



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

AIMEÉ JORDÂNIA DE AQUINO ROCHA

**USO DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA COMO FERRAMENTA DE
AUXÍLIO NO INVENTÁRIO DE PLANTAÇÕES FLORESTAIS**

Bom Jesus – PI

2025

AIMEÉ JORDÂNIA DE AQUINO ROCHA

**USO DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA COMO FERRAMENTA DE
AUXÍLIO NO INVENTÁRIO DE PLANTAÇÕES FLORESTAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Produção Vegetal, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Ferraz Filho

Coorientadora: Profa. Dra. Andressa Ribeiro

Bom Jesus – PI

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial do Campus Professora Cinobelina Elvas
Serviço de Processamento Técnico

R672u Rocha, Aimeé Jordânia de Aquino.
 Uso de aeronave remotamente pilotada como ferramenta de
 auxílio no inventário de plantações florestais / Aimeé Jordânia de
 Aquino Rocha. -- 2025.
 57 f.

 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí,
 Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus-PI,
 2025.
 “Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Ferraz Filho”.
 “Coorientadora: Profa. Dra. Andressa Ribeiro”.

 1. Terras florestais. 2. Inventário florestal. 3. Sensoriamento
 remoto. I. Ferraz Filho, Antônio Carlos. II. Ribeiro, Andressa. III.
 Título.

CDD 333.75

Bibliotecária: Nayra Fontinele Feijão – CRB3/1249

AIMEÉ JORDÂNIA DE AQUINO ROCHA

**USO DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA COMO FERRAMENTA DE
AUXÍLIO NO INVENTÁRIO DE PLANTAÇÕES FLORESTAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, do Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Área de concentração: Produção vegetal.

Linha de Pesquisa: Propagação e manejo cultural de plantas.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Ferraz Filho.

Coorientadora: Profa. Dra. Andressa Ribeiro.

Aprovada em: 14 de março de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Carlos Ferraz Filho (UFPI)
Orientador

Profa. Dra. Andressa Ribeiro (UFPI)
Coorientadora

Prof. Dra. Giselle Lemos Moreira (UFPI)
Examinadora Externa ao Programa

Profa. Dra. Rafaella Carvalho Mayrinck (UNB)
Examinadora Externa ao Programa

A Ana Lúcia e Antônio meus pais, a Aimbeé e Naibeé meus irmãos e a Teresa Raquel minha companheira.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida.

À minha família, por todo apoio incondicional.

À minha companheira Teresa Raquel, por toda paciência e companheirismo nessa jornada.

Ao professor Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho, pela orientação, ensinamentos, paciência e disposição em sempre ajudar.

À professora Dra. Andressa Ribeiro, pela coorientação, disponibilidade e contribuição durante todo o desenvolvimento do projeto.

À Universidade Federal do Piauí, especialmente ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias - PPGCA/UFPI, pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

A fazenda Vista Verde pela disponibilização da área de estudo.

A empresa Agroforest pela parceria e disponibilidade dos equipamentos, em nome do Dr. Clebson Cerqueira.

Ao Grupo de Estudos em Manejo Florestal (UFPI) pelo auxílio na coleta de dados em campo.

Ao professor Dr. Doze Batista pela disponibilidade as idas em campo e por todo o conhecimento compartilhado.

Aos meus amigos que contribuíram de forma direta ou indireta para meu crescimento profissional.

RESUMO

O uso de aeronave remotamente pilotada (ARP) como ferramenta de auxílio na prática do inventário florestal já é uma realidade em muitos locais. O presente estudo visa comparar dados obtidos no voo com os obtidos na atividade tradicional de inventário florestal (altura, diâmetro a 1,30 m do solo e número de árvores), afim de estimar volume por hectare. O trabalho foi conduzido de forma integrada, empregando técnicas de sensoriamento remoto com uso de ARP e métodos alternativos e adicionais a fim de estimar variáveis dendrométricas por meio de regressões e simulação do Princípio de Bitterlich, usando os dados da amostragem tradicional como verdade de campo. A atividade de campo foi realizada em 12 parcelas circulares de 400 m², com a coleta de dados de circunferência à altura do peito (CAP) e altura total das árvores. Paralelamente, um aerolevantamento foi conduzido utilizando um drone equipado com câmera RGB, gerando um ortomosaico e modelos digitais de elevação (MDE), terreno (MDT) e altura (MDA). Tais produtos cartográficos foram processados para estimar a altura e o número de árvores no plantio. Para estimativa do diâmetro a partir dos dados obtidos no aerolevantamento, modelos matemáticos em função da altura foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados ordinários e pela modelagem mista, selecionando a melhor alternativa em função do erro padrão residual. Também foram empregadas equações disponíveis na literatura para estimativa do diâmetro a partir da altura obtida. A partir das estimativas de diâmetro, a área basal e o volume foram estimados para cada metodologia avaliada (inventário tradicional, contagem visual e automatizada). Os resultados mostraram que a contagem visual de árvores no ortomosaico foi eficiente, com valores próximos aos obtidos no inventário tradicional. No entanto, a contagem automatizada utilizando o plugin *Tree Density Calculator* subestimou o número de árvores, acertando apenas 52% do total. A altura média estimada pelo aerolevantamento foi próxima à obtida em campo, com diferença de 0,8 m (contagem visual) e 0,6 m (automatizada). Para a estimativa do diâmetro, a modelagem mista empregando a regressão linear simples com a parcela como variável aleatória apresentou o menor erro residual (4,1%). A área basal e o volume estimados com base na altura média e contagem visual das árvores foram os que mais se aproximaram dos valores de campo. Já os métodos que utilizaram equações da literatura para estimar o diâmetro e o volume subestimaram os valores. Conclui-se que o uso de ARP pode ser uma ferramenta eficiente para otimizar a coleta de dados em inventários florestais, especialmente para a obtenção de altura, diâmetro e número de árvores. No entanto, a contagem automatizada de árvores ainda precisa ser aprimorada, e a utilização de modelos matemáticos específicos para cada contexto é essencial para garantir a precisão das estimativas. Futuros estudos devem explorar o uso de sensores mais avançados, como LiDAR, e a aplicação dessas técnicas em diferentes espécies e regiões, visando consolidar o uso de geotecnologias como ferramenta padrão no setor florestal.

Palavras-chave: Otimização florestal, modelo digital de altura, modelagem estatística.

ABSTRACT

The use of Remotely Piloted Aircraft (RPA) as a tool to assist in forest inventory practices is already a reality in many locations. This study aims to compare data obtained from aerial flights with those obtained from traditional forest inventory activities (height, diameter at 1.30 m above ground, and tree count), in order to estimate volume per hectare. The work was conducted in an integrated manner, employing remote sensing techniques using RPA and alternative and additional methods to estimate dendrometric variables through regressions and simulations of Bitterlich's Principle, using traditional sampling data as ground truth. Field activities were carried out in 12 circular plots of 400 m², collecting data on circumference at breast height (CBH) and total tree height. Simultaneously, an aerial survey was conducted using a drone equipped with an RGB camera, generating an orthomosaic and digital elevation models (DEM), terrain (DTM), and height (CHM). These cartographic products were processed to estimate tree height and count in the plantation. To estimate diameter from the aerial survey data, mathematical models based on height were adjusted using ordinary least squares and mixed modeling, selecting the best alternative based on residual standard error. Equations available in the literature were also used to estimate diameter from the obtained height. From the diameter estimates, basal area and volume were estimated for each methodology evaluated (traditional inventory, visual counting, and automated counting). The results showed that visual tree counting in the orthomosaic was efficient, with values close to those obtained in the traditional inventory. However, automated counting using the Tree Density Calculator plugin underestimated the number of trees, accurately identifying only 52% of the total. The average height estimated from the aerial survey was close to that obtained in the field, with a difference of 0.8 m (visual counting) and 0.6 m (automated counting). For diameter estimation, mixed modeling using simple linear regression with the plot as a random variable showed the lowest residual error (4.1%). Basal area and volume estimates based on average height and visual tree counting were the closest to field values. In contrast, methods using literature equations to estimate diameter and volume underestimated the values. It is concluded that the use of RPA can be an efficient tool to optimize data collection in forest inventories, especially for obtaining height, diameter, and tree count. However, automated tree counting still requires improvement, and the use of specific mathematical models for each context is essential to ensure the accuracy of estimates. Future studies should explore the use of more advanced sensors, such as LiDAR, and the application of these techniques in different species and regions, aiming to consolidate the use of geotechnologies as a standard tool in the forestry sector.

Keywords: Forest optimization, digital height model, statistical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plantação florestal de <i>Eucalyptus</i> sp. estudada, localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.....	32
Figura 2 - Fluxo das etapas executadas no estudo para comparativo entre as metodologias avaliadas para estimativa volumétrica em plantação de <i>Eucalyptus</i> sp. em Palmeira do Piauí, PI.....	34
Figura 3 - Árvores identificadas via contagem visual e automática com plugin, da plantação florestal de <i>Eucalyptus</i> sp. estudada, localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.....	40
Figura 4 - Modelos digitais de elevação (DEM), do terreno (DTM) e de altura (DHM) para plantação de <i>Eucalyptus</i> sp. localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.....	41
Figura 5 - Ajuste das regressões lineares via método dos mínimos quadrados ordinários, e modelagem com efeito aleatório considerando parcela, originado dos dados obtidos na amostragem tradicional.....	42
Figura 6 - Médias de diâmetro e área basal estimadas por diferentes metodologias para uma plantação florestal de <i>Eucalyptus</i> sp. estudada, localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Metodologias avaliadas para estimativa do volume em plantação de <i>Eucalyptus</i> sp. localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.....	36
Tabela 2 - Valores dendrométricos obtidos na amostragem tradicional realizada na plantação de <i>Eucalyptus</i> sp. localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.....	38
Tabela 3 - Valores dendrométricos obtidos na contagem visual realizada na plantação de <i>Eucalyptus</i> sp. localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.....	39
Tabela 4 - Valores dendrométricos obtidos na contagem automatizada via plugin realizada na plantação de <i>Eucalyptus</i> sp. localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.....	39
Tabela 5 - Parâmetros para o ajuste dos modelos analisados para plantio de <i>Eucalyptus</i> sp., localizado no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.....	42
Tabela 6 - Número de árvores conforme metodologia avaliada para plantio de <i>Eucalyptus</i> sp., localizado no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.....	43
Tabela 7 - Medidas de precisão para estimativa do volume de madeira para as diferentes metodologias avaliadas em uma plantação de <i>Eucalyptus</i> sp. localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS

ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
CAP	Circunferência à Altura do Peito
RGB	Red – Green - Blue (faixa do visível)
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
GPS	Global Positioning System
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
MDA	Modelo Digital de Altura
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
SWIR	Short Wave Infrared
NIR	Infravermelho Próximo
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
EVI	Enhanced Vegetation Index
LiDAR	Light Detection and Ranging
AIC	Critério de Informação de Akaike
BIC	Critério de Informação Bayesiano

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
ha	Hectare
cm	Centímetro
%	Por cento
D	Diâmetro
H	Altura
n	Número de Árvores
g	Área Seccional
G	Área Basal
v	Volume
ff	Fator de Forma
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
ha	Hectare
cm	Centímetro
%	Por cento
D	Diâmetro
H	Altura
n	Número de Árvores
g	Área Seccional
G	Área Basal
v	Volume
ff	Fator de Forma

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	13
2	ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL.....	15
3	CAPÍTULO 1: REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	17
3.1	Geoprocessamento e sensoriamento remoto.....	17
3.1.1	Plugins.....	18
3.2	Aeronaves remotamente pilotadas (ARP).....	19
3.3	Inventário florestal.....	20
3.4	<i>Eucalyptus</i> sp 	22
	REFERÊNCIAS.....	23
4	CAPÍTULO 2: USO DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO NO INVENTÁRIO DE PLANTAÇÕES FLORESTAIS.....	29
	RESUMO.....	29
4.1	Introdução.....	30
4.2	Material e Métodos.....	31
4.2.1	Área de estudo.....	31
4.2.2	Amostragem tradicional.....	32
4.2.3	Amostragem empregando aerolevantamento.....	33
4.2.4	Processamento das imagens.....	33
4.2.5	Determinação das variáveis dendrométricas.....	35
4.2.6	Análises estatísticas.....	37
4.3	Resultados.....	37
4.3.1	Determinação das variáveis dendrométricas via amostragem tradicional.....	37
4.3.2	Determinação das variáveis dendrométricas via aerolevantamento.....	40
4.3.3	Estimativa de diâmetro, área basal e volume das árvores a partir dos dados de altura obtidos por diferentes metodologias.....	41
4.4	Discussão.....	46
4.5	Conclusão.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	57

1 INTRODUÇÃO GERAL

O inventário florestal consiste na coleta sistemática de dados quantitativos e qualitativos sobre a estrutura, composição e dinâmica das florestas (Lutz *et al.*, 2018). Essas informações são essenciais para o planejamento de atividades de manejo, a conservação da biodiversidade e a tomada de decisões baseadas em evidências científicas (Angelo *et al.*, 2023). Além disso, o inventário florestal é fundamental para atender a demandas legais e regulatórias, como o licenciamento ambiental e a certificação florestal.

O inventário tradicional ocorre por meio de técnicas que percorrem as áreas florestais coletando informações de cada árvore individualmente, como espécie, diâmetro, altura, entre outras informações (García; Olvera; Cervantes, 2023). Esse processo é demorado e exige mão de obra especializada, além de ser inacessível para regiões com difícil acesso ou risco de acidentes. Diante disso, ressalta-se a importância de novas ferramentas como as geotecnologias como meio de otimizar o trabalho de campo.

Assim, o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) em inventários florestais tem inovado a forma como os dados florestais são coletados, processados e analisados. Essas tecnologias destacam-se por oferecer uma combinação única de eficiência, precisão e custo-benefício, possibilitando a coleta de informações detalhadas em grandes áreas, inclusive em regiões de difícil acesso. Apesar dos avanços tecnológicos associados à utilização de ARP e de suas principais aplicações em inventários florestais, ainda existem desafios que precisam ser superados para que essas ferramentas se consolidem como padrão no setor florestal (Park *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2016).

O setor florestal desempenha papel fundamental na economia global, 54% do setor no Brasil fornece recursos como madeira serrada, celulose, papel, painéis, pisos laminados, carvão e biomassa, além de contribuir para a conservação da biodiversidade e a regulação do clima. No entanto, o setor enfrenta desafios significativos, como a necessidade de manejo sustentável, desmatamento, ambientais e sociais (IBÁ, 2024). Paralelamente, as ARPs têm se destacado como uma ferramenta inovadora para enfrentar esses desafios. Porém, apesar do potencial, a adoção de ARP no setor também enfrenta diversos desafios como técnicos (limitação de autonomia de voo e processamento de dados), operacionais (condições climáticas e acesso a áreas remotas) e financeiros (custos iniciais e manutenção e atualizações) (Gonçalves; Henriques, 2015).

Diante da necessidade de se empregar geotecnologias como ferramenta de auxílio em inventários florestais, o presente trabalho objetiva empregar técnicas de geoprocessamento com utilização de uma aeronave remotamente pilotada para obter variáveis dendrométricas acuradas para fins de inventário florestal em um plantio de Eucalipto.

2 ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido em quatro etapas, sendo a primeira para a coleta dos dados de inventário florestal tradicional, que serviu como verdade de campo para comparar com as demais metodologias testadas. Tal etapa foi realizada no mês de fevereiro de 2024, em que foram demarcadas em campo 12 parcelas circulares com área fixa de 400 m² distribuídas sistematicamente na área. Foram coletados dados dendrométricos das árvores das parcelas, com a medição da circunferência à altura do peito (CAP) utilizando fita métrica graduada em centímetros, posteriormente convertidos em diâmetro (D), e da altura total (H) utilizando o hipsômetro Vertex IV. O erro padrão da média foi calculado com o desvio padrão dividido pela raiz quadrada do número de amostras, multiplicado por 100, indicando a variabilidade das estimativas em torno da média. O erro do inventário, expresso em porcentagem, foi obtido pela razão entre o erro padrão da média e a média amostral, multiplicado por 100, refletindo a precisão das estimativas em relação ao valor real da população.

Na segunda etapa foi realizada a coleta dos dados remotamente com o uso de uma ARP. O voo foi realizado no mês junho de 2024, utilizado um drone do modelo DJI Mavic 2, equipado com uma câmera Hasselblad RGB. O voo teve uma sobreposição de 85% e um ângulo de câmera de 90 graus, com uma altitude de 120 m. Os pontos de controle foram distribuídos em nove alvos na área mapeada e suas coordenadas coletadas com um par de receptores GNSS - Sistema Global de Navegação por Satélite (GPS + GLONASS).

Na terceira etapa o processamento dos dados e das imagens coletas foi realizado no software Agisoft PhotoScan Professional, versão trial, seguindo a sequência: alinhamento das imagens, geração e classificação da nuvem de pontos, textura, ortomosaico e geração do Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE e ortomosaico foram exportados e no software QGIS 3.10 Coruña® foi gerado o Modelo Digital do Terreno (MDT) utilizando a ferramenta *v.surf.srt* do GRASS, através dos pontos cotados. O Modelo Digital de Altura (MDA) foi então obtido pela diferença entre os modelos MDE e MDT, empregando a ferramenta *raster calculator* do referido software. Foi utilizado o plugin *Tree Density Calculator* versão 1.5.7 do software QGIS, para contagem automatizada do número de árvores.

Já na quarta etapa foi realizada a estimativa das variáveis estudadas com a utilização dos dados obtidos pelo método tradicional (campo) e métodos alternativos (aerolevantamento com a obtenção do MDA e ortomosaico). Por meio desses dados obteve-se as variáveis de

número de árvores, altura, diâmetro, área seccional, área basal e volume de madeira presente na área.

3 CAPÍTULO 1

REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 Geoprocessamento e sensoriamento remoto

Geoprocessamento e sensoriamento remoto são duas áreas inter-relacionadas que desempenham um papel fundamental no campo da ciência geoespacial onde o geoprocessamento refere-se ao conjunto de técnicas e tecnologias utilizadas para coletar, armazenar, processar, analisar e visualizar dados geográficos (Bolfe; Pereira; Madruga, 2004). Por outro lado, o sensoriamento remoto é uma técnica que envolve a coleta de informações sobre a superfície terrestre a partir de sensores que estão localizados em plataformas remotas, como satélites ou drones (Rosa; Brito, 2013).

O geoprocessamento é o conjunto de técnicas e ferramentas que combina princípios da cartografia, ciência da computação, estatística e outras disciplinas relacionadas para lidar com informações geográficas, onde seu objetivo principal é capturar, gerenciar e analisar dados espaciais, permitindo a tomada de decisões mais controladas e a criação de soluções para problemas relacionados ao espaço geográfico, o mesmo utiliza sistemas de informação geográfica (SIG) como ferramentas para armazenar e manipular dados geográficos, esses dados podem incluir informações sobre características físicas como relevo, hidrografia, vegetação (Sousa; Giongo, 2022).

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que permite a aquisição de informações sobre a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com o objeto estudado, utilizando sensores instalados em plataformas como satélites, aviões ou drones para capturar imagens e dados de diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético (Shiratsuchi *et al.*, 2014). Essas informações são processadas e transformadas em imagens digitais que podem ser remanescentes e interpretadas para entender características e fenômenos presentes na superfície terrestre (Xianmin; Jing; Hongyang, 2021).

Os sensores remotos capturam dados em diferentes faixas do espectro eletromagnético, incluindo o visível, infravermelho e vermelho próximo, onde cada faixa do espectro fornece informações sobre diferentes propriedades e características do terreno, como cobertura vegetal,

uso do solo, temperatura da superfície e muito mais. Essa combinação de diferentes bandas espectrais permite a identificação de padrões e a escolha de informações úteis para diversos campos, como monitoramento ambiental, agrícola, gestão de recursos naturais, planejamento urbano e resposta a desastres (Silva; Crispim; Silva, 2021).

3.1.1 Plugins

No campo do sensoriamento remoto a utilização de plugins para a identificação automática ou semiautomática de árvores tem se mostrado uma abordagem inovadora, essas ferramentas permitem a extração de informações detalhadas sobre a cobertura vegetal a partir de dados de sensoriamento remoto, coletados a partir de satélite ou aeronaves remotamente pilotadas, a automação desse processo reduz significativamente o tempo para identificação manual de árvores.

O Orfeo Toolbox é um plugin que oferece algoritmos avançados de processamento de imagens, incluindo técnicas de segmentação e classificação, que podem ser aplicadas para detectar e mapear árvores individualmente (Orfeo Toolbox, 2024).

A extensão SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) é uma ferramenta de código aberto, utilizada para análises geoespaciais, incluindo a detecção de árvores. Integrado ao QGIS, o SAGA oferece módulos especializados, como o Canopy Height Model (CHM) e técnicas de segmentação de imagens, que permitem processar dados LiDAR e imagens de alta resolução para identificar e mapear árvores individuais. Com ferramentas avançadas e versáteis, o SAGA destaca-se como uma solução robusta para pesquisadores e profissionais da área de sensoriamento remoto e gestão florestal (Nascimento *et al.*, 2025).

O plugin TreeDetect, por sua vez, concentra-se na detecção individual de árvores, empregando técnicas avançadas de processamento de imagens para identificar e mapear árvores de maneira automática ou semiautomática. Essa ferramenta é compatível com diversos tipos de dados, incluindo imagens de alta resolução e dados LiDAR, o que possibilita a geração de mapas detalhados da distribuição espacial das árvores (Stolle *et al.*, 2021).

O plugin TreeDensity é uma ferramenta especializada no QGIS voltada para a análise e estimativa da densidade de árvores, utilizando técnicas avançadas de processamento de imagens. Sua principal funcionalidade é identificar e quantificar a cobertura de copas a partir de dados de sensoriamento remoto, com modelos digitais de altura (MDH), onde permite a

diferenciação das copas das árvores em relação ao solo e a outros elementos da paisagem. Por meio de algoritmos de segmentação e classificação, o TreeDensity isola as copas das árvores e calcula sua densidade espacial, gerando mapas do tipo shapefile (Crabbé *et al.*, 2020).

3.2 Aeronaves remotamente pilotadas (ARP)

Os veículos aéreos remotamente pilotados são conhecidos popularmente por “drones” ou por veículos aéreos não tripulados (VANTs), são aeronaves controladas remotamente ou pode operar de forma autônoma por meio de sistemas de navegação e sensores, adaptados para voar na atmosfera, sobre o solo, operado por um piloto que fica na superfície terrestre com auxílio de um controle remoto (Jorge; Inamasu, 2014).

A composição de uma ARP pode variar dependendo do modelo e da finalidade para a qual foi projetado. No entanto, a maioria dos drones possui componentes comuns como a estrutura, motores e hélices, controlador de voo, sistema de navegação (GPS – global positioning system), sensores, bateria, câmera e equipamentos adicionais e sistema de controle, também é importante lembrar que as especificações e os recursos podem variar de um modelo para outro, dependendo da certificação e do nível de capacidade do drone em questão (Alencar *et al.*, 2020).

Os sensores acoplados nas RPAs dependendo da finalidade tem aplicações distintas, por exemplo as câmeras RGB que é a faixa do visível e pode auxiliar na detecção de falhas em plantios, formação da planta, modelo de elevação do terreno, entre outras, as câmeras termais que é a faixa do short wave infrared – SWIR, detecta estresse hídrico e irrigação, as câmeras multiespectrais que corresponde à faixa do infravermelho próximo – NIR, detecta estresse nutricional, determinação de índices indicadores fisiológicos, estrutura da copa e índices de vegetação como NDVI, EVI e outros e os sensores ativos que detecta refletância, NDVI e outros (Prudkin, 2019).

Através do mapeamento com ARP pode-se gerar uma diversidade de produtos cartográficos precisos, dentre elas estão a nuvem de pontos, ortomosaicos, modelos digitais de elevação (modelo digital de superfície e modelo digital do terreno), curvas de níveis e mapas de uso do solo, esses produtos são de alta resolução e dados acurados que permite a criação de mapas e modelos detalhados, que são essenciais para diversas aplicações em diferentes setores (Soares *et al.*, 2023).

Na área florestal e conservação ambiental o uso de ARP tem como aplicabilidade a detecção e monitoramento de incêndios florestais, mapeamento e monitoramento de biodiversidade, identificação de doenças e pragas, monitoramento de desmatamento e atividades ilegais, análise de solo, contagem de plantas, identificação de falhas no plantio e monitoramento de floresta (Martins Neto; Breunig, 2019). No inventário sua aplicabilidade é na estimativa de dados dendrométrico, como altura de árvore (através da diferença entre os modelos digitais de elevação (DEM) e modelos digitais de terreno (MDT)), diâmetro à altura do peito (D) (pode ser estimado indiretamente através de correlações com a altura das árvores), número de árvores (ortomosaicos) e volume de madeira e biomassa (utilizando equações alométricas e dados de altura e diâmetro).

Estudos voltados para o uso de ARP no setor florestal que se destaca é a China liderando nas pesquisas, seguido pelos Estados Unidos, Japão e Brasil (Silva *et al.*, 2024). No Brasil, diversas pesquisas já foram desenvolvidas tanto em florestas nativas (Araujo *et al.*, 2020; d'Oliveira *et al.*, 2020; Almeida *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2021) quanto em florestas plantadas e voltados a estimativa de variáveis dendrométricas (Oliveira *et al.*, 2014; Dalla Corte *et al.*, 2020; Dalla Corte *et al.*, 2022).

3.3 Inventário florestal

O inventário florestal é um processo sistemático de coleta, análise e interpretação de dados sobre as características e condições de uma determinada área florestal, seu principal objetivo é fornecer informações sobre a composição, estrutura e função da floresta, incluindo a quantidade e qualidade de recursos madeireiros e não madeireiros (Silva; Gonçalves; Leite, 2005). O mesmo é realizado por profissionais especializados, como engenheiros florestais, que coletam dados sobre a vegetação, incluindo a identificação das espécies de árvores, a medição de suas dimensões (diâmetro, altura, volume, biomassa), estimativa da densidade e distribuição dessas árvores (Ubialli *et al.*, 2014). Esses dados são frequentemente usados para auxiliar no planejamento e manejo sustentável das florestas, incluindo elaboração de políticas de conservação, avaliação dos estoques de madeira, previsão do crescimento das árvores e identificação de áreas prioritárias para a preservação da biodiversidade (Angelo *et al.*, 2023).

Uma área importante no inventário é a dendrometria que é o ramo da ciência florestal que está relacionado à medição e análise das características das árvores é uma área fundamental

no campo da silvicultura e no manejo de recursos florestais (Figueiredo Filho *et al.*, 2010). Sua finalidade é obter dados precisos sobre o crescimento, volume, forma e qualidade das árvores, essas informações são essenciais para avaliar o estoque de madeira, planejar colheitas florestais, monitorar o crescimento das árvores ao longo do tempo e tomar decisões sobre o manejo e inventário florestal (Silva *et al.*, 2023).

As técnicas utilizadas na dendrometria incluem o uso de instrumentos de medição, como trenas, calibradores e dendrômetros, além de fórmulas para calcular volumes e outros parâmetros das árvores, com o avanço da tecnologia, também é possível utilizar técnicas de sensoriamento remoto, como imagens de satélite e dados de sensor Light Detection and Ranging (LiDAR), para obter informações mais próximas do real sobre as florestas e suas árvores, também vale ressaltar a importância da hipsometria, uma técnica utilizada na dendrometria afim de fornecer informações sobre distribuição das alturas das árvores (Jorge; Eufrade Junior, 2023).

Os modelos de regressão apresentam-se como uma abordagem eficiente para a estimativa de variáveis dendrométricas, fundamentando-se em variáveis preditoras de mensuração mais acessível, tais como o diâmetro à altura do peito (D) e a altura das árvores. Sua finalidade está intrinsecamente relacionada à necessidade de otimização de processos, redução de custos e incremento na precisão das estimativas, viabilizando a extrapolação de dados para extensas áreas ou locais de acesso restrito, onde a realização de medições diretas torna-se inviável (Martins *et al.*, 2019). No âmbito da hipsometria e da volumetria, tais modelos são empregados para estabelecer relações entre o D e a altura das árvores, permitindo a estimativa indireta da altura e a predição do volume de madeira em grandes extensões florestais (Melo *et al.*, 2017).

A relação hipsométrica é definida segundo Binoti, Binoti e Leite (2013), como uma regressão da altura sobre o diâmetro em um povoamento numa determinada data. Para Ribeiro *et al.* (2010) essa relação é comumente representada pela relação altura (h) e diâmetro (d) de uma árvore. A hipsometria é útil para estimar a altura das árvores quando apenas o diâmetro do tronco é conhecido, ou para estimar o diâmetro com base na altura, essas estimativas são de suma importância em situações em que a medição direta de uma das variáveis não é possível, como em inventários florestais em grandes áreas (Machado *et al.*, 2008). Além da hipsometria, o inventário florestal envolve uma série de outros processos essenciais para a coleta e análise de dados sobre a floresta. Esses processos são interligados e complementares, garantindo que as informações obtidas sejam precisas e úteis.

A estimativa de volume, por exemplo, é calculado com base em variáveis dendrométricas, como o diâmetro à altura do peito (D) e a altura das árvores, utilizando equações alométricas específicas para cada espécie ou grupo de espécies. Essas equações relacionam as dimensões das árvores com seu volume, permitindo estimar a quantidade de madeira disponível por hectare (Allouis *et al.*, 2013).

Após a coleta dos dados em campo, eles são organizados e submetidos a uma análise estatística para extrair informações relevantes. Essa etapa envolve o cálculo de parâmetros como densidade de árvores (número de árvores por hectare), área basal (área ocupada pelas seções transversais dos troncos), volume por hectare, diversidade de espécies e entre outros (Fritz; Kattenborn; Koch, 2013; Lopatin; Lopatina, 2017). A análise estatística também inclui a estimativa de erros e intervalos de confiança, que indicam a precisão das extrapolações feitas a partir das parcelas amostrais para toda a área de estudo (Cao; Wang, 2011).

3.4 *Eucalyptus* sp.

Segundo IBÁ (2024) em 2023, as florestas plantadas no Brasil totalizaram 10,2 milhões de hectares, aumento de 3% em relação a 2022, desse total, a maior parte (76%) é representada pelo eucalipto, com cerca de 7,8 milhões de hectares, e 19% de pinus, com 1,9 milhão de hectares. Os plantios de eucalipto estão distribuídos em todo o território brasileiro, com predominância na região Sudeste, que concentra 44% da área cultivada. Em seguida, destacam-se as regiões Centro-Oeste (20%), Sul (18%), Nordeste (13%) e Norte (5%). No Nordeste, que responde por 13% da área total de plantação de eucalipto, o Piauí, em 2023, registrou 32.062 hectares cultivados, posicionando-se atrás apenas da Bahia e do Maranhão em termos de extensão plantada.

O gênero *Eucalyptus*, pertencente à família Myrtaceae, popularmente conhecido como eucalipto, é um dos grupos de árvores mais amplamente cultivados e estudados no mundo, devido à sua importância econômica, ecológica e ambiental (Pereira *et al.*, 2000). Originário da Austrália, o *Eucalyptus* inclui mais de 700 espécies, que variam desde pequenos arbustos até árvores de grande porte, capazes de atingir alturas impressionantes, sua adaptabilidade a diferentes condições climáticas e solos, aliada ao rápido crescimento e às múltiplas aplicações de sua madeira, óleos essenciais e outros produtos, fazem do *Eucalyptus* uma escolha

preferencial para reflorestamentos, silvicultura e projetos de restauração ambiental (Vechi; Magalhães Júnior, 2018).

Essa espécie é fundamental para a indústria de celulose e papel, fornecendo matéria-prima de alta qualidade para a produção de fibra curta, além de ser utilizado na fabricação de painéis de madeira, móveis e carvão vegetal (Longue; Colodette, 2013). O eucalipto também é uma fonte relevante de biomassa para geração de energia renovável, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis (Silva; Rocha, 2010). Além disso, a extração de óleos essenciais de suas folhas movimenta setores como o farmacêutico, cosmético e de produtos de limpeza (Borges *et al.*, 2023). No contexto brasileiro, o cultivo de eucalipto gera empregos diretos e indiretos, impulsiona a economia regional e contribui significativamente para as exportações, consolidando-se como um dos pilares do setor florestal (IBÁ, 2024).

Além de seu valor econômico, as espécies de *Eucalyptus* desempenham um papel significativo em ecossistemas, fornecendo habitat para a fauna, contribuindo para a ciclagem de nutrientes e atuando como sumidouros de carbono (Cândido *et al.*, 2014). No entanto, seu cultivo também gera debates, especialmente em relação aos impactos ambientais, como o consumo de água e a competição com espécies nativas (Silva, Santos; Corrêa, 2013). Neste contexto, o estudo das espécies de *Eucalyptus* é essencial para equilibrar seus benefícios e desafios, garantindo seu uso sustentável e responsável.

No Piauí, estudo sobre as propriedades físicas e químicas da madeira juvenil de *Eucalyptus urograndis* desenvolvido por Medeiros *et al.*, (2016) mostra que a madeira não é indicada para construção civil por apresentar baixa densidade básica, mas tem potencial para o setor energético. Sendo um ponto positivo para a região que possui polo agrícola, mostrando ser uma alternativa estratégica para empresas que necessitam de lenha e biomassa para secagem de grãos.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, A. E. B.; ATTADEMO, F. L. N.; NORMANDE I. C.; LUNA F. O. **Uso de aeronaves não tripuladas (DRONES) para pesquisa e monitoramento de peixe-boi-marinho e seu habitat**. Brasília: ICMBio. 2020. 45 p.

ALLOUIS, T.; DURRIEU, S.; VEGA, C.; COUTERON, P. Stem Volume and Above-Ground Biomass Estimation of Individual Pine Trees From LiDAR Data: Contribution of Full-

Waveform Signals. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 6, p. 924-934, 2013.

ALMEIDA, A.; GONÇALVES, F.; SILVA, G.; SOUZA, R.; TREUHART, R.; SANTOS, W.; LOUREIRO, D.; FERNANDES, M. Estimating Structure and Biomass of a Secondary Atlantic Forest in Brazil Using Fourier Transforms of Vertical Profiles Derived from UAV Photogrammetry Point Clouds. **Remote Sens.** v. 12, p. 3560, 2020.

ANGELO, D. H.; ARRUDA, A. A.; SCHNEIDER, C. R.; GIRARDI, É.; SANTOS, A. F.; ARCE, J. E. Processos de inventário florestal para avaliação da arborização urbana da região central de Imperatriz – MA: Forestry inventory processes for evaluation of urban arborization in the central region of Imperatriz–MA. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 6, n. 1, p. 547-559, 2023.

ARAUJO, R. F.; CHAMBERS, J. Q.; CELES, C. H. S.; MULLER-LANDAU, H. C.; SANTOS, A. P. F.; EMMERT, F.; RIBEIRO, G. H. P. M.; GIMENEZ, B. O.; LIMA, A. J. N.; ... Higuchi, N. Integrating High Resolution Drone Imagery and Forest Inventory to Distinguish Canopy and Understory Trees and Quantify Their Contributions to Forest Structure and Dynamics. **PLoS ONE**, v. 15, e0243079, 2020.

BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 37, p. 639-645, 2013.

BOLFE, E. L.; PEREIRA, R. S.; MADRUGA, P. R. A. Geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicados à análise de recursos florestais. **Ciência Rural**, v. 34, n. 1, p. 105-111, 2004.

BORGES, A. G. S.; SILVA, F. T.; PAIVA, K. V. D.; GAMINO, M. J. F.; SANTOS, T. L. P.; RODRIGUES, V.; BARROS, V. F.; CASATTI, V. C. M. F. **Óleo essencial de eucalipto no tratamento de problemas respiratórios**. Trabalho de Conclusão de Curso 2023. 17 f. (Curso Técnico em Farmácia) – Escola Técnica de Araçatuba, Araçatuba, 2023.

CÂNDIDO, B. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BATISTA, P. V. G. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na bacia do rio Paraná, no leste do Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1565-1575, 2014.

CAO, Q. V.; WANG, W. Calibrating fixed-and mixed-effects taper equations. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 4, p. 671-673, 2011.

COSTA, M. B. T.; SILVA, C. A.; BROADBENT, E. N.; LEITE, R. V.; MOHAN, M.; LIESENBERG, V.; STODDART, J.; AMARAL, C. H.; ALMEIDA, D. R. A.; ... KLAUBERG, C. Beyond Trees: Mapping Total Aboveground Biomass Density in the Brazilian Savanna Using High-Density UAV-Lidar Data. **Forest Ecology and Management**, v. 491, p. 119155. 2021.

CRABBÉ, A. H.; CAHY, T.; SOMERS, B.; VERBEKE, L. P.; VAN COILLIE, F. **Tree Density Calculator Software**. Versão 1.5.7. Ghent: Laboratory of Forest Management and Spatial Information Techniques, 2020. Disponível em: <https://treedensitycalculator.readthedocs.io>. Acesso em: 17 mar. 2025.

D'OLIVEIRA, M. V. N.; BROADBENT, E. N.; OLIVEIRA, L. C.; ALMEIDA, D. R. A.; PAPA, D. A.; FERREIRA, M. E.; ZAMBRANO, A. M. A.; SILVA, C. A.; AVINO, F. S.; ... COSTA, M. A. Aboveground Biomass Estimation in Amazonian Tropical Forests: A Comparison of Aircraft-and Gatoreye UAV-Borne LIDAR Data in the Chico Mendes Extractive Reserve in Acre, Brazil. **Remote Sens.** v. 12, p. 1754, 2020.

DALLA CORTE, A. P.; CUNHA NETO, E. M.; REX, F. E.; SOUZA, D.; BEHLING, A.; MOHAN, M.; SANQUETTA, M. N. I.; SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; ... SANQUETTA, C. R. High-Density UAV-LiDAR in an Integrated Crop-Livestock-Forest System: Sampling Forest Inventory or Forest Inventory Based on Individual Tree Detection (ITD). **Drones**, v. 6, p. 48, 2022.

DALLA CORTE, A. P.; SOUZA, D. V.; REX, F. E.; SANQUETTA, C. R.; MOHAN, M.; SILVA, C. A.; ZAMBRANO, A. A.; PRATA, G.; ALMEIDA, D. R. A.; BROADBENT, E. N.; Forest inventory with high-density UAV-LiDAR: Machine learning approaches for predicting individual tree attributes. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, p. 105815, 2020.

FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A. N.; STEPKA, T. F.; SAWCZUK, A. R. Crescimento, mortalidade, ingresso e distribuição diamétrica em Floresta Ombrófila Mista. **Floresta**, v. 40, n. 4, p. 763-776, 2010.

FRITZ, A.; KATTENBORN, T.; KOCH, B. UAV-based photogrammetric point clouds-tree stem mapping in open stands in comparison to terrestrial laser scanner point clouds. International Archives of the Photogrammetry. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 40, n. 141-146, 2013.

GARCÍA, R. E.; OLVERA, P. A.; CERVANTES, L. R. Inventário de Melolonthidae nocturnos (Insecta: Coleoptera), en bosque de pino-encino, Tapalpa, Jalisco, México. **Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad**, v. 6, e298, 2023.

GONÇALVES, J. A.; HENRIQUES, R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 104, p. 101-111, 2015.

IBÁ. **Indústria Brasileira de Árvore**. 2024. Disponível em: <https://www.iba.org/>. Acesso em: 13 fev. 2025.

JORGE, L. A. B.; EUFRATE JUNIOR, H. J. **Dendrometria e inventário florestal com aplicações em R**. Botucatu: Cubo. 2023. 179 p.

JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Embrapa, Brasília. 2014. p. 109-134.

LONGUE, D. J.; COLODETTE, J. L. Importância e versatilidade da madeira de eucalipto para a indústria de base florestal. **Brazilian Journal of Forestry Research**, v. 33, n. 76, p. 429-438, 2013.

LOPATIN, E.; LOPATINA, A. Assessing and mapping energy biomass distribution using a UAV in Finland. **Biofuels**, v. 8, n. 4, p. 485-499, 2017.

LUTZ, J. A.; FURNISS, T. J.; JOHNSON, D. J.; DAVIES, S. J.; ALLEN, D.; ALONSO, A.; ANDERSON-TEIXEIRA, K. J.; ANDRADE, A.; BALTZER, J.; ... ZIMMERMAN, J. K. Global importance of large-diameter trees. **Global Ecology and Biogeography**, v. 27, n. 7, p. 849-864, 2018.

MACHADO, A. S.; NASCIMENTO, R. G. M.; AUGUSTYNICZIK, A. L. D.; SILVA, L. C. R. S.; FIGURA, M. A.; PEREIRA, E. M.; TÉO, S. J. Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* no capão da Engenharia Florestal da UFPR. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 5, n. 56, p. 5-16, 2008.

MARTINS NETO, R. P.; BREUNIG, F. M. Drone nas ciências florestais. In: BREUNIG, F. M.; PRUDKIN, G. (eds.). **Drones e ciência: Teoria e aplicações metodológicas**. FACOS-UFMS: Santa Maria. 2019. p. 68-90.

MARTINS, M. T.; MARANGON, G. P.; COSTA, E. A.; SILVEIRA, B. D.; CUBAS, R.; CAVALLI, J. P. Estimação da altura de plantios florestais de eucalipto por regressão e redes neurais artificiais. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 141-152, 2019.

MEDEIROS, B. L. M. A.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; RIBEIRO, M. X.; LISBOA, F. J. N., GUIMARÃES, I. L.; PROTÁSIO, T. P. Propriedades físicas e químicas da madeira juvenil de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urograndis* cultivadas no Piauí. **Nativa**, v. 4, n. 6, p. 403-407. 2016.

MELO, E. A.; CALEGARIO, N.; MENDONÇA, A. R.; POSSATO, E. L.; ALVES, J. A.; ISAAC, M. A. Modelagem não linear da relação hipsométrica e do crescimento das árvores dominantes e codominantes de *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, v. 27, p. 1325-1338, 2017.

NASCIMENTO, L. A.; VALE, W. G.; LOUREIRO, D. C.; ANDRADE, V. J. S.; ENES, A. M.; VALE, P. A. C. B.; MACHADO, T. M. Identificação de plantas em pomar de citros sob uso de sensoriamento remoto. **Aracê**, v. 7, n. 1, p. 1508-1530, 2025.

OLIVEIRA, L. T. D.; FERREIRA, M. Z.; CARVALHO, L. M. T.; FERRAZ FILHO, A. C.; OLIVEIRA, T. C. A.; SILVEIRA, E. M. O.; JUNIOR, F. W. A. Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 692-700. 2014.

ORFEO TOOLBOX. Versão 9.1.0. (S.l.): CNES, 2024. Disponível em: <https://www.orfeo-toolbox.org/>. Acesso em: 17 mar. 2025.

PARK, J. Y.; MULLER-LANDAU, H. C.; LICHSTEIN, J. W.; RIFAI, S. W.; DANDOIS, J. P.; BOHLMAN, S. A Quantifying leaf phenology of individual trees and species in a tropical forest using unmanned aerial vehicle (UAV) images. **Remote Sensing**, v. 11, n. 13, p. 1534, 2019.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 p. (Documentos, 38).

PRUDKIN, G. Drones: su origen y aplicación en el periodismo contemporáneo para generación de contenidos en 3D. In: BREUNIG, F. M.; PRUDKIN, G. (eds.) **Drones e Ciência: teoria e aplicações metodológicas**. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2019. p. 9-27.

RIBEIRO, A.; FERRAZ, A. C.; MELLO, J. M.; FERREIRA, M. Z.; LISBOA, P. M. M.; SCOLFORO, J. R. S. Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v. 16, n. 1, p. 22-31, 2010.

ROSA, R.; BRITO, J. L. S. **Introdução ao geoprocessamento**. Uberlândia: UFA. 2013.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDÃO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F. Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Embrapa, Brasília. 2014. p. 58-73.

SILVA, A. G. S.; GONÇALVES, W.; LEITE, H. G. Estudo comparativo entre os procedimentos de amostragem casual simples e amostragem sistemática em inventários de arborização urbana. **Natureza & Desenvolvimento**, v. 1, n. 1, p. 67-73, 2005.

SILVA, B. R. F.; UCELLA-FILHO, J. G. M.; BISPO, P. D. C.; ELERA-GONZALES, D. G.; SILVA, E. A.; FERREIRA, R. L. C. Using Drones for Dendrometric Estimations in Forests: A Bibliometric Analysis. **Forests**, v. 15, p. 1993, 2024.

SILVA, E.; ROCHA, C. R. Eucalipto e capim elefante: características e potencial produtivo de biomassa. **Revista Agrogeoambiental**, v. 2, n. 1, p. 143-152, 2010.

SILVA, J. E.; CRISPIM, A. M. C.; SILVA, J. B. Dinâmica espaço-temporal da expansão urbana brasileira a partir do uso de sensoriamento remoto—uma revisão. Research, **Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e450101220686, 2021.

SILVA, M. R.; SANTOS, L. T.; CORRÊA, S. A. Impactos ambientais provocados pela monocultura do eucalipto. **Anais do Fórum de Iniciação Científica do Unifunec**, v. 4, n. 4, 2013.

SILVA, V. V.; NICOLETTI, M. F.; DOBNER, J. M.; VAZ, D. R. Manejo da floresta ombrófila mista a partir da distribuição diamétrica: uma revisão bibliográfica. **Biofix Scientific Journal**, v. 8, n. 1, p. 24-32, 2023.

SOARES, L. D. V.; ZUCHINALI, M. C.; RODRIGUES, V.; SCHWALM, H. Uso de imagens ortorretificadas obtidas por drones, para o planejamento de parcelamento de solo: Use of ortorectified images obtained by drones, for the planning of landscape planning. **Revista UNICREA**, v. 1, n. 1, p. 289-306, 2023.

SOUSA, L. F. A.; GIONGO, P. R. Revisão de literatura: Uso do geoprocessamento na avaliação da degradação de pastagens. **Revista Sapiência: Sociedade, Saberes e Práticas Educacionais**, v. 11, p. 1-16, 2022.

STOLLE, L.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; HENTZ, Â.M. K.; EISFELD, R. D. L. Predicting Stand Volume by Number of Trees Automatically Detected in UAV Images: An Alternative Method for Forest Inventory. **Forests**, v. 12, p. 1508, 2021.

UBIALLI, J. A.; FILHO, A. F.; MACHADO, S. A. M.; ARCE, J. E. Comparação de métodos e processos de amostragem para estimar a área basal para grupos de espécies em uma floresta ecotonal da região norte mato-grossense. **Acta Amazônica**, v. 39, n. 2, p. 305-314, 2014.

VECHI, A.; MAGALHÃES JÚNIOR, C. A. O. Aspectos positivos e negativos da cultura do eucalipto e os efeitos ambientais do seu cultivo. **Revista Valore**, v. 3, n. 1, p. 495-507, 2018.

WU, J.; ALBERT, L. P.; LOPES, A. P.; RESTREPO-COUPÉ, N.; HAYEK, M.; WIEDEMANN, K. T.; GUAN, K.; STARK, S. C.; CHRISTOFFERSEN, B.; ... SALESKA, S. R. Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in Amazon evergreen forests. **Science**, v. 351, n. 6276, p. 972-976, 2016.

XIANMIN, W.; JING, L.; HONGYANG, Y. An improved anti-quantum MST3 public key encryption scheme for remote sensing images, **Enterprise Information Systems**, v. 15, n. 4, p. 530-544, 2021.

4 CAPÍTULO 2

USO DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO NO INVENTÁRIO DE PLANTAÇÕES FLORESTAIS

RESUMO

O uso de aeronave remotamente pilotada (ARP) como ferramenta de auxílio na prática do inventário florestal já é uma realidade em muitos locais. O presente estudo visa comparar dados obtidos no voo com os obtidos na atividade tradicional de inventário florestal (altura, diâmetro a 1,30 m do solo e número de árvores), afim de estimar volume por hectare. O trabalho foi conduzido de forma integrada, empregando técnicas de sensoriamento remoto com uso de ARP e métodos alternativos e adicionais a fim de estimar variáveis dendrométricas por meio de regressões e simulação do Princípio de Bitterlich, usando os dados da amostragem tradicional como verdade de campo. A atividade de campo foi realizada em 12 parcelas circulares de 400 m², com a coleta de dados de circunferência à altura do peito (CAP) e altura total das árvores. Paralelamente, um aerolevantamento foi conduzido utilizando um drone equipado com câmera RGB, gerando um ortomosaico e modelos digitais de elevação (MDE), terreno (MDT) e altura (MDA). Tais produtos cartográficos foram processados para estimar a altura e o número de árvores no plantio. Para estimativa do diâmetro a partir dos dados obtidos no aerolevantamento, modelos matemáticos em função da altura foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados ordinários e pela modelagem mista, selecionando a melhor alternativa em função do erro padrão residual. Também foram empregadas equações disponíveis na literatura para estimativa do diâmetro a partir da altura obtida. A partir das estimativas de diâmetro, a área basal e o volume foram estimados para cada metodologia avaliada (inventário tradicional, contagem visual e automatizada). Os resultados mostraram que a contagem visual de árvores no ortomosaico foi eficiente, com valores próximos aos obtidos no inventário tradicional. No entanto, a contagem automatizada utilizando o plugin *Tree Density Calculator* subestimou o número de árvores, acertando apenas 52% do total. A altura média estimada pelo aerolevantamento foi próxima à obtida em campo, com diferença de 0,8 m (contagem visual) e 0,6 m (automatizada). Para a estimativa do diâmetro, a modelagem mista empregando a regressão linear simples com a

parcela como variável aleatória apresentou o menor erro residual (4,1%). A área basal e o volume estimados com base na altura média e contagem visual das árvores foram os que mais se aproximaram dos valores de campo. Já os métodos que utilizaram equações da literatura para estimar o diâmetro e o volume subestimaram os valores. Conclui-se que o uso de ARP pode ser uma ferramenta eficiente para otimizar a coleta de dados em inventários florestais, especialmente para a obtenção de altura, diâmetro e número de árvores. No entanto, a contagem automatizada de árvores ainda precisa ser aprimorada, e a utilização de modelos matemáticos específicos para cada contexto é essencial para garantir a precisão das estimativas. Futuros estudos devem explorar o uso de sensores mais avançados, como LiDAR, e a aplicação dessas técnicas em diferentes espécies e regiões, visando consolidar o uso de geotecnologias como ferramenta padrão no setor florestal.

Palavras-chave - Otimização florestal; modelo digital de altura, modelagem estatística.

4.1 Introdução

A busca por tecnologias inovadoras para otimizar práticas de inventário florestal tem se expandido nos últimos anos, com o uso de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs), popularmente conhecidas como drones, se tornando uma solução promissora, oferecendo rapidez, redução de custos e coleta de dados em alta resolução (Kovácsóvá; Antalová, 2010; Valjarević *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2024). Essa abordagem tecnológica permite monitorar grandes áreas, auxiliando na tomada de decisão em diversas etapas do planejamento florestal, desde a coleta de dados a tomadas de decisão (Costa; Finger; Hess, 2015; Krause *et al.*, 2019).

Os inventários florestais tradicionais com a amostragem em campo, apesar de consolidados, envolvem metodologias que demandam tempo, esforço humano e recursos financeiros significativos. A coleta de dados realizada em campo pode estar sujeita a limitações práticas, como o difícil acesso nas áreas e a variabilidade nos métodos de coleta (Cosenza *et al.*, 2022). Nesse contexto, as ARPs apresentam-se como uma ferramenta de suporte eficiente, permitindo a obtenção de imagens georreferenciadas e a obtenção de produtos como ortomosaicos, modelos digitais de elevação e estimativas volumétricas, que complementam e otimizam o inventário convencional (Puliti *et al.*, 2017).

Nos últimos anos, avanços significativos na aplicação de ARPs no setor florestal têm sido obtidos como na detecção de árvores (Ghasemi; Latifi; Pourhashemi, 2022), mensuração de variáveis como altura (Matasci *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2022), densidade de copa, biomassa (Crowther *et al.*, 2015; Cao *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2021) e volume do tronco (Allouis *et al.*, 2026). Embora os resultados sejam no geral positivos, discussões sobre a integração de ARPs com métodos tradicionais e a adaptação para diferentes espécies e regiões ainda são necessárias.

As plantações florestais no Brasil, frequentemente dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, apresentam características únicas que podem influenciar a precisão das estimativas conforme a localização. O Piauí apresenta um setor florestal ainda incipiente, mas com predisposição agrícola, se inserindo na fronteira agrícola denominada MATOPIBA, com grande potencial para expansão da demanda por biomassa energética (Souza *et al.*, 2024).

Uma vez que poucos estudos são realizados na região e a busca pela otimização na quantificação de madeira presente na área é necessária. O objetivo do trabalho foi realizar um aerolevanteamento num plantio de *Eucalyptus* sp. localizado no sudoeste piauiense, comparando os dados obtidos no voo com os obtidos na atividade tradicional de inventário florestal (altura, diâmetro a 1,30 m do solo e número de árvores), afim de estimar volume por hectare.

4.2 Material e Métodos

4.2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende um talhão de *Eucalyptus* sp. de 15,2 ha, com idade próxima aos 10 anos, com espaçamento inicial de 3 por 2 m. A plantação conta com diferentes materiais genéticos, majoritariamente híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, apresentando alta mortalidade e baixo nível de manejo após plantio (Figura 1). O clima predominante da região é Aw (quente e úmido) com grandes períodos de seca, com ocorrência de chuvas entre os meses de novembro a março e pluviosidade média anual entre 1000 e 1400 mm, com vegetação característica do bioma Cerrado (Alvares *et al.*, 2013).

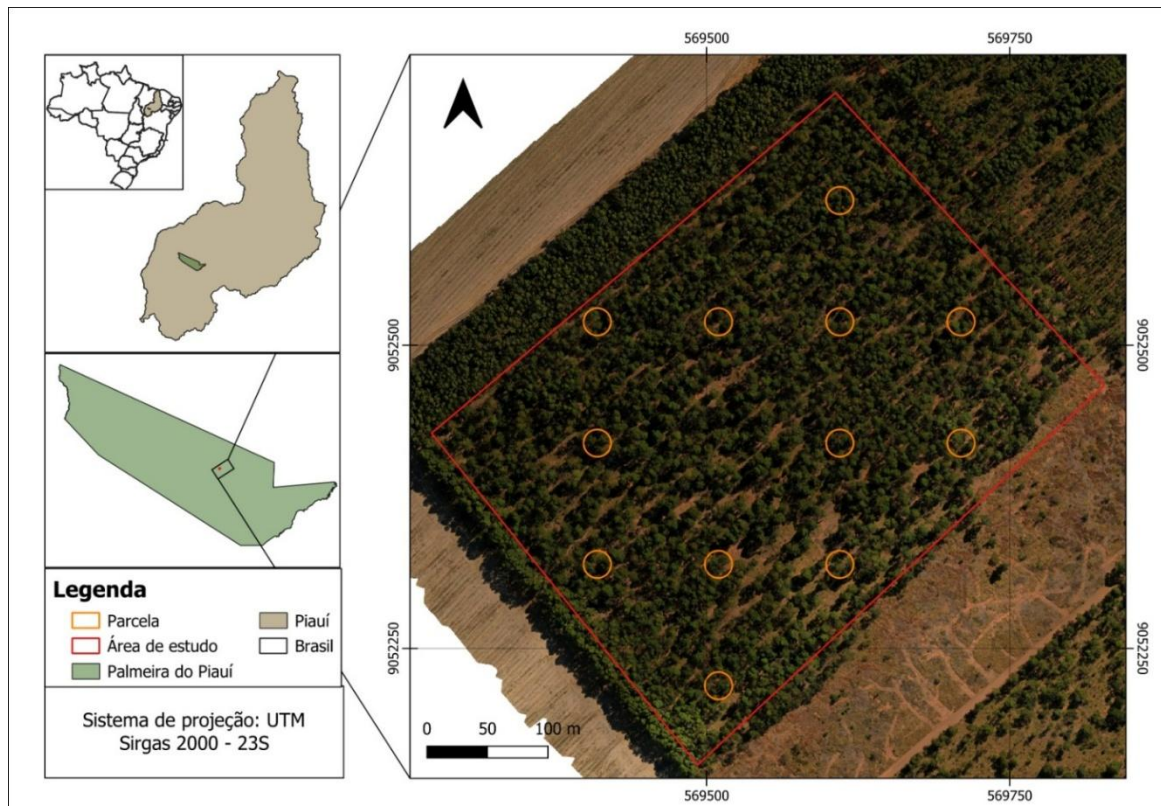


Figura 1 - Plantação florestal de *Eucalyptus* sp. estudada, localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.

O trabalho foi conduzido de forma integrada, empregando técnicas de sensoriamento remoto com uso de ARP e métodos alternativos e adicionais a fim de estimar variáveis dendrométricas por meio de regressões e simulação do Princípio de Bitterlich, usando os dados da amostragem tradicional como verdade de campo.

4.2.2. Amostragem tradicional

O inventário florestal foi realizado em fevereiro de 2024, em que foram demarcadas em campo 12 parcelas circulares com área fixa de 400 m². A disposição das parcelas seguiu uma grade sistemática e foram georreferenciadas com distância de 100 m entre os centros. Foram coletados dados dendrométricos das árvores das parcelas, com a medição da circunferência à altura do peito (CAP) utilizando fita métrica graduada em centímetros, posteriormente convertidos em diâmetro (D), e da altura total (H) utilizando o hipsômetro Vertex IV. Para determinar área basal e volume foram realizados cálculos matemáticos como mostra na Figura 2.

Para o cálculo dos parâmetros estatísticos a formulação da amostragem sistemática foi empregada conforme descrito em (Soares; Neto; Souza, 2011) adotando um erro admissível de 10% e probabilidade de 95% de acerto. O erro padrão da média foi calculado com o desvio padrão dividido pela raiz quadrada do número de amostras, multiplicado por 100, indicando a variabilidade das estimativas em torno da média. O erro do inventário, expresso em porcentagem, foi obtido pela razão entre o erro padrão da média e a média amostral, multiplicado por 100, refletindo a precisão das estimativas em relação ao valor real da população.

4.3.2 Amostragem empregando aerolevanteamento

Para coleta de dados remotamente, um voo foi realizado em junho de 2024, utilizado um drone do modelo DJI Mavic 2, equipado com uma câmera Hasselblad RGB. O voo teve uma sobreposição de 85% e um ângulo de câmera de 90 graus, com uma altitude de 120 m. A automatização do voo foi realizada usando o aplicativo Pix4Dcapture, com uma resolução de imagem de 2,85 cm por pixel. Os pontos de controle foram distribuídos em nove alvos na área mapeada e suas coordenadas coletadas com um par de receptores GNSS - Sistema Global de Navegação por Satélite (GPS + GLONASS).

As informações obtidas através das imagens capturadas no voo foram processadas utilizando os softwares Agisoft e QGIS para geração de modelos digitais de elevação (MDE) e modelos digitais de terreno (MDT), a fim de calcular a altura das árvores pela diferença entre os dois modelos. A partir das alturas obtidas, os valores de D, área basal e volume de madeira foram estimados. O método de Bitterlich (Soares; De Paula Neto; Souza, 2011), também conhecido como amostragem por relascopia, foi simulado no estudo, visto ser uma técnica eficiente para estimar a área basal, diminuindo o tempo dos inventários florestais tradicionais.

4.2.4 Processamento das imagens

Nessa etapa do trabalho foi realizada como mostra na figura 2 (etapa 1), o pré-processamento das imagens foi realizado empregando o software Agisoft PhotoScan

Professional, versão trial seguindo a sequência: alinhamento das imagens, geração e classificação da nuvem de pontos, textura e ortomosaico.

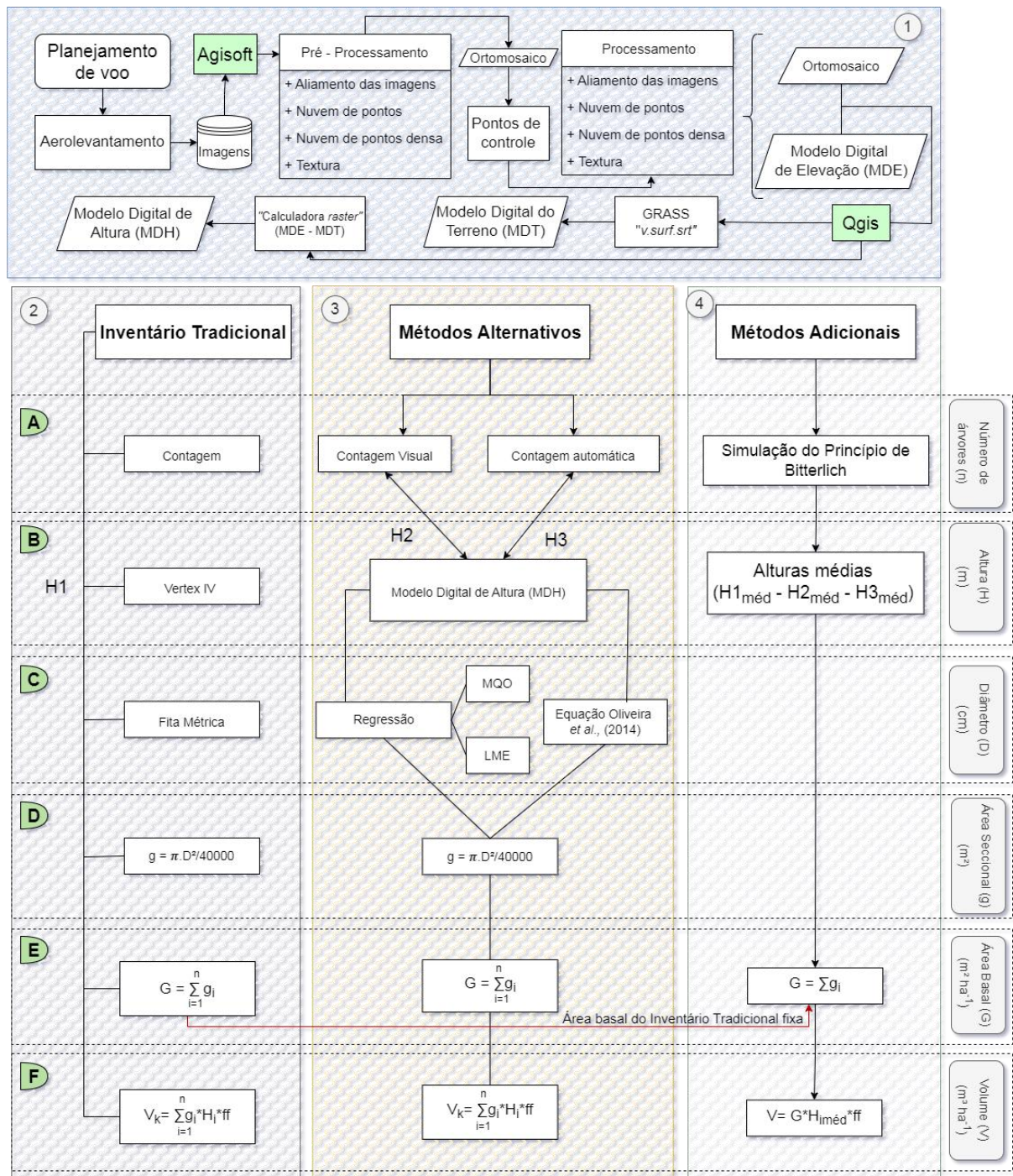


Figura 2 - Fluxo das etapas executadas no estudo para comparativo entre as metodologias avaliadas para estimativa volumétrica em plantação de *Eucalyptus* sp. em Palmeira do Piauí, PI.

Durante as etapas, adicionou-se os pontos de controle para ajustar o ortomosaico e após esse procedimento, realizou-se o processamento das imagens seguindo a mesma sequência citada anteriormente: alinhamento das imagens, geração e classificação da nuvem de pontos,

textura, ortomosaico e geração do Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE e ortomosaico foram exportados e no software QGIS 3.10 Coruña® foi gerado o Modelo Digital do Terreno (MDT) utilizando a ferramenta *v.surf.srt* do GRASS, através dos pontos cotados. O Modelo Digital de Altura (MDH) foi então obtido pela diferença entre os modelos MDE e MDT, empregando a ferramenta *calculadora raster* do referido software.

4.2.5 Determinação das variáveis dendrométricas

Para determinação das variáveis (número de árvores, altura, diâmetro, área seccional, área basal e volume) foi realizadas estratégias divididas em 3 etapas, onde na etapa 2 foi realizado a obtenção dos dados dendrométricos através da amostragem tradicional por meio do inventário tradicional que serviu como verdade de campo. Na etapa 3 realizou os testes com os métodos alternativos afim de estimar as variáveis dendrométricas por meio do aerolevantamento integrando plugins, regressões lineares, equações da literatura e modelos matemáticos. E na etapa 4 os métodos adicionais foram para simulação do Princípio de Bitterlich como estratégia de volume global para estimação do volume de madeira. Na Figura 2 mostra o passo a passo de como foi realizado a estimação de cada variável nos seus respectivos métodos.

Passo A: Além da contagem das árvores realizada no inventário tradicional dentro das parcelas amostrais, foram utilizados nos métodos alternativos: contagem visual, em que a contagem se deu por meio da identificação das árvores com o auxílio do ortomosaico e a contagem automatizada, empregando o plugin *Tree Density Calculator* versão 1.5.7 do software QGIS, recomendado por (Crabbé *et al.*, 2020).

Passo B: Variável altura (H1) foi coletada diretamente utilizando um hipsômetro Vertex IV nas parcelas amostrais, e também por meio do MDH com contagem visual (H2) e contagem automatizada (H3).

Passo C: A variável diâmetro à altura do peito (D), medido a 1,30 m do solo, foi coletada diretamente em campo (CAP convertido em D) utilizando uma fita métrica graduada em centímetros. Além disso, o diâmetro foi estimado em função das alturas obtidas por meio do MDH, por meio de diferentes abordagens. Para a estimativa de D, foram ajustadas regressões lineares utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) e a modelagem mista (LME), considerando a parcela como a variável aleatória, conforme a metodologia descrita em

(Pinheiro; Bates, 2000). Adicionalmente, foi avaliada uma equação da literatura, $\ln(D) = -3,1179 + 1,7646 \ln(H)$, proposta por (Oliveira *et al.*, 2014). Essa abordagem permitiu comparar a eficácia dos modelos estatísticos ajustados com uma equação já estabelecida na literatura, visando identificar o método mais preciso para a estimativa do diâmetro das árvores.

Passo D: As áreas seccionais (g em m² por árvore) foram calculadas em função dos diâmetros obtidos no passo C.

Passo E: Foi realizado o somatório das áreas seccionais individuais (g) obtidas para cada metodologia descrita passo D para o cálculo da área basal (G, em m² ha⁻¹).

Passo F: O volume (v) foi estimado em função da área seccional, alturas obtidas nas diferentes metodologias avaliadas e emprego de um fator de forma de 0,46, proposto por (Oliveira *et al.*, 2020). Além dos métodos para área basal avaliados no passo E, a estimativa foi também realizada empregando três métodos adicionais para simular o princípio de Bitterlich, utilizando a área basal obtida no inventário tradicional e a altura média (Passo B) de cada metodologia (Tabela 1). Esses métodos (Puliti *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2022; Ghasemi; Latifi; Pourhashemi, 2022) basearam-se na premissa de que, com a área basal conhecida via relascopia e a altura média das árvores obtida no aerolevantamento, é possível estimar o volume de madeira sem a necessidade de medir individualmente os diâmetros em campo. Para isso, a área basal das parcelas foi mantida constante, enquanto as alturas médias foram obtidas a partir das três abordagens descrita no passo B. O mesmo fator de forma foi aplicado para estimar o volume.

Tabela 1 - Metodologias avaliadas para estimativa do volume em plantação de *Eucalyptus* sp. localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil

Metodologia	Fórmula*	Obtenção das alturas e diâmetros
1	$V = \sum g_i \cdot H1 \cdot ff$	Inventário tradicional
2	$V = \sum g_i \cdot H2 \cdot ff$	Contagem visual e D estimado via MQO
3	$V = \sum g_i \cdot H2 \cdot ff$	Contagem visual e D estimado via LME
4	$V = \sum g_i \cdot H2 \cdot ff$	Contagem visual e D estimado via equação Oliveira <i>et al.</i> (2014)
5	$V = \sum g_i \cdot H3 \cdot ff$	Contagem automática e D estimado via MQO
6	$V = \sum g_i \cdot H3 \cdot ff$	Contagem automática e D estimado via LME
7	$V = \sum g_i \cdot H3 \cdot ff$	Contagem automática e D estimado via equação Oliveira <i>et al.</i> (2014)
8	$V = G_j \cdot H_{méd1} \cdot ff$	G obtida no Inventário tradicional e H1 média
9	$V = G_j \cdot H_{méd2} \cdot ff$	G obtida no Inventário tradicional e H2 média
10	$V = G_j \cdot H_{méd3} \cdot ff$	G obtida no Inventário tradicional e H3 média

*Note: g_i - área seccional de cada árvore individual (m²) referente a cada metodologia descrita na etapa 6; para 2 via regressão por MQO e H2 - contagem visual; 3 via regressão LME e H2 - contagem visual; 4 via equação Oliveira *et al.*, (2014) e H2 - contagem visual; 5 via regressão por MQO e H3 - contagem automatizada; 6 via regressão LME e H3 - contagem automatizada; 7 via equação Oliveira *et al.* (2014) e H3 - contagem automatizada. G_j - área basal (m² ha⁻¹) da amostragem tradicional, valor fixo nos métodos adicionais; $H_{méd1}$ - altura (m) média da amostragem tradicional; $H_{méd2}$ - altura (m) média via contagem visual; $H_{méd3}$ - altura (m) média via contagem automatizada; e ff - fator de forma = 0,46.

4.2.6. Análises estatísticas

Para a comparação e seleção das melhores estimativas dos ajustes empregando as diferentes metodologias (Tabela 1), o Critério de Informação de Akaike (AIC) e Critério de Informação Bayesiano (BIC) foram empregados a fim de avaliar os modelos de regressão (MQO e LME), pois permitem comparar diferentes modelos de forma objetiva, equilibrando o ajuste aos dados e a complexidade do modelo. Avaliou-se o erro-padrão da estimativa (cm) e o coeficiente de determinação R^2 para cada modelo. Foram determinados intervalos de confiança para as médias das variáveis obtidas seguindo a fórmula: $z \cdot (S/\sqrt{n})$, em que z é o valor da estatística z (1,95), S é o desvio padrão da variável e n é o número de observações (parcelas).

A fim de validar a melhor metodologia para obtenção das alturas e posterior cálculo diamétrico, área basal e volume, os dados foram submetidos à análise de variância, e quando significativos às médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 95% de probabilidade de acerto. Todos os cálculos e gráficos foram feitos no software R v. 4.4.1 (R Core Team, 2024), empregando pacotes básicos do R (stats e graphics). Para o ajuste dos modelos diamétricos a função *lme* foi utilizada (Pinheiro; Bates, 2016) para a modelagem mista com efeito aleatório, a função *lm* foi utilizada para os ajustes pelos mínimos quadrados ordinários. Para a análise de variância e teste de médias o pacote *agricolae* foi empregado (Mendiburu, 2023).

4.3 Resultados

4.3.1 Determinação das variáveis dendrométricas via amostragem tradicional

A Tabela 2 apresenta os resultados dendrométricos obtidos na amostragem tradicional nas 12 parcelas da plantação de *Eucalyptus* sp. estudada. O número de árvores (n) variou de 4 a 14 por parcela, com uma média de aproximadamente 8,5 árvores por parcela. O diâmetro (D) apresentou uma média de 22,4 cm, com valores variando de 17,1 cm a 27,3 cm, indicando uma considerável variabilidade no crescimento das árvores. A altura total média foi de 19,9 m, com variação entre 17,0 m e 23,1 m, refletindo diferenças no desenvolvimento vertical das árvores.

A área basal da parcela apresentou uma média de 0,331 m², com variação de 0,199 m² a 0,419 m². O volume da parcela teve uma média de 3,172 m³, variando de 1,776 m³ a 3,897 m³. Esses resultados evidenciam uma grande variabilidade nas características dendrométricas entre as parcelas, o que pode ser atribuído à mistura de materiais genéticos, diferenças no espaçamento inicial e condições de manejo.

Tabela 2 - Valores dendrométricos obtidos na amostragem tradicional realizada na plantação de *Eucalyptus* sp. localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.

Parcelas	n	H (m)	D (cm)	g (m ²)	v (m ³)
1	10	20,0	22,2	0,410	3,897
2	14	18,8	17,1	0,344	3,254
3	10	18,6	22,1	0,419	3,800
4	12	19,5	17,6	0,326	3,210
5	5	19,4	26,0	0,295	2,836
6	4	19,5	25,1	0,199	1,776
7	5	23,1	26,7	0,281	3,008
8	10	17,0	18,7	0,301	2,528
9	9	21,3	22,2	0,363	3,640
10	8	20,2	21,9	0,318	3,181
11	6	21,3	27,3	0,364	3,675
12	9	19,5	22,1	0,352	3,261
X		19,9	22,4	0,331	3,172
S		1,5	3,4	0,060	0,596

Os valores dendrométricos obtidos na contagem visual estão apresentados na Tabela 3, os resultados demonstram que os métodos alternativos via regressões MQO e LME apresentaram valores consistentes e próximos entre si, enquanto a equação de Oliveira *et al.* (2014) forneceu estimativas significativamente menores, possivelmente devido a diferenças metodológicas ou ajustes específicos dos coeficientes da equação.

Como podem ser observados na Tabela 4 os valores dendrométricos pela contagem automatizada via *plugin*, observa-se uma redução no número de árvores (n) por parcela, a altura apresentou valores próximos à contagem visual com média parecidas (19,0 m), os diâmetros estimados via regressões (MQO e LME) não teve tanta diferença, porém para as variáveis de área basal (m²) e volume de madeira (m³) obtiveram baixo desempenho nesse método, ressaltando a importância do número de árvores para essas estimativas. Para equação de Oliveira *et al.*, (2014) foi o método que apresentou menos eficiência nas estimativas.

Tabela 3 - Valores dendrométricos obtidos na contagem visual realizada na plantação de *Eucalyptus* sp. localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.

Parcelas	n	H (m)	MQO			LME			Equação de Oliveira <i>et al.</i> (2014)		
			D (cm)	g (m ²)	v (m ³)	D (cm)	g (m ²)	v (m ³)	D (cm)	g (m ²)	v (m ³)
1	10	19,0	20,7	0,338	2,993	21,0	0,351	3,108	8,0	0,051	0,460
2	14	17,0	18,4	0,379	3,029	16,2	0,291	2,321	6,6	0,050	0,404
3	10	17,5	19,0	0,287	2,355	20,5	0,333	2,740	7,0	0,039	0,324
4	12	18,3	19,9	0,381	3,360	17,4	0,292	2,581	7,6	0,058	0,528
5	5	20,1	21,9	0,191	1,800	25,9	0,268	2,542	8,9	0,032	0,306
6	4	18,5	20,1	0,130	1,139	22,1	0,156	1,368	7,7	0,020	0,176
7	5	20,4	22,2	0,194	1,829	23,0	0,209	1,963	9,0	0,032	0,305
8	10	17,7	19,2	0,301	2,603	19,3	0,301	2,600	7,2	0,044	0,394
9	9	20,7	22,6	0,362	3,471	21,9	0,342	3,280	9,3	0,062	0,597
10	8	20,6	22,5	0,319	3,052	22,5	0,320	3,061	9,2	0,054	0,524
11	6	18,7	20,3	0,195	1,697	22,6	0,242	2,104	7,8	0,029	0,253
12	9	20,0	21,8	0,338	3,154	22,1	0,349	3,249	8,8	0,055	0,522
X		19,0	20,7	0,285	2,540	21,2	0,285	2,576	8,1	0,044	0,399
S		1,3	1,4	0,085	0,762	2,6	0,085	0,573	0,9	0,013	0,130

Tabela 4 - Valores dendrométricos obtidos na contagem automatizada via plugin realizada na plantação de *Eucalyptus* sp. localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.

Parcelas	n	H (m)	MQO			LME			Equação de Oliveira <i>et al.</i> (2014)		
			D (cm)	g (m ²)	v (m ³)	D (cm)	g (m ²)	v (m ³)	D (cm)	g (m ²)	v (m ³)
1	5	19,1	20,8	0,171	1,540	21,1	0,178	0,320	8,1	0,027	0,244
2	5	18,2	19,8	0,156	1,329	17,3	0,118	0,201	7,5	0,022	0,194
3	4	18,1	19,6	0,122	1,028	21,2	0,143	0,302	7,3	0,017	0,147
4	5	18,4	20,0	0,163	1,484	17,5	0,126	0,229	7,7	0,026	0,247
5	4	19,3	21,0	0,142	1,314	24,6	0,197	0,461	8,3	0,023	0,220
6	5	16,9	18,3	0,133	1,064	20,0	0,160	0,255	6,5	0,017	0,143
7	4	19,6	21,3	0,145	1,335	22,1	0,155	0,358	8,5	0,023	0,219
8	3	18,1	19,6	0,092	0,776	19,7	0,092	0,259	7,4	0,013	0,111
9	5	20,8	22,7	0,203	1,950	22,0	0,192	0,369	9,4	0,035	0,336
10	6	19,8	21,6	0,222	2,062	21,6	0,222	0,344	8,6	0,036	0,343
11	4	19,3	21,1	0,140	1,263	23,5	0,174	0,393	8,3	0,022	0,198
12	3	20,7	22,6	0,122	1,176	23,0	0,125	0,402	9,4	0,021	0,205
X		19,0	20,7	0,151	1,360	21,1	0,157	0,324	8,1	0,024	0,217
S		1,1	1,3	0,036	0,366	2,2	0,038	0,078	0,8	0,007	0,070

4.3.2 Determinação das variáveis dendrométricas via aerolevantamento

O ortomosaico devido a sua alta resolução e precisão georreferenciada, pode proporcionar uma visão detalhada e abrangente da plantação florestal, facilitando a identificação e contagem de árvores de forma mais eficiente. A qualidade das imagens permitiu a visualização clara das copas das árvores e a detecção dos indivíduos (Figura 3A). O ortomosaico possibilitou a criação de camadas de informação em shapefiles do tipo pontos, que foram utilizadas para marcar e contar as árvores de forma visual para determinação da altura (H2). Na Figura 3B mostra a disposição das árvores identificadas pelo plugin *Treedensity* (H3).

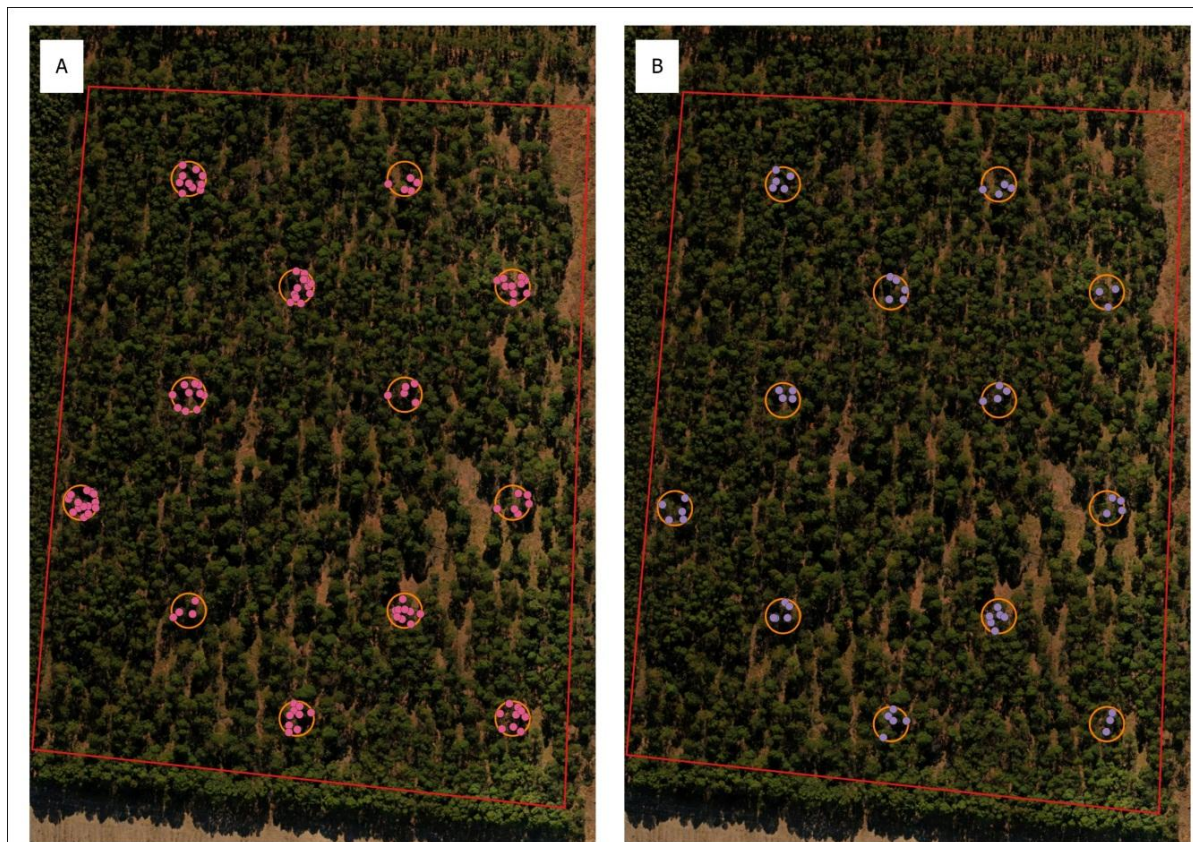


Figura 3 - Árvores identificadas via contagem visual (A) e contagem automática via plugin (B), da plantação florestal de *Eucalyptus* sp. estudada, localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.

A Figura 4 mostra os modelos digitais de elevação (MDE) e terreno (MDT), que desempenham um papel crucial na obtenção de dados precisos sobre a altura das árvores em estudos florestais. O MDE representa a superfície do terreno incluindo a vegetação, enquanto o MDT reflete apenas o terreno, sem a presença de árvores ou outras estruturas. A diferença entre esses dois modelos resulta no modelo digital de altura (MDH), que captura a altura relativa

das árvores em relação ao solo. No estudo em questão, a utilização desses modelos permitiu a obtenção de alturas das árvores com acurácia, essencial para estimativas do diâmetro, área basal e volume.

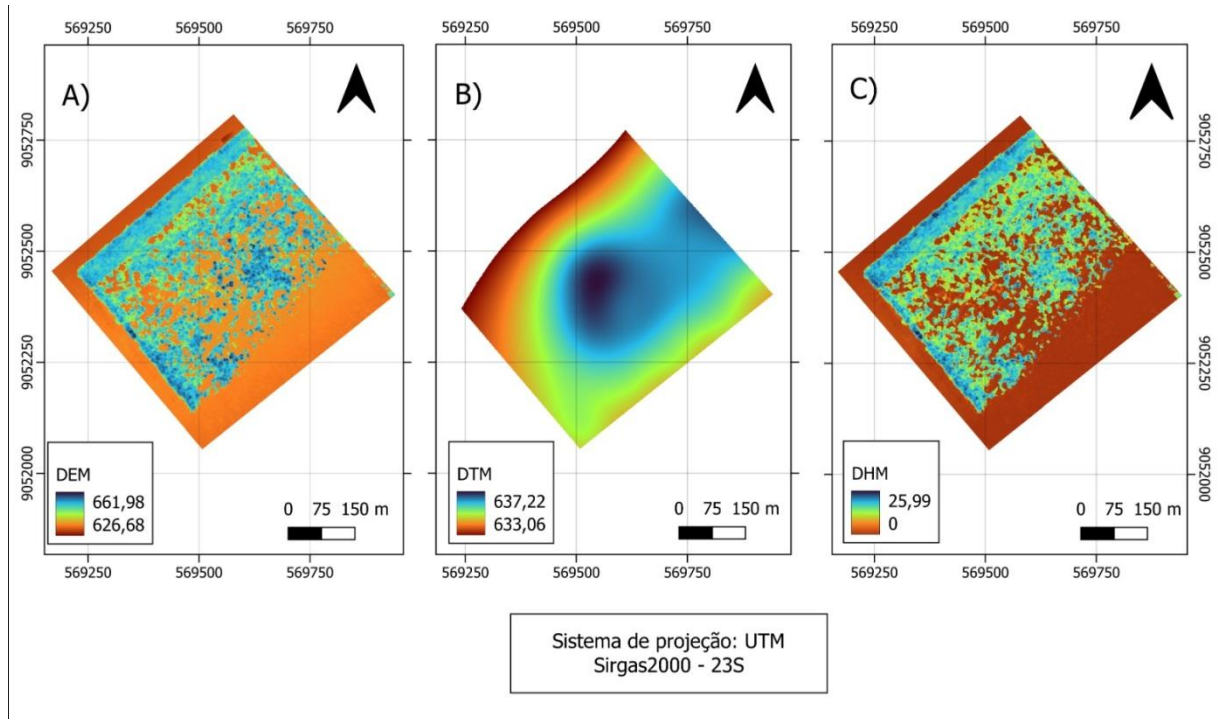


Figura 4 - Modelo digital de elevação (DEM, A), modelo digital do terreno (DTM, B) e modelo digital de altura (DHM, C) para plantação de *Eucalyptus* sp. no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.

4.3.3 Estimativa de diâmetro, área basal e volume das árvores a partir dos dados de altura obtidos por diferentes metodologias

O ajuste da regressão para modelar a relação entre diâmetro e altura foi realizado utilizando os métodos dos mínimos quadrados ordinários (MQO) e a modelagem mista (LME), com as parcelas incluídas como variável aleatória (Figura 5). Os valores de AIC para os modelos foram 609.8 (MQO) e 605.9 (LME), enquanto os valores de BIC foram 617.6 (MQO) e 621.5 (LME). Esses resultados indicam que o modelo misto apresenta um melhor ajuste para a estimativa do diâmetro, considerando sua capacidade de incorporar a variabilidade entre parcelas, uma vez que menores valores de AIC sugerem um equilíbrio mais adequado entre a qualidade do ajuste e a complexidade do modelo. No caso do BIC, embora o valor seja

ligeiramente maior na modelagem mista, a diferença é pequena e não invalida a superioridade do LME, que é reforçada pelo AIC.

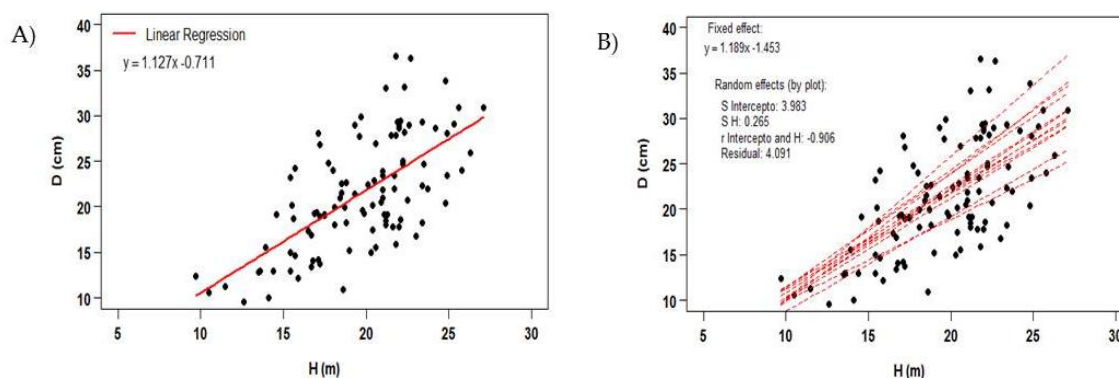


Figura 5 - Ajuste das regressões lineares via método dos mínimos quadrados ordinários (A) e modelagem com efeito aleatório considerando parcela (B) dos dados obtidos na amostragem tradicional.

Os dados de R^2 e do erro-padrão residual apontaram para a LME como o de melhor ajuste, permitindo o ajuste para cada parcela como mostra a Tabela 5, destacando a parcela 2 que apresentou o menor erro padrão (2,54 cm) e R^2 de 70,7, salientando que esta parcela é a que possui mais árvores em relação as demais. Já na parcela 6, que apresenta menos indivíduos, apresentou o maior R^2 , porem seu erro padrão foi alto com 5,49 cm.

Tabela 5 - Parâmetros para o ajuste dos modelos analisados para plantio de *Eucalyptus* sp., localizado no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.

Modelo	Equação	Parcela	R^2 ajustado	Erro padrão residual (cm)
MQO	$D = 1,127H - 0,711$		42,5	4,71
		1	35,3	4,95
		2	70,7	2,54
		3	59,2	4,77
		4	56,5	4,30
		5	66,2	6,45
		6	74,1	5,49
		7	47,5	3,60
		8	29,4	5,36
		9	37,0	4,05
		10	68,9	3,36
		11	13,6	5,92
		12	8,8	3,70
LME	$D = 1,189H - 1,453$			

Os resultados das três metodologias de contagem de árvores (Tabela 6) indicaram que a amostragem tradicional e a contagem visual identificaram igualmente 102 árvores presentes na área (213 árvores por hectare). Esses dois métodos apresentaram resultados idênticos, indicando que a contagem visual no ortomosaico gerado pela RPA foi tão precisa quanto o método tradicional de campo. Já na contagem automatizada utilizando um *plugin*, apenas 53 árvores foram contabilizadas (111 árvores por hectare), correspondendo a 52% do total de árvores contadas no inventário tradicional. Essa subestimação significativa pode ser atribuída às limitações do *plugin* em distinguir árvores individuais em plantações com copas sobrepostas ou em áreas abertas, onde o algoritmo pode agrupar várias árvores como uma única unidade. A diferença estatística entre as metodologias avaliadas foi confirmada pelo teste de Tukey, que mostrou que a contagem automatizada difere significativamente da contagem visual e do inventário tradicional ($p < 0,05$).

Tabela 6 - Número de árvores conforme metodologia avaliada para plantio de *Eucalyptus* sp., localizado no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.

Metodologia	n	n (%)	N ha ⁻¹
Inventário tradicional	102	100	213 ^a
Contagem visual	102	100	213 ^a
Contagem automática via <i>plugin</i>	53	52	111 ^b

* letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade de acerto.

Os resultados da estimativa diamétrica, área basal e volume, a partir das alturas obtidas em campo e no aerolevantamento (Figura 6) mostraram que o ajuste pela contagem visual e automatizada, ajustados por mínimos quadrados ordinários (MQO) e pela modelagem mista com parcela sendo efeito aleatório (LME) não apresentaram diferenças estatísticas significativas, comparados à amostragem tradicional, para estimativa do diâmetro com valores próximos de 22 cm. Já o diâmetro médio estimado pela equação proposta por Oliveira *et al.* (2014) indicou uma diferença estatística significativa em relação aos outros métodos.

Para determinação da área basal (G em m² ha⁻¹), os resultados mostram que a contagem visual, combinada com modelos de regressão ajustados por MQO e LME, foram eficazes na estimativa da área basal (Figura 6), apresentando valores estatisticamente semelhantes ao inventário tradicional ($p < 0,05$). Isso indica que esses métodos são precisos e confiáveis para a estimativa da área basal, com a regressão LME mostrando-se ligeiramente mais precisa ao considerar a variabilidade entre as parcelas. Os resultados da metodologia com uso do *plugin* para contagem automatizada apresentaram resultados inferiores ao inventário tradicional, essa

subestimação da área basal pode ser atribuída à baixa eficiência do *plugin* na contagem de árvores. Assim como na estimativa do diâmetro, o uso da equação proveniente da literatura apresentou os piores resultados, indicando uma diferença estatística significativa em relação aos outros métodos ($p > 0,05$).

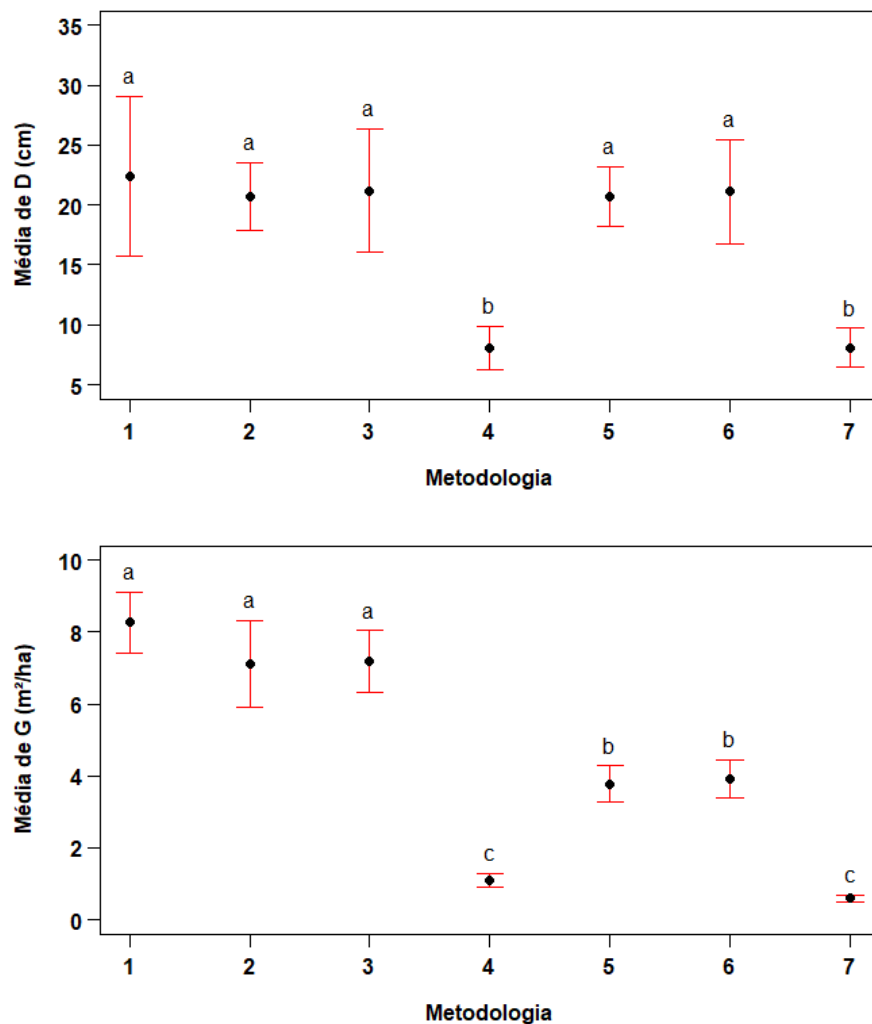


Figura 6 - Médias de diâmetro (D) e área basal (G) estimadas por diferentes metodologias para uma plantação florestal de *Eucalyptus* sp., localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil. As letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade de acerto. 1 - Inventário tradicional; 2 - Contagem visual / regressão via MQO; 3 - Contagem visual / regressão via LME; 4 - Contagem visual / equação de Oliveira *et al.* (2014); 5 - Contagem automatizada / regressão via MQO; 6 - Contagem automatizada / regressão via LME; 7 - Contagem automatizada / equação de Oliveira *et al.* (2014).

Os resultados das métricas de precisão para a estimativa de volume de madeira presente na área nas diferentes metodologias avaliadas (Tabela 7), indicaram que os métodos 1 e 9 apresentaram os menores valores de erro da média que variaram de 5,1% a 9,2%, o que reflete

a precisão das estimativas. Os erros de inventário, que medem a precisão global, variaram de 11,3% a 20,3%, com os métodos 9 e 8 destacando-se como os mais precisos, com isso foram os mais confiáveis, com menor variabilidade e erros menores, enquanto métodos como 4 e 7 apresentaram maior variabilidade e erros mais elevados.

Tabela 7 - Medidas de precisão para estimativa do volume de madeira para as diferentes metodologias avaliadas em uma plantação de *Eucalyptus* sp. localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil.

Metodologia	Volume	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Erro padrão da média	Erro do inventário florestal
	m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	%	%	%
1	79,30	14,91	18,8	5,3	11,8
2	63,50	19,05	30,0	8,5	18,8
3	64,41	14,34	22,3	6,3	13,9
4	9,98	3,24	32,5	9,2	20,3
5	34,00	9,15	26,9	7,6	16,8
6	35,36	9,54	27,0	7,7	16,9
7	5,43	1,76	32,3	9,2	20,2
8	75,59	14,36	19,0	5,4	11,9
9	72,30	13,07	18,1	5,1	11,3
10	72,65	14,51	20,0	5,7	12,5

Note: 1 - Inventário tradicional; 2 - Contagem visual / MQO; 3 - Contagem visual / LME; 4 - Contagem visual / Oliveira *et al.* (2014); 5 - Contagem automatizada / MQO; 6 - Contagem automatizada / LME; 7 - Contagem automatizada / Oliveira *et al.* (2014); 8 - Simulação do Princípio de Bitterlich / $H_{\text{méd}1}$; 9 - Simulação do Princípio de Bitterlich / $H_{\text{méd}2}$; 10 - Simulação do Princípio de Bitterlich / $H_{\text{méd}3}$. Onde: MQO: regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários; LME - Modelagem de efeitos mistos; Simulação do Princípio de Bitterlich / Utilizou-se G (m²ha⁻¹) valor fixo do inventário tradicional; $H_{\text{méd}1}$ - altura (m) média da amostragem tradicional; $H_{\text{méd}2}$ - altura (m) média via contagem visual; $H_{\text{méd}3}$ - altura (m) média via contagem automatizada; ff - fator de forma = 0,46.

Os volumes de madeira estimados para cada metodologia avaliada (Figura 7) mostram que os métodos 1, 2, 3, 8, 9 e 10 não apresentaram diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) entre si, variando 79,30 a 63,50 m³ ha⁻¹ de madeira presente na área. Os métodos 5 e 6, que utilizaram o *plugin* para contagem automatizada, apresentaram valores significativamente menores (em torno de 34,00 a 35,36 m³ ha⁻¹, respectivamente). Já as metodologias 4 e 7, que estimaram o volume com a equação proveniente da literatura, foram os menos eficientes, com valores de volume de 9,98 e 5,43 m³ ha⁻¹, respectivamente.

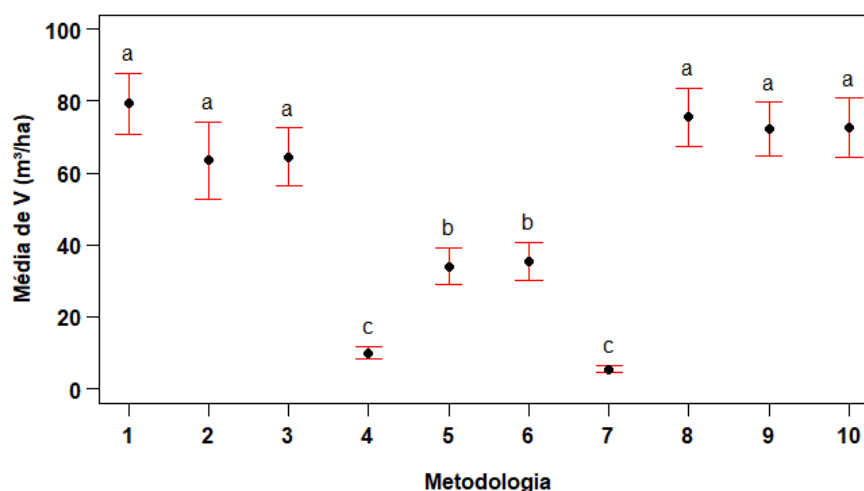


Figura 7. Volume médio de madeira na plantação de *Eucalyptus* sp. localizada no município de Palmeira do Piauí, PI, Brasil. As letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade de acerto. Em que: 1 – Inventário tradicional; 2 - Contagem visual / MQO; 3 - Contagem visual / LME; 4 - Contagem visual / Oliveira *et al.* (2014); 5 – Contagem automatizada / MQO; 6 - Contagem automatizada / LME; 7 - Contagem automatizada / Oliveira *et al.* (2014); 8 – Simulação do Princípio de Bitterlich / $H_{méd1}$; 9 - Simulação do Princípio de Bitterlich / $H_{méd2}$; 10 - Simulação do Princípio de Bitterlich / $H_{méd3}$. Onde: MQO: regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários; LME - Modelagem de efeitos mistos; Simulação do Princípio de Bitterlich / Utilizou-se G (m^2ha^{-1}) valor fixo do inventário tradicional; $H_{méd1}$ – altura (m) média da amostragem tradicional; $H_{méd2}$ – altura (m) média via contagem visual; $H_{méd3}$ – altura (m) média via contagem automatizada; ff – fator de forma = 0,46.

4.4 Discussão

Este estudo teve como objetivo demonstrar diferentes estratégias do uso de geotecnologias no auxílio de obtenção de variáveis dendrométricas obtidas no inventário florestal. Através de um aerolevantamento e técnicas de fotogrametria, foi possível obter um modelo digital de altura para estimativa das demais variáveis dendrométricas, tais como Número de árvores, altura, diâmetro, área basal e volume. Na busca pela validação dos dados obtidos, diferentes metodologias para contagem de árvores e estimativa de diâmetro foram avaliadas a fim de selecionar a mais eficiente para estimativa do volume de madeira presente na área.

Uma das estratégias aplicadas neste estudo consistiu em utilizar as imagens obtidas para individualizar cada árvore do plantio (métodos alternativos, Tabela 3), obtendo também sua altura total. A altura estimada de cada árvore é então utilizada para estimar seu diâmetro por

meio de modelos de regressão, e, posteriormente, seu volume é estimado e extrapolado para hectare. Para estimar o diâmetro utilizando regressão, a melhor estratégia de ajuste foi à modelagem mista em relação a linear, que resultou em estimativas satisfatórias para o D e consequentemente para o volume (Figura 7). No estudo de Dalla Corte *et al.*, (2020), os autores demonstraram a superioridade no ajuste ao utilizar um modelo linear simples para estimar o diâmetro em um plantio de eucalipto em relação ao desse trabalho ($R^2 = 0,44$), com dados de altura obtidos por meio de um voo com sensor *Lidar* ($R^2 = 0,77$). Essa diferença pode ser atribuída à tecnologia empregada, visto que o sensor *Lidar* possui superioridade comparada a câmara RGB utilizada no presente estudo. No estudo de Dalla Corte *et al.*, (2020), o plantio era eucalipto parte de um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) com aproximadamente sete anos de idade, o que pode ter contribuído para uma relação mais consistente entre altura e diâmetro, além do manejo mais eficiente e o plantio da espécie arbórea era só uma, tornando-o mais homogêneo.

A diferença entre o sensor *Lidar* e as câmeras RGB reside principalmente na forma como cada tecnologia coleta e processa dados, impactando diretamente a precisão e a aplicabilidade do estudo. O *Lidar* é uma tecnologia ativa que emite pulsos de laser e mede o tempo de retorno após a reflexão em superfícies (Veras *et al.*, 2023). As câmeras RGB são tecnologias passivas que capturam imagens bidimensionais baseadas na luz visível refletida (Mlenek; Dalla Corte; Santos, 2020; Silva *et al.*, 2024). Estudos comparativos, como os realizados por (Kaartinen *et al.*, 2012; Wallace *et al.*, 2016; Thiel; Schmullius, 2017; Deng *et al.*, 2016; Puliti *et al.*, 2020), demonstram que enquanto o *Lidar* se destaca pela precisão na modelagem tridimensional e na estimativa de variáveis estruturais, as câmeras RGB, especialmente quando combinadas com algumas técnicas, oferecem uma alternativa acessível e eficiente para aplicações que não demandam alto nível de detalhamento. A combinação de ambas as tecnologias, como demonstrado por (Kaartinen *et al.*, 2012; Deng *et al.*, 2016), pode ser uma estratégia promissora para maximizar a precisão e a eficiência em estudos florestais, equilibrando custos e benefícios. A escolha entre *Lidar* e RGB deve considerar as especificidades do estudo, como o nível de detalhamento necessário, o orçamento disponível e as características da área florestal em questão.

A modelagem mista é uma ferramenta estatística que permite trabalhar com dados espacialmente, fator importante para aliar com geotecnologia além de estimar variáveis como o diâmetro por parcela, combinando efeitos fixos (que representam fatores que afetam o diâmetro de forma consistente para todas as parcelas) e aleatórios (que representam a variabilidade que não pode ser explicada pelos efeitos fixos e que varia entre parcelas). Velasco-

Bautista *et al.*, (2024) recomendaram o uso de modelos mistos como maneira de lidar com dados mais complexos e por oferecer precisão ao estimar dados florestais como diâmetro, biomassa, volume e densidade. No presente trabalho, o uso dessa técnica de ajuste reduziu o erro residual geral para 4,1 centímetros na estimativa do diâmetro em comparação com o ajuste por mínimos quadrados ordinários (4,7 cm), afirmando que efeitos aleatórios explicam melhor a variabilidade total dos dados ao considerar a estrutura de cada parcela.

Os diâmetros estimados nas diferentes metodologias via regressões MQO e LME (Figura 6) não apresentaram diferenças estatísticas significativas quando comparados ao valor obtido na amostragem tradicional, mostrando que aerolevantamentos podem ser empregados no inventário para otimização da coleta de dados. Com exceção da estimativa empregando a equação proveniente da literatura (Oliveira *et al.*, 2014), que resultou em subestimativas para os valores diamétricos. Reforçando a necessidade de realizar trabalhos no estado do Piauí, visto que é importante o ajuste de modelos regionais de relação hipsométrica (Ribeiro *et al.*, 2010; Andrade *et al.*, 2015; Andrade *et al.*, 2023). A disparidade nos valores obtidos pelo emprego da equação de Oliveira *et al.* (2014) pode ser devido a plantação do estudo apresentar 7 anos de idade, espaçamento 5 por 2,4 m e com altura média de 31,7 m (no presente estudo foi de 19,9 m) apresentando porte diferente.

A contagem automatizada de árvores utilizando o *plugin Tree Density* não foi eficiente neste estudo devido a várias limitações intrínsecas ao método e às características específicas do plantio analisado. O *plugin* opera com base em algoritmos que identificam árvores por meio de padrões de densidade no DHM, o que pode não ser eficaz em plantações com copas sobrepostas ou em áreas de alta complexidade estrutural. No estudo em questão, o *plugin* identificou apenas 52% das árvores contadas no inventário tradicional, resultando em uma subestimação significativa do número de indivíduos. Uma das principais razões para essa imprecisão é o fato de que o *plugin* utiliza uma abordagem binária para detectar árvores, o que pode levar à identificação incorreta de aglomerados de copas como uma única árvore, especialmente em plantações com espaçamento irregular. Além disso, outro fator que pode ter contribuído para a baixa eficiência foi a heterogeneidade do plantio, que apresenta uma mistura de materiais genéticos e variações no espaçamento inicial.

Estudos como o de Sá *et al.* (2021), que compararam dois *plugins* para contagem automática em um plantio de mangueira, identificaram o *Tree Density* como o mais eficiente em seu contexto específico. Da mesma forma, Stolle *et al.* (2021), ao analisarem plantios de *Pinus taeda* e *Eucalyptus urograndis*, utilizaram o *TreeDetect* (outro tipo de *plugin*) em conjunto com dados de DHM obtidos por sensores *Lidar*, alcançando resultados mais precisos.

Esses exemplos destacam que a eficácia dos *plugins* de contagem automatizada pode variar significativamente dependendo das características do plantio e da tecnologia utilizada. Portanto, sugere-se a realização de novos estudos com o emprego de diferentes *plugins* e a integração de tecnologias como sensor *Lidar* e câmeras multiespectrais para aprimorar a precisão e a eficiência na contagem de árvores em amostragens por aerolevantamento.

A área basal é uma variável importante na área florestal, é usada como indicador de densidade da vegetação e crescimento de uma floresta, servindo como dados de entrada para cálculo volumétrico (Soares; De Paula Neto; Souza, 2011). A metodologia empregando os modelos lineares simples ajustados por MQO e LME e contagem visual de árvores foram as que mais se assemelharam aos valores obtidos na amostragem tradicional.

Já na estimativa do volume os melhores resultados foram os resultantes do cálculo da área basal com emprego da altura via contagem visual de indivíduos com modelos de regressão e os que simularam o princípio de Bitterlich com a altura média das parcelas. (Bouvier *et al.*, 2015; Hyypä *et al.*, 2020; Iizuka *et al.*, 2020; Gejdoš *et al.*, 2024) obtiveram resultados satisfatórios na estimativa de volume em plantios florestais via aerolevantamento, porém a maioria dos estudos empregaram um sensor *Lidar*.

Trabalhos recentes têm explorado o uso de RPAs equipadas com câmeras RGB para estimar volume florestal e comparar métodos de contagem visual e automática de árvores, oferecendo percepções valiosas que podem ser contrastadas com os resultados obtidos no presente estudo. Stolle *et al.*, (2021) investigaram a previsão do volume de povoamentos florestais com base no número de árvores detectadas automaticamente em imagens de RPA, os autores utilizaram técnicas de detecção automática e modelos de regressão, alcançando resultados promissores, mas com variações na precisão dependendo da densidade e complexidade do povoamento. Esse achado é semelhante ao observado no presente estudo, onde a contagem automatizada com o *plugin Tree Density* identificou apenas 52% das árvores, resultando em uma subestimação significativa do volume, o que mostra a importância do número de árvores para estimar o volume.

Veras *et al.*, (2023) ao realizarem estudos para estimativa de volume de árvores na floresta amazônica utilizando imagens de RPA para mapeamento de copas, destacaram a importância da qualidade das imagens e da resolução espacial para a precisão das estimativas. No presente estudo, a contagem visual em ortomosaicos mostrou-se mais eficaz que a contagem automatizada, indicando que, em florestas complexas, a interpretação humana ainda pode superar métodos automatizados, especialmente quando combinada com técnicas de regressão. Esse resultado está alinhado com as observações de Gejdoš *et al.*, (2024), que também

ressaltaram a eficácia da análise visual em cenários de alta complexidade estrutural. Silva *et al.*, (2024) quantificaram o volume de povoamentos de *Eucalyptus* sp., utilizando técnicas fotogramétricas para gerar modelos digitais de elevação e obtiveram resultados satisfatórios, mas destacaram a importância de combinar diferentes variáveis, como área basal e altura média, para melhorar a precisão das estimativas.

No presente estudo, as metodologias 8, 9 e 10 foram estatisticamente semelhantes ao inventário florestal tradicional, onde utilizaram uma abordagem que simulou o Princípio de Bitterlich, que combinou a área basal fixa, obtida da amostragem tradicional, com as alturas médias (inventário tradicional, contagens visual e automatizada). Essa combinação de variáveis permitiu que esses métodos alcançassem estimativas de volume próximas às do inventário tradicional, com valores dentro do intervalo de confiança e sem diferenças estatísticas significativas. A área basal, sendo uma variável fundamental para o cálculo do volume, garantiu uma base confiável para as estimativas, enquanto a altura média, mesmo com variações na precisão (especialmente na metodologia 10, que utilizou o plugin *Tree Density*), foi compensada pela robustez da área basal fixa.

O princípio de Bitterlich estima apenas o volume global por hectare, que não é um problema para plantios destinados a energia e celulose. Para realizar essa técnica demanda maior esforço de campo, pois é necessária medição direta de parcela, que é rápido neste método. O alto acerto do volume, independente da forma de estima-lo, desde que as estimativas de Bitterlich sejam compatíveis com a realidade. Com isso, metodologias vêm sendo testadas a fim de aperfeiçoar esse trabalho de campo para coleta de dados de área basal, na literatura encontramos trabalho como Ficko *et al.* (2020) que fez uso de tecnologias modernas como uso de aplicativos moveis como Trestima e moti, onde o Trestima, baseado em visão computacional, permite a estimativa de parâmetros florestais por meio de fotos, enquanto o Moti funciona como um relascópio digital, seguindo o método tradicional de Bitterlich.

A utilização de ARP em inventários florestais oferece vantagens como a redução do esforço de campo, já que exige apenas a calibração de equações de diâmetro (D) e altura (H) para estimar o volume das árvores, especialmente quando as equações da literatura não são adequadas. Além disso, a ARP permite contar e estimar o volume de todas as árvores do plantio, sendo ideal para plantios destinados à produção de madeira sólida, como serraria e laminação, pois possibilita inferir a distribuição espacial das árvores e simular desbastes. No entanto, em grandes plantios, sua aplicação pode ser limitada devido à baixa precisão das metodologias automatizadas de contagem.

No contexto do manejo intensivo, as ARPs podem ser empregadas para monitorar o crescimento das árvores e a densidade do povoamento, fornecendo dados precisos e em tempo real que permitem ajustes operacionais, como a aplicação de desbastes precoces. Já no manejo multiproduto, as ARPs auxiliam no planejamento e na execução de desbastes, identificando áreas com maior densidade ou árvores que necessitam ser removidas para alcançar as metas de produção de biomassa e madeira sólida. Além disso, as ARPs podem ser utilizadas para monitorar a eficácia das operações de poda, avaliando a cicatrização dos ferimentos e a qualidade da madeira produzida. Essa funcionalidade é especialmente relevante em podas mais intensivas (até 70% da altura da árvore), nas quais a precisão é fundamental para assegurar que apenas galhos vivos sejam removidos, minimizando impactos negativos no crescimento das árvores e maximizando a qualidade da madeira (Ferraz Filho, 2013).

Portanto, mais pesquisas são necessárias avaliar o potencial de eficiência e redução de custos na prática do inventário florestal aliado ao aerolevantamento. O presente trabalho demonstrou que é possível obter estimativas de volume precisas sem a necessidade de medir o diâmetro de todas as árvores em campo, o que pode ser particularmente vantajoso em grandes áreas. A adaptabilidade desses métodos para diferentes espécies e condições de plantio também é um ponto a ser explorado, desde que a área basal seja conhecida ou estimada com precisão, a estimativa volumétrica poderá ser acurada. Isso sugere que a integração de múltiplas variáveis pode ser uma estratégia promissora para otimizar a estimativa de volume.

4.5. Conclusão

O aerolevantamento pode ser utilizado como ferramenta de auxílio na obtenção de dados de inventário como altura total, diâmetro e número de árvores. Para a contagem de árvores de forma automatizada novos testes deverão ser conduzidos para melhoria das estimativas. Na estimação dos diâmetros das árvores e área basal equações lineares simples ajustadas pela modelagem mista são recomendadas. Para o cálculo do volume o uso da área basal com altura obtida da contagem visual e modelos de regressão e os métodos adicionais com área basal fixa e altura média foram eficientes mostrando-se promissores para otimização das atividades de campo.

REFERÊNCIAS

- ALLOUIS, T.; DURRIEU, S.; VEGA, C.; COUTERON, P. Stem Volume and Above-Ground Biomass Estimation of Individual Pine Trees From LiDAR Data: Contribution of Full-Waveform Signals. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 6, p. 924-934, 2013.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEC, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p.711-728, 2013.
- ANDRADE, V. C. L.; KROETZ, E. A.; NICOLA, A.; SOUZA, P. B.; NOHAMA, F. K.; LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S. Amostragem e agrupamento de dados de relação hipsométrica em inventários florestais de Cerrado Tocantinense. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 83, p. 228-238, 2015.
- ANDRADE, V. C. L.; SCHMITT, T.; CARVALHO, S. P. C. E.; BINOTTI, D. H. B.; CALEGARIO, N. Modelos regionais de relação hipsométrica avaliados para plantio clonal de eucalipto em área de Cerrado. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 2, e67995, 2023.
- BOUVIER, M.; DURRIEU, S.; FOURNIER, R. A.; RENAUD, J. P. Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 322-334, 2015.
- CAO, L.; COOPS, N. C.; INNES, J. L.; SHEPPARD, S. R. J.; FU, L.; RUAN, H.; SHE, G. Estimation of forest biomass dynamics in subtropical forests using multi-temporal airborne LiDAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 178, p. 158-171, 2016.
- CHEN, S.; NIAN, Y.; HE, Z.; CHE, M. Measuring the Tree Height of *Picea Crassifolia* in Alpine Mountain Forests in Northwest China Based on UAV-LiDAR. **Forests**, v. 13, p. 1163, 2022.
- COSENZA, D. N.; VOGEL, J.; BROADBENT, E. N.; SILVA, C. A. Silvicultural Experiment Assessment Using Lidar Data Collected from an Unmanned Aerial Vehicle. **Forest Ecology and Management**, v. 522, p. 120489, 2022.
- COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; HESS, A. F. Modelo de incremento em área basal para árvores de araucária de uma floresta inequiânea. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 83, p. 239, 2015.
- COSTA, M. B. T.; SILVA, C. A.; BROADBENT, E. N.; LEITE, R. V.; MOHAN, M.; LIESENBERG, V.; STODDART, J.; AMARAL, C. H.; ALMEIDA, D. R. A.; ... CLAUBERG, C. Beyond Trees: Mapping Total Aboveground Biomass Density in the Brazilian Savanna Using High-Density UAV-Lidar Data. **Forest Ecology and Management**, v. 491, p. 119155, 2021.
- CRABBÉ, A. H.; CAHY, T.; SOMERS, B.; VERBEKE, L. P.; VAN COILLIE, F. **Tree Density Calculator Software**. Versão 1.5.7. Ghent: Laboratory of Forest Management and

Spatial Information Techniques, 2020. Disponível em:
<https://bitbucket.org/kulreseco/localmaxfilter>. Acesso em: 20 set. 2024.

CROWTHER, T. W.; GLICK, H. B.; COVEY, K. R.; BETTIGOLE, C.; MAYNARD, D. S.; THOMAS, S. M.; SMITH, J. R.; HINTLER, G.; DUGUID, M. C.; ... BRADFORD, M. A. Mapping Tree Density at a Global Scale. **Nature**, v. 525, p. 201-205, 2015.

DALLA CORTE, A. P.; REX, F. E.; ALMEIDA, D. R. A.; SANQUETTA, C. R.; SILVA, C.A.; MOURA, M. M.; WILKINSON, B.; ZAMBRANO, A. M. A.; CUNHA NETO, E. M. D.; VERAS, H. F. P. Medição do diâmetro e altura de árvores individuais usando o UAV-Lidar de alta densidade GatorEye em um sistema integrado de cultivo, pecuária e floresta. **Remote Sensing**, v. 12, p. 863, 2020.

DENG, S.; KATOH, M.; YU, X.; HYYPPÄ, J.; GAO, T. Comparison of Tree Species Classifications at the Individual Tree Level by Combining ALS Data and RGB Images Using Different Algorithms. **Remote Sensing**, v. 8, p. 1034, 2016.

FERRAZ FILHO, A. C. **Management of eucalyptus plantations for solid wood production**. 2013. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

FICKO, A. Bayesian Evaluation of Smartphone Applications for Forest Inventories in Small Forest Holdings. **Forests**, v. 11, p. 1148, 2020.

GAO, C.; MIN, A.; ZHANG, W.; LONG, Y.; ZHANG, D.; WU, H.; WU, B.; ZHANG, Z.; XIONG, P. Vegetation Restoration Effectiveness in Mianshan Abandoned Mine, Dongzhi County, China: Considering Habitat Diversity and Critical Drivers. **Forests**, v. 15, p. 2213, 2024.

GEJDOŠ, M.; VÝBOŠŤOK, J.; CHUDÁ, J.; TOMČÍK, D.; LIESKOVSKÝ, M.; SKLADAN, M.; MASNÝ, M.; GERGEL, T. Assessment of new techniques for measuring volume in large wood chip piles. **Forests**, v. 15, p. 1747, 2024.

GHASEMI, M.; LATIFI, H.; POURHASHEMI, M. A Novel Method for Detecting and Delineating Coppice Trees in UAV Images to Monitor Tree Decline. **Remote Sensing**, v. 14, p. 5910, 2022.

HYYPPÄ, E.; HYYPPÄ, J.; HAKALA, T.; KUKKO, A.; WULDER, M.A.; WHITE, J.C.; PYÖRÄLÄ, J.; YU, X.; WANG, Y.; ... KARTNEN, H. Under-canopy UAV laser scanning for accurate forest field measurements. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 164, p. 41-60, 2020.

IIZUKA, K.; HAYAKAWA, Y. S.; OGURA, T.; NAKATA, Y.; KOSUGI, Y.; YONEHARA, T. Integration of multi-sensor data to estimate plot-level stem volume using machine learning algorithms-case study of evergreen conifer planted forests in Japan. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1649, 2020.

KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J.; YU, X.; VASTARANTA, M.; HYYPPÄ, H.; KUKKO, A.; HOLOPAINEN, M.; HEIPKE, C.; HIRSCHMUGL, M.; ... WU, J. C. An International Comparison of Individual Tree Detection and Extraction Using Airborne Laser Scanning. **Remote Sensing**, v. 4, p. 950-974. 2012.

KOVÁČSOVÁ, P.; ANTALOVÁ, M. Precision Silviculture – Definition and Technologies. **Šumarski list**, v. 134, n. 11, p. 603-611, 2010.

KRAUSE, S.; SANDERS, T. G. M.; MUND, J. P.; GREVE, K. UAV-Based Photogrammetric Tree Height Measurement for Intensive Forest Monitoring. **Remote Sensing**, v. 11, p. 758, 2019.

MATASCI, G.; HERMOSILLA, T.; WULDER, M. A.; WHITE, J. C.; COOPS, N. C.; HOBART, G. W.; ZALD, H. S. J. Large-area mapping of Canadian boreal forest cover, height, biomass and other structural attributes using Landsat composites and lidar plots. **Remote Sensing of Environment**, v. 209, p. 90-106, 2018.

MENDIBURU, F. **Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research**. R package version 1.3-7. 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/nlme/index.html>. Acesso em: 21 out. 2024.

MLENEK, D. C.; DALLA CORTE, A. P. SANTOS, D. R. Revisão sistemática da literatura sobre detecção de árvores utilizando dados de sensoriamento remoto. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 71-79. 2020.

OLIVEIRA, L. T. D.; FERREIRA, M. Z.; CARVALHO, L. M. T.; FERRAZ FILHO, A. C.; OLIVEIRA, T. C. A.; SILVEIRA, E. M. O.; JUNIOR, F. W. A. Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 692-700, 2014.

OLIVEIRA, R. D. S.; RIBEIRO, C. V. G.; NERES, D. F.; PORTO, A. C. M.; RIBEIRO, D.; SIQUEIRA, L. D.; ZAUZA, E. A. V.; COELHO, A. S. G.; REIS, C. A. F.; ALFENAS, A. C.; NOVAES, E. Evaluation of genetic parameters and clonal selection of Eucalyptus in the Cerrado region. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, n. 3, e29982031, 2020.

PARK, J. Y.; MULLER-LANDAU, H. C.; LICHSTEIN, J. W.; RIFAI, S. W.; DANDOIS, J. P.; BOHLMAN, S. A Quantifying leaf phenology of individual trees and species in a tropical forest using unmanned aerial vehicle (UAV) images. **Remote Sensing**, v. 11, n. 13, p. 1534, 2019.

PINHEIRO, J. C.; BATES D. M. **R Core Team. lme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models**. R package version 3.1-166, 2016. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/nlme/index.html>. Acesso em: 21 out. 2024.

PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. **Mixed-Effects Models in S and S-PLUS**. New York: Springer, 2000. 527 p.

PULITI, S.; DASH, J. P.; WATT, M. S.; BREIDENBACH, J.; PEARSE, G. D. A comparison of UAV laser scanning, photogrammetry and airborne laser scanning for precision inventory of small-forest properties. **Forestry**, v. 93, p. 150-162, 2020.

PULITI, S.; ENE, L. T.; GOBAKKEN, T.; NESSET, E. Use of Partial-Coverage UAV Data in Sampling for Large Scale Forest Inventories. **Remote Sensing of Environment**, v. 194, p. 115-126, 2017.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 21 out. 2024.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; MELLO, J. M.; FERREIRA, M. Z.; LISBOA, P. M. M.; SCOLFORO, J. R. S. Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v. 16, n. 1, p. 22-31, 2010.

SÁ, C. A. S.; MOURA, M. S. B.; GALVÍCIO, J. D.; MIRANDA, R. Q.; SILVA, M. J.; SANTOS, C. V. B. Detecção semiautomática de árvores em pomar de mangueira irrigada a partir de imagens obtidas por drone. **Brazilian Journal of Irrigation & Drainage**, v. 26, p. 507, 2021.

SILVA, N. G. V.; ROCHA, K. J.; SILVA, L. C. A.; SILVA, G. N. Volumetric Quantification of *Eucalyptus* Sp. Stands through Aerial Photographs Obtained by Rpas. **Floresta**, v. 54, e-87270, 2024.

SOARES, C. P. B.; DE PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Amostragem sistemática em Dendrometria e Inventário Florestal**. 2 ed. Minas Gerais. 2011. pp. 197-203.

SOUZA, O. M. M.; OLIVEIRA, B. G. D.; COLLICCHIO, E.; SILVA, J. L. C.; SERRA, J. C. V. Agroclimatic aptitude of *Eucalyptus urophylla* for the Matopiba region. **Ciência Florestal**, v. 34, n. 2, e70219. 2024,

STOLLE, L.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; HENTZ, Â.M. K.; EISFELD, R. D. L. Predicting Stand Volume by Number of Trees Automatically Detected in UAV Images: An Alternative Method for Forest Inventory. **Forests**, v. 12, p. 1508, 2021.

THIEL, C.; SCHMULLIUS, C. Comparison of UAV photograph-based and airborne lidar-based point clouds over forest from a forestry application perspective. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8, p. 2411-2426, 2017.

VALJAREVIĆ, A.; DJEKIĆ, T.; STEVANOVIĆ, V.; IVANOVIĆ, R.; JANDZIKOVIĆ, B. GIS Numerical and Remote Sensing Analyses of Forest Changes in the Toplica Region for the Period of 1953–2013. **Applied Geography**, v. 92, p. 131-139, 2018.

VELASCO-BAUTISTA, E.; GONZALEZ-HERNANDEZ, A.; ROMERO-SANCHEZ, M. E.; GUERRA-DE LA CRUZ, V.; PEREZ-MIRANDA, R. Does It Matter Whether to Use Circular or Square Plots in Forest Inventories? A Multivariate Comparison. **Forests**, v. 15, p. 1847, 2024.

VERAS, H. F. P.; NETO, E. M. C.; BRASIL, I. D. S.; MADI, J. P. S.; ARAÚJO, E. C. G.; CAMAÑO, J. D. Z.; FIGUEIREDO, E. O.; PAPAI, D. A.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de volume de árvores com base no mapeamento de copas por imagens de UAV na Floresta Amazônica. **Arquivos Eletrônicos Científicos**, v. 16, n. 7, p. 1-11, 2023.

WALLACE, L.; LUCIEER, A.; MALENOVSKÝ, Z.; TURNER, D.; VOPĚNKA, P. Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. **Forests**, v. 7, p. 62, 2016.

ZHOU, L.; MENG, R.; TAN, Y.; LV, Z.; ZHAO, Y.; XU, B.; ZHAO, F. Comparison of UAV-Based LiDAR and Digital Aerial Photogrammetry for Measuring Crown-Level Canopy Height in the Urban Environment. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 69, p. 127489, 2022.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

O presente estudo demonstrou que o uso de aeronaves remotamente pilotadas (ARP) pode ser uma ferramenta eficaz para otimizar a coleta de dados em inventários florestais, especialmente em plantios de *Eucalyptus* sp. A utilização de geotecnologias, como o aerolevanteamento, permitiu a obtenção de informações dendrométricas, como altura, diâmetro e número de árvores, com resultados comparáveis aos métodos tradicionais de inventário florestal. A modelagem mista mostrou-se particularmente eficiente na estimativa do diâmetro, com erros residuais menores em comparação com modelos lineares, destacando a importância de considerar a variabilidade entre parcelas na análise de dados florestais.

A contagem visual de árvores, realizada por meio de ortomosaicos, apresentou resultados satisfatórios, com valores próximos aos obtidos no inventário tradicional. No entanto, a contagem automatizada utilizando o plugin *Tree Density Calculator* não foi eficiente, subestimando o número de árvores. Isso sugere a necessidade de explorar outras ferramentas ou aprimorar os algoritmos de detecção automática para melhorar a precisão na contagem de árvores em plantios florestais.

A estimativa do volume de madeira foi mais precisa quando utilizada a área basal e a altura média obtida por meio da contagem visual, reforçando a importância de combinar diferentes variáveis dendrométricas para obter resultados mais confiáveis. Os métodos que utilizaram a área basal fixa e a altura média também se mostraram promissores, indicando que é possível reduzir a dependência de medições diretas em campo, otimizando o processo de inventário florestal.