

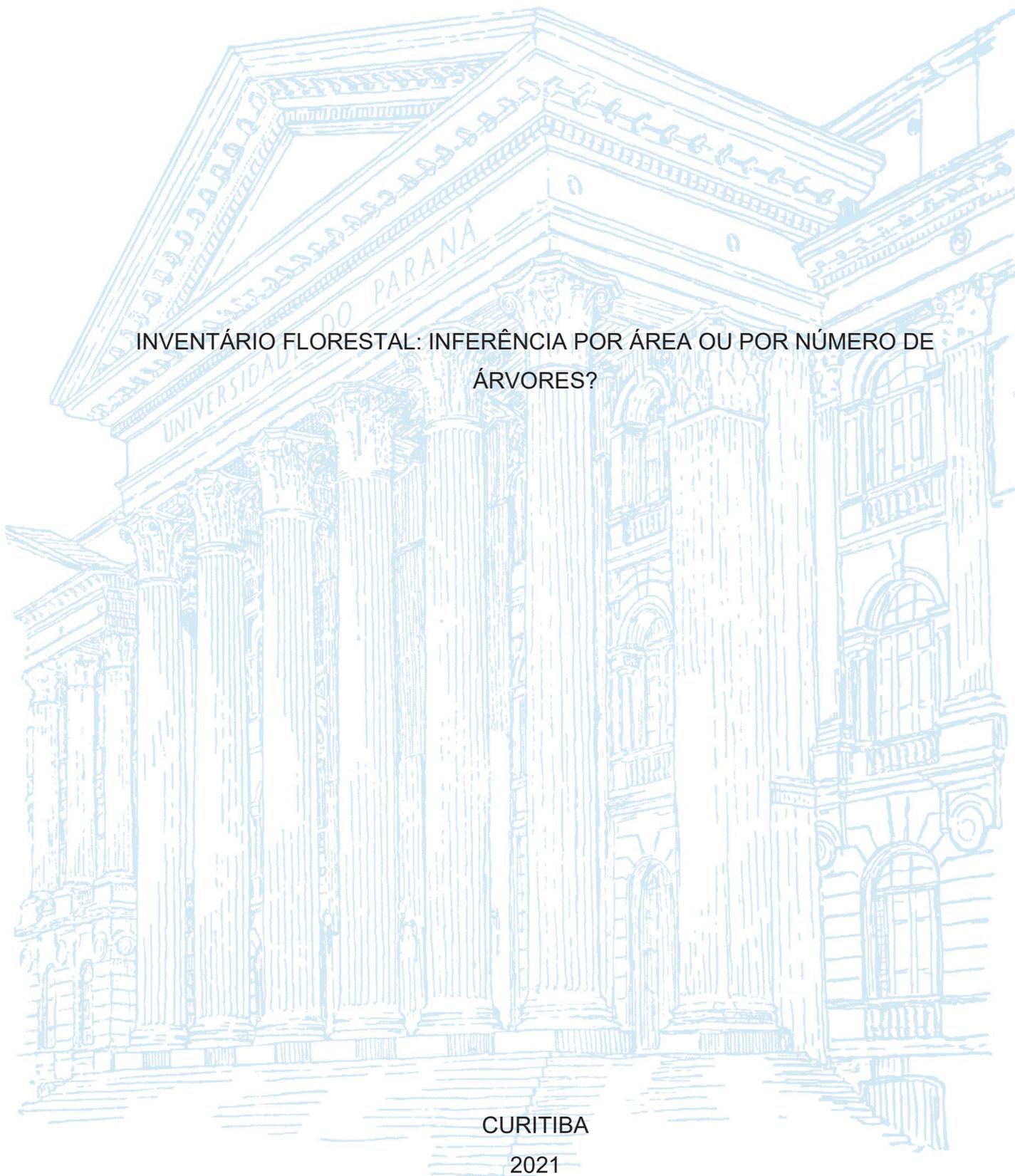
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LORENA STOLLE

INVENTÁRIO FLORESTAL: INFERÊNCIA POR ÁREA OU POR NÚMERO DE  
ÁRVORES?

CURITIBA

2021



LORENA STOLLE

INVENTÁRIO FLORESTAL: INFERÊNCIA POR ÁREA OU POR NÚMERO DE  
ÁRVORES?

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciências Florestais, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Agrárias, da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Dalla Corte  
Coorientadores: Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta  
Prof. Dr. Alexandre Behling

CURITIBA

2021

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

Stolle, Lorena

Inventário florestal: inferência por área ou por número de árvores? /  
Lorena Stolle. – Curitiba, 2021.  
98 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Dalla Corte  
Coorientadores: Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta  
Prof. Dr. Alexandre Behling

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de  
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 19/08/2021. Área de  
concentração: Manejo Florestal.

1. Levantamentos florestais. 2. Árvores - Medição. 3. Árvores  
- Amostragem. 4. Dendrometria. 5. Teses. I. Dalla Corte, Ana Paula.  
II. Sanquetta, Carlos Roberto. III. Behling, Alexandre. IV. Universidade  
Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.524.6



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

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **LORENA STOLLE** intitulada: **INVENTÁRIO FLORESTAL: INFERÊNCIA POR ÁREA OU POR NÚMERO DE ÁRVORES?**, sob orientação da Profa. Dra. ANA PAULA DALLA CORTE, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

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

CURITIBA, 19 de Agosto de 2021.

Assinatura Eletrônica  
19/08/2021 14:34:35.0  
ANA PAULA DALLA CORTE  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
19/08/2021 14:10:15.0  
ALLAN LIBANIO PELISSARI  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
23/08/2021 13:13:58.0  
ANDREA NOGUEIRA DIAS  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE)

Assinatura Eletrônica  
20/08/2021 09:58:28.0  
LUCIANO FARINHA WATZLAWICK  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE)

Assinatura Eletrônica  
24/08/2021 17:58:18.0  
PYRAMON ACCIOLY  
Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ)

Aos meus pais: Raquel e Marco.  
Para minhas avós, Hilda e Dirce (*in memoriam*).  
Com amor, para: Alice e Alexandre.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida e saúde, e aos espíritos de luz, pelo amparo nos momentos em que pensei não ser possível concluir este trabalho, mostrando-me que, com fé, tudo é possível.

Aos meus pais, Raquel e Marco, por todo apoio incondicional, comidas quentinhas, abraços apertados, cafés filosóficos e, o mais importante: cuidar com tanto amor e carinho de quem mais importa para nós. Sem a ajuda de vocês, eu não teria conseguido. Muito obrigada!!!!

Alexandre, meu esposo, não há palavras que possam descrever tudo o que nossa união representa. Você se mostrou o melhor companheiro que eu poderia ter. Um pai amoroso, brincalhão e que, nos momentos em que eu não tinha rumo, foi a minha bússola. Muito obrigada!!!!

Alice, minha filha, hoje você não tem ideia do que tudo isso vai representar na nossa vida, mas com certeza os ensinamentos que tive irão influenciar para sempre o nosso futuro. Só posso te agradecer, pois você foi minha inspiração e meu combustível... nasceu entre as fases do processo seletivo do doutorado e participou intensamente destes quatro anos. Você representa a luz e a alegria em minha vida. Seu sorriso é meu maior motivo de felicidade. Te amo!!!!

Aos meus sogros, Beti e Gerhard, sou muito grata por todo apoio e amor dedicados a nós, nunca irei me esquecer de cada palavra de incentivo. Foram meses intensos regados com café, cuca e alegria. Obrigada por cuidar da Alice nos momentos em que tive que me ausentar. Muito obrigada!!!!

Aos meus amigos do CPCS: Déborah, Meire, Giovana, Tiago, Ana Paula e Sebastião, por todo apoio recebido. Aos amigos da UFPR: Diellen, Verônica, Aline, lasmin e Rafael, por compartilhar as alegrias, conquistas e apoio nos momentos difíceis. Às minhas grandes amigas de toda a vida: Rafaela, Kelly e Helena, minhas psicólogas sempre de prontidão!!!! Ao meu grande amigo Itamar, com seus sábios conselhos.

A minha amiga Rozane de Loyola Eisfeld. Este trabalho surgiu da nossa conversa de cafezinho. Obrigada por me instigar a querer descobrir a resposta daquela pergunta que você me fez!!!!

À UFMS, por permitir meu afastamento temporário para a realização do doutorado. Aos diretores do campus de Chapadão do Sul, Fábio Henrique Rojo Baio e Kleber Gastaldi, e a servidora Janaína J. Oliveira, por todo auxílio administrativo.

Ao programa de Pós-graduação em Eng. Florestal da UFPR e aos funcionários Reinaldo e David, sempre solícitos. Em especial, agradeço aos professores Henrique Soares Koehler e Julio Eduardo Arce, pelas conversas descontraídas e renovadoras.

A prof. Graciela Bolzón de Muniz, por ajudar em um momento muito difícil. Suas palavras me deram muito conforto e esperança. O melhor cafezinho que já tomei!!! Obrigada!!!

A minha orientadora prof. Ana Paula Dalla Corte. Sua paixão e dedicação ao trabalho é muito motivadora. Obrigada pelos conselhos, por me entender nos momentos difíceis e por todo apoio nestes anos.

Ao prof. Carlos Roberto Sanquetta, por toda a orientação, ideias relevantes e sugestões para a melhoria deste trabalho.

Ao prof. Alexandre Behling, por todas as horas dedicadas a me ensinar e por todo esforço em tornar este trabalho melhor. Muito obrigada!!!!

À Klabin, por me dar a oportunidade de trabalhar com os dados deste estudo. Em especial, agradeço aos engenheiros Yuri Accioly, Clewerson Frederico Scheraiber e Emerson Roberto Schoeninger.

A Ângela Maria Klein Hentz, por compartilhar seu conhecimento e por me dar todo suporte durante a análise dos dados. Sempre muito atenciosa. Muito obrigada!!!!!!

À Capes, pela bolsa de estudos parcial.

“Você poderia me dizer, por favor, que caminho devo seguir a partir daqui? ”

“Isso depende muito de onde você quer chegar”, disse o Gato.

“Eu não me importo muito”, disse Alice.

“Então, não importa qual caminho você escolher”, disse o Gato.

(Alice no País das Maravilhas, Lewis Carroll, 2000, p.89)

## RESUMO

O volume total de uma população florestal é estimado por meio de técnicas de amostragem utilizadas nos inventários florestais, em que o volume estimado na área da unidade amostral é extrapolado para a área do talhão. Neste trabalho, o objetivo foi avaliar e comparar dois métodos para a estimativa do volume total em florestas plantadas: 1) método tradicional de inventários florestais (inferência por área); e 2) método de árvore individual, no qual a estimativa é realizada pelo produto do volume médio individual (vmi) pelo número de árvores detectadas remotamente nos talhões (inferência por indivíduo). A pesquisa foi conduzida em três talhões florestais: *Pinus taeda* (16 anos), *Pinus taeda* (7 anos) e *Eucalyptus urograndis* (5 anos). Em cada talhão, foi realizado o censo para as variáveis: diâmetro a 1,30 m e altura total. Os volumes das árvores foram estimados pelo modelo de Schumacher-Hall, ao passo que a soma dos seus volumes individuais foi considerada como o volume total paramétrico. Em seguida, foi executada a etapa da estimativa do volume total da população. No método 1 (por área), foram analisados dois procedimentos de amostragem (aleatória simples e sistemática). No método 2 (por número de árvores), o vmi utilizado foi obtido de duas maneiras: (a) média do volume individual de cem árvores selecionadas aleatoriamente, reamostradas pelo método *Bootstrap* e, (b) pela amostragem sistemática. O número de árvores (N) foi obtido por um algoritmo de contagem automática aplicado em imagens obtidas por -uma aeronave remotamente pilotada (ARP). Adicionalmente, no método 2, foram simuladas diferentes taxas de detecção de indivíduos (90% a 110%), enquanto para o método 1, foram simuladas diferenças ( $\pm 10\%$ ) na área do talhão. Os resultados dos dois métodos de estimativa de volume total da população foram comparados ao volume total paramétrico pela diferença absoluta, diferença relativa e pela abrangência dos intervalos de confiança obtidos por cada método. O método 1, tradicional de inventário florestal (inferência por área), apresentou as menores diferenças em relação ao volume do censo. O processo de amostragem sistemático produziu os melhores resultados para os talhões 1 e 3, enquanto o processo aleatório foi o melhor para o talhão 1. O método 2 (abordagem por número de árvores) apresentou o volume total paramétrico dentro do intervalo de confiança (95% de probabilidade) ao se utilizar o vmi da amostragem aleatória de cem árvores e o número de árvores detectadas automaticamente, com diferença relativa de no máximo 4,7%. A variação em área e em número de árvores permitiu verificar que o acerto em 100% da área ou em 100% da do número de árvores não garante o menor erro de estimativa para o total, pois ela também depende da acurácia da estimativa do volume médio individual. O método 2 (abordagem por número de árvores) pode ser utilizado como uma alternativa ao inventário florestal tradicional.

**Palavras-chaves:** Censo. Volume individual. RPA. VANT.

## ABSTRACT

The total volume of a forest population is estimated through sampling techniques used in forest inventories, in which the estimated volume in the sample unit area is extrapolated to the stand area. The aim of this work was to evaluate and compare two methods for estimating the total volume in planted forests: 1) traditional method of forest inventories (inference by area); and 2) individual tree method, in which the estimate is performed by the product of the mean individual volume by the number of trees remotely detected in the stands (inference by number of trees). The study was conducted in three forest stands: *Pinus taeda* (16 years of age), *Pinus taeda* (7 years of age) and *Eucalyptus urograndis* (5 years of age). A census was carried out in each stand for the variables: diameter at 1.30 m (d) and total height. Tree volumes were estimated by the Schumacher-Hall's model and the sum of their individual volumes was considered as the total parametric volume. Then, the step for estimating the total population volume was performed. Thus, two sampling procedures (simple random and systematic) were analyzed in method 1 (by area). Next, the mean individual volume used in method 2 (number of trees) was obtained in two ways: (a) mean individual volume of one hundred randomly selected trees, resampled by the Bootstrap method; and (b) by systematic sampling. The number of trees (N) was obtained by an automatic counting algorithm applied to images obtained by RPA. Additionally, different detection rates of individuals (90% to 110%) were simulated in method 2, while differences ( $\pm 10\%$ ) in the stand area were simulated for method 1. The results of the two methods for estimating total population volume were compared to the total parametric volume by the absolute difference, relative difference and by the amplitude of the 95% confidence intervals obtained by each method. Method 1, traditional forest inventory (inference by area), showed the smallest differences in relation to the volume of the census. The systematic sampling process produced the best results for plots 1 and 3, and the random process for plot 1. Method 2 (number of trees) presented the total parametric volume included in the confidence interval when using the mean individual volume of random sampling of one hundred trees and the number of trees automatically detected, with a relative difference of at most 4.7%. The variation in area and number of trees enabled us to verify that the correctness in 100% of the area or in 100% of the number of trees does not guarantee the smallest estimate error for the total, as it depends on the accuracy of the estimate of the average volume individual. Method 2 (number of trees) can be used as an alternative to the traditional forest inventory.

**Keywords:** Census. Individual volume. RPA. UAV.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	28
FIGURA 2 – FLUXOGRAMA METODOLÓGICO .....	31
FIGURA 3 - LOCALIZAÇÃO DAS UNIDADES AMOSTRAIS NO PROCESSO DE AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	43
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS DOS TRÊS TALHÕES, SITUADO NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, NO ESTADO DO PARANÁ.....	49
FIGURA 5 – BOX-PLOT DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS UTILIZADAS PARA O AJUSTE (A) E VALIDAÇÃO (B) PARA OS TALHÕES 1, 2 E 3, NA ÁREA DE ESTUDO.....	51
FIGURA 6 – GRÁFICO QUANTIL-QUANTIL DOS RESÍDUOS DO AJUSTE DO MODELO DE SCHUMACHER-HALL PARA OS TALHÕES 1, 2 E 3 DA ÁREA DE ESTUDO.....	54
FIGURA 7 – DISPERSÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS X VOLUME ESTIMADO DO AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE <i>P.taeda</i> E <i>E. urograndis</i> .....	56
FIGURA 8 – DISPERSÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS X DIÂMETRO A 1,30m DO AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE <i>P.taeda</i> E <i>E. urograndis</i> .....	57
FIGURA 9 – VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO X VOLUME INDIVIDUAL OBSERVADO DO AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE <i>P.taeda</i> E <i>E. urograndis</i> .....	58
FIGURA 10 – DISPERSÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS X VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO (A) E DISPERSÃO DO VOLUME ESTIMADO X VOLUME OBSERVADO (B) DA VALIDAÇÃO DOS DADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE <i>P.taeda</i> .....	59
FIGURA 11 – BOX-PLOT DO VOLUME MÉDIO INDIVIDUAL ESTIMADO DOS DADOS DE CUBAGEM (AJUSTE) PELOS TRÊS MÉTODOS TESTADOS PARA OS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS.....	62

FIGURA 12 – BOX-PLOT DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO PARA OS DADOS DO CENSO NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO .....	64
FIGURA 13 – INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA AS SIMULAÇÕES DO INVENTÁRIO FLORESTAL TRADICIONAL PELO PROCESSO ALEATÓRIO SIMPLES (MÉTODO 1) NOS TRÊS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO .....	65
FIGURA 14 – DIFERENÇA RELATIVA (%) PARA AS SIMULAÇÕES DO INVENTÁRIO FLORESTAL POR AMOSTRAGEM ALEATÓRIA SIMPLES NOS TRÊS TALHÕES, DA ÁREA DE ESTUDO .....	66
FIGURA 15 – ESPACIALIZAÇÃO DO VOLUME ESTIMADO POR HECTARE NOS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO .....	66
FIGURA 16 – ERRO RELATIVO AMOSTRAL (%) DO VOLUME POR HECTARE PARA AS SIMULAÇÕES DO INVENTÁRIO FLORESTAL TRADICIONAL PELO PROCESSO ALEATÓRIO SIMPLES (MÉTODO 1) NOS TRÊS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO.....	67
FIGURA 17 – BOX-PLOT DO VOLUME MÉDIO POR HECTARE ESTIMADO NAS SIMULAÇÕES DO INVENTÁRIO FLORESTAL PELO PROCESSO DE AMOSTRAGEM ALEATÓRIA SIMPLES NOS TRÊS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO.....	68
FIGURA 18 – UNIDADES AMOSTRAIS SISTEMÁTICAS VERSUS MAPA IDW DO VOLUME POR HECTARE NOS TRÊS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO .....	70
FIGURA 19 – VOLUME TOTAL ESTIMADO (VMI 100 ÁRVORES) PELA SIMULAÇÃO DE DIFERENTES TAXAS DE DETECÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES NOS TRÊS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO.....	74
FIGURA 20 - VOLUME TOTAL ESTIMADO (VMI AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA) PELA SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO EM ÁREA (A) E DE DIFERENTES TAXAS DE DETECÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES (B) NO TALHÃO 1 .....	78
FIGURA 21 – VOLUME TOTAL ESTIMADO (VMI AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA) PELA SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO EM ÁREA (A) E DE DIFERENTES TAXAS DE DETECÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES (B) NO TALHÃO 2 .....	79

FIGURA 22 – VOLUME TOTAL ESTIMADO (VMI AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA)  
PELA SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO EM ÁREA (A) E DE DIFERENTES  
TAXAS DE DETECÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES (B) NO TALHÃO  
3 .....80

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS TALHÕES UTILIZADOS COMO ÁREA DE ESTUDO, SITUADO NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, NO ESTADO DO PARANÁ.....	29
TABELA 2 - NÚMERO DE ÁRVORES POR VARIÁVEIS QUALITATIVAS DE TRÊS TALHÕES FLORESTAIS, SITUADO NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, NO ESTADO DO PARANÁ.....	30
TABELA 3 – FREQUÊNCIA POR CLASSES DE DIÂMETRO DAS ÁRVORES CUBADAS (AJUSTE E VALIDAÇÃO) PARA CADA TALHÃO, MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, NO ESTADO DO PARANÁ.....	34
TABELA 4 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS QUANTITATIVAS OBTIDAS POR CENSO DE TRÊS TALHÕES FLORESTAIS, SITUADO NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, NO ESTADO DO PARANÁ.....	49
TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS ÁRVORES CUBADAS UTILIZADAS NO AJUSTE E VALIDAÇÃO PARA OS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO, SITUADO NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, NO ESTADO DO PARANÁ.....	50
TABELA 6 – ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO PARA O FATOR DE FORMA MÉDIO E PARA O FATOR DE FORMA PELO ESTIMADOR DE RAZÃO OBTIDO POR CUBAGEM.....	52
TABELA 7 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS E COEFICIENTES DE AJUSTE DO MODELO DE SCHUMACHER-HALL E SEUS RESPECTIVOS INTERVALOS DE CONFIANÇA.....	53
TABELA 8 – RESULTADOS DOS TESTES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DOS RESÍDUOS DO AJUSTE DO MODELO DE SCHUMACHER-HALL NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	53
TABELA 9 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS VARIÁVEIS DO MODELO AJUSTADO DE SCHUMACHER-HALL PARA OS TRÊS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO.....	54
TABELA 10 – ESTATÍSTICAS DE ACURÁCIA DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO (AJUSTE) PELOS TRÊS TRATAMENTOS TESTADOS, NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	55

TABELA 11 – ESTATÍSTICAS DE ACURÁCIA DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO (VALIDAÇÃO) DE <i>P. taeda</i> , PELOS TRÊS MÉTODOS TESTADOS, NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO .....	56
TABELA 12 – VALORES DE QUI-QUADRADO DOS TRÊS TRATAMENTOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE <i>P. taeda</i> .....	60
TABELA 13 – TESTE DE BARTLETT E TESTE F DOS TRÊS TRATAMENTOS AVALIADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME MÉDIO INDIVIDUAL DE <i>P. taeda</i> E <i>E. urograndis</i> .....	61
TABELA 14 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO PARA AS ÁRVORES DO CENSO E VOLUME TOTAL DA POPULAÇÃO, PARA OS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO ...	63
TABELA 15 – ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO DAS MÉDIAS <i>BOOTSTRAP</i> DO VOLUME POR HECTARE DAS SIMULAÇÕES DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM ALEATÓRIO SIMPLES PARA OS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO .....	68
TABELA 16 – INTERVALOS DE CONFIANÇA E ACURÁCIA DO VOLUME TOTAL DA POPULAÇÃO ESTIMADO PELA MÉDIA <i>BOOTSTRAP</i> DAS SIMULAÇÕES DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM ALEATÓRIO SIMPLES PARA OS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO .....	69
TABELA 17 – ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO DO VOLUME POR HECTARE NO INVENTÁRIO FLORESTAL PELO PROCESSO DE AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA PARA OS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO .....	69
TABELA 18 – INTERVALOS DE CONFIANÇA E ACURÁCIA DO VOLUME TOTAL DA POPULAÇÃO ESTIMADO PELO PROCESSO DE AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA PARA OS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO .....	70
TABELA 19 – NÚMERO DE ÁRVORES (N) DETECTADAS AUTOMATICAMENTE PELO ALGORITMO <i>TREEDTECT</i> NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO .....	72
TABELA 20 – INTERVALOS DE CONFIANÇA E ACURÁCIA DO VOLUME TOTAL ESTIMADO PELO VOLUME MÉDIO INDIVIDUAL AMOSTRAL DE 100 ÁRVORES E PELO NÚMERO DE ÁRVORES DETECTADAS PELO	

ALGORITMO TREEDETECT, NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	73
TABELA 21 – INTERVALOS DE CONFIANÇA E ACURÁCIA PARA O VOLUME TOTAL ESTIMADO PELO VOLUME MÉDIO INDIVIDUAL DA AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA E PELO NÚMERO DE ÁRVORES DETECTADAS PELO ALGORITMO TREEDETECT, NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	75
TABELA 22 - RESUMO DOS RESULTADOS DA ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL DA POPULAÇÃO PELOS MÉTODOS DE INFERÊNCIA POR ÁREA E POR INDIVÍDUO, NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO .....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARP – aeronave remotamente pilotada

CAP – circunferência da árvore a 1,30 m de altura do solo

CHM – *canopy height model* – modelo de altura do dossel

IMU - unidades de medição de inércia

iOT - *internet of things*

GNSS - sistema global de navegação por satélite

LiDAR - *light detection and ranging*

MAE - erro médio absoluto

MDT - modelo digital do terreno

MDS - modelo digital de superfície

MSE - erro médio quadrático

NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index* (índice de vegetação normalizado)

NIR - *near infrared* (infravermelho próximo)

RGB - *Red, Green, Blue* (faixa visível do espectro eletromagnético)

RMSE - raiz quadrada do erro médio quadrático

RPA - *remotely piloted aircraft* (aeronave remotamente pilotada)

SAR - *synthetic aperture radar* (radar de abertura sintética)

UAV - *unmanned aerial vehicle* (veículos aéreos não tripulados)

VANT - veículo aéreo não tripulado

VANTs - veículos aéreos não tripulados

VIF – *variance inflation factor*

vmi - volume médio individual

d - diâmetro a 1,30 m de altura em cm

h - altura total em metros

v - volume individual em m<sup>3</sup>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS .....	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos .....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>16</b>
2.1	ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL.....	16
2.2	INVENTÁRIO FLORESTAL APOIADO POR SENSORIAMENTO REMOTO .....	18
2.3	DETECÇÃO REMOTA DO NÚMERO DE ÁRVORES .....	22
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO .....	28
3.2	RESUMO: FLUXOGRAMA METODOLÓGICO .....	30
3.3	INVENTÁRIO FLORESTAL – CENSO .....	32
3.4	ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL.....	32
3.4.1	Fator de forma médio .....	34
3.4.2	Estimador por razão .....	35
3.4.3	Modelo de Schumacher-Hall .....	37
3.4.4	Escolha do tratamento para a estimativa do volume individual .....	39
3.4.5	Volume individual das árvores do censo e volume total paramétrico .....	41
3.5	ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL DA POPULAÇÃO .....	41
3.5.1	Método 1: Inferência por área.....	41
3.5.1.1	Aleatória simples .....	42
3.5.1.2	Sistemática .....	43
3.5.1.3	Avaliação das estimativas pelo método de inferência por área .....	44
3.5.2	Método 2: Inferência por indivíduo .....	45
3.5.2.1	Avaliação das estimativas pelo método de inferência por indivíduo .....	47
3.5.3	Comparação entre os métodos de estimativa do volume total da população 48	
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS PLANTAÇÕES FLORESTAIS - CENSO .....	48
4.2	ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL.....	50
4.2.1	Análise dos tratamentos para a estimativa do volume individual.....	52

4.2.2	Escolha do tratamento para a estimativa do volume individual .....	55
4.2.3	Volume individual das árvores do censo e volume total da população .....	62
4.3	ESTIMATIVA DO TOTAL DA POPULAÇÃO – MÉTODO 1.....	64
4.3.1	Processo de amostragem aleatória simples .....	64
4.3.2	Processo de amostragem sistemática .....	69
4.3.3	Aspectos gerais da estimativa do volume total pelo método 1 .....	71
4.4	ESTIMATIVA DO TOTAL DA POPULAÇÃO – MÉTODO 2.....	71
4.5	INFERÊNCIA POR ÁREA OU POR NÚMERO DE ÁRVORES? .....	76
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>84</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As florestas plantadas ocupam cerca de 294 milhões de hectares ou 7% da área total mundial (FAO, 2020). A matéria-prima originada dessas plantações é considerada uma alternativa sustentável para a demanda mundial de produtos de madeira (NEPAL et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2018), contribuindo, também, para a redução do desmatamento de florestas nativas (BUONGIORNO; ZHU, 2014; MARTINS et al., 2020; WARING et al., 2020). Além disso, as florestas plantadas apresentam potencial para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (PAWSON et al., 2013), manutenção da biodiversidade e sequestro do carbono (BEETS et al., 2012; GOGOI et al., 2021).

No Brasil, as plantações de pinus e eucalipto são formadas por extensas áreas manejadas por empresas florestais (COUTINHO MENEGUZZI et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2018), às quais necessitam de informações confiáveis da sua produção para o planejamento operacional de suas atividades (GREEN et al., 2020). Assim, a estimativa de parâmetros de um povoamento florestal é obtida pelos inventários florestais, que são realizados por métodos e processos de amostragem e inferência estatística (FEKETY et al., 2015; GREEN et al., 2020; NÆSSET, 2004; PANAGIOTIDIS et al., 2021; WHITE et al., 2016).

Devido a grande extensão das áreas florestais e o elevado número de unidades amostrais visitadas anualmente, o inventário florestal caracteriza-se como uma atividade complexa, de grande escala (COUTINHO MENEGUZZI et al., 2020; FEKETY et al., 2015) e com um alto custo operacional (MATURBONGS et al., 2019; PICOS et al., 2020). Por isso, atualmente, a utilização de sensores remotos, algoritmos de inteligência artificial e IoT (*internet of things*) têm se destacado na área florestal com o objetivo de reduzir custos na aquisição de dados, principalmente no tempo gasto para a medição de variáveis em campo, e também no tempo de processamento dos dados.

Um exemplo é a utilização de dados remotos com LiDAR (*Light Detection and Ranging*), que apresenta potencial para a detecção das árvores, bem como a medição automática da altura, diâmetro e volume (CORTE; REX et al., 2020; CORTE; SOUZA et al., 2020; COSENZA et al., 2018; FEKETY et al., 2015; LEITE et al., 2020; PICOS et al., 2020; SACKOV et al., 2016; SILVA et al., 2016).

Apesar das pesquisas recentes com a utilização de sensores remotos para obtenção de dados ao nível de indivíduo, a realização dos inventários florestais pelo modo tradicional ainda é predominante. No inventário florestal tradicional, as estimativas médias obtidas nas unidades amostrais são extrapoladas para a área total da população, cujo valor é derivado do mapeamento dos limites dos talhões (SANQUETTA et al., 2014). Por esta razão, West (2015) cita que uma estimativa precisa da área florestal é fundamental para que não haja comprometimento das estimativas do inventário florestal e que medições de área inadequadas costumam ser uma de suas maiores fontes de erros. Vários fatores podem contribuir a qualidade do mapeamento das áreas florestais, tais como: falta de controle de qualidade no plantio (espaçamento) e a presença de clareiras devido a danos causados por ventos ou pragas e doenças.

Na literatura, não há muitos relatos sobre o impacto dos erros de levantamento de áreas nos resultados do inventário florestal. Porém, Vatrás e Borges (2014) verificaram que a incorreta delimitação das áreas dos talhões foi responsável pelo aumento do volume em 13,84% em relação ao volume efetivamente colhido.

Ao comparar a área do cadastro de uma empresa florestal com a área obtida pela delimitação dos talhões em imagens obtidas pelo processamento de dados LiDAR aerotransportado, foi encontrada uma diferença de até 1,2 ha a mais na área registrada no cadastro (OLIVEIRA, et al., 2014a). Além disso, o número de árvores detectados automaticamente foi 8,6 vezes mais acurado que o número de árvores obtido pela extrapolação do número de árvores das unidades amostrais para a área total do talhão (OLIVEIRA, et al., 2014a). Por esse motivo, Oliveira et al. (2014a) sugeriram que, se o número de árvores dos povoamentos fosse conhecido, o volume médio das árvores das parcelas poderia ser extrapolado pelo número total de árvores, diminuindo o erro do inventário.

A detecção e contagem do número de árvores em imagens obtidas por sensores remotos embarcados em aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) tem se mostrado promissora (WALLACE et al., 2014; SILVA et al., 2016; COSENZA et al., 2018; HENTZ et al., 2018; MATURBONGS et al., 2019; CORTE; REX et al., 2020; CORTE; SOUZA et al., 2020; EUGENIO et al., 2020; LEITE et al., 2020; MLENEK et al., 2020; PICOS et al. 2020), sendo que a taxa de detecção pode variar de 70% a 114%, dependendo do tipo e das características do sensor utilizado, dos métodos e algoritmos de detecção, da idade e espécie, espaçamento e condições de manejo.

Desta forma, considerando a perspectiva de se ter a contagem automática do número de árvores, formulou-se a seguinte hipótese neste estudo: é possível obter estimativas satisfatórias (erro amostral máximo admitido de 10%) do volume total de uma população florestal por meio do produto do número de árvores detectadas remotamente pelo volume médio individual do povoamento?

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar dois métodos para a estimativa do volume total em florestas plantadas, sendo: a) método tradicional de inventários florestais (inferência por área) e b) por árvore, em que a estimativa é obtida pelo produto do volume médio individual pelo número de árvores detectadas remotamente na população (inferência por indivíduo).

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) Testar diferentes procedimentos para estimativa do volume médio individual e definir o melhor para este estudo;
- b) Comparar os dados paramétricos de volume total com os métodos de estimativas por amostragem tradicional do inventário florestal (área) e pelo número de árvores da população (indivíduo);
- c) Avaliar a acurácia da estimativa do volume total ao utilizar número de árvores detectadas remotamente em imagens obtidas por RPA;
- d) Verificar quanto a variação em área do talhão e em número de indivíduos detectados automaticamente influenciaram na determinação do volume total da população.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL

O manejo sustentável dos recursos florestais requer uma grande quantidade de informações, especialmente quando o objetivo é a produção de madeira para fins comerciais em que a estimativa do volume e de crescimento são essenciais (NURUDEEN et al., 2014).

O volume de uma árvore não é uma medida direta, de fácil mensuração, sendo necessária a sua derrubada para realizar medições ao longo do fuste e obter o seu volume (MACHADO; FIGUEIREDO-FILHO, 2014).

A maneira mais comum na determinação do volume do fuste são os métodos de cubagem rigorosa, cujos volumes são calculados por seções, em que o volume total da árvore é dado pela somatória dos volumes de cada seção (MACHADO; FIGUEIREDO-FILHO, 2014).

O volume de cada seção é obtido pelo produto da área transversal média da seção pelo seu comprimento (AVERY; BURKHART, 2015; MACHADO; FIGUEIREDO-FILHO, 2014). De acordo com Avery; Burkhart (2015), o principal problema encontrado ao se calcular os volumes das seções nos métodos de cubagem é o de se determinar com exatidão a área transversal média de cada seção.

No método de Huber a área transversal média é mensurada na metade da seção, enquanto no método de Smalian são tomadas duas medidas, no início e no final da seção. Já no método de Newton são mensuradas as áreas nas extremidades e no meio das seções (AVERY; BURKHART, 2015; MACHADO; FIGUEIREDO-FILHO, 2014).

O método de Huber apresenta limitações se houver a presença de galhos que impossibilitem a medição no meio da seção, e o de Smalian é o mais fácil, com menor custo e menos preciso, dependendo da forma da árvore, porém é o método mais utilizado pelos pesquisadores.

Atualmente tem se estudado a aplicação de dados obtidos por varredura com laser terrestre (TLS) para a obtenção do volume das árvores em pé (BUCK et al., 2019; FAN et al., 2020; HACKENBERG et al., 2015; PANAGIOTIDIS et al., 2021; SAARINEN et al., 2017), representando um avanço na área de mensuração florestal.

De qualquer modo, para a estimativa do volume total de uma floresta, são mensurados o volume individual de algumas árvores (amostra) para a estimativa do volume das árvores que não foram derrubadas ou medidas, normalmente por meio de técnicas de regressão linear ou não linear (GORGENS et al., 2009; DOLÁCIO et al., 2020; SOUZA et al., 2020).

A estimativa do volume individual tem sido estudada por muitos pesquisadores. No sul do Brasil, os primeiros trabalhos para a estimativa do volume individual de *Pinus taeda* foi realizado com o ajuste de modelos volumétricos para a construção de tabelas de volume para idades de 5 a 18 anos (MACHADO, 1979) e para os principais eixos de reflorestamento no estado do Paraná (UBIALLI, 1981).

Os métodos de estimativa mais utilizados são por modelos de afilamento (FIGUEIREDO-FILHO et al., 1996; KOHLER et al., 2016; SANTOS et al., 2019), modelos volumétricos e fator de forma (MIRANDA et al., 2015; PERTILLE et al., 2018; SANQUETTA et al., 2016; SANQUETTA et al. 2017; SANTOS et al., 2019).

Destaca-se que, quando avaliado, o método de estimativa pelo modelo de Schumacher-Hall (SCHUMACHER; HALL, 1933) obteve os melhores resultados para a maioria dos trabalhos (BONAZZA et al., 2019; KOHLER et al., 2016; MIRANDA et al., 2015; MÔRA et al., 2014; PERTILLE et al., 2018; SANTOS et al., 2019).

Por outro lado, estimativas realizadas com fator de forma também apresentaram resultados satisfatórios, especialmente quando foi utilizado o fator de forma médio por classes de diâmetro (KOHLER, 2017; SANQUETTA et al., 2017).

O fator de forma pode ser considerado como um estimador por razão, pois ele é obtido pelo quociente do volume da árvore e do volume do cilindro (PÉLLICO NETTO; BEHLING, 2019a).

O fator de forma obtido pelo estimador por razão deve resultar na melhor resposta ao volume da árvore, pois a sua forma está associada a uma variável (diâmetro a altura do peito) com alta correlação com o fator de forma e com o volume (PÉLLICO NETTO; BEHLING, 2019a).

As estimativas de razão, em que o fator de forma foi associado ao expoente da variável diâmetro, resultaram em volumes de árvore mais precisos predominantemente, quando comparados com aqueles obtidos pelo modelo tradicional de Schumacher-Hall (PÉLLICO NETTO; BEHLING, 2019a).

Pesquisas atuais mostraram a melhor performance ao se utilizar estimadores por razão na estimativa da biomassa de florestas nativas no sul do Brasil

(TRAUTENMÜLLER, 2019), da biomassa de *Pinus* spp. (NHADUCO, 2019), da biomassa da acácia negra (PÉLLICO NETTO; BEHLING, 2019b) e do volume comercial em espécies da Floresta Amazônica (CIARNOSCHI, 2020).

## 2.2 INVENTÁRIO FLORESTAL APOIADO POR SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento remoto pode ser definido como:

A utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações (NOVO, 2010, p.28).

Técnicas avançadas de sensoriamento remoto tem sido utilizadas como fonte de dados para apoio as atividades de inventário e manejo florestal com diferentes plataformas e sensores (WHITE et al., 2016).

De acordo Toth; Józsków (2016) as plataformas podem ser: orbitais (satélites), aéreas (avião ou VANT) e terrestres (móveis ou estáticas) e os sensores podem ser: multiespectrais, hiperespectrais, LiDAR (laser) e SAR (radar de abertura sintética).

White et al. (2016) citam que a varredura a laser aerotransportada (ALS), a varredura a laser terrestre (TLS), fotogrametria aérea digital e imagens de satélites de alta resolução espacial são os sensores/plataformas que apresentam maior potencial para aquisição de dados para planejamento estratégico, tático e operacional das atividades florestais.

Recentemente, é observado um aumento no uso de sistemas RPA (*Remotely Piloted Aircraft* – aeronave remotamente pilotada) em inventários florestais para a estimativa a nível individual ou em unidades amostrais (CORTE; REX et al., 2020; CORTE; SOUZA et al., 2020; GÜLCI, 2019; HU et al., 2020; KOTIVUORI et al., 2020; KRŮČEK et al., 2020; MATURBONGS et al., 2019; OTA et al., 2017; PANAGIOTIDIS et al., 2017).

As variáveis tridimensionais, derivadas de imagens obtidas por RPA, combinadas com dados de varredura laser aerotransportada foram utilizadas para ajuste de modelos lineares para a estimativa da altura média de Lorey (RMSE = 13,3%), altura dominante (RMSE = 3,5%), número de árvores (RMSE = 39,2%), área

basal (RMSE = 15,4%) e volume (RMSE = 14,5%) em estudos de pequena escala (PULITI et al., 2015).

Com o objetivo de reduzir os custos de amostragem em campo, o volume a nível de população foi obtido com um RMSD de 3,5%, sem utilizar dados de campo para calibração em sistema RPA-LiDAR (PULITI et al., 2020). Por este mesmo sistema, outro trabalho mostrou boas estimativas de volume em nível de população (RMSE entre 7,9% e 25,9%) sem novas medições de campo in situ (KOTIVUORI et al., 2020).

Sistemas RPA-LiDAR com alta densidade de pontos, como o GatorEye, apresentaram maior potencial para estimativa dos diâmetros das árvores (RMSE = 11,3%) e na altura (RMSE = 7,9%) em plantações de eucalipto em sistema silvipastoril, comparados a outros sistemas aerotransportados (CORTE; REX; et al., 2020).

Com o mesmo sistema, Corte; Souza; et al. (2020) utilizaram técnicas de machine learning em nuvem de pontos de alta densidade (GatorEye) para estimativa dos diâmetros (RMSE < 15%), altura (RMSE < 9%) e volume (RMSE < 29%) de árvores em plantações de eucalipto em sistema silvipastoril.

Krůček et al. (2020) verificaram que dados obtidos por nuvem de pontos de alta densidade em sistema LiDAR-RPA em baixa altitude podem produzir estimativas de diâmetros compatíveis com as estimativas obtidas por varredura laser terrestre, com a vantagem de o sistema RPA pode recobrir maiores áreas em menor tempo.

A estimativa de alturas de coníferas foi realizada em uma floresta urbana na Turquia (15 ha) com um sistema RPA de baixo custo, em que foram utilizadas imagens CHM (modelo digital de alturas do dossel) e um algoritmo de filtragem “local máxima” com um RMSE de 28 cm (BIRDAI et al., 2017).

Em parte, a popularização do uso de RPAs na área florestal está relacionado ao seu custo relativamente baixo, a automatização de processos e também porque estes sistemas podem suportar vários tipos de sensores (COLOMINA; MOLINA, 2014; MORALES et al., 2018; TOTH; JÓZKÓW, 2016). Por outro lado, Hu et al. (2021) citam que sensores LiDAR são mais caros em comparação a sensores convencionais utilizados em sistemas fotogramétricos aéreos digitais.

As principais vantagens apontadas pelo uso de dados obtidos por RPAs em inventários florestais são a qualidade dos produtos gerados em termos de resolução espacial e temporal (EUGENIO et al., 2020).

Para inventários florestais em grandes escalas, o levantamento por RPAs apresentam restrições quanto aos custos de aquisição, de algumas exigências do órgão regulador do espaço aéreo, e a quanto a durabilidade das baterias (PULITI et al., 2017).

Além disso, outras limitações do uso de RPAs incluem dificuldades operacionais em dias com ventos fortes (EMILIEN et al., 2021; WANG et al., 2019) e também apresentam uma área de cobertura relativamente pequena comparada aos dados obtidos por satélites (EMILIEN ET AL., 2021; TOTH; JÓZKÓW, 2016).

Outra questão a se considerar é que dados de imagens de alta resolução obtidos por RPA ocupam grande espaço de armazenamento e recursos computacionais de processamento de dados (TORRESAN et al., 2017).

Uma alternativa ao uso de RPAs é o uso de plataformas aéreas com sensores LiDAR (FEKETY et al., 2015; HILL et al., 2014; MCROBERTS et al., 2018; NÆSSET, 2002; NÆSSET, 2004; NÆSSET, 2007), com radar (CHEN et al., 2017; SCHMITT; ZHU, 2016) ou ainda plataformas orbitais (BERRA et al., 2012; HAWRYŁO; WEZYK, 2018; MACEDO et al., 2017), que apresentam menor precisão, mas maior área de cobertura.

Puliti et al. (2018) utilizaram uma combinação de dados obtidos do satélite Sentinel-2 (gratuitos), imagens obtidas por RPA para estimar volume de uma floresta boreal visando a realização de inventários florestais em larga escala. Os autores verificaram que foi possível reduzir a amostragem com dados obtidos por RPA sem perder precisão nos resultados.

A estimativa de volume apenas com imagens orbitais de média resolução espacial, como as do satélite Landsat-8 ou de SAR (radar) do satélite Sentinel-1B, não produziram boas estimativas volumétricas em um povoamento de eucalipto (RMSE acima de  $32 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ ), sendo indicado diferentes combinações de dados e técnicas de regressão não linear para uma melhor estimativa (REIS et al., 2019).

A varredura a laser aerotransportada (ALS) mostrou ser uma tecnologia transformadora, oferecendo aos inventários florestais os detalhes espaciais necessários e a precisão em grandes áreas em uma ampla variedade de tipos de floresta (WHITE et al., 2016).

Os dados obtidos por varredura a laser aerotransportada (ALS) é um método baseado no alcance do laser até os alvos e a orientação precisa dessas medições. A posição e a rotação do sensor são continuamente registradas usando um sistema de

posicionamento global (GPS) e unidades de medição de inércia (IMU) ao longo da trajetória de voo. O ALS fornece a nuvem de pontos georreferenciada (x, y, z), a partir da qual é possível calcular modelos digitais de terreno (MDT), modelos digitais de superfície (MDS) (HYYPPÄ et al., 2008).

A estimativa da altura das árvores é realizada com base na diferença entre o MDT - modelo digital do terreno (últimos retornos) e o MDS - modelo digital de superfície (primeiros retornos), cujo resultado é o CHM - modelo digital da altura do dossel (COSENZA et al., 2018; HILL et al., 2014; SILVA et al., 2016).

A correta filtragem e classificação dos pontos (solo e superfície) obtidos da nuvem LiDAR e a metodologia empregada na elaboração dos modelos digitais do terreno permitem a redução de erros na determinação das alturas das árvores (HYYPPÄ et al., 2008; PACHECO et al., 2011; PANAGIOTIDIS et al., 2017).

Dados de varredura laser aerotransportado (30 pulsos por m<sup>2</sup>) foram utilizados para estimar a altura das árvores (RMSE = 8,2%), diâmetro (RMSE = 21,8%) e volume (RMSE = 45,7%) em florestas mistas na Itália (SACKOV et al., 2016).

Leite et al. (2020) utilizaram dados de nuvem de pontos obtidas por varredura a laser aerotransportada (4 pulsos/m<sup>2</sup>) e modelos lineares de efeitos para a estimativa de altura (RMSE = 7,3%), diâmetro (RMSE = 7,1%) e carbono (RMSE = 13,6%) em plantações de eucalipto na região de Telêmaco Borba-PR.

Muitos autores realizaram a modelagem volumétrica a partir de algumas métricas, obtidas de dados dos sensores remotos LiDAR em unidade amostrais, que podem ser os percentis de alturas, no caso do laser aerotransportado (NÆSSET, 2004; SILVA et al., 2016; OTA et al., 2017; PULITI et al., 2017; COSENZA et al., 2018).

No entanto, é importante destacar que devido aos diferentes sensores lasers disponíveis, verifica-se a necessidade de se avaliar as diversas combinações de parâmetros (altura, velocidade) e sensores para estimar os atributos do inventário florestal (HU et al., 2021).

De maneira geral, o que difere um inventário florestal terrestre tradicional de um inventário florestal apoiado por sensores remotos, são os instrumentos utilizados para obter os dados florestais onde, na maioria das vezes há a combinação das duas técnicas: a abordagem por área (processos de amostragem tradicionais) e a aquisição dos dados de forma remota nestas amostras (NÆSSET, 2007; PULITI et al., 2017).

Normalmente os dados coletados nas parcelas são utilizados para calibração de modelos (PULITI et al., 2017) presumindo uma redução da intensidade amostral

para o inventário florestal terrestre (JUNTTILA et al., 2013; MCROBERTS et al., 2018; NOORDERMEER et al., 2019; CORTE; SOUZA et al., 2020).

As abordagens em campo permanecem importantes para estimativa de parâmetros da floresta por modelagem e só podem ser aplicadas com sucesso se estiverem adequadamente relacionadas aos dados detectados remotamente (STÄHL et al., 2016).

Em dados obtidos por câmeras em sistemas RPA, estas necessitam de procedimentos de calibração e tratamentos geométricos para correção posicional (COLOMINA; MOLINA, 2014).

Os dados obtidos remotamente também estão sujeitos aos erros amostrais tal como no inventário terrestre, uma vez que são utilizadas unidades amostrais para inferência por área (WHITE et al., 2016). Uma exceção ocorre caso os dados sejam utilizados para censo, pois as imagens obtidas detectam áreas bem maiores que as das unidades amostrais ou no caso da abordagem por árvore individual se a resolução for suficiente para a correta identificação da árvore individual (HENTZ, 2018).

De toda forma, independente do método utilizado, é realizada a etapa de validação para verificar a acurácia de medição pelos sensores por meio da comparação dos valores medidos em campo por parcelas (NÆSSET, 2007; PULITI et al., 2015; PANAGIOTIDIS et al., 2017) ou por censo (HENTZ, 2018).

Nesta etapa, as estimativas obtidas pelos sensores são comparadas com dados de campo (parcelas) por meio da análise do desvio padrão, raiz quadrada do erro médio (*RMSD*), bias e/ou do teste Qui-Quadrado (NÆSSET, 2007; LATIFI; NOTHDURFT; KOCH, 2010; JUNTTILA et al., 2013; PULITI et al., 2015; SILVA et al., 2016; COSENZA et al. 2018).

Eugenio et al. (2020) destacam o potencial do uso de dados obtidos por sistemas RPA no inventário florestal, embora o seu uso não substitua completamente os levantamentos de campo, as facilidades de aplicação podem ampliar o alcance de projetos desenvolvidos no manejo florestal.

### 2.3 DETECÇÃO REMOTA DO NÚMERO DE ÁRVORES

O principal objetivo da identificação de árvores por sensores remotos está relacionado a aquisição de dados a nível individual como suporte ao inventário florestal (EUGENIO et al., 2020; MATURBONGS et al., 2019; PANAGIOTIDIS et al.,

2017), ou ainda ao manejo de espécies de interesse comercial ou ecológica (LI et al., 2017; MORALES et al., 2018; REX et al., 2018).

Para obter informações a nível individual em imagens de sensoriamento remoto é essencial identificar a árvore, ou seja, elas devem ser visualmente reconhecíveis como objetos discretos, exigindo que a resolução espacial das imagens seja compatível com o tamanho das copas (KWAK et al., 2007).

Dada a capacidade de fornecimento de dados de alta resolução, os sistemas RPA são muito citados na literatura para a identificação e/ou contagem de árvores, cujos sensores mais utilizados são: o LiDAR, as câmeras multiespectrais, RGB e o infravermelho (MLENEK et al., 2020; EUGENIO et al., 2020), bem como o sensor laser aerotransportado (LEITE et al., 2020; MLENEK et al., 2020; ZAREA; MOHAMMADZADEH, 2016).

Além disso, há diversas metodologias e algoritmos empregados na contagem automática de árvores, sendo que os mais utilizados são baseados em filtro de máximos locais (COSENZA et al., 2018; KRAUSE et al., 2019; MOHAN et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2021; PICOS et al., 2020; SILVA et al., 2016) e o método por segmentação de bacias (HENTZ et al., 2018), ou uma combinação dos dois (KWAK et al., 2007; PANAGIOTIDIS et al., 2017).

O algoritmo de filtro de máximos locais utiliza uma janela de busca, cujo tamanho (número de pixels) e forma (circular, quadrada) pode variar e deve ser definido pelo usuário. A janela percorre toda a imagem e compara o valor central do pixel com os pixels vizinhos para definir aquele que tem o valor máximo, o qual representa o topo da árvore (BIRDAL et al., 2017; POPESCU; WYNNE, 2004).

Neste caso, definir o tamanho adequado da janela de busca é fundamental para uma correta identificação das árvores, pois uma janela muito grande pode determinar que duas ou mais árvores são apenas uma, ou caso a janela seja muito pequena em relação ao tamanho da copa, o algoritmo pode identificar mais de uma árvore por copa (MOHAN et al., 2017; SILVA et al., 2016).

Ao contrário do algoritmo de filtro de máximo locais, Culvenor (2002) propôs um método em que não é necessário definir um tamanho de janela de busca, pois a partir de um pixel de máximo valor o algoritmo continua a expandir a sua busca até que os valores comecem a subir novamente.

O algoritmo baseado no método de segmentação de bacias apresenta este nome porque ele é semelhante ao utilizado para estudo de delimitação de bacias

hidrográficas ou redes de drenagem. Este método baseia-se no fato de que a água sempre vai fluir pelas encostas mais íngremes (maiores valores de altitude) até chegar no fundo da bacia ou vale (menores valores de altitude). A aplicação deste procedimento, para a delimitação das copas das árvores, segue o mesmo princípio, pois o modelo assume que os valores de altura tendem a diminuir no sentido das bordas (o que seriam os limites das bacias) e apresenta o maior valor no pico, ou seja, no topo da árvore (HEURICH, 2008).

Segundo Kwak et al. (2007) os métodos gerais de segmentação de bacias hidrográficas podem apresentar problemas de detecção devido à grande variação topográfica ou de árvores dominadas/sub-bosque.

Recentemente há aplicações de outras técnicas como as abordagens baseadas em deep learning (LI et al., 2017; PULIDO et al., 2020), redes neurais (TIANYANG et al., 2018), random Forest (KRŮČEK et al., 2020).

O número de árvores foi subestimado em até 35% pelo algoritmo de filtro de máximos locais aplicado no CHM derivado de levantamento laser aerotransportado em plantações de eucalipto, cujos resultados também causaram erros na estimativa do volume total da floresta (COSENZA et al., 2018).

Por outro lado, Leite et al. (2020) detectaram 96,6% das árvores em uma plantação de eucalipto. Os autores utilizaram o CHM derivado de nuvem de pontos obtidas por varredura a laser aerotransportada (4 pulsos/m<sup>2</sup>), filtro de máximo locais e o delineamento das copas foi realizado pelo algoritmo de diagramas de Voronoi.

Vauhkonen et al. (2012) compararam seis algoritmos para a detecção de árvores em dados obtidos por laser aerotransportado em diferentes tipologias florestais. Neste estudo os autores verificaram que em povoamentos de eucalipto o melhor algoritmo foi o de segmentação adaptativa baseada no modelo florestal de Poisson, com uma taxa de detecção de 97,3%.

No trabalho de Sackov et al. (2016) a taxa de detecção foi de 66% para árvores dominantes e de 48% para as co-dominantes com a utilização de dados de varredura laser aerotransportado (30 pulsos por m<sup>2</sup>) e um filtro de máximo locais em florestas mistas na Itália.

Os erros de subestimativa ou superestimativa na detecção de árvores, especialmente em florestas mais densas, motivaram Hui et al. (2021) a testar uma nova técnica, cujas etapas envolveram a aplicação de metodologias relacionadas a análise de componentes principais e estimativa de densidade de Kernel para

determinar uma segmentação inicial, seguida da aplicação de um modelo de mistura Gaussiano para a identificação da árvore. Este modelo foi aplicado na nuvem de pontos obtidos por laser terrestre, cuja taxa de detecção foi de 87,7%.

Os dados de alta densidade de pontos obtidos por sensor LiDAR embarcado em RPA, em baixa altitude, foram utilizados para a identificação de árvores, bem como para a estimativa de suas alturas e diâmetros. Neste estudo, os autores verificaram que 85,9% das árvores foram detectadas por meio de um classificador *machine learning* – *Random Forest* (KRŮČEK et al., 2020).

Jaskierniak et al. (2021), utilizando nuvem de pontos obtidas por sistema LiDAR-RPA (1.485 pontos/m<sup>2</sup>), aplicaram uma sequência de técnicas que envolvem um algoritmo de densidade Kernel, segmentação de bacias, análise de componentes principais e um procedimento de conectividade Voxel. Esta técnica obteve 85% das árvores corretamente detectadas, em florestas mistas de eucalipto, consideradas complexas estruturalmente.

A identificação de árvores em imagens derivadas de dados obtidos por sensores ativos, como o laser, são considerados muito eficientes, porém são sensores de alto custo (GOLDBERGS et al., 2018; ONISHI; ISE, 2021). Desta forma, a aquisição por imagens por sensores passivos (câmeras em diversas faixas espectrais) pode ser uma alternativa com melhor custo benefício (ONISHI; ISE, 2021; WALLACE et al., 2016).

A detecção de árvores em imagens obtidas por sensores embarcados em sistemas RPA pode ser realizada em uma imagem RGB (ONISHI; ISE, 2021), por exemplo, ou ainda em imagens com combinações entre faixas do espectro eletromagnético e índices de vegetação (HENTZ et al., 2018; PULIDO et al., 2020).

Além disso, muitos trabalhos utilizam o CHM (modelo digital de alturas do dossel) e/ou a nuvem de pontos derivada das imagens obtidas pelos sensores ópticos passivos para a identificação das árvores (GOLDBERGS et al., 2018; GÜLCI, 2019; MOHAN et al., 2017; PANAGIOTIDIS et al., 2017; TINKHAM; SWAYZE, 2021).

Wallace et al. (2016) compararam os resultados obtidos pelo processamento da nuvem de pontos ALS e da nuvem de pontos derivada das imagens obtidas com sensor RGB em RPA. Neste estudo os autores observaram que ambas as técnicas são capazes de fornecer informações que podem ser usadas para descrever a superfície do terreno, a identificação das árvores e de suas respectivas alturas em

florestas pouco densas. Porém os dados obtidos por ALS apresentam um desempenho melhor na captura de dados da superfície do terreno.

Mohan et al. (2017) obtiveram uma acurácia geral de 85% na detecção de árvores em floresta mista de coníferas. Os autores utilizaram o CHM derivado de nuvem de pontos obtidas por sensor RGB em sistema RPA (*DJI Phantom 3*).

Um algoritmo para detecção de árvores (*TreeDetect*) em imagens obtidas por sensores passivos embarcados em RPA foi elaborado por Hentz et al. (2018). Neste trabalho, os autores obtiveram uma subestimativa média de 2,75% do número de árvores em povoamentos jovens de eucalipto com 18 meses de idade (imagem RGB), uma diferença de apenas 2 árvores em povoamentos de eucalipto com 5 anos (imagem multiespectral) e uma superestimativa de 0,72% na estimativa de indivíduos de pinus com 7 anos de idade (imagem RGB).

Pulido et al. (2020) utilizaram uma combinação de imagens multiespectrais (NDVI) obtidas por RPA, modelos digitais de superfície e modelos digitais do terreno para a detecção de árvores por meio de um algoritmo de *deep learning* (*DetectNet/GoogleNet*) com acurácia aproximada de 90%, porém os autores sugerem testar esta metodologia em áreas com florestas mais densas.

Com o objetivo de se obter as alturas das árvores em uma plantação de *Pinus sylvestris*, Krause et al. (2019) utilizaram nuvem de pontos derivada de imagens obtidas por RPA para a identificação das árvores, cuja taxa de detecção foi de 80% com o algoritmo de filtro de máximos locais.

Recentemente Tinkham; Swayze (2021) avaliaram a performance da detecção de árvores em CHMs derivados de nuvens de pontos de alta densidade obtidas por sensor RGB em RPA (*DJI Phantom 4 Pro multirotor*) em florestas de pinus. Os autores puderam observar que as árvores de todos os tamanhos puderam ser melhor representadas nas imagens com melhor resolução, porém deve-se avaliar o tempo de processamento e as demandas de armazenamento dos dados.

Oliveira et al. (2021) compararam os resultados obtidos entre imagens (CHM) derivadas de nuvem de pontos de sistemas LiDAR-RPA e por sensores passivos (RGB *wide-angle digital camera* e *digital single-lens reflex (DSLR) camera*) embarcado em RPA. O objetivo foi identificar e estimar a altura de indivíduos de pinus, em que o sensor LiDAR obteve acurácia média de 98%, a câmera DSLR obteve 95% e a RGB obteve 86%, incluindo os erros de omissão e comissão.

A detecção de árvores em sistemas RPA com sensor RGB também foi realizada por Onishi; Ise (2021) em que foram utilizadas técnicas de deep learning (*convolutional neural network* (CNN)) e a segmentação foi apoiada na imagem de inclinação (*slope*) do MDS em que as bordas das copas das árvores foram delimitadas. Este sistema obteve mais de 90% de acurácia na classificação das árvores (tipos e espécies).

Em outro estudo, imagens do satélite *QuickBird*, com resolução de 0,6 m após a fusão das bandas multiespectrais e a pancromática, foram utilizadas para a detecção de palmeiras (*Oil Palm Tree*) na Malásia. Os autores empregaram uma técnica de classificação baseada em deep learning (*convolutional neural network* - CNN) em que mais de 96% das árvores foram corretamente identificadas (LI et al., 2017).

O sucesso geral da detecção de árvores depende da sensibilidade e parametrização dos algoritmos utilizados, porém está mais fortemente relacionado à densidade de povoamento e ao padrão espacial das árvores (OLIVEIRA et al., 2021; VAUHKONEN et al., 2012), bem como a forma da copa e presença de galhos (GÜLCI, 2019).

Krůček et al. (2020) verificaram que a filtragem intensa antes do processo de segmentação foi responsável pelos erros de omissão na detecção de árvores em florestas temperadas.

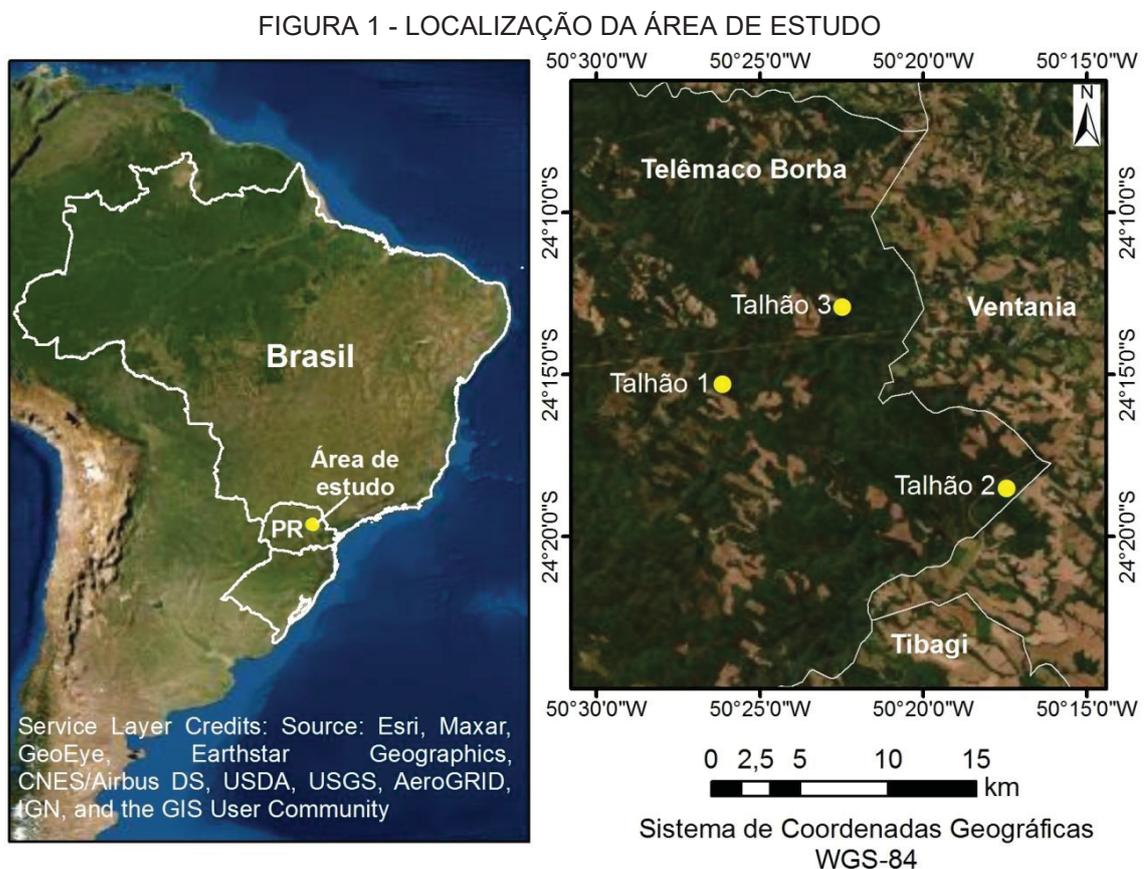
De modo geral, observa-se que a combinação do filtro utilizado para a suavização do CHM com o tamanho da janela de busca do filtro de máximos locais afeta a acurácia de detecção e deve ser escolhido de acordo com as características de cada floresta (OLIVEIRA et al., 2021; PICOS et al., 2020; SILVA et al., 2016).

Mlenek et al. (2020) conclui que não existe uma metodologia padronizada para a detecção de árvores, mas que algoritmos fundamentados em modelos digitais de altura (CHM), segmentação de bacias e filtros de máximos locais apresentam resultados satisfatórios para diversas espécies. Além disso, a detecção de árvores automatizada ainda se apresenta como uma tarefa desafiadora frente a diversidade das populações florestais, custos dos levantamentos e acurácia exigida para a correta identificação dos indivíduos em uma floresta.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em três talhões com florestas plantadas, pertencentes a empresa Klabin S. A., situados no município de Telêmaco Borba, no estado do Paraná (FIGURA 1). Essa região destaca-se pela produção madeireira, apresentando cerca de 183.500 ha de florestas plantadas em 37 municípios, segundo o resumo público de manejo florestal da Klabin em 2019.



FONTE: A autora (2021)

O município de Telêmaco Borba encontra-se aproximadamente a 797 m de altitude, em região de clima Cfb, segundo a classificação de Köppen, caracterizado como clima subtropical úmido, sem estação seca definida, com uma temperatura média anual de 18°C e precipitação anual de 1.440 mm (ALVARES et al., 2013). Os solos dos talhões 1 e 2 foram classificados como ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos de textura arenosa/média, e o talhão 3 como LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos de textura média (BHERING et al., 2007).

Os talhões 1 e 2 foram constituídos de plantações da espécie *Pinus taeda* L. e o talhão 3 pela espécie *Eucalyptus urograndis* (híbrido de *E. grandis* W. Hill e *E. urophylla* S.T. Blake). Esses talhões foram selecionados para esse estudo por apresentarem dados de censo (diâmetro e altura), realizado no ano de 2015 para o trabalho de Hentz (2018). Além disso, são talhões que apresentam as duas espécies florestais mais plantadas no Brasil, com diferentes idades, sendo um talhão de pinus com 16 anos e outro mais jovem, 7 anos, e um talhão de eucalipto com 5 anos (idade na data de coleta dos dados, ano de 2015). As informações de área, idade e espaçamento de cada talhão estão apresentadas na TABELA 1.

TABELA 1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS TALHÕES UTILIZADOS COMO ÁREA DE ESTUDO, SITUADO NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, NO ESTADO DO PARANÁ

Características	Talhão 1	Talhão 2	Talhão 3
Espécie	<i>P. taeda</i>	<i>P. taeda</i>	<i>E. urograndis</i>
Idade (anos)*	16	7	5
Área do talhão (ha)	3,08	2,54	2,16
Espaçamento médio (m)	3,0 x 2,5	2,5 x 2,5	3,75 x 2,4

\*Levantamento realizado em 2015

FONTE: Adaptado de HENTZ (2018)

O levantamento qualitativo realizado por censo (HENTZ, 2018) mostrou que o talhão 1 sofreu danos por ataque de macaco prego em 72,4% das árvores e apresentou também o maior número de árvores quebradas, mortas e com a ponta seca, o que pode ser atribuído às lesões caudas pelo ataque do macaco. O talhão 2 registrou 6,3% de suas árvores fora do alinhamento, enquanto o número de árvores bifurcadas também apresentou um valor expressivo nos três talhões: 25,6% no talhão 1, 5,6% no talhão 2 e 5,9% no talhão 3 (TABELA 2).

TABELA 2 - NÚMERO DE ÁRVORES POR VARIÁVEIS QUALITATIVAS DE TRÊS TALHÕES FLORESTAIS, SITUADO NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, NO ESTADO DO PARANÁ

Variáveis qualitativas	Talhão 1	Talhão 2	Talhão 3
Normais	291	3.687	1.878
Bifurcadas abaixo do diâmetro a 1,3 m de altura	236	161	110
Bifurcadas acima do diâmetro a 1,3 m de altura	530	89	24
Falhas	148	125	82
Mortas ou caídas	43	5	5
Quebradas	186	0	19
Dominadas	4	0	6
Rebrota (fora de linha)	94	275	4
Torta	56	7	135
Ataque de macaco	2.162	0	0
Ataque de vespa	3	0	0
Ponta seca	182	2	3
Número de Fustes (Censo)*	2.986	4.341	2.253

\* Algumas árvores apresentaram duas ou mais características

FONTE: Adaptado de HENTZ (2018)

### 3.2 RESUMO: FLUXOGRAMA METODOLÓGICO

Nos três talhões da área de estudo, foram medidos o diâmetro a 1,3 m de altura e a altura total de todas as árvores (censo - dados de 2015), porém não foi possível cubar rigorosamente os seus volumes. Dessa forma, foi necessário definir um procedimento para a estimativa do volume individual das árvores, sendo eles: fator de forma médio, fator de forma obtido pelo estimador de razão e o ajuste do modelo de Schumacher-Hall. Para isso, foram utilizados dados de cubagem, independentes da área de estudo (base de dados da Klabin). O melhor procedimento, escolhido estatisticamente, foi aplicado nas árvores mensuradas no censo para estimar os seus volumes individuais (FIGURA 2).

A soma dos volumes individuais estimados de cada talhão originou o volume total da população, que, neste estudo, foi considerado como o valor paramétrico (FIGURA 2). Em seguida, o foco deste trabalho foi direcionado para avaliar e comparar dois métodos para a estimativa do volume total da população: tradicional de inventários florestais (área) e por número de árvores (indivíduo).

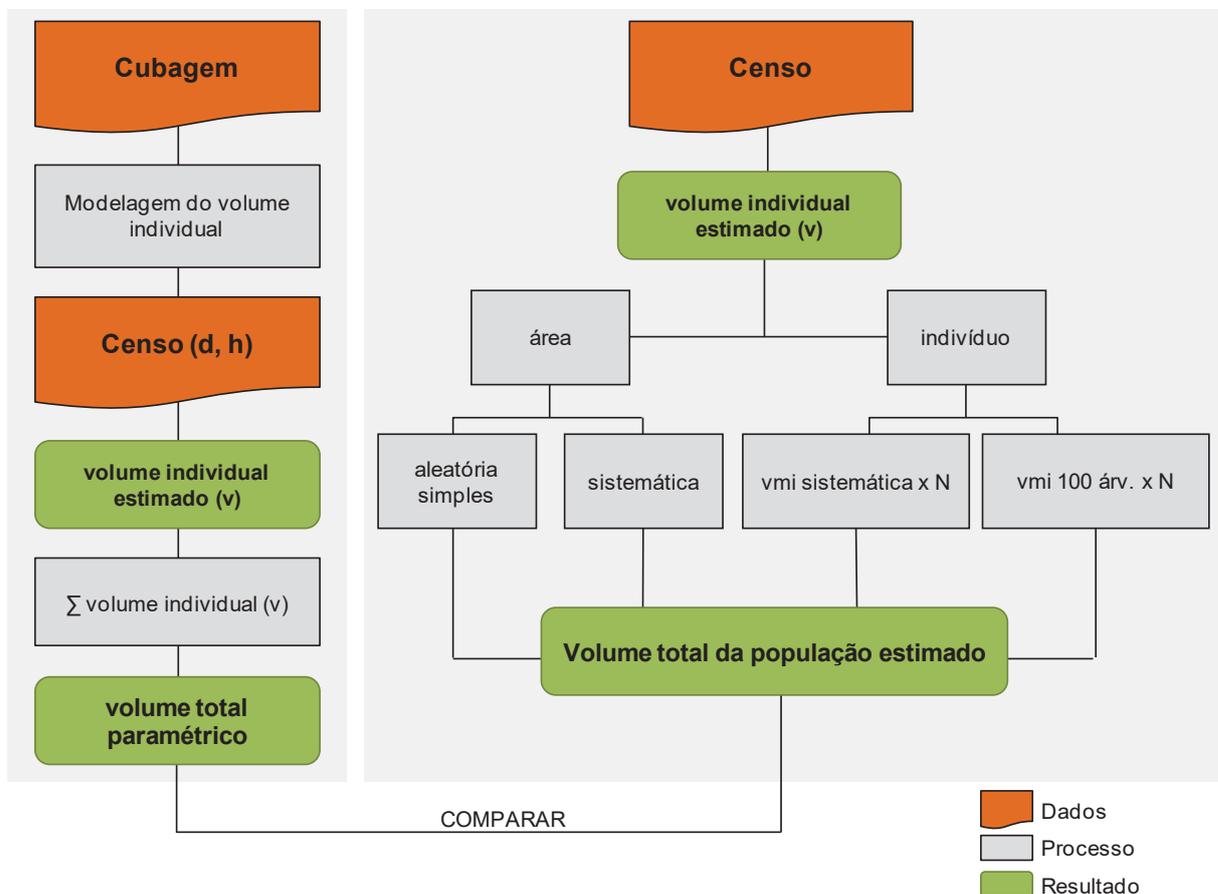
No método por área (método 1) foram avaliados dois processos de amostragem (aleatória simples e sistemática). Nesse método, o volume total da

população foi dependente da área do talhão, sendo que o volume médio por unidade amostral foi extrapolado para a área total.

No método por indivíduo (método 2), o volume total da população é estimado pelo produto do volume médio individual ( $v_{mi}$ ) e do número de árvores, no qual o produto de um pelo outro resultou no volume total. Nesse método, o volume médio individual ( $v_{mi}$ ) utilizado foi obtido de duas maneiras: (a) seleção aleatória de 100 árvores, e (b) amostragem sistemática do método 1. Em relação ao número de árvores ( $N$ ), esse foi obtido por um algoritmo de contagem automática (HENTZ, 2018) aplicado em imagens obtidas por RPA (FIGURA 2).

Adicionalmente, foram simuladas diferentes taxas de detecção de indivíduos no método 2 e, para o método 1, foram simuladas diferenças ( $\pm 10\%$ ) na área do talhão. Os resultados dos dois métodos de estimativa de volume total da população foram comparados ao volume total paramétrico (FIGURA 2). Todas essas etapas serão explicadas com maiores detalhes nas próximas seções.

FIGURA 2 – FLUXOGRAMA METODOLÓGICO



FONTE: A autora (2021)

### 3.3 INVENTÁRIO FLORESTAL – CENSO

Os dados de censo utilizados neste trabalho foram provenientes do inventário florestal realizado por Hentz (2018). O censo foi realizado nos três talhões descritos na TABELA 1 nos mesmos períodos em que foram obtidas as imagens dos voos com aeronave remotamente pilotada (RPA), em julho de 2015 para os talhões 1 e 2 e em setembro de 2015 para o talhão 3.

No censo, foram coletadas as seguintes variáveis quantitativas: a altura total (m), obtida por meio de um Clinômetro Eletrônico Haglöf e; diâmetro a 1,3 m de altura (d), obtido por meio da conversão da circunferência a 1,3 m de altura (cap), mensurada a partir de uma fita métrica. O volume individual foi estimado e será descrito no item 3.4.

Os dados coletados foram analisados estatisticamente com intuito de verificar as particularidades de cada área por meio de: média, máxima, mínima, desvios e gráficos de distribuição de frequência das variáveis dendrométricas (diâmetro a 1,3 m de altura e altura total).

### 3.4 ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL

Neste estudo, não foi possível calcular rigorosamente os volumes das árvores mensuradas no censo. Desse modo, houve a necessidade de se definir um procedimento para estimar o volume individual das mesmas. De acordo com Machado e Figueiredo-Filho (2014), a estimativa do volume individual das árvores de uma população florestal pode ser realizada por técnicas indiretas, como o fator de forma, equações de volume e funções de afilamento.

As funções de afilamento são mais utilizadas quando se deseja estimar o volume por sortimento em função de diâmetros e alturas (GARCÍA-ESPINOZA et al., 2018), e alguns modelos podem apresentar uma maior complexidade para o ajuste (KÖHLER et al., 2016). Assim, neste trabalho, optou-se por testar três procedimentos, sendo que dois deles – o fator de forma médio e o modelo de volume de Schumacher-Hall (SCHUMACHER; HALL, 1933) – foram amplamente avaliados em diversos estudos, caracterizando-se por metodologias consagradas na literatura, cujos resultados normalmente são satisfatórios. O terceiro procedimento refere-se ao emprego de um estimador por razão (COCHRAN, 1977; PÉLLICO NETTO; BEHLING,

2019a), cujos estudos para a estimativa de volume individual ainda são escassos, porém com resultados promissores.

Para efeito de terminologia, os três procedimentos testados para a estimativa do volume individual das árvores do censo foram denominados como tratamentos, sendo eles: T1: Tratamento 1 - fator de forma médio; T2: tratamento 2 - estimador por razão e, T3: tratamento 3 - modelo de Schumacher-Hall (regressão linear múltipla).

A primeira etapa consistiu em selecionar dados de cubagem para o ajuste dos três modelos adotados em cada tratamento. Os dados de cubagem foram obtidos de uma base de dados previamente consolidada e disponibilizada pela empresa. Por esse motivo, são independentes da área de estudo, mas pertencentes à mesma região de estudo.

A seleção de dados das árvores cubadas foi realizada de acordo com a amplitude de diâmetro e altura encontrada no censo. Porém, não foi possível manter a mesma proporcionalidade da distribuição de frequência do censo, pois, para algumas classes, não haviam árvores suficientemente amostradas na base de dados. Além disso, a seleção foi realizada de modo que o número de árvores utilizadas para o ajuste dos modelos, fosse o maior número possível..

A etapa de validação foi realizada apenas para as árvores de pinus, uma vez que haviam poucos dados de cubagem de eucalipto. Os dados utilizados para a validação foram provenientes de outra base de dados da mesma região de estudo e disponibilizado pelo laboratório de inventário florestal (LIF) da UFPR.

A validação consistiu em aplicar o teste de Qui-Quadrado a 95% de probabilidade, para verificar a aderência da estimativa para árvores que não participaram do processo de modelagem, sendo comum em estudos de modelagem (CIARNOSCHI, 2020; MARTINS et al., 2020). Ademais, a seleção das árvores para validação foi aleatória, fixando-se o número de 10 árvores por classe de diâmetro (TABELA 3).

Para representar as árvores do talhão 1, foram utilizados os dados de cubagem com diâmetros de até 40 cm; para o talhão 2, com diâmetros de até 28,2 cm; e para o talhão 3, com diâmetros de até 25 cm (TABELA 3).

TABELA 3 – FREQUÊNCIA POR CLASSES DE DIÂMETRO DAS ÁRVORES CUBADAS (AJUSTE E VALIDAÇÃO) PARA CADA TALHÃO, MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, NO ESTADO DO PARANÁ

Dados	Talhão	Classes de diâmetro (cm)							Total
		Até 10	10,01 a 15	15,01 a 20	20,01 a 25	25,01 a 30	30,01 a 35	35,01 a 40	
	1	13	36	46	61	59	38	27	<b>280</b>
Ajuste	2	13	36	46	61	40	-	-	<b>196</b>
	3	4	12	30	7	-	-	-	<b>53</b>
Validação	1	10	10	10	10	10	10	10	<b>70</b>
	2	10	10	10	10	10	-	-	<b>50</b>

FONTE: A autora (2021)

O método de cubagem de Smalian foi o utilizado na base de dados, em que foram tomadas medidas nas alturas: 0 m; 0,7 m; 1,3 m e a cada 2 m até a altura total. O volume de cada seção foi calculado em (1), em que  $v$  = volume da seção ( $m^3$ ),  $\bar{d}$  = diâmetro médio (m) tomados nas extremidades das seções e  $L$  = comprimento da seção (m). O volume da última seção foi calculado pela fórmula do cone (2). O volume total da árvore foi obtido pela soma dos volumes de todas as seções.

$$v = \frac{\pi}{4} \bar{d}^2 L \quad (1)$$

$$v_{cone} = \frac{\frac{\pi}{4} \bar{d}^2 L}{3} \quad (2)$$

Foram calculadas as estatísticas descritivas (média, desvio padrão e coeficiente de variação, variância da média e erro padrão) das variáveis: diâmetro a 1,3 m de altura ( $d$ ), altura total ( $h$ ) e volume total ( $v$ ) das árvores cubadas para o ajuste e para a validação.

#### 3.4.1 Fator de forma médio

No tratamento 1- fator de forma médio, foi utilizado o fator de forma comum, que utiliza o diâmetro à altura do peito (1,3 m de altura) como base para calcular o volume do cilindro. O fator de forma médio ( $f$ ) (3) foi calculado pela média aritmética do fator de forma das árvores cubadas utilizadas no ajuste.

$$f = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n \left( \frac{v_{cub}}{v_{cil}} \right) \quad (3)$$

em que:  $v_{cub}$  = volume cubado da árvore ( $m^3$ );  $v_{cil}$  = volume de um cilindro diâmetro a altura do peito (cm) e altura (m) da árvore;  $n$  = número de árvores cubadas.

Nesse tratamento, o volume individual das árvores cubadas foi determinado pela equação (4), em que:  $v$  é o volume individual em  $m^3$ ,  $g$  é a área transversal em  $m^2$ ,  $h$  é a altura total em m e  $f$  é o fator de forma médio.

$$v = g \cdot h \cdot f \quad (4)$$

Para avaliação desse tratamento, foram calculadas as medidas estatísticas de precisão do fator de forma médio estimado: média (5), variância da média (6), erro padrão (7), erro absoluto (8), erro relativo (9) e intervalos de confiança (10).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n x_i \quad (5)$$

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{s_x^2}{n-1} \quad (6)$$

$$s_{\bar{x}} = \pm \frac{s_x}{\sqrt{n-1}} \quad (7)$$

$$Ea = \pm t s_{\bar{x}} \quad (8)$$

$$Er = \pm \frac{Ea}{\bar{x}} 100 \quad (9)$$

$$IC[\bar{x} - t s_{\bar{x}} \leq \bar{X} \leq \bar{x} + t s_{\bar{x}}] = 95\% \quad (10)$$

em que:  $\bar{x}$  = fator de forma médio;  $n$  = número de observações;  $x_i$  = fator de forma individual;  $s_{\bar{x}}^2$  = variância da média;  $s_x^2$  = variância;  $s_{\bar{x}}$  = erro padrão;  $s_x$  = desvio padrão;  $t$  = valor  $t$  da distribuição de Student a 95% de probabilidade.

### 3.4.2 Estimador por razão

No tratamento de estimador por razão, o volume individual foi estimado em função da multiplicação do volume do cilindro por um fator de forma, sendo o fator de

forma ( $f = \hat{R}_j$ ) determinado pela razão da média do volume observado (árvores cubadas) e da média do volume do cilindro das respectivas árvores (11). Esse procedimento é definido na literatura como um estimador por razão (COCHRAN, 1977) e recentemente foi aplicado na estimativa do volume individual da acácia (PÉLLICO NETTO; BEHLING, 2019a).

$$f = \hat{R}_j = \frac{\bar{y}_i}{\bar{x}_i} \quad (11)$$

em que:  $\hat{R}_j = f$  = estimador de razão = fator de forma médio;  $\bar{y}_i$  = média dos volumes individuais obtido pela cubagem e  $\bar{x}_i$  = média dos volumes dos cilindros das árvores cubadas.

Assim, o volume médio ( $\bar{y}_i$ ) pode ser obtido pelo produto do estimador de razão ( $\hat{R}_j$ ) da média dos volumes dos cilindros das árvores cubadas ( $\bar{x}_i$ ) (12):

$$\bar{y}_i = \bar{x}_i \hat{R}_j \quad (12)$$

A vantagem de se utilizar o estimador por razão incide sobre o fato de que a alta correlação entre as duas variáveis ( $Y_i$  e  $X_i$ ) proporcionam um estimador com elevada precisão, pois a razão  $Y_i/X_i$  é praticamente a mesma em todas as unidades amostrais e os valores  $Y_i/X_i$  apresentam baixa variabilidade de uma amostra para outra (COCHRAN, 1977).

A estimativa da variância (13), erro padrão (14), intervalo de confiança (15) e erro relativo (16) do fator de forma estimado ( $\hat{R}_j$ ) foram calculados de acordo com Cochran (1977) e Péllico Netto; Behling (2019b), como segue:

$$S_{\hat{R}_j}^2 = \frac{1}{n \bar{x}_i^2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{R}_j x_i)^2 \quad (13)$$

$$S_{\hat{R}_j} = \sqrt{\frac{1}{n \bar{x}_i^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - 2\hat{R}_j \sum_{i=1}^n y_i x_i + \hat{R}_j^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{(n-1)}}} \quad (14)$$

$$IC = \hat{R}_j \pm t \sqrt{S_{\hat{R}_j}^2} \quad (15)$$

$$E_{\hat{R}_j} = \frac{t S_{\hat{R}_j}}{\hat{R}_j} 100 \quad (16)$$

em que:  $s_{\hat{R}_j}^2$  = variância da média;  $s_{\hat{R}_j}$  = erro padrão da média;  $IC$  = intervalo de confiança;  $E_{\hat{R}_j}$  = erro relativo;  $n$  = número de observações;  $y_i$  = volume individual observado;  $x_i$  = volume do cilindro;  $\hat{R}_j$  = fator de forma obtido pelo estimador de razão;  $t$  = valor  $t$  da distribuição de Student a 95% de probabilidade,  $\hat{R}_j$  = fator de forma obtido pelo estimador de razão.

Nesse tratamento, o volume individual foi estimado pela equação (17), em que:  $\hat{y}$  = volume individual estimado em  $m^3$ ;  $x_i$  = volume do cilindro em  $m^3$  e  $\hat{R}_j$  = fator de forma obtido pelo estimador por razão.

$$\hat{y} = x_i \hat{R}_j \quad (17)$$

### 3.4.3 Modelo de Schumacher-Hall

O terceiro tratamento testado foi o de estimativa pelo modelo de regressão múltipla. O modelo utilizado foi o de Schumacher-Hall (SCHUMACHER; HALL, 1933), definido na equação (18), sendo:  $v$  o volume individual em  $m^3$ ,  $d$  o diâmetro a altura do peito em cm,  $h$  a altura total em m,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  os coeficientes do modelo e  $\varepsilon_i$  o erro aleatório proveniente do método de estimativa.

$$v = e^{(\beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \beta_2 \ln(h))} + \varepsilon_i \quad (18)$$

Os volumes estimados pela equação de Schumacher-Hall foram corrigidos pelo fator de correção de Meyer (19) devido à discrepância logarítmica e suas estatísticas foram recalculadas: coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust.}$ ) (20) e erro padrão da estimativa em percentagem ( $syx\%$ ) (21). O teste  $t$ -Student ( $\alpha = 0,05$ ) foi utilizado para avaliar a significância dos coeficientes da regressão, e o teste  $F$  ( $\alpha = 0,05$ ) da análise de variância foi utilizado para verificar a existência de relação (regressão) entre o volume e as variáveis independentes do modelo.

$$FCM = e^{0,5 syx^2} \quad (19)$$

$$R^2_{ajust.} = 1 - \frac{(n-1)}{n-p} (1 - R^2) \quad (20)$$

$$syx(\%) = \frac{syx}{\bar{v}} 100 \quad (21)$$

em que:  $e = 2,718281828$ ;  $n$  = número de observações;  $p$  = números de coeficientes do modelo;  $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (v - \hat{v})^2}{\sum_{i=1}^n (v - \bar{v})^2}$ ;  $syx = \frac{\sum_{i=1}^n (v - \hat{v})^2}{n - p}$ ;  $v$  = volume individual observado;  $\hat{v}$  = volume individual estimado;  $\bar{v}$  = volume observado médio.

Os resíduos da regressão linear foram avaliados quanto às pressuposições de normalidade (Lilliefors,  $\alpha=0,05$ ), autocorrelação (Durbin Watson,  $\alpha=0,05$ ) e homocedasticidade (Breusch-Pagan,  $\alpha=0,05$ ). Os testes foram realizados no ambiente estatístico R, versão 4.0.2., com as respectivas funções e pacotes: *shapiro.test (stats)*, *durbinWatsonTest (car)* e *bptest (lmtest)*, descritos em Souza et al. (2018). Essa análise é importante para que as estimativas pelo modelo de regressão não sejam tendenciosas ou incorretas.

A normalidade dos resíduos é uma das condicionantes a serem cumpridas na análise de regressão, pois a aplicação dos testes de significância exige que os resíduos estejam normalmente distribuídos. Na ausência dessa condição, se pode utilizar modelos lineares generalizados, fazer a transformação das variáveis ou utilizar um método estatístico não paramétrico (SCHNEIDER et al., 2009).

A presença de autocorrelação, significa que existe dependência entre os resíduos. Dessa forma, as estimativas dos mínimos quadrados dos parâmetros não apresentam variância mínima, o erro padrão apresenta resultados distorcidos e por isso as estimativas se tornam ineficientes e os intervalos de confiança gerados são incorretos (SCOLFORO, 2005).

A existência de tendência nas estimativas pode ser avaliada graficamente, porém testes estatísticos para avaliar a homogeneidade das variâncias são frequentemente aplicados (SCOLFORO, 2005).

A matriz de correlação de Pearson foi utilizada para avaliação prévia da existência de multicolinearidade. De acordo com Schneider et al. (2009), a colinearidade existe quando as variáveis independentes de um modelo estão correlacionadas de forma significativa, em maior grau do que entre a variável, e neste caso seria impossível se determinar quais das variáveis causam variância na variável dependente.

A presença de multicolinearidade foi analisada por meio do fator de inflação da variância (VIF - *variance inflation factor*), onde utilizou-se a função *vif()* do pacote *faraway* (SOUZA et al., 2018) no ambiente estatístico R, versão 4.0.2.

O VIF expressa um fator que aumenta a variância dos coeficientes estimados da regressão quando ocorre dependência linear entre as variáveis. Se qualquer um dos VIF's assume valor maior que 10, é possível que os coeficientes de regressão associados a esses valores tenham estimativas de mínimos quadrados demasiadamente influenciadas pela multicolinearidade (SCOLFORO, 2005).

O ajuste do modelo de Schumacher-Hall e a estimativa do intervalo de confiança dos coeficientes do modelo da regressão foram realizados ambiente estatístico R, versão 4.0.2, em que os valores dos coeficientes foram estimados por meio do Método de Mínimos Quadrados.

As estatísticas (fator de correção de Meyer, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da estimativa) foram recalculados no *software* Excel, devido a discrepância logarítmica do modelo linearizado de Schumacher-Hall.

#### 3.4.4 Escolha do tratamento para a estimativa do volume individual

A seleção do melhor tratamento foi baseada nos resultados do ajuste e da validação dos três tratamentos testados. De modo que o procedimento selecionado possa estimar o volume das árvores do censo com maior acurácia.

O resultado dos três tratamentos foram avaliados e comparados entre si por meio da análise gráfica dos resíduos (22), viés (23), erro médio absoluto (MAE) (24), erro quadrático médio (MSE) (25), raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) (26), raiz quadrada do erro quadrático médio em percentagem (RMSE%) (27) e pseudo-coeficiente de determinação, o qual é dado pelo quadrado do coeficiente de correlação linear de Pearson (28) entre os valores observados e estimados (CIARNOSCHI, 2020).

$$\text{resíduo (\%)} = \frac{(v-\hat{v})}{v} 100 \quad (22)$$

$$\text{Viés} = \frac{\sum(v-\hat{v})}{n} \quad (23)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum(|v-\hat{v}|)}{n} \quad (24)$$

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(v-\hat{v})^2}{n}} \quad (26)$$

$$RMSE (\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum(v-\hat{v})^2}{n}}}{\bar{v}} 100 \quad (27)$$

$$r^2_{(v,\hat{v})} = \left( \frac{\sum((v-\bar{v})(\hat{v}-\bar{\hat{v}}))}{\sqrt{(\sum(v-\bar{v})^2 \sum(\hat{v}-\bar{\hat{v}})^2)}} \right)^2 \quad (28)$$

Onde:  $v$  = volume observado em  $m^3$ ;  $\hat{v}$  = volume estimado em  $m^3$ ;  $n$  = número de observações;  $p$  = número de parâmetros do modelo;  $\bar{v}$  = volume médio observado em  $m^3$ ;  $\bar{\hat{v}}$  = volume médio estimado em  $m^3$ .

O melhor tratamento escolhido para a estimativa do volume individual foi aquele que apresentou as melhores estatísticas no ajuste e na validação, ou seja, os menores valores de viés, do MAE (erro médio absoluto), do MSE (erro médio quadrático), do RMSE (raiz quadrada do erro médio quadrático), do RMSE% (raiz quadrada do erro médio quadrático em percentagem) e maior  $r^2$  (CIARNOSCHI, 2020), e ainda a melhor distribuição gráfica dos resíduos. Foram avaliados os gráficos de resíduos *versus* valores de volumes estimados para os dados de ajuste e validação dos três tratamentos testados. Além disso, aplicou-se o teste Qui-Quadrado ( $\alpha=0,05$ ) nos dados de validação para verificar se os volumes estimados diferem-se dos volumes observados (KOHLENER, 2017).

Em uma etapa seguinte, as estimativas do volume médio individual das árvores cubadas foram submetidas à análise de variância para verificar se as médias estimadas pelos três tratamentos são consideradas diferentes ou equivalentes. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, testando-se a seguinte hipótese de nulidade:  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ ; sendo  $\mu_1, \mu_2$  e  $\mu_3$ , os volumes médios estimados para as árvores cubadas em cada tratamento (KOHLENER, 2017).

Inicialmente, as variâncias dos tratamentos foram avaliadas quanto a sua homogeneidade pelo teste de Bartlett. Em seguida, se o teste indicar que as variâncias são homogêneas, os efeitos dos tratamentos foram avaliados por meio do teste F.

Nos casos de diferenças estatisticamente significativas entre as médias, essas foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro.

#### 3.4.5 Volume individual das árvores do censo e volume total paramétrico

Após a escolha do melhor tratamento para a estimativa do volume individual, o próximo passo consistiu em aplicar o tratamento selecionado na estimativa do volume individual das árvores mensuradas no censo. O volume total da população, foi obtido pelo somatório dos volumes individuais estimados em cada talhão. Para fins comparativos, esse valor foi considerado como o volume paramétrico.

### 3.5 ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL DA POPULAÇÃO

Para a estimativa do volume total da população, foram avaliados dois métodos. No primeiro, a estimativa do volume total da população foi obtida pelo procedimento tradicional de inventário florestal, no qual o volume por hectare obtido por amostragem foi extrapolado para a área da população. No segundo, o volume total foi obtido por meio da multiplicação do volume médio individual pelo número de árvores do talhão. Os dois métodos são explicados com mais detalhes a seguir.

#### 3.5.1 Método 1: Inferência por área

Nesse método, foram avaliados dois processos de amostragem amplamente utilizados em inventários florestais de florestas equiâneas: a) aleatória simples e b) sistemática. A amostragem aleatória simples é o processo do qual derivam os demais procedimentos de amostragem (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997), e normalmente é aplicado em áreas pequenas, homogêneas e de fácil acesso, de modo que a intensidade amostral seja pequena, reduzindo os custos do levantamento (SANQUETTA et al., 2014).

A amostragem sistemática apresenta algumas vantagens, como uma boa estimativa da média e do total devido a distribuição uniforme das amostras na população. Além disso, é um tipo de amostragem que pode ser executada com maior rapidez, pois o deslocamento entre as unidades é mais fácil por seguir uma direção fixa (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997). Segundo Sanquetta et al. (2014), esse

processo de amostragem tem sido adotado por um grande número de empresas que realizam inventários em plantações florestais devido à vantagem operacional e a uma melhor supervisão de controle.

Nos dois processos de amostragem utilizados neste estudo foram utilizadas unidades amostrais circulares de área fixa (600 m<sup>2</sup>), n= 5, representando uma fração amostral de 9,7% para o talhão 1, 10,7% para o talhão 2 e 13% para o talhão 3.

### 3.5.1.1 Aleatória simples

Na amostragem aleatória simples, cada árvore do censo representou o centro da unidade amostral e a partir dele executou-se a delimitação da área da unidade amostral circular. Esse procedimento foi adotado para permitir que todas as árvores tivessem a mesma probabilidade de participar de pelo menos uma unidade amostral.

Para cada talhão, foram realizadas 100 simulações do processo aleatório simples, onde as unidades amostrais (n=5) foram selecionadas casualmente no *software ArcGis* (com reposição). Em cada seleção, foi verificado se as unidades amostrais não estavam sobrepostas, e, se caso isso ocorresse, uma nova seleção foi efetuada.

Para cada unidade amostral foi obtido o volume total (soma dos volumes individuais), o qual foi convertido para volume por hectare (V). O volume médio por hectare foi extrapolado para a área do talhão para se obter o volume total da população.

Para cada simulação foi calculado o volume médio por hectare (média das cinco unidades amostrais) e os estimadores (variância, erro padrão, total da população, intervalos de confiança) de acordo com Péllico Netto; Brena (1997) ao nível de 95% de probabilidade pela distribuição "t" (*t* - Student).

As repetições do processo aleatório, representada pelas simulações foi realizada para se ter uma percepção do comportamento deste processo de amostragem para a estimativa do volume total da população em sucessivas ocasiões. Desta forma, com as simulações pode-se observar o resultado deste processo de amostragem para a estimativa do total da população em 100 vezes.

Em seguida, para expressar a inferência média deste método, foi realizada uma reamostragem das 100 simulações (*Bootstrap resample* – não paramétrico). Esse procedimento foi realizado no software R, com as respectivas funções e pacotes:

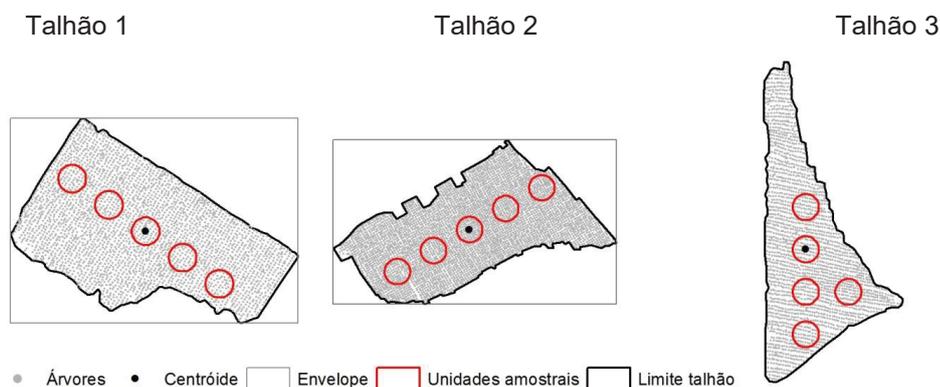
*boot* (*boot*) para a reamostragem e *boot.ci* (*boot*) para se obter os intervalos de confiança.

A amostragem *Bootstrap* é útil quando se deseja reproduzir a distribuição da amostragem de alguma estatística, por exemplo: média, mediana, ou os coeficientes de um modelo de regressão (SCHUMACKER; TOMEK, 2013). Os mesmos autores citam que a ideia básica é que as conclusões sobre algum parâmetro da população sejam originadas de uma amostra aleatória de dados. Neste trabalho, considerou-se que a amostra aleatória são as 100 simulações, e a partir da reamostragem delas, foram geradas as estimativas do volume médio por hectare da população e seus intervalos de confiança.

### 3.5.1.2 Sistemática

Neste método, as cinco unidades amostrais foram alocadas a partir do centróide do talhão e distribuídas ao longo do seu maior comprimento, de modo que se mantivesse a mesma distância entre elas (45 m). O azimute que definiu a linha de direção da distribuição das parcelas nos talhões 1 e 2 foi determinado pela paralela da diagonal do limite formado pelas coordenadas das extremidades do talhão (envelope). O envelope é um polígono, normalmente retangular, o qual é determinado pelos limites geográficos do talhão. No talhão 3, a direção do lançamento das parcelas foi de 90°, uma vez que esta é a orientação do maior comprimento do talhão (FIGURA 3). Esse procedimento foi adotado para garantir a melhor distribuição espacial das cinco unidades amostrais dentro dos limites dos talhões.

FIGURA 3 - LOCALIZAÇÃO DAS UNIDADES AMOSTRAIS NO PROCESSO DE AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2021)

Da mesma forma que no processo aleatório simples, foram extraídos: o volume médio por hectare de cada unidade amostral e os estimadores (média, variância, erro padrão, total da população e intervalos de confiança) de acordo com Péllico Netto; Brena (1997) ao nível de 95% de probabilidade pelo teste “t” (*t*-Student).

### 3.5.1.3 Avaliação das estimativas pelo método de inferência por área

A estimativa do volume total da população, obtidas nos dois processos de amostragem, foram comparadas aos valores de volume total do talhão obtidos no censo (paramétrico) pela diferença absoluta (29) e diferença relativa (30) (KOHLENER, 2017), além da análise do intervalo de confiança do processo de amostragem do inventário florestal, o qual deve incluir o volume total paramétrico para que se tenha uma estimativa confiável.

$$\text{Diferença absoluta} = V_r - V_e \quad (29)$$

$$\text{Diferença relativa} = \frac{(V_r - V_e)}{V_r} \cdot 100 \quad (30)$$

Onde:  $V_r$  = volume real obtido no censo florestal ( $m^3$ );  $V_e$  = volume estimado na amostragem ( $m^3$ );  $n$ =número de observações.

Nestes dois processos de amostragem, é importante destacar que o volume total da população apresenta duas fontes de incertezas: a) a incerteza da estimativa do volume individual; e b) a incerteza do processo de amostragem, na qual apenas uma parte da população é medida.

Porém, nesse método foi adotado o intervalo de confiança do processo de amostragem, pois é o procedimento realizado nos inventários florestais tradicionais (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997; SANQUETTA et al., 2014), em que a incerteza das predições obtidas pelos modelos são geralmente ignoradas (MCROBERTS; WESTFALL, 2014).

Em seguida, com o intuito de se avaliar espacialmente a influência da localização das unidades amostrais (aleatória ou sistemática) na estimativa do volume médio por unidade de área, procedeu-se a aplicação de um método de interpolação

de dados espaciais para a representação contínua, e não pontual, da variável dentro do talhão.

O método adotado foi o IDW (interpolação pelo inverso da distância) por ser um método determinístico, uma vez que, em análise prévia não foi detectada dependência espacial do volume por hectare na área de estudo. Na interpolação pelo IDW utilizou-se a ferramenta *Geostatistical Analyst* do programa *ArcGis* 10.2. O grid amostral utilizado para fazer a interpolação foi de 30 m para o talhão 1 e 2 e de 50 m para o talhão 3. O tamanho do grid foi determinado de acordo com as características espaciais dos talhões, para que as amostras ficassem melhor distribuídas.

Os mapas gerados serviram de apoio para a discussão dos resultados dos volumes médios obtidos nos processos de amostragem adotados.

### 3.5.2 Método 2: Inferência por indivíduo

Nesse método, o volume total da população foi estimado pela equação (31), em que:  $\hat{y}$  é o volume médio individual e  $N$  é igual ao número de árvores de cada talhão.

$$\hat{Y} = N \times \hat{y} \quad (31)$$

O volume médio individual estimado ( $\hat{y}$ ) utilizado na estimativa do volume total ( $\hat{Y}$ ) foi obtido de duas maneiras:

a) pela média dos volumes individuais de 100 árvores de cada talhão, selecionadas aleatoriamente, com proporcionalidade a frequência por classe diamétrica. Esse procedimento teve o objetivo de se obter um volume médio individual representativo (todas as classes de diâmetro) de cada talhão, de modo que ele seja independente da amostragem por área (unidade amostral).

O número de 100 árvores foi baseado em outros estudos, tais como o de David et al. (2016), em que os autores verificaram que a amostragem proporcional por classes de diâmetro, com apenas 36 árvores proporcionou a melhor performance para a modelagem do volume individual em povoamentos de eucalipto. Kohler (2017) obteve um menor erro padrão da estimativa do volume médio individual de pinus quando utilizou dados de cubagem (89 árvores) distribuídos de acordo com a

frequência do povoamento, em que a qualidade de ajuste foi muito semelhante à obtida com utilização do número total de árvores.

Por fim, a média do volume individual deste método, e seu respectivo intervalo de confiança foi obtido por reamostragem *Bootstrap*. O objetivo de se utilizar o método *Bootstrap* para as estimativas do volume médio individual é a mesma apontada por Schumacker; Tomek (2013), em que a inferência do parâmetro (volume médio individual) é realizada a partir de uma amostra aleatória de dados, reamostrada  $n$  vezes, com reposição. O resultado deste método implica em fazer inferência para a população a partir da distribuição da variável de interesse que em média, é semelhante a da amostra original.

b) pelo volume médio individual determinado pela amostragem sistemática, descrita no item 3.5.1.2. Esse procedimento teve o objetivo de avaliar a estimativa do volume médio individual por um método de amostragem que normalmente é empregado para estimativas médias em inventários florestais.

O número de árvores ( $N$ ) de cada talhão foi obtido pela simulação de diferentes taxas de detecção, que variaram de 90 a 110% do número de árvores mensuradas no censo.

Na simulação foi incluída a taxa de detecção obtida por meio da ferramenta TreeDetect (HENTZ et al., 2018) aplicada nas imagens obtidas por sensores embarcados em aeronave pilotada remotamente (RPA) na área de estudo. Este algoritmo propiciou a determinação automática do número de árvores de cada talhão.

O RPA utilizado na aquisição dos dados remotos foi o eBee-Ag (Sensefly) com diferentes câmeras. Para o talhão 1, o melhor resultado foi obtido com a câmera Canon S110, onde foi utilizada uma imagem CHM (modelo digital de alturas, normalizada a partir da nuvem de pontos LiDAR). Para o talhão 2 também foi utilizada a câmera Canon S110 (sensor NIR – *Near Infrared*) e a imagem NIR como arquivo de entrada. Para o talhão 3, foi utilizada uma câmera multiespectral (Multispec 4C) e a imagem NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (HENTZ, 2018).

A câmera Canon S110 apresenta resolução de 12 MP, um sensor de tamanho de 6,23 x 4,69 mm (4048 x 3048 pixels), distância focal de 5 mm, e um tamanho de pixel de 1.54  $\mu\text{m}$ . A câmera multiespectral tem resolução de 1.2 MP, um sensor de

tamanho de 4,8 x 3,6 mm (1280 x 960 pixels), distância focal de 4 mm, e um tamanho de pixel de 3.75  $\mu\text{m}$  (HENTZ, 2018).

Para todos os talhões, os parâmetros de entrada no algoritmo de detecção foram: arquivo raster com resolução espacial de 0,5 m, o valor de conversão da estrutura do raster foi de -1 (devido a inversão utilizada no método de segmentação de bacias), o valor que representa o tamanho médio da área de copa foi de 3 mestros para os talhões com *P. taeda* (16 anos) e de eucalipto, e um tamanho de 2 mestros para o talhão de *P. taeda* (7 anos). Por último foi selecionado o fator de suavização (filtro aplicado na imagem de entrada) para diminuir o efeito de pixels isolados, em que foi utilizado um fator igual a 2 para *P. taeda* (16 anos) e para o eucalipto, e um tamanho de 1 para o talhão de *P. taeda* (7 anos).

Informações complementares sobre a coleta de pontos de controle e o processamento das imagens podem ser encontrados com maiores detalhes em Hentz, 2018.

#### 3.5.2.1 Avaliação das estimativas pelo método de inferência por indivíduo

As estimativas do volume total da população pelo método de inferência por indivíduo foram comparadas aos valores de volume total do talhão obtidos no censo pela diferença absoluta (29) e relativa (30).

Além disso, foi observado se o valor do total da população obtido com os dados do censo foi incluído nos intervalos de confiança construídos da seguinte maneira:

- a) quando o volume médio individual for igual a média dos volumes de cem árvores selecionadas aleatoriamente, e proporcional a frequência da classe de diâmetro: o intervalo de confiança foi obtido por meio da reamostragem *Bootstrap* por meio da função *boot.ci()* do pacote *Boot* no software R.
- b) quando o volume médio individual for igual ao volume médio obtido pela amostragem sistemática: o intervalo de confiança foi o mesmo obtido pelo processo de amostragem do método 1 (área).

### 3.5.3 Comparação entre os métodos de estimativa do volume total da população

Para fins comparativos entre os dois métodos, foi definido que o volume médio individual estimado para cada talhão foi aquele estimado pelo processo de amostragem sistemática, pois ele apresenta estimativas comuns entre as duas abordagens (área e indivíduo). Além disso, é um dos processos de amostragem mais utilizados em inventários florestais.

Dessa forma, o volume médio individual e seu respectivo intervalo de confiança (do processo de amostragem) se tornou uma constante e pode-se avaliar o erro de estimativa atribuída a área e ao número de árvores, objeto principal deste estudo.

Neste trabalho, a área do talhão foi definida com elevada acurácia, pois foi delimitada pela interpretação visual das imagens de alta resolução obtidas pelo sensor embarcado no sistema RPA. Por este motivo, para se avaliar possíveis discrepâncias obtidas por erros de delimitação de áreas de talhões, foi simulada uma variação em área nos talhões para verificar o seu impacto na estimativa do volume total do talhão. A variação em área foi de 90 a 110%, da mesma forma que a variação do número de árvores.

Os resultados obtidos pelos métodos de inferência por área e de inferência por indivíduo foram analisados quanto às diferenças absoluta e relativa e quanto aos intervalos de confiança do volume total estimado, obtido pelo processo de amostragem.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PLANTAÇÕES FLORESTAIS - CENSO

Os resultados estatísticos obtidos para as variáveis quantitativas diâmetro e altura, pode ser observado na TABELA 4. O talhão 1 (*P. taeda*, 16 anos) apresentou diâmetro médio de 23,5 cm e altura média de 16,5 m, bem abaixo dos valores médios ( $d = 29,4$  cm ;  $h = 18,3$  m) encontrados por Kohler (2017), em um povoamento misto de *P. elliottii* e *P. taeda* de mesma idade. A diferença de crescimento pode ser atribuída às características previamente relatadas (árvores bifurcadas e quebradas devido ao ataque de macaco-prego).

TABELA 4 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS QUANTITATIVAS OBTIDAS POR CENSO DE TRÊS TALHÕES FLORESTAIS, SITUADO NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, NO ESTADO DO PARANÁ

Talhão	Estatísticas descritivas								
	Mín.	Máx.	Média	Mediana	Moda	Desvio Padrão	CV%	Número de Fustes*	
1	d	6,2	39,2	23,5	23,7	23,6	±4,9	20,7	2.611
	h	6,6	25,5	16,5	16,8	17,0	±2,6	15,9	
2	d	3,2	28,2	16,1	16,5	15,9	±3,9	24,6	4.211
	h	3,7	15,8	11,0	11,0	11,0	±1,4	13,1	
3	d	5,4	28,3	18,7	19,1	20,1	±2,9	15,6	2.147
	h	8,1	28,1	21,2	21,6	21,7	±2,1	10,0	

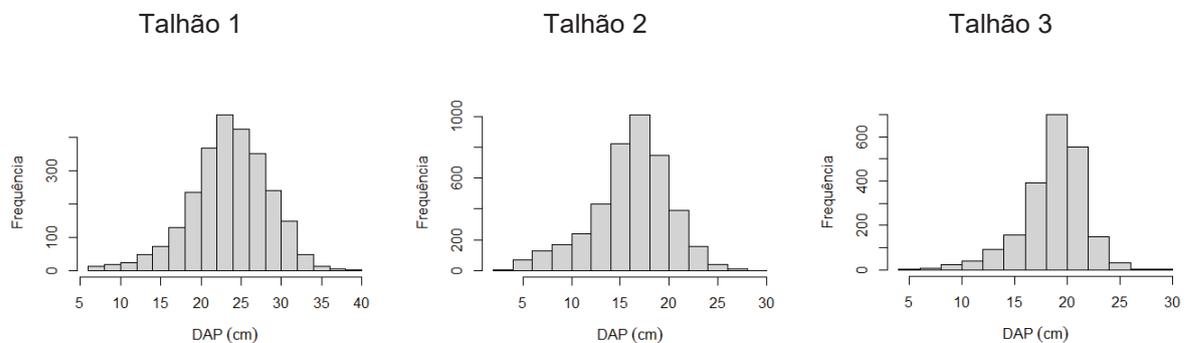
FONTE: A autora (2021)

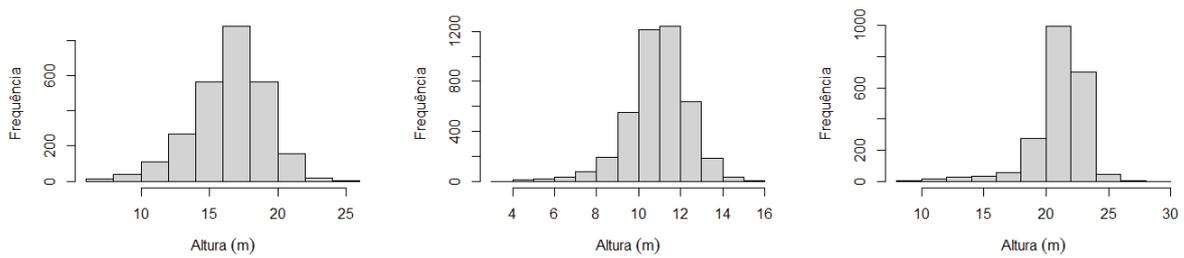
Em que: d = diâmetro a 1,30 m de altura (cm); h = altura total (m); CV%=coeficiente de variação; \*Excluídas as árvores mortas, as falhas e as quebradas.

No talhão 2 (*P. taeda*, 7 anos) o diâmetro médio encontrado foi de 16,1 cm, e a altura média foi de 10,1 m. Já para o talhão 3, o diâmetro médio foi de 18,7 cm e a altura média foi de 21,2 cm, inferior ao relatado por Oliveira et al. (2014) em um povoamento de *Eucalyptus* sp. cujo diâmetro à 1,30m de altura aos sete anos foi de aproximadamente 20 cm e a altura total foi de 32 m.

As distribuições de frequência por classes de diâmetro e de altura (FIGURA 4) se mostrou compatível com a distribuição frequentemente observadas em plantações florestais, em que a distribuição dos diâmetros é unimodal e se aproxima da curva normal, com os valores de média, mediana e moda próximos entre si (ARAÚJO et al., 2012; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2013; TÉO et al., 2011).

FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS DOS TRÊS TALHÕES, SITUADO NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, NO ESTADO DO PARANÁ





FONTE: A autora (2021)

## 4.2 ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL

As estatísticas dos dados de ajuste e validação das árvores cubadas de *P. taeda* e de *E. urograndis* foram apresentadas na TABELA 5. A maior dispersão foi encontrada para a variável volume, cujo erro amostral (Er %) para os dados de validação ficou acima de 10% para os talhões 1 e 2.

TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS ÁRVORES CUBADAS UTILIZADAS NO AJUSTE E VALIDAÇÃO PARA OS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO, SITUADO NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA, NO ESTADO DO PARANÁ

Talhão	Dados	Variáveis	n	média	desvio	CV%	$s_{\bar{x}}^2$	$s_{\bar{x}}$	Er (%)
1	Ajuste	d (cm)	280	23,4	8,16	34,9	0,238	0,488	2,1
		h (m)	280	17,5	6,05	34,6	0,131	0,361	2,1
		v (m <sup>3</sup> )	280	0,4498	0,381	84,8	0,0005	0,023	5,1
	Validação	d (cm)	70	22,4	10,23	45,6	1,494	1,222	5,4
		h (m)	70	14,9	6,03	40,4	0,519	0,720	4,8
		v (m <sup>3</sup> )	70	0,4029	0,422	104,8	0,003	0,050	12,5
2	Ajuste	d (cm)	196	19,3	5,86	30,4	0,175	0,419	2,2
		h (m)	196	15,0	5,08	33,9	0,131	0,363	2,4
		v (m <sup>3</sup> )	196	0,2446	0,187	76,3	0,0002	0,013	5,4
	Validação	d (cm)	50	17,4	7,28	41,8	1,059	1,029	5,9
		h (m)	50	11,7	3,12	26,7	0,195	0,442	3,8
		v (m <sup>3</sup> )	50	0,1665	0,137	82,5	0,0004	0,019	11,7
3	Ajuste	d (cm)	53	16,6	3,75	22,7	0,266	0,516	3,1
		h (m)	53	25,3	4,74	18,7	0,423	0,651	2,6
		v (m <sup>3</sup> )	53	0,2677	0,134	50,1	0,0003	0,018	6,9

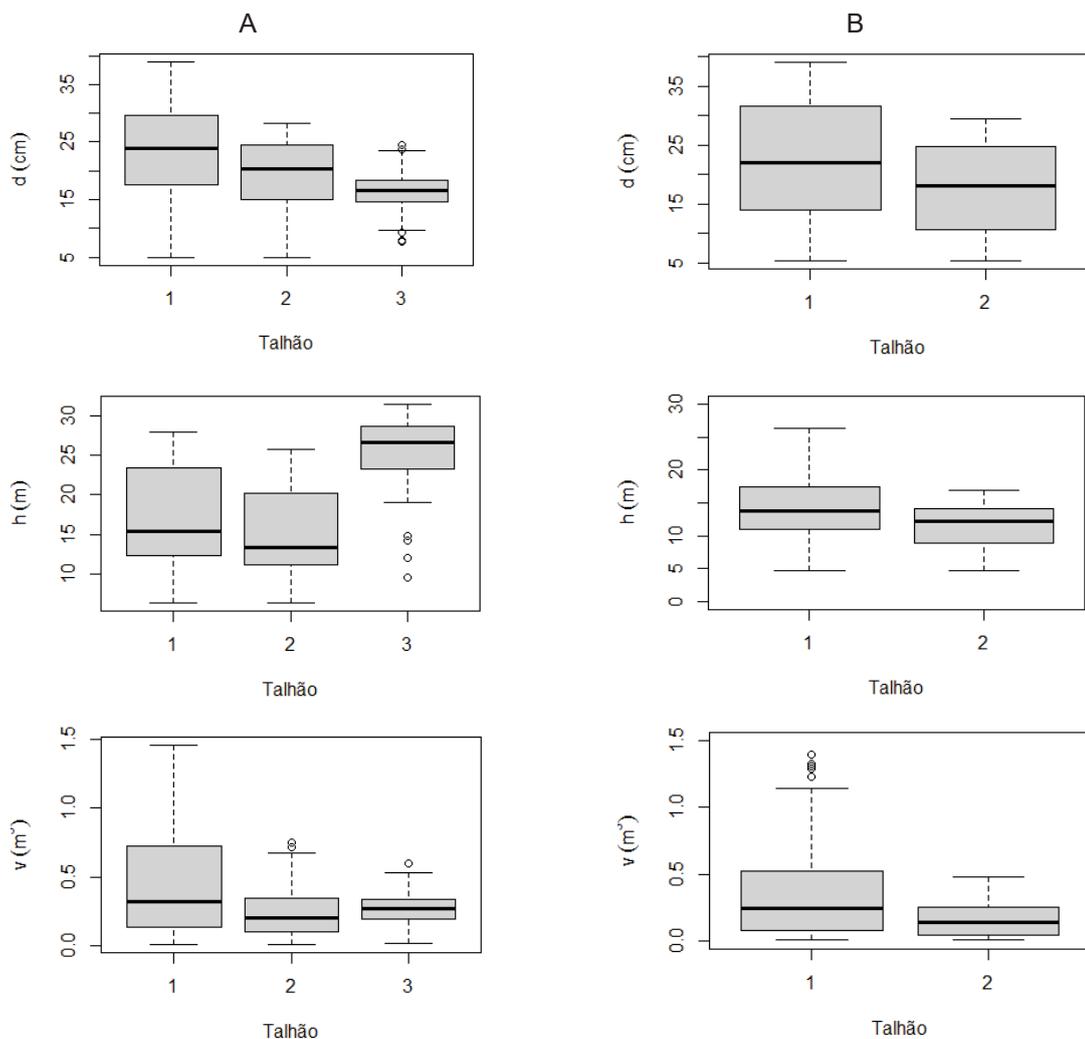
FONTE: A autora (2021)

Em que: d = diâmetro a 1,3 m de altura (cm); h = altura total (m); v = volume (m<sup>3</sup>); n = número de observações; CV% = coeficiente de variação em %;  $s_{\bar{x}}^2$  = variância da média;  $s_{\bar{x}}$  = erro padrão da média; Er (%) = erro padrão da média relativo.

Nos gráficos box-plot (FIGURA 5) das variáveis dendrométricas ( $d$ ,  $h$  e  $v$ ) das árvores cubadas para ajuste (A) e validação (B), foi observada uma maior variação diamétrica ( $d$ ) das árvores que representaram o talhão 1 e menor para o talhão 3 (ajuste).

As árvores cubadas de pinus apresentaram assimetria a direita para as variáveis altura (ajuste) e volume (ajuste e validação). Os dados de validação da altura de pinus tiveram uma menor dispersão e menor assimetria quando comparados aos dados de ajuste. Os dados das árvores cubadas de eucalipto apresentaram uma leve assimetria a esquerda para a altura total ( $h$ ) e o volume apresentou uma distribuição mais simétrica (FIGURA 5).

FIGURA 5 – BOX-PLOT DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS UTILIZADAS PARA O AJUSTE (A) E VALIDAÇÃO (B) PARA OS TALHÕES 1, 2 E 3, NA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2021)

#### 4.2.1 Análise dos tratamentos para a estimativa do volume individual

No tratamento 1, o fator de forma médio obtido para o talhão 1 (pinus – 16 anos) e para o talhão 2 (pinus – 7 anos) foi de aproximadamente 0,46 (TABELA 6). SANQUETTA et al. (2017) obtiveram um fator de forma médio de 0,47 em plantações de *Pinus taeda* com idades que variaram de 5 a 15 anos. KOHLER et al. (2016) ao estudar o fator de forma ao longo dos anos, encontraram um fator de forma médio de 0,47 aos 15 anos e PERTILLE et al. (2018) determinaram um fator de forma médio de 0,46 em plantações de *Pinus taeda* com idades entre 13 e 16 anos.

TABELA 6 – ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO PARA O FATOR DE FORMA MÉDIO E PARA O FATOR DE FORMA PELO ESTIMADOR DE RAZÃO OBTIDO POR CUBAGEM

Talhão	Fator de forma médio			Fator de forma (razão)		
	ff	IC	Erro relativo (%)	ff	IC	Erro relativo (%)
1 – <i>P. taeda</i>	0,460	±0,0057	1,23	0,455	±0,0060	1,32
2 – <i>P. taeda</i>	0,463	±0,0072	1,55	0,457	±0,0077	1,69
3 – <i>E. urograndis</i>	0,445	±0,0086	1,92	0,442	±0,0084	1,89

FONTE: A autora (2021)

Em que: ff = fator de forma; IC = intervalo de confiança para a média amostral

Para o talhão 3 foi obtido um fator de forma médio de 0,445, ou seja, aproximadamente 0,45. Miranda et al. (2015) encontraram um fator de forma médio para *E. urograndis* de 0,4624 aos 2,5 anos de idade, superior ao fator de forma encontrado neste estudo, o que é esperado, pois povoamentos mais jovens apresentam valores maiores de fator de forma (KOHLER et al., 2016; PÉLLICO NETTO; BEHLING, 2019a).

No tratamento 2, o fator de forma médio obtido pelo estimador de razão foi de 0,455 para o talhão 1 e de 0,457 para o talhão 2. para o talhão 3 (eucalipto), o fator de forma médio obtido pelo estimador de razão foi de 0,442 (TABELA 6).

As estatísticas de precisão do fator de forma médio e do fator de forma pelo estimador de razão apresentados na TABELA 6 mostraram que o tratamento 1 apresentou menor variação na estimativa do fator de forma médio e maior precisão na estimativa amostral (menor erro relativo) para os talhões 1 e 2. Para o talhão 3, o tratamento 2 apresentou maior precisão.

No ajuste do modelo de Schumacher-Hall todos os coeficientes foram significativos ( $p$ -value < 0,001), e a significância do valor de F (<0,001) indicaram a existência de regressão entre as variáveis dependente e independentes (TABELA 7).

TABELA 7 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS E COEFICIENTES DE AJUSTE DO MODELO DE SCHUMACHER-HALL E SEUS RESPECTIVOS INTERVALOS DE CONFIANÇA

Talhão	Coeficientes	IC inferior	IC superior	R <sup>2</sup> ajust.	Syx (%)	valor p	Significância valor F
1	$\beta_0 = -10,0404$	$\beta_0 = -10,132$	$\beta_0 = -9,949$	0,98	11,3	0,00	5E-295
	$\beta_1 = 1,8531$	$\beta_1 = 1,8033$	$\beta_1 = 1,9028$			1,8E-183	
	$\beta_2 = 1,0924$	$\beta_2 = 1,0367$	$\beta_2 = 1,1480$			1,3E-113	
2	$\beta_0 = -9,9265$	$\beta_0 = -10,048$	$\beta_0 = -9,8045$	0,97	12,5	2,1E-207	4E-191
	$\beta_1 = 1,8467$	$\beta_1 = 1,7892$	$\beta_1 = 1,9043$			4,7E-131	
	$\beta_2 = 1,0539$	$\beta_2 = 0,9904$	$\beta_2 = 1,1174$			9,81E-81	
3	$\beta_0 = -10,2850$	$\beta_0 = -10,555$	$\beta_0 = -10,015$	0,99	5,8	1,80-53	7E-52
	$\beta_1 = -1,8251$	$\beta_1 = 1,6548$	$\beta_1 = 1,9953$			6,0E-27	
	$\beta_2 = -1,1583$	$\beta_2 = 0,9748$	$\beta_2 = 1,3417$			3,04-17	

FONTE: A autora (2021)

Em que:  $\beta_i$  = coeficientes ajustados; R<sup>2</sup> ajust. = coeficiente de determinação; Syx% = erro padrão da estimativa relativo; valor p = indica o nível de significância do teste t para cada coeficiente da regressão ( $\alpha = 0,05$ ); F = estatística F da ANOVA de regressão.

Os talhões de pinus apresentaram coeficientes de determinação ajustados de 0,98 (talhão 1) e 0,97 (talhão 2), com erros padrão da estimativa acima de 11%. O talhão de eucalipto, por sua vez, apresentou o maior valor de R<sup>2</sup>ajust. e o menor valor de Syx (%).

Esses resultados são semelhantes aos encontrados em outros estudos, em que foi testado o modelo de Schumacher-Hall para a estimativa de volume individual para pinus (MÔRA et al., 2014; RODRIGUES et al., 2017; SANTOS et al., 2019) e para eucalipto (LEAL et al., 2020; MIRANDA et al., 2015).

Os resultados dos testes estatísticos para análise das condicionantes da regressão podem ser analisados na TABELA 8. O teste Durbin-Watson ( $\alpha = 0,05$ ) apontou que não há indícios de autocorrelação dos resíduos, com p-valor > 0,05 para todos os talhões, enquanto o teste Breusch-Pagan ( $\alpha = 0,05$ ) apontou homocedasticidade das variâncias (p-valor > 0,05) (TABELA 8).

TABELA 8 – RESULTADOS DOS TESTES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DOS RESÍDUOS DO AJUSTE DO MODELO DE SCHUMACHER-HALL NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

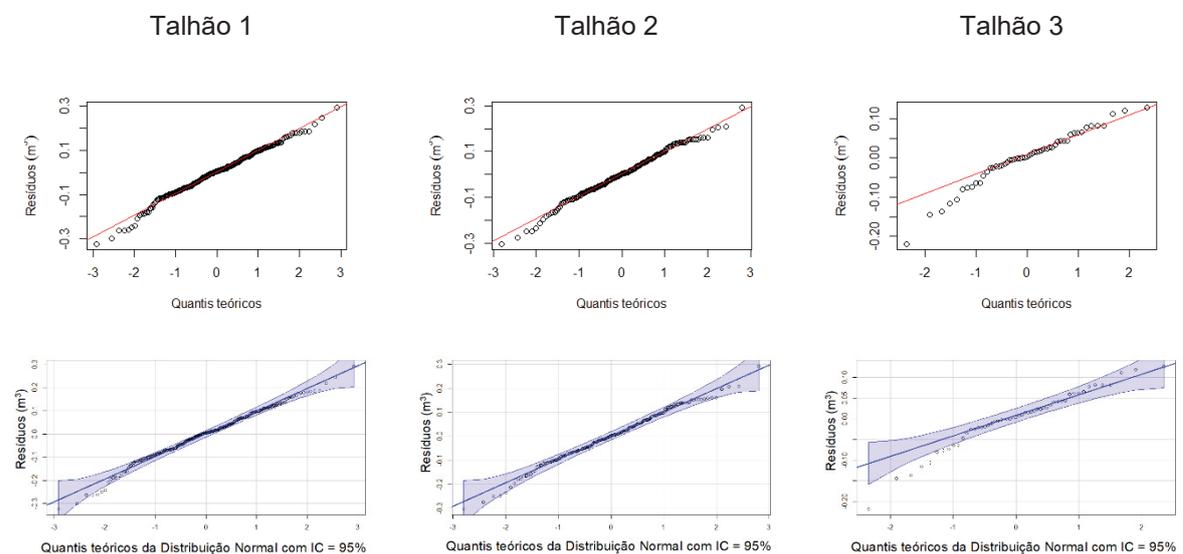
Talhão	Teste	Estatística	Valor p
1	Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov)	D = 0,0379	0,425
	Durbin-Watson	D-W = 1,9162	0,432
	Breusch-Pagan	BP = 4,4557	0,108
2	Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov)	D = 0,0335	0,854
	Durbin-Watson	D-W = 1,943	0,644
	Breusch-Pagan	BP = 3,6603	0,160
3	Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov)	D = 0,1295	0,026
	Durbin-Watson	D-W = 2,0214	0,882
	Breusch-Pagan	BP = 3,6922	0,158

FONTE: A autora (2021)

Os resíduos apresentaram distribuição normal ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) no teste de Lilliefors para o talhão 1 e 2 (TABELA 8). Para o talhão 3 (eucalipto) o teste de Lilliefors indicou a não normalidade dos resíduos ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) e o gráfico Quantil-Quantil (FIGURA 6) mostrou uma assimetria na distribuição além de valores fora do intervalo de confiança, indicando que os resíduos não estão normalmente distribuídos.

Para os talhões de pinus (1 e 2), os gráficos Quantil-Quantil (FIGURA 6), mostram uma aproximação dos resíduos a distribuição normal, sem assimetrias significativas.

FIGURA 6 – GRÁFICO QUANTIL-QUANTIL DOS RESÍDUOS DO AJUSTE DO MODELO DE SCHUMACHER-HALL PARA OS TALHÕES 1, 2 E 3 DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2021)

A análise de correlação de Pearson (TABELA 9) mostrou correlação positiva significativa através do teste  $t$ -Student entre as variáveis dependente ( $\ln v$ ) e independentes ( $\ln d$  e  $\ln h$ ) ao nível de 1% de probabilidade. A maior correlação ocorreu entre as variáveis  $\ln v$  (logaritmo neperiano do volume) e  $\ln d$  (logaritmo neperiano do diâmetro).

TABELA 9 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS VARIÁVEIS DO MODELO AJUSTADO DE SCHUMACHER-HALL PARA OS TRÊS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO

Variáveis	Talhão 1		Talhão 2		Talhão 3	
	$\ln d$	$\ln h$	$\ln d$	$\ln h$	$\ln d$	$\ln h$
$\ln v$	0,976**	0,920**	0,965**	0,877**	0,981**	0,953**

\*\*significativo através do teste  $t$ -Student ao nível de 1% de probabilidade ( $p \leq 0,001$ ).

A multicolinearidade, analisada por meio da estatística *Variance Inflation Factor* – (VIF), não foi detectada, em que foram encontrados os seguintes valores de VIF: 3,17 para o talhão 1, 2,20 para o talhão 2 e 4,96 para o talhão 3.

#### 4.2.2 Escolha do tratamento para a estimativa do volume individual

As estatísticas dos ajustes dos três tratamentos testados (TABELA 10) mostraram que quanto à diferença entre os valores observados e estimados, os três procedimentos se mostraram similares, com RMSE muito próximos entre si, e uma ligeira superioridade do método do fator de forma pelo estimador por razão (tratamento 2) para *P. taeda*. Para o eucalipto, o melhor tratamento foi o de Schumacher-Hall com RMSE% de 5,6% (TABELA 10). Os valores de viés foram próximos de zero e o método 2 produziu estimativas não enviesadas para os três talhões.

TABELA 10 – ESTATÍSTICAS DE ACURÁCIA DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO (AJUSTE) PELOS TRÊS TRATAMENTOS TESTADOS, NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Estatísticas	Talhão 1			Talhão 2			Talhão 3		
	Tratamento			Tratamento			Tratamento		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Viés (m <sup>3</sup> )	-0,004	0,000	0,004	0,003	0,000	0,002	-0,002	0,000	0,000
MAE (m <sup>3</sup> )	0,031	0,031	0,031	0,020	0,019	0,020	0,014	0,014	0,011
MSE (m <sup>3</sup> )	0,003	0,003	0,003	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
RMSE (m <sup>3</sup> )	0,050	0,050	0,051	0,029	0,029	0,030	0,019	0,018	0,015
RMSE (%)	11,2	11,2	11,3	12,0	12,0	12,5	7,0	6,8	5,6
r <sup>2</sup>	0,983	0,983	0,983	0,976	0,976	0,976	0,984	0,984	0,987

FONTE: A autora (2021)

Em que: 1 = fator de forma médio; 2 = estimador de razão; 3 = Schumacher-Hall.

As estatísticas da validação dos três tratamentos testados (TABELA 11) mostraram que o modelo de Schumacher-Hall apresentou melhor resultado, com os menores erros. O talhão 1 apresentou RMSE% de 15,5 e o talhão 2 um RMSE% de 8,5%.

TABELA 11 – ESTATÍSTICAS DE ACURÁCIA DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO (VALIDAÇÃO) DE *P. taeda*, PELOS TRÊS MÉTODOS TESTADOS, NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Estatísticas	Talhão 1			Talhão 2		
	Tratamento			Tratamento		
	1	2	3	1	2	3
Viés (m <sup>3</sup> )	-0,019	-0,015	-0,005	-0,009	-0,007	-0,003
MAE (m <sup>3</sup> )	0,038	0,037	0,033	0,013	0,012	0,009
MSE (m <sup>3</sup> )	0,005	0,005	0,004	0,0005	0,0004	0,0002
RMSE (m <sup>3</sup> )	0,071	0,069	0,062	0,021	0,019	0,014
RMSE (%)	17,7	17,1	15,5	12,9	11,7	8,5

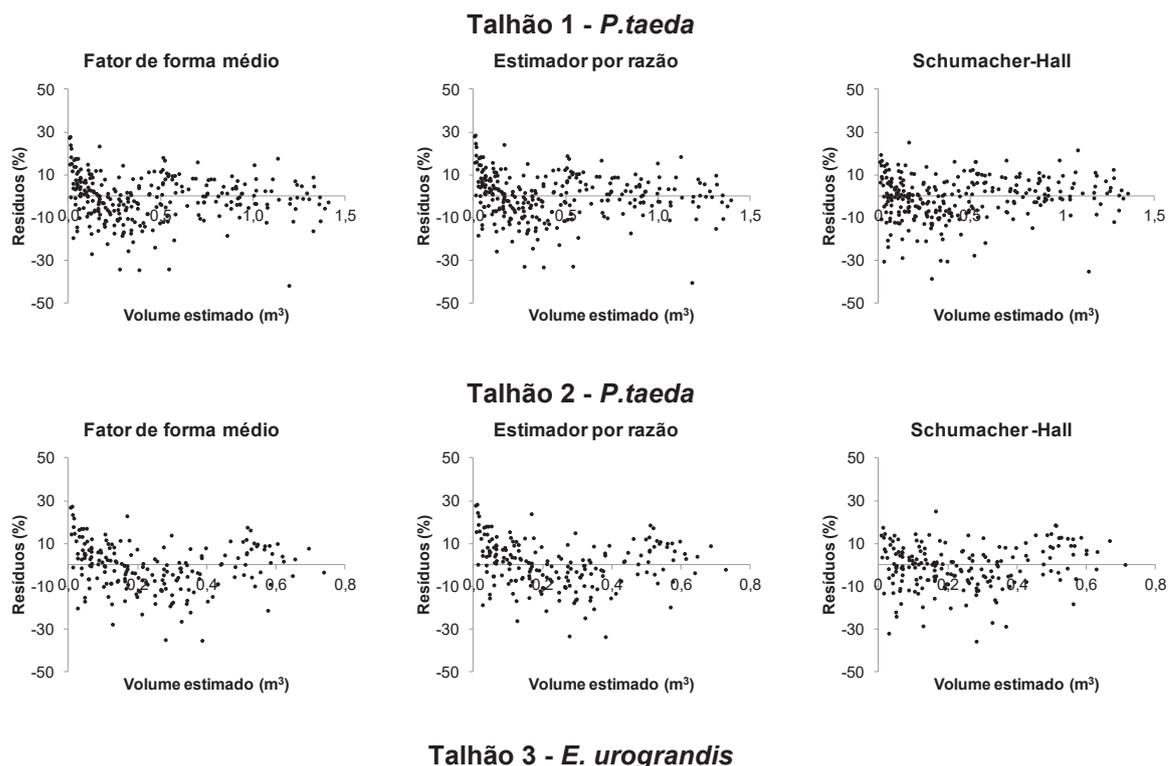
FONTE: A autora (2021)

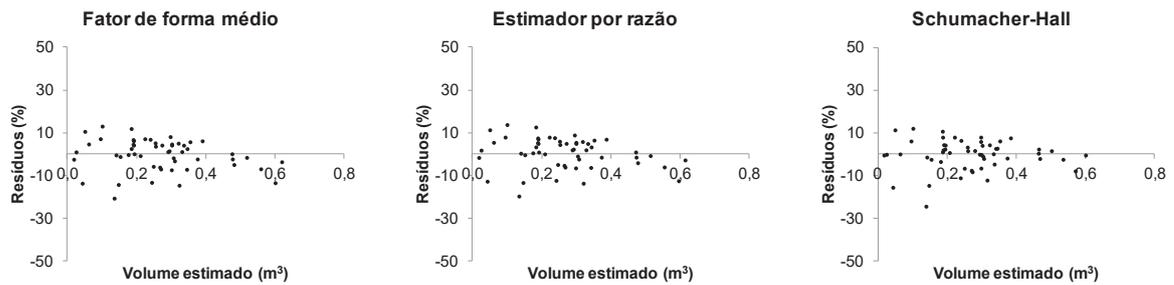
Em que: 1 = fator de forma médio; 2 = estimador de razão; 3 = Schumacher-Hall. Obs.: Para o talhão 3 não foi efetuada a validação.

Todos os tratamentos apresentaram viés negativos (TABELA 11) indicando uma superestimativa do volume individual. Resultado semelhante foi encontrado no trabalho de Kohler (2017). Da mesma forma, Pertille et al. (2018) encontraram um viés negativo ao utilizar fator de forma médio, porém o modelo de Schumacher-Hall subestimou os volumes individuais de *P. taeda*.

A análise gráfica dos resíduos dos dados de ajuste em relação ao volume estimado (FIGURA 7) e em relação ao diâmetro (FIGURA 8), mostrou que os três tratamentos tiveram comportamentos semelhantes.

FIGURA 7 – DISPERSÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS X VOLUME ESTIMADO DO AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE *P.taeda* E *E. urograndis*

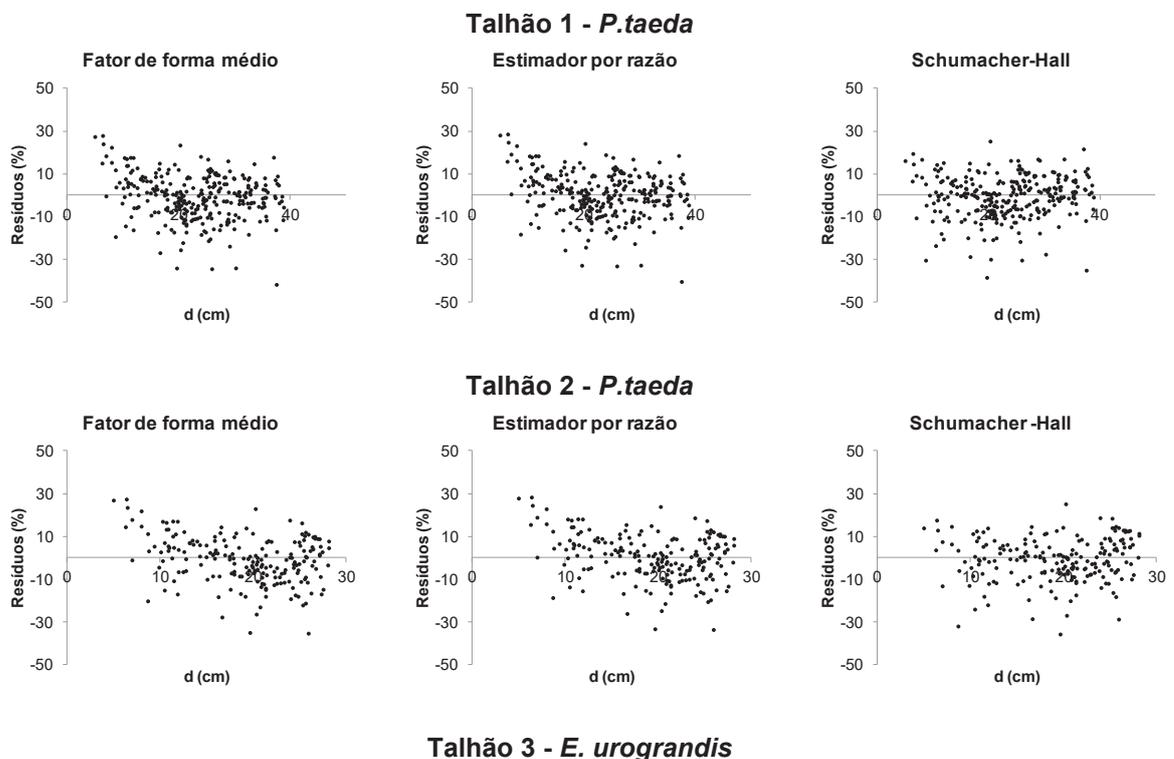




FONTE: A autora (2021)

Ao se comparar a distribuição de resíduos dos três tratamentos (FIGURA 7) e (FIGURA 8), percebeu-se uma tendência maior em subestimar as árvores de menor volume de *P. taeda* nos tratamentos 1 e 2, que utilizaram o fator de forma. Ferrari et al. (2017) obtiveram resultado semelhante ao estimar o volume de *P. elliottii* com o modelo de Schumacher-Hall. Para *E. urograndis*, houve uma ligeira tendência em superestimar os volumes das árvores maiores, tal como mostrou o trabalho de Leal et al. (2020).

FIGURA 8 – DISPERSÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS X DIÂMETRO A 1,30m DO AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE *P.taeda* E *E. urograndis*



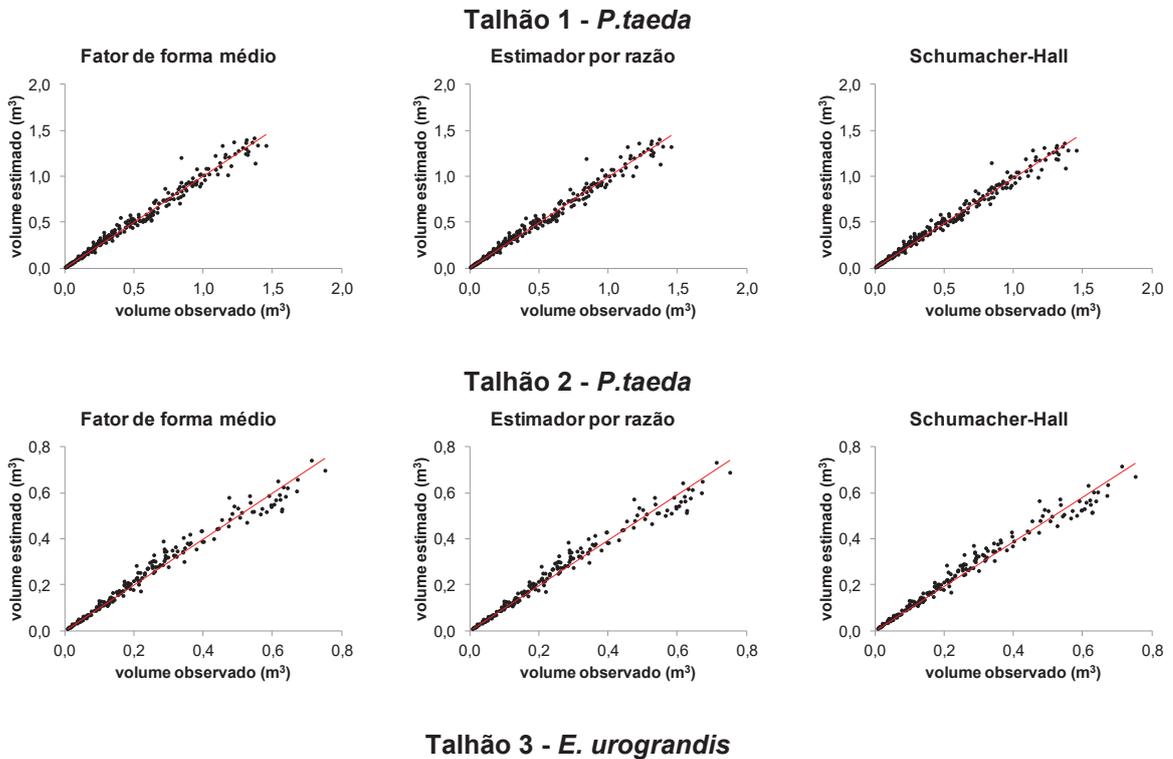


FONTE: A autora (2021)

Os gráficos do volume individual estimado versus o volume observado (FIGURA 9) mostraram uma distribuição homogênea das observações, o que denota uma estimativa sem tendências significativas. Porém, para os dados de eucalipto, observa-se uma predominância de dados com volumes superestimados nas árvores de maior volume.

Além disso, nos dados de pinus, pode-se observar que à medida que os dados avançam para as árvores de maiores volumes, os pontos ficam mais distantes da reta (maior dispersão), mostrando que a diferença do volume observado e estimado é maior para estas árvores.

FIGURA 9 – VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO X VOLUME INDIVIDUAL OBSERVADO DO AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE *P.taeda* E *E. urograndis*

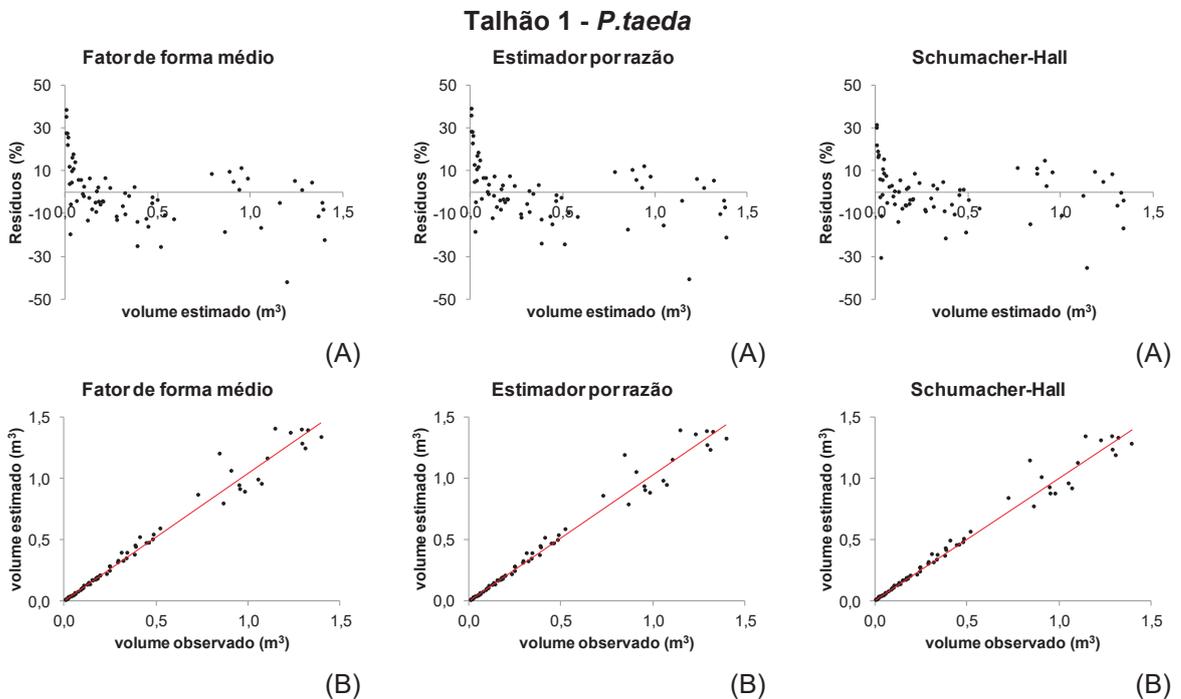


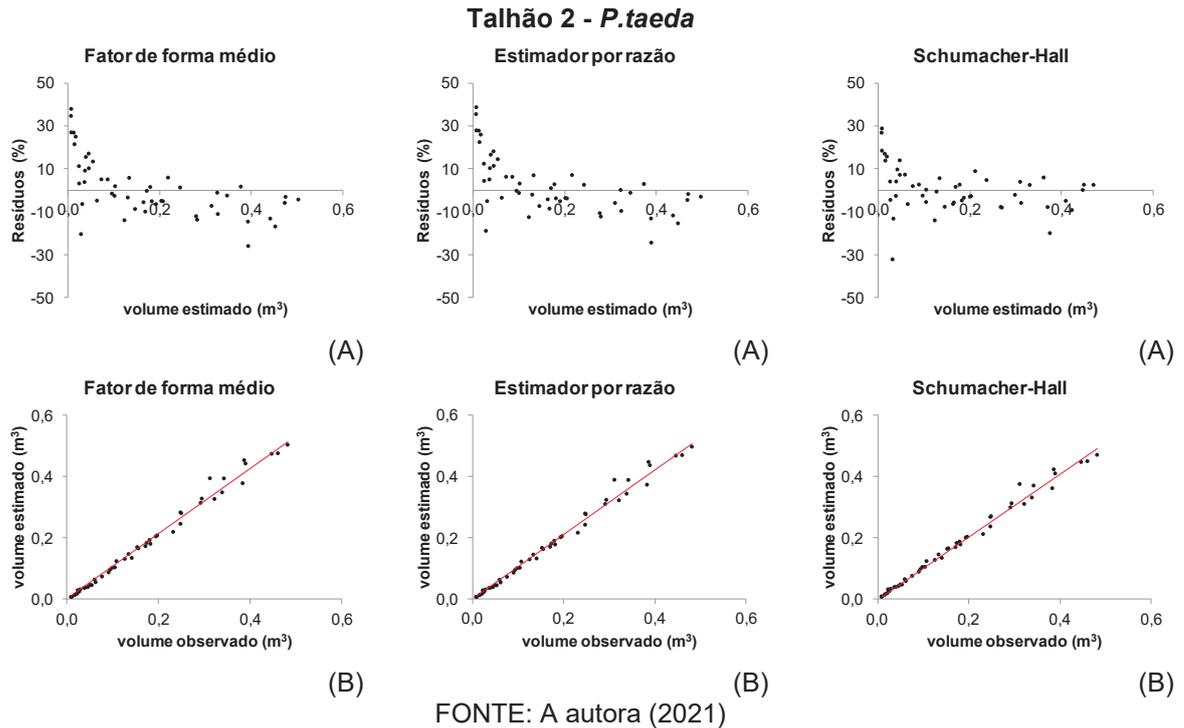


FONTE: A autora (2021)

Os gráficos com a dispersão dos resíduos para os dados de validação de *P. taeda* (FIGURA 10) mostraram tendência em subestimar o volume das árvores menores para os três tratamentos e nos dados para o talhão 2, observou-se também uma superestimativa para as árvores maiores, tal como mostrou o estudo de (KOHLENER, 2017).

FIGURA 10 – DISPERSÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS X VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO (A) E DISPERSÃO DO VOLUME ESTIMADO X VOLUME OBSERVADO (B) DA VALIDAÇÃO DOS DADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE *P. taeda*





O teste Qui-quadrado aplicado na validação dos dados (*P. taeda*) mostrou que o volume individual estimado não difere estatisticamente do volume observado (cubado) nos três tratamentos avaliados, com o valor de Qui-quadrado calculado menor que Qui-quadrado tabelado (TABELA 12).

Esse teste demonstrou, em parte, que os dados de cubagem utilizados para a modelagem do volume individual podem ser utilizados para outra área, mas não mostra especificamente se podem ser utilizados na área de estudo deste trabalho. Para isso, seria necessário ter dados de cubagem obtidos nos talhões, o que não foi possível de se realizar.

Porém, em estudos de modelagem do volume individual, principalmente para a construção de tabelas de volume, dados coletados em várias localidades são utilizados para ajuste de modelos, que podem ser utilizados para a estimativa de volume de uma determinada região (MACHADO, 1979; UBIALLI, 1981).

TABELA 12 – VALORES DE QUI-QUADRADO DOS TRÊS TRATAMENTOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE *P. taeda*

Espécie (talhão)	n	Método 1 $\chi^2$ calc.	Método 2 $\chi^2$ calc.	Método 3 $\chi^2$ calc.	$\chi^2_{\text{tab.}}$
<i>Pinus taeda</i> (talhão 1)	70	0,377	0,358	0,295	89,39
<i>Pinus taeda</i> (talhão 2)	50	0,079	0,070	0,040	66,34

FONTE: A autora (2021)

Em que: 1 = método do fator de forma médio; 2 = método pelo estimador de razão; 3 = método do modelo de Schumacher-Hall. Obs.: Para o talhão 3 não foi efetuada a validação.

O teste de Bartlett apontou que as variâncias são homogêneas ( $X^2_{\text{calc.}} < X^2_{\text{tab.}} = 5,99$ ) e o teste F da análise de variância mostrou que as médias não se diferem estatisticamente, com valor de F calculado menor que o valor de F tabelado (TABELA 13).

TABELA 13 – TESTE DE BARTLETT E TESTE F DOS TRÊS TRATAMENTOS AVALIADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME MÉDIO INDIVIDUAL DE *P. taeda* E *E. urograndis*

Espécie (talhão)	Teste de Bartlett		Teste F - ANOVA		
	X <sup>2</sup>	Valor p	F	valor p	F <sub>tab.</sub>
<i>Pinus taeda</i> (1)	0,3477 <sup>ns</sup>	0,8404	0,0343 <sup>ns</sup>	0,966	3,01
<i>Pinus taeda</i> (2)	0,2965 <sup>ns</sup>	0,8622	0,0466 <sup>ns</sup>	0,955	3,01
<i>Eucalyptus urograndis</i> (3)	0,0835 <sup>ns</sup>	0,9591	0,0037 <sup>ns</sup>	0,996	3,05

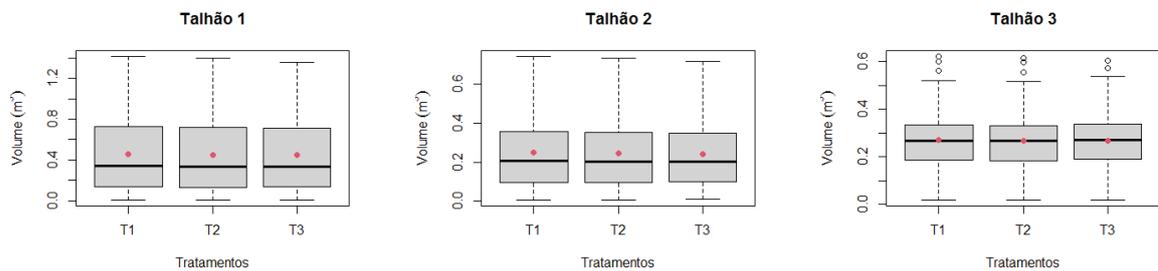
FONTE: A autora (2021)

Kohler (2017) ao comparar as estimativas do volume individual por fator de forma, modelos volumétricos e funções de afilamento para pinus, também não encontrou diferença significativa entre os volumes médios estimados, tal como Miranda et al. (2015) ao avaliar as estimativas por fator de forma e o modelo de Schumacher-Hall para árvores de eucalipto.

A FIGURA 11 apresenta o gráfico box-plot do volume individual estimado pelos três tratamentos para as árvores cubadas utilizadas no ajuste, no qual foi observada uma assimetria para *P. taeda* e uma distribuição próxima à normal para os dados de *E. urograndis*. Pode-se observar também que o volume médio individual é muito próximo entre os três tratamentos testados, corroborando os resultados do teste F da análise de variância.

Kohler (2017) cita que apesar de o teste estatístico indicar que não houve diferença estatística entre os métodos de estimativa do volume individual em seu estudo, é importante escolher aquele com o menor erro, pois deve-se considerar o impacto na receita ao se multiplicar o volume estimado pelo valor do metro cúbico por hectare comercializado.

FIGURA 11 – BOX-PLOT DO VOLUME MÉDIO INDIVIDUAL ESTIMADO DOS DADOS DE CUBAGEM (AJUSTE) PELOS TRÊS MÉTODOS TESTADOS PARA OS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS



Legenda: • volume médio individual estimado

FONTE: A autora (2021)

Onde: T1 = fator de forma médio; T2 = fator de forma pelo estimador de razão; T3 = modelo de Schumacher-Hall.

Após a análise conjunta das estatísticas de acurácia do ajuste, da validação e dos gráficos de resíduos, escolheu-se o modelo de Schumacher-Hall para a estimativa do volume individual das árvores mensuradas no censo.

Dentre os modelos matemáticos testados para estimativa do volume individual, o modelo de Schumacher-Hall é um dos modelos de dupla entrada mais utilizados (SANTOS et al., 2019; COSENZA et al., 2018; PERTILLE et al., 2018; KOHLER, 2017; MIRANDA et al., 2015) normalmente com boa performance de estimativa (RMSE entre 9 e 12%).

Porém, é importante destacar que, dependendo do conjunto de dados utilizado nos ajustes, os resultados podem variar entre um ou outro tratamento. A escolha do melhor procedimento fica a critério de cada pesquisador dado os resultados estatísticos de ajuste, bem como das vantagens e desvantagens de cada um.

#### 4.2.3 Volume individual das árvores do censo e volume total da população

O volume médio individual (vmi) das árvores do censo, estimadas pelas equações de Schumacher-Hall podem ser observadas na TABELA 14. Verificou-se que o volume médio individual para o talhão 1 (*P. taeda* – 16 anos) foi de 0,3494 m<sup>3</sup>, para o talhão 2 (*P. taeda* – 7 anos) foi de 0,1126 m<sup>3</sup>, e para o talhão 3 (*E. urograndis* – 5 anos) foi de 0,2559 m<sup>3</sup>.

TABELA 14 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO PARA AS ÁRVORES DO CENSO E VOLUME TOTAL DA POPULAÇÃO, PARA OS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Características	Talhão 1	Talhão 2	Talhão 3
N	2.611	4.211	2.147
Mínimo (m <sup>3</sup> )	0,0127	0,0024	0,0086
Máximo (m <sup>3</sup> )	0,9891	0,3452	0,5578
Médio (m <sup>3</sup> )	0,3494	0,1126	0,2559
$S_x$ (m <sup>3</sup> )	0,1602	0,0541	0,0807
CV (%)	45,8	48,0	31,5
Total População (m <sup>3</sup> )	912,2	474,3	549,3
Volume por hectare	296,4	186,6	254,7

FONTE: A autora (2021)

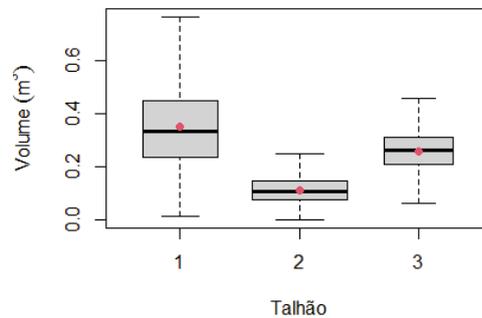
Onde: n = número de observações; Mínimo = volume individual mínimo; Máximo = volume individual máximo;  $S_x$  = desvio padrão; CV% = coeficiente de variação em %.

Os volumes individuais estimados para os talhões florestais deste estudo estão próximos dos valores encontrados na literatura, tais como o trabalho de Machado (1979) que, ao construir tabelas de volume para *P. taeda* (idades de 5 a 18 anos) na região de Telêmaco Borba, obteve um volume médio individual de 0,350 m<sup>3</sup> para árvores com 24 cm de diâmetro a 1,30 m e 17 metros de altura total e um volume de 0,101 m<sup>3</sup> para árvores com 16 cm de diâmetro a 1,30 m e 11 metros de altura total. Ubialli (1981) cita um volume médio de 0,334 m<sup>3</sup> para *P. taeda* com 24 cm de diâmetro e 16 m de altura e um volume médio de 0,115 m<sup>3</sup> para *P. taeda* com 16 cm de diâmetro e 12 m de altura.

Para o eucalipto, Oliveira et al. (2009) citaram um volume médio individual de 0,295 para um clone com diâmetro de 18,78 cm e altura de 23,90 m. O coeficiente de variação foi maior que 30% para todos os talhões (TABELA 14), denotando uma acentuada dispersão de seus valores. Porém, esta variação é explicada pela amplitude volumétrica normalmente encontrada em povoamentos florestais.

Os gráficos box-plot do volume individual dos três talhões da área de estudo podem ser observados na FIGURA 12, onde verificou-se não haver assimetrias significativas para a referida variável, com a menor dispersão para o talhão 2.

FIGURA 12 – BOX-PLOT DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO PARA OS DADOS DO CENSO NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2021)

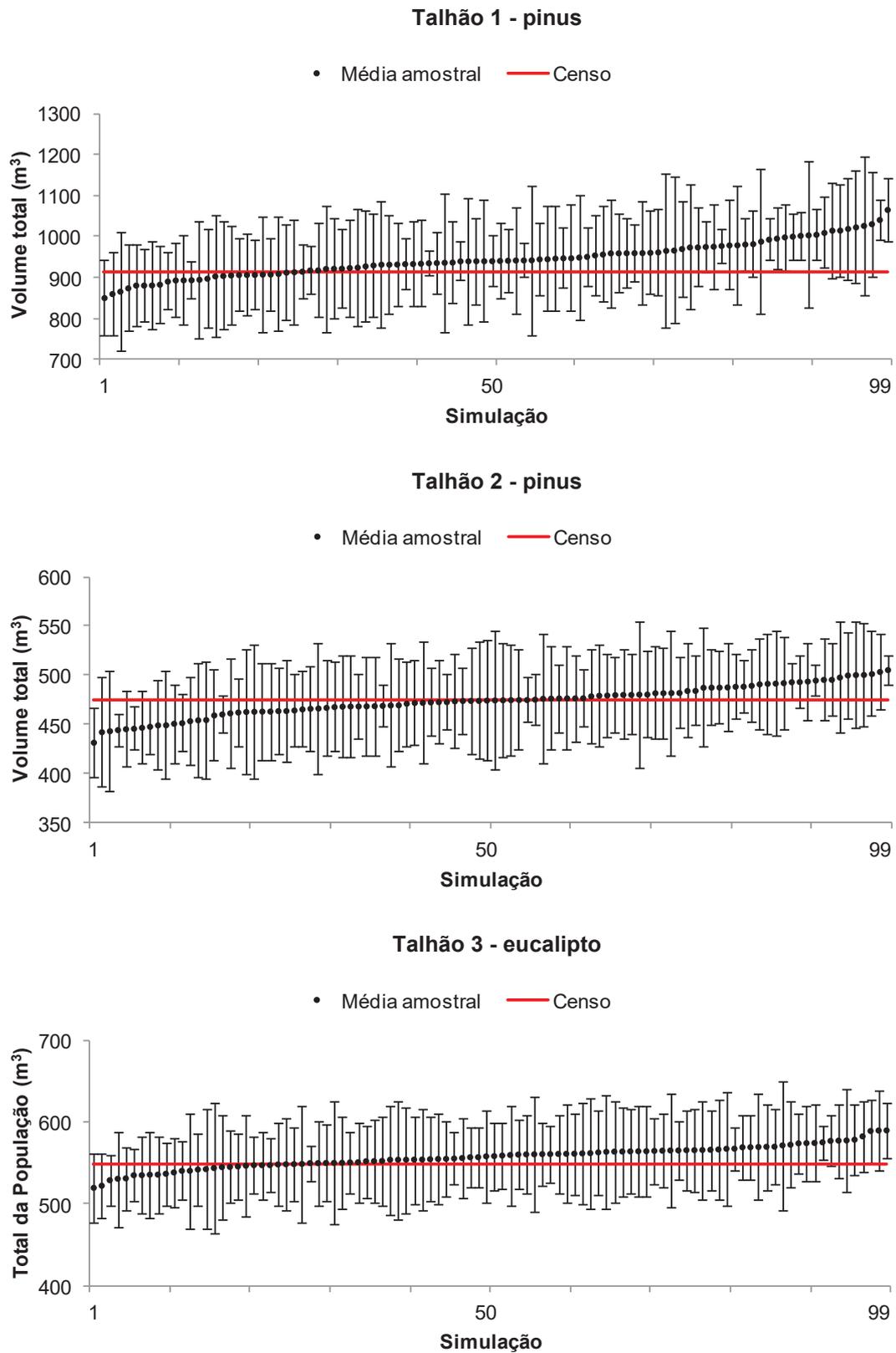
O volume paramétrico de cada talhão, dado pela soma dos volumes individuais estimados de cada talhão, foi de 912,2 m<sup>3</sup> para o talhão 1, 474,3 m<sup>3</sup> para o talhão 2 e de 549,3 m<sup>3</sup> para o talhão 3 e, os volumes por unidade de área foram de 296,4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, 186,6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e 254,7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

#### 4.3 ESTIMATIVA DO TOTAL DA POPULAÇÃO – MÉTODO 1

##### 4.3.1 Processo de amostragem aleatória simples

As simulações do processo aleatório simples, realizadas com cinco unidades amostrais cada, permitiram estimar o volume total da população nos três talhões da área de estudo, assim como seus respectivos intervalos de confiança (FIGURA 13). Observou-se que o volume total paramétrico ficou dentro do intervalo de confiança para 88% das simulações no talhão 1, 94% no talhão 2 e 97% das simulações no talhão 3. No entanto, para os talhões 1 e 3 houve superestimativa do volume total da população em mais da metade das simulações.

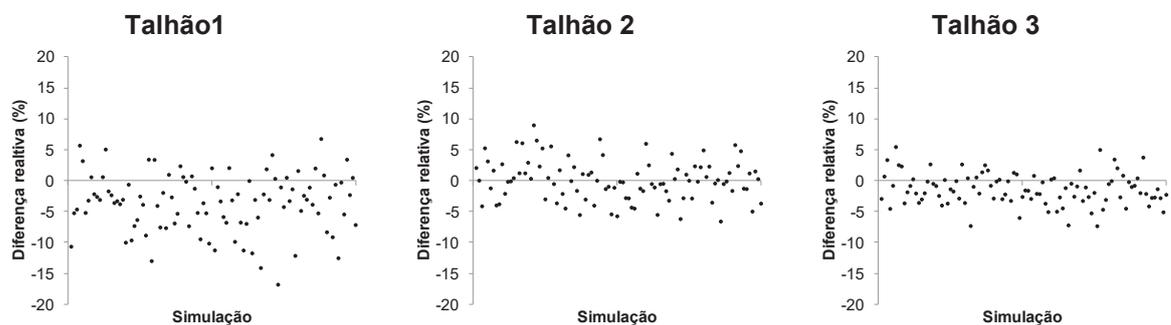
FIGURA 13 – INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA AS SIMULAÇÕES DO INVENTÁRIO FLORESTAL TRADICIONAL PELO PROCESSO ALEATÓRIO SIMPLÉS (MÉTODO 1) NOS TRÊS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2021)

As diferenças relativas (%) entre os valores estimados do total da população e o valor paramétrico ficaram abaixo de 10% para a maioria das simulações, sendo que a maior diferença (acima de 10%), foi encontrada apenas no talhão 1. Verificou-se a predominância de uma diferença negativa nos talhões 1 e 3 (FIGURA 14), enquanto no talhão 2 não houve tendência, demonstrando em média uma boa estimativa (FIGURA 14).

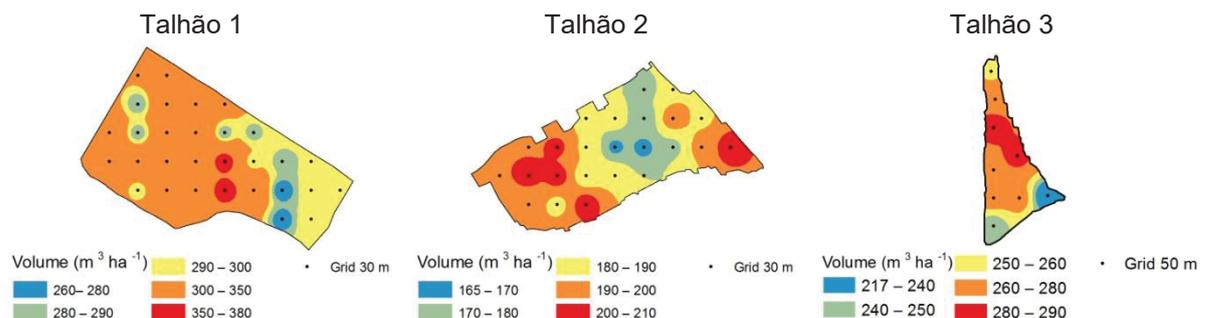
FIGURA 14 – DIFERENÇA RELATIVA (%) PARA AS SIMULAÇÕES DO INVENTÁRIO FLORESTAL POR AMOSTRAGEM ALEATÓRIA SIMPLES NOS TRÊS TALHÕES, DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2021)

A diferença relativa negativa (superestimativa do volume) encontrada na maioria das simulações do talhão 1 e do talhão 3 pode ser justificada pela análise dos mapas com a espacialização do volume por hectare e do grid de amostragem utilizado na interpolação dos dados (FIGURA 15), onde verificou-se o predomínio de áreas com volume por hectare acima da média de  $296,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  para o talhão 1, e de  $254,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  para o talhão 3. O talhão 2 apresentou uma proporção de áreas semelhantes com volume acima e abaixo da média de  $186,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (FIGURA 15).

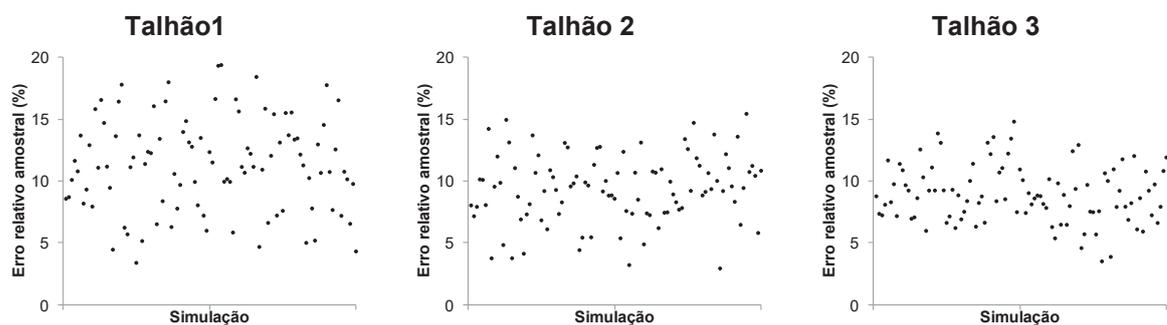
FIGURA 15 – ESPACIALIZAÇÃO DO VOLUME ESTIMADO POR HECTARE NOS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2021)

Os gráficos com os erros amostrais estimados (95% de confiabilidade) do inventário florestal (FIGURA 16) mostraram maior variabilidade para o talhão 1, com erros amostrais relativos de até 20% para variável volume por hectare. Essa dispersão pode indicar uma necessidade de maior intensidade amostral, ou que o procedimento de amostragem aleatório não foi representativo do volume médio deste talhão.

FIGURA 16 – ERRO RELATIVO AMOSTRAL (%) DO VOLUME POR HECTARE PARA AS SIMULAÇÕES DO INVENTÁRIO FLORESTAL TRADICIONAL PELO PROCESSO ALEATÓRIO SIMPLES (MÉTODO 1) NOS TRÊS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2021)

O talhão 1 sofreu danos por ataque de macaco prego em 72,4% das árvores, apresentando um maior número de árvores quebradas, mortas e com ponta seca, podendo justificar a sua variabilidade volumétrica. Kohler (2017) cita que a heterogeneidade do povoamento, demonstrado pela grande variação das suas dimensões e de sua distribuição no talhão, teve influência sobre o erro amostral. Com isso, em processos de amostragem aleatório, corre-se o risco de obter uma amostragem tendenciosa da área.

O erro relativo médio de amostragem (média das cem simulações) do volume por hectare para o talhão 1 foi de 11,3%, para o talhão 2 foi de 9,4% e para o talhão 3 foi de 8,9% (TABELA 15). Péllico Netto; Brena (1997) citam que a precisão mínima admitida é de 10% do valor médio e a desejável em torno de 5%, e seus valores dependem do tamanho da amostra, da variabilidade das unidades amostrais e do procedimento de amostragem utilizado.

O volume médio por hectare obtido pela reamostragem *Bootstrap* das cem simulações pode ser observado na TABELA 15, em que o talhão 1 apresentou um volume por hectare médio de  $307,2 \text{ m}^3 \text{ há}^{-1}$ , com menor precisão ( $\pm 1,3545 \text{ m}^3 \text{ há}^{-1}$ ), o talhão 2 apresentou um volume médio por hectare de  $186,5 \text{ m}^3 \text{ há}^{-1}$ , com a maior

precisão ( $\pm 0,6197 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) e o talhão 3 com  $258,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  e  $\pm 0,6634 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de erro padrão.

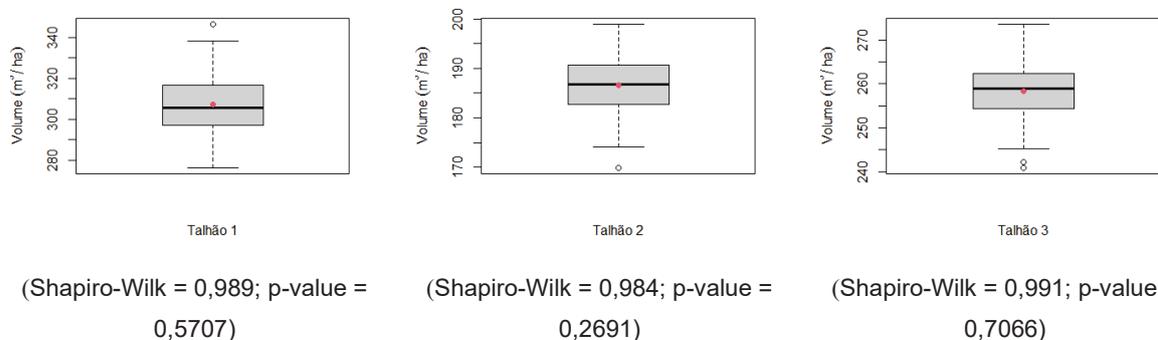
TABELA 15 – ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO DAS MÉDIAS *BOOTSTRAP* DO VOLUME POR HECTARE DAS SIMULAÇÕES DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM ALEATÓRIO SIMPLES PARA OS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Talhão	n	V/ha médio ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ )	Bias ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ )	Erro padrão ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ )	IC ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ )	V/ha Censo ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ )
1	100	307,2	0,026581	$\pm 1,3545$	$304,5 \leq \bar{X} \leq 309,8$	296,4
2	100	186,5	0,001978	$\pm 0,6197$	$185,3 \leq \bar{X} \leq 187,7$	186,6
3	100	258,4	-0,005926	$\pm 0,6634$	$257,1 \leq \bar{X} \leq 259,7$	254,7

FONTE: A autora (2021)

Pelos resultados da reamostragem, o valor paramétrico do volume por hectare foi incluído apenas no intervalo de confiança obtido para o talhão 2. As distribuições dos volumes médios por hectare estimados nas cem simulações apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk ( $p > 0,05$ ), com ausência de assimetrias (FIGURA 17).

FIGURA 17 – BOX-PLOT DO VOLUME MÉDIO POR HECTARE ESTIMADO NAS SIMULAÇÕES DO INVENTÁRIO FLORESTAL PELO PROCESSO DE AMOSTRAGEM ALEATÓRIA SIMPLES NOS TRÊS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2021)

Legenda: • volume médio por hectare (média da simulação)

Apesar dos erros amostrais apresentarem, em média, valores próximos de 10%, o volume total da população estimado com as médias *Bootstrap* das simulações produziu uma diferença relativa ao volume do censo de -3,6% para o talhão 1, de apenas 0,02% para o talhão 2 e de -1,4% para o talhão 3, em que o valor paramétrico foi incluído apenas na amostragem para o talhão 2 (TABELA 16).

TABELA 16 – INTERVALOS DE CONFIANÇA E ACURÁCIA DO VOLUME TOTAL DA POPULAÇÃO ESTIMADO PELA MÉDIA BOOTSTRAP DAS SIMULAÇÕES DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM ALEATÓRIO SIMPLES PARA OS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Talhão	Total da população estimado (m <sup>3</sup> )	IC (m <sup>3</sup> )	Total da população censo (m <sup>3</sup> )	Diferença absoluta (m <sup>3</sup> )	Diferença relativa (%)
1	945,4	937,2 ≤ X ≤ 953,8	912,2	-33,2	-3,6
2	474,2	471,1 ≤ X ≤ 477,2	474,3	0,07	0,02
3	557,2	554,5 ≤ X ≤ 560,1	549,3	-7,9	-1,4

FONTE: A autora (2021)

De modo geral, o processo de amostragem aleatório no talhão 2 apresentou o menor erro de estimativa devido à uma distribuição espacial do volume da população, o que não ocorreu para os talhões 1 e 3.

No presente estudo, pode-se afirmar que o erro de estimativa ocorreu devido ao erro amostral (quando não se mede toda a população), porém é um fato difícil de ser eliminado do inventário florestal, mas que pode ser minimizado se os métodos e processos de amostragem forem bem empregados, como mostrou o trabalho de (KOHLENER, 2017).

#### 4.3.2 Processo de amostragem sistemática

A análise estatística do inventário florestal pelo processo de amostragem sistemática para a variável volume por hectare pode ser observada na TABELA 17. O talhão 1 apresentou o maior erro de estimativa, em termos amostrais, e o talhão 3 o menor. Em todos os talhões, o volume por hectare do censo foi incluído no intervalo de confiança, denotando confiabilidade deste método de estimativa para 95% de probabilidade.

TABELA 17 – ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO DO VOLUME POR HECTARE NO INVENTÁRIO FLORESTAL PELO PROCESSO DE AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA PARA OS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Talhão	n	V/ha médio (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Erro padrão (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	IC (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Erro amostral relativo (%)	V/ha Censo (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
1	5	298,1	±13,9	259,6 ≤ $\bar{X}$ ≤ 336,6	±12,9	296,4
2	5	177,2	±6,5	159,2 ≤ $\bar{X}$ ≤ 195,2	±10,2	186,6
3	5	256,0	±7,3	235,8 ≤ $\bar{X}$ ≤ 276,1	±7,9	254,7

FONTE: A autora (2021)

Ao se avaliar o volume total da população percebeu-se que, apesar do talhão 1 apresentar a maior variabilidade e o maior erro relativo de amostragem, o volume

por hectare médio amostrado sistematicamente foi próximo ao volume por hectare do censo, permitindo uma boa estimativa do volume total da população com apenas - 0,6% de diferença relativa (TABELA 18).

TABELA 18 – INTERVALOS DE CONFIANÇA E ACURÁCIA DO VOLUME TOTAL DA POPULAÇÃO ESTIMADO PELO PROCESSO DE AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA PARA OS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

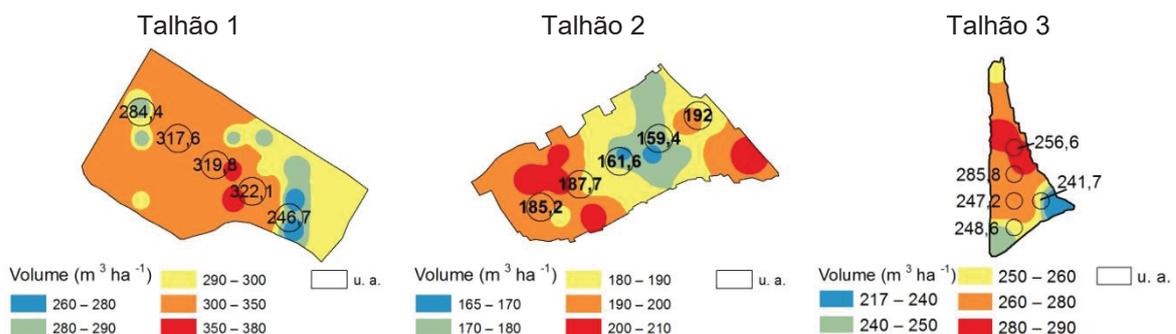
Talhão	Total da população estimado (m <sup>3</sup> )	IC (m <sup>3</sup> )	Total da população censo (m <sup>3</sup> )	Diferença absoluta (m <sup>3</sup> )	Diferença relativa (%)
1	917,5	799,0 ≤ X ≤ 1.036,1	912,2	-5,3	-0,6
2	450,4	404,6 ≤ X ≤ 496,2	474,3	23,9	5,0
3	552,0	508,5 ≤ X ≤ 595,5	549,3	-2,6	-0,5

FONTE: A autora (2021)

Já o talhão 2 apresentou estatísticas satisfatórias no inventário florestal, porém a maior diferença em relação ao volume total do censo, ou seja, uma subestimativa de 5% indicando que neste procedimento, devido a localização espacial das unidades amostrais (FIGURA 18), a média estimada foi menos representativa. No talhão 3 observou-se uma boa acurácia no inventário florestal e uma superestimativa de apenas 0,5% em relação ao volume total do censo (TABELA 18). Em todos os talhões, o volume total da população do censo também foi incluído no intervalo de confiança.

A FIGURA 18 apresenta a localização das unidades amostrais no processo sistemático em conjunto com o mapa da espacialização do volume nos três talhões, em que é possível observar que as unidades amostrais cobriram toda a variação em volume.

FIGURA 18 – UNIDADES AMOSTRAIS SISTEMÁTICAS VERSUS MAPA IDW DO VOLUME POR HECTARE NOS TRÊS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2021)

#### 4.3.3 Aspectos gerais da estimativa do volume total pelo método 1

Ao se avaliar os dois processos de amostragem pode-se inferir que o processo de amostragem aleatório apresentou os melhores resultados na população com menor dispersão volumétrica (talhão 2) e a amostragem sistemática nos talhões com maior dispersão (talhões 1 e 3). Além disso, apenas no processo de amostragem sistemática o valor paramétrico foi incluído no intervalo de confiança para todos os talhões.

Kohler (2017) observou que os erros amostrais foram menores para as amostras distribuídas sistematicamente, ou seja, este processo de amostragem tem maiores chances de representar adequadamente toda a variação de dimensões de volume do povoamento.

Outra questão importante neste estudo, e que a área do talhão foi definida de acordo com os limites determinados pela localização espacial das árvores, conferindo uma alta acurácia na área do talhão, a qual foi utilizada para a estimativa do total da população. Vatrás; Borges (2014) verificaram que a amostragem para determinação do volume por hectare foi eficiente e confiável, mas que o erro na área do talhão foi responsável por apresentar um acréscimo de 13,84% no volume estimado, mostrando a importância de se ter uma base cartográfica consistente.

Considerando que a área do talhão está corretamente determinada, pode-se investigar os erros pelos métodos e processos de amostragem empregados no inventário florestal. Kohler (2017) verificou que os erros amostrais e não amostrais não propiciaram influência significativa nas estimativas do volume do inventário, porém essas variações de volume podem representar uma diferença relevante em termos econômicos.

#### 4.4 ESTIMATIVA DO TOTAL DA POPULAÇÃO – MÉTODO 2

O número de indivíduos detectados pelo algoritmo TreeDetect foi de 2.681 árvores para o talhão 1, 3.962 para o talhão 2 e de 2.111 para o talhão 3, conferindo respectivamente uma taxa de detecção de 102,7%, 94,1% e 98,3% (TABELA 19), incluídos os erros de comissão (não árvore, classificada como árvore pelo algoritmo) e omissão (árvore existente, mas não detectada).

TABELA 19 – NÚMERO DE ÁRVORES (N) DETECTADAS AUTOMATICAMENTE PELO ALGORITMO TREEDETECT NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Talhão	N - TreeDetect	Taxa de detecção (%)	N censo	Erro absoluto (N)
1	2.681	102,7	2.611	70
2	3.962	94,1	4.211	-249
3	2.111	98,3	2.147	-36

FONTE: A autora (2021)

O número de árvores detectadas pelo algoritmo foi menor que o encontrado pelo censo nos talhões 2 e 3 e maior no talhão 1. As árvores não detectadas no talhão 2 e 3 ocorreram devido a dificuldade de visualização da copa (árvores dominadas, bifurcadas), conferindo uma menor acuracidade de detecção (WALLACE et al., 2014). É importante destacar que os algoritmos de contagem dificilmente conseguem detectar árvores bifurcadas como sendo duas árvores ou mais árvores, principalmente se as copas estiverem bem próximas uma das outras (LI et al., 2012; WALLACE et al., 2014; PICOS et al., 2020), conferindo um erro na determinação do número de árvores.

Para o talhão 1, o algoritmo registrou um número maior de árvores, devido principalmente à presença de árvores com galhos laterais (14,7%) que resultam numa característica geométrica peculiar de mais de uma copa. Tais galhos surgiram devido ao ataque de macaco prego ao povoamento, que geralmente culmina com a ponta da árvore quebrada. O excesso de galhos laterais também foi responsável por superestimativa do número de árvores no trabalho de Picos et al. (2020) ao avaliar dois métodos de detecção de árvores em nuvem de pontos LiDAR.

Ao testar dois algoritmos de detecção em uma floresta de pinus com 11 anos de idade, Mourão (2018) verificou que o algoritmo de máximas globais, aplicado em nuvem de pontos 3D obtidas a partir de fotografias tiradas por RPA, produziu 95,2% de acerto, em que a superestimativa de árvores estava relacionada ao prolongamento de galhos em espaçamentos maiores.

Ao se multiplicar o número de árvores detectadas automaticamente (*TreeDetect*) pelo volume médio individual obtido pela amostragem aleatória de 100 árvores (reamostragem *Bootstrap*), foi possível verificar que o volume total paramétrico foi incluído no intervalo de confiança para todos os talhões, no qual obteve-se uma superestimativa de 3,1% para o talhão 1, e uma subestimativa de 4,7% para o talhão 2, e de 2,0% para o talhão 2 (TABELA 20), ou seja, abaixo do limite máximo de 10%, indicando que este método produziu resultados satisfatórios.

TABELA 20 – INTERVALOS DE CONFIANÇA E ACURÁCIA DO VOLUME TOTAL ESTIMADO PELO VOLUME MÉDIO INDIVIDUAL AMOSTRAL DE 100 ÁRVORES E PELO NÚMERO DE ÁRVORES DETECTADAS PELO ALGORITMO TREEDETECT, NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Talhão	$v_{mi}(m^3)$	$N$ (TreeDetect)	Volume total estimado ( $m^3$ )		Volume total Censo ( $m^3$ )	Diferença	
			$V$	IC		Absoluta ( $m^3$ )	Relativa (%)
1	0,3509	2.681	940,8	$859,0 \leq X \leq 1.022,5$	912,2	-28,6	-3,1
2	0,1140	3.962	451,8	$407,7 \leq X \leq 495,6$	474,3	22,5	4,7
3	0,2551	2.111	538,6	$505,0 \leq X \leq 572,7$	549,3	10,8	2,0

FONTE: A autora (2021)

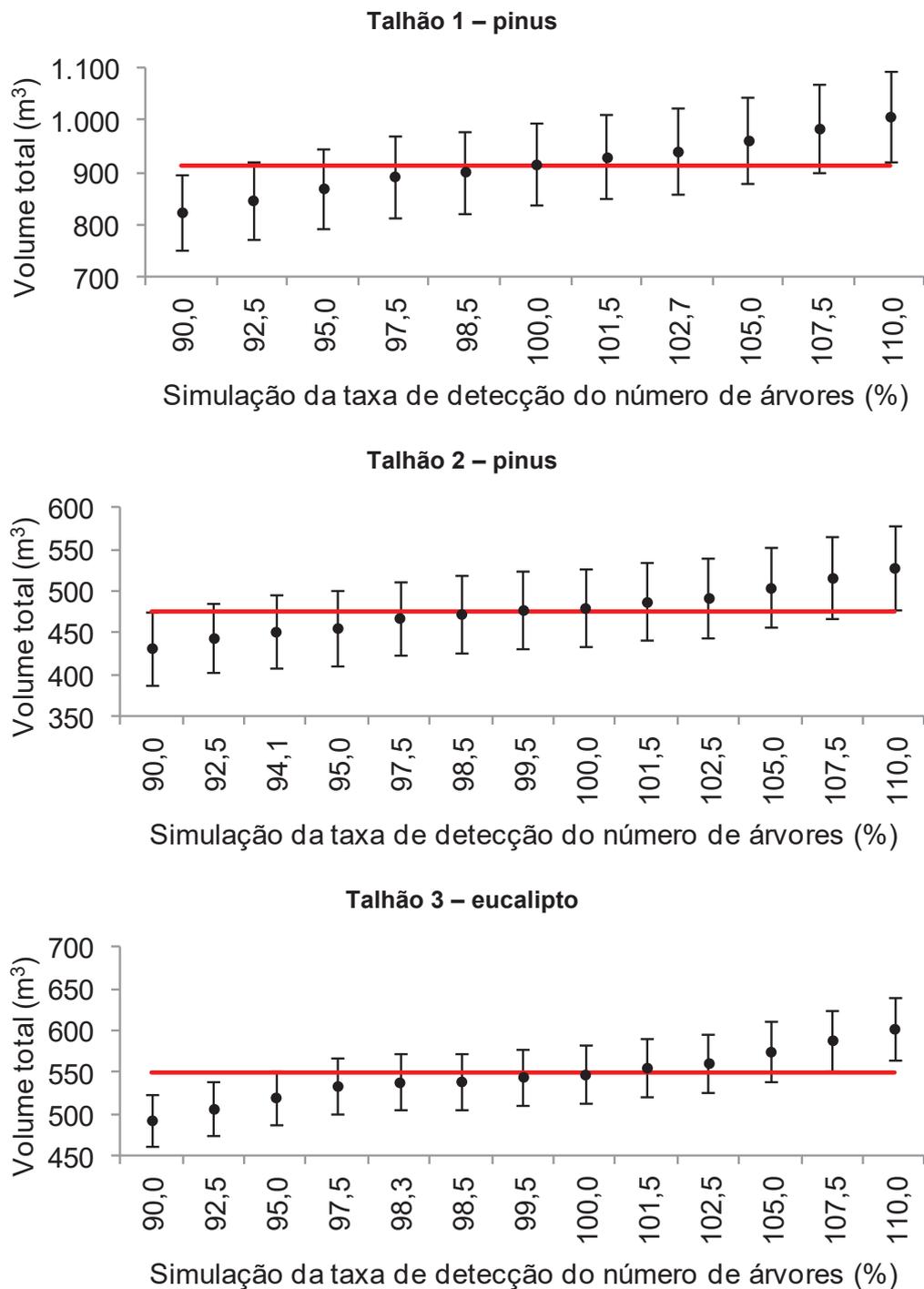
A diferença entre o volume médio individual paramétrico e o volume médio individual estimado pela amostra de 100 árvores foi de  $-0,002 m^3$  (-0,4%) para o talhão 1, de  $-0,001 m^3$  (-1,2%) para o talhão 2 e de  $0,001 m^3$  (0,3%) para o talhão 3, ou seja, o volume médio individual pela amostragem foi superestimado para os talhões 1 e 2, e subestimado para o talhão 3, sendo a maior diferença para o talhão de pinus com 7 anos de idade.

A diferença entre o volume total estimado e o volume total paramétrico se deve a combinação do erro de amostragem para o  $v_{mi}$  e da taxa de detecção de árvores pelo *TreeDetect*, e apesar disto, as estimativas pelo método proposto apresentaram boa performance, com erro relativo de no máximo 4,7% e com o valor paramétrico incluído no intervalo de confiança para todos os talhões.

A menor diferença entre o volume total paramétrico e o volume total estimado foi para o talhão de eucalipto, pois este talhão apresentou os menores erros na estimativa do volume médio individual e também o menor erro na detecção do número de árvores.

Na simulação da combinação de diferentes taxas de detecção com o volume médio estimado das cem árvores amostradas aleatoriamente (FIGURA 19), observa-se que o valor paramétrico ficou contido nos intervalos de confiança das taxas entre 92,5% e 107,5% para os talhões de pinus e entre as taxas de 95% e 105% para o talhão de eucalipto.

FIGURA 19 – VOLUME TOTAL ESTIMADO (VMI 100 ÁRVORES) PELA SIMULAÇÃO DE DIFERENTES TAXAS DE DETECÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES NOS TRÊS TALHÕES DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2021)

Os resultados da estimativa do volume total da população em que foi utilizado o volume médio individual da amostragem sistemática e o número de árvores detectadas pelo *TreeDetect* (TABELA 21) mostraram que o volume total paramétrico foi incluído nos intervalos de confiança para os talhões 2 e 3.

TABELA 21 – INTERVALOS DE CONFIANÇA E ACURÁCIA PARA O VOLUME TOTAL ESTIMADO PELO VOLUME MÉDIO INDIVIDUAL DA AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA E PELO NÚMERO DE ÁRVORES DETECTADAS PELO ALGORITMO TREEDETECT, NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Talhão	$v_{mi}$ (m <sup>3</sup> )	$N$ (TreeDetect)	Volume total estimado (m <sup>3</sup> )		Volume total Censo (m <sup>3</sup> )	Diferença	
			$V$	IC		Abs. (m <sup>3</sup> )	Relativa (%)
1	0,3841	2.681	1.029,8	$933,9 \leq X \leq 1.125,6$	912,2	-117,6	-12,9
2	0,1033	3.962	409,2	$342,1 \leq X \leq 476,4$	474,3	65,1	13,7
3	0,2453	2.111	517,8	$431,6 \leq X \leq 604,0$	549,3	31,5	5,7

FONTE: A autora (2021)

O volume médio individual obtido na amostragem foi superior (-9,9%) ao volume médio individual do censo para o talhão 1, que somado à superestimativa na contagem das árvores, proporcionou uma superestimativa do volume total da população em 12,9%. Para os talhões 2 e 3, os volumes médios individuais amostrados foram menores que o volume médio do censo, com diferenças de 8,3% e 4,1%, respectivamente. O erro na estimativa do volume individual em conjunto com a subestimativa do número de árvores pelo algoritmo, conferiu uma diferença positiva de 13,7% e 5,7% para os talhões 2 e 3, respectivamente.

De modo geral, verificou-se que a acurácia da estimativa do volume total da população é proporcional à acurácia do volume médio individual e da contagem do número de árvores, onde uma estimativa pode compensar a outra. Desta forma, logicamente, quanto maior a acurácia das duas, maior a acurácia de estimativa no total.

Neste trabalho, a estimativa do volume médio individual foi melhor no método que utilizou a amostragem aleatória de 100 árvores com frequência proporcional a distribuição do número de árvores por classes de diâmetro, pois obteve-se as menores diferenças em relação ao volume individual paramétrico, além de que o volume médio individual paramétrico foi incluído no intervalo de confiança deste método. Este fato é interessante, pois demonstra a potencialidade de coletar dados individuais, independentes da locação de unidades amostrais.

Os resultados aqui demonstrados apresentaram menores erros de estimativa no volume total, frente a outros estudos com a aquisição de dados remotos a nível individual, tal como o trabalho de Oliveira et al. (2014), que ao usar dados de altura e número de árvores obtidos por LiDAR obtiveram uma subestimativa de 11,4% no volume total de eucalipto. Cosenza et al. (2018) registraram erros entre -13% e 56% na estimativa do volume total em florestas plantadas de eucalipto ao utilizar dados laser aerotransportado e erros entre -8% a -35% na detecção do número de árvores.

A detecção de indivíduos tem se mostrado promissora com o uso de sensores em RPA ou LiDAR aerotransportado (COSENZA et al., 2018; MACEDO et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2014; WALLACE et al., 2014; GÜLCI, 2019; MATURBONGS et al., 2019; NOORDERMEER et al., 2019; PULITI et al., 2020). Porém, a identificação das árvores depende de uma variedade de parâmetros definidos no processamento das imagens ou nuvens de pontos e também nos algoritmos utilizados (MATURBONGS et al., 2019).

Assim, este trabalho exemplificou a potencialidade de se fazer inferência para o total da população a partir da contagem do número de árvores do talhão, e com a amostragem individual proporcional a classes de diâmetro, com erros de até 4,7%, mostrando-se como uma alternativa ao inventário florestal tradicional.

Evidenciou-se, também, a importância de se ter controle da estimativa do volume médio individual, bem como do número de árvores (taxas de detecção) para gerar menores erros de estimativas do volume total da população.

#### 4.5 INFERÊNCIA POR ÁREA OU POR NÚMERO DE ÁRVORES?

Para avaliação e discussão dos métodos de estimativa do volume total da população, foi elaborada uma tabela resumindo os resultados obtidos (TABELA 22), na qual foi possível verificar que o método de inferência por área com o processo de amostragem sistemática apresentou as menores diferenças para os talhões 1 e 3. No talhão 2, o processo de amostragem aleatória produziu os melhores resultados. Além disso, o método por área com o processo de amostragem sistemático apresentou todos os valores paramétricos incluídos no intervalo de confiança, conforme já discutido.

TABELA 22 - RESUMO DOS RESULTADOS DA ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL DA POPULAÇÃO PELOS MÉTODOS DE INFERÊNCIA POR ÁREA E POR INDIVÍDUO, NOS TRÊS TALHÕES FLORESTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Talhão	volume parâmetro (m <sup>3</sup> )	Área				Indivíduo			
		aleatória simples <i>Bootstrap</i>		sistemática		vmi 100 ( <i>Bootstrap</i> ) x N TreeDetect		vmi sist. x N TreeDetect	
		Total	Dif.%	Total	Dif.%	Total	Dif.%	Total	Dif.%
1	912,2	945,4*	-3,6	917,5	<b>-0,6</b>	940,8	-3,1	1.029,8*	-12,9
2	474,2	474,2	<b>0,02</b>	450,4	5,0	451,8	4,7	409,2	13,7
3	549,3	557,2*	-1,4	552,0	<b>-0,5</b>	538,6	2,0	517,8	5,7

FONTE: A autora (2021)

Em que: vmi 100 = volume médio individual obtido da amostragem aleatória de 100 árvores do censo, reamostrados pelo método de *Bootstrap*; vmi sist. = volume médio individual obtido pela amostragem sistemática; N = número de árvores: \* resultados em que o volume total paramétrico não foi incluído no intervalo de confiança.

O método de inferência por número de árvores (indivíduo), apesar de não apresentar os melhores resultados de acurácia, obteve uma diferença de no máximo 13,7% com o valor paramétrico contido no intervalo de confiança para quase todas as situações, exceto quando se utilizou o vmi da amostragem sistemática no talhão 1 (TABELA 22).

As análises baseadas neste estudo mostram que independente do método (área ou indivíduo) deve-se considerar o efeito da escolha do processo de amostragem no inventário florestal, que depende das características de cada povoamento para ter uma melhor acurácia.

A menor diferença do método 2 foi obtido para o talhão 3, de eucalipto, cujas estatísticas descritivas tiveram menor coeficiente de variação e menor assimetria da distribuição volumétrica no talhão, indicando maior proximidade entre o volume médio individual estimado e o paramétrico, como demonstrado.

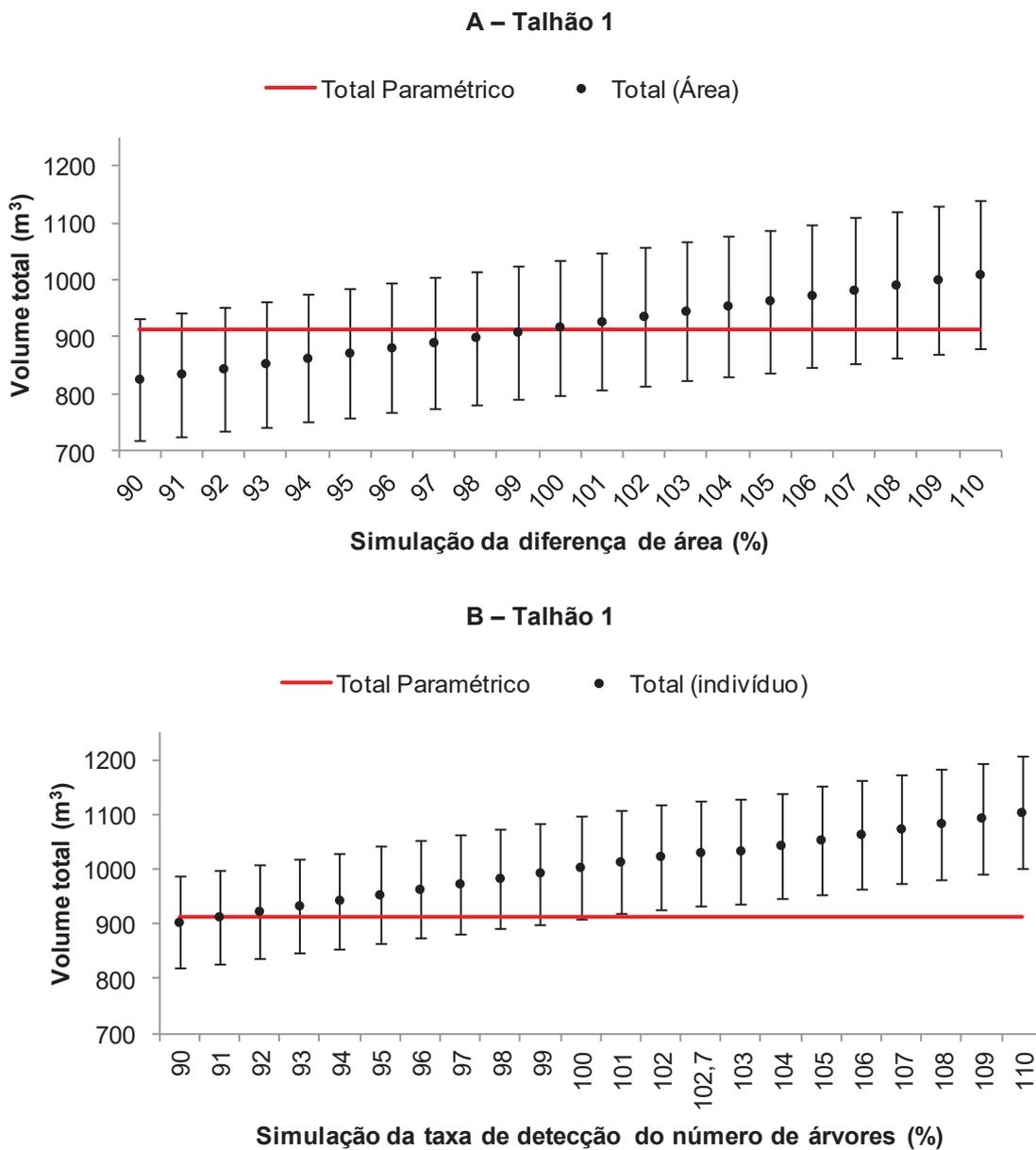
Para completar a discussão sobre a comparação entre os métodos 1 (área) e 2 (indivíduo), foi utilizado o resultado do processo de amostragem sistemática como método para se determinar o volume por hectare ou o volume médio individual e assim avaliar os resultados com as simulações de variação em área e com as diferentes taxas de detecção do número de indivíduos.

Nas figuras (FIGURA 20, FIGURA 21 e FIGURA 22) pode-se observar os resultados da simulação da variação em área do talhão (90 a 110%) e a variação na detecção do número de indivíduos (90 a 110%), incluindo a taxa obtida pelo TreeDetect.

No talhão 1 (FIGURA 20), ao simular diferenças de  $\pm 10\%$  na área do talhão, observou-se que a média (parâmetro) ficou incluída em todos os intervalos de

confiança, com uma diferença que variou de 9,5% (decréscimo da área em 10%) até 10,6% (acréscimo da área em 10%). Ao avaliar as diferentes taxas de detecção, observou-se que no talhão 1 o volume paramétrico ficou contido no intervalo de confiança para as taxas de 90 a 100% (FIGURA 20), com diferenças de 1,1 a -9,9%, respectivamente.

FIGURA 20 - VOLUME TOTAL ESTIMADO (VMI AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA) PELA SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO EM ÁREA (A) E DE DIFERENTES TAXAS DE DETECÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES (B) NO TALHÃO 1



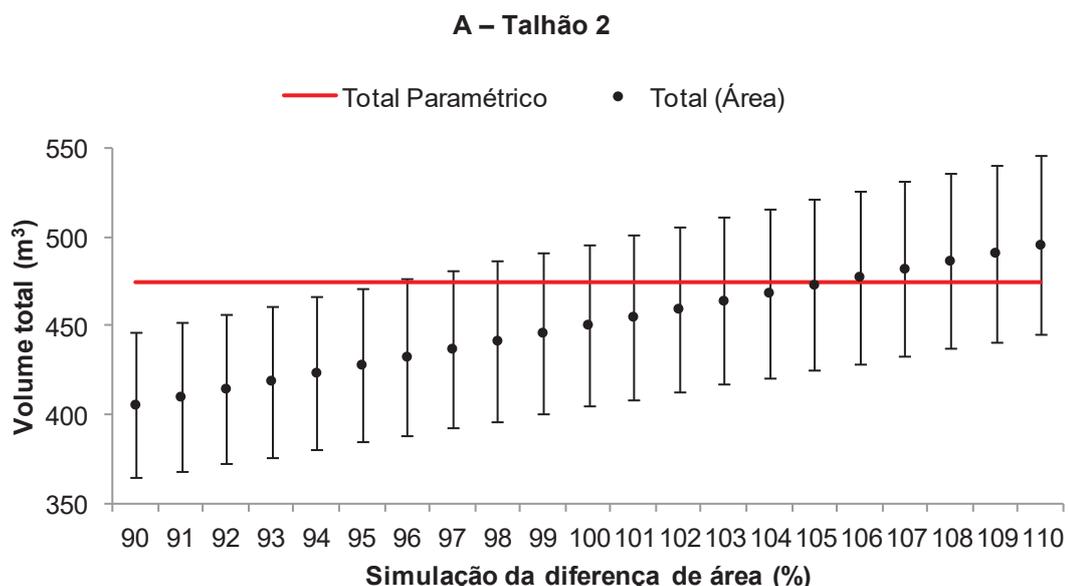
FONTE: A autora (2021)

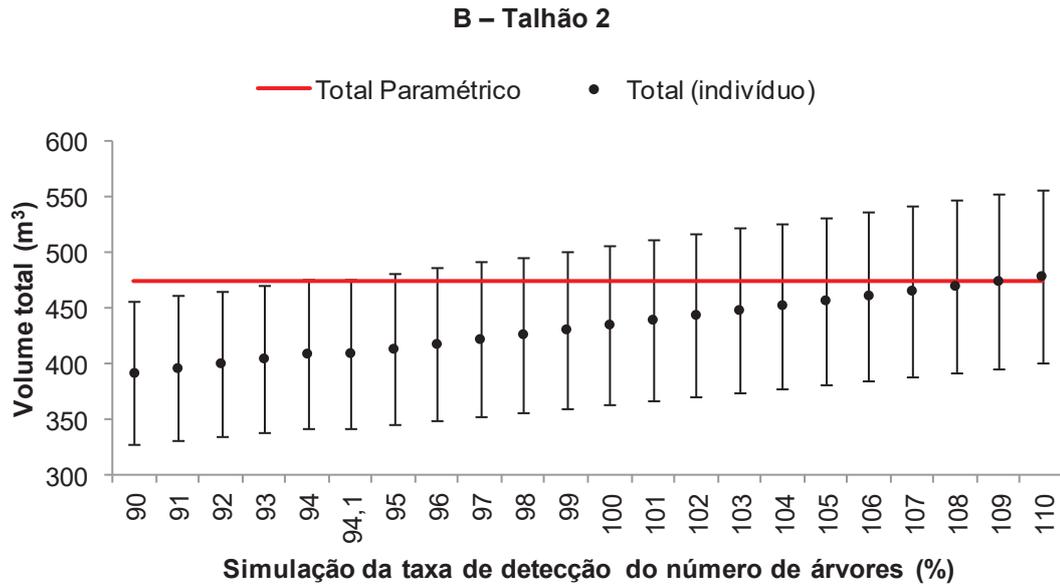
Ao analisar as duas figuras observou-se que a variação em área tem menor diferença quanto mais próxima da área correta (100%). Já o acerto em 100% na detecção dos indivíduos não determina a melhor acurácia, pois o erro de estimativa do volume individual pode compensar o erro de estimativa na contagem, como mostra a FIGURA 20 (B), onde o volume médio individual amostrado, maior que o volume do censo, fez com que a taxa de detecção com maior acurácia fosse a taxa de 91% de contagem, indicando maior sensibilidade às variações em volume médio individual e em número de indivíduos, do que em área.

No talhão 2 (FIGURA 21) o valor paramétrico ficou dentro do intervalo de confiança para as diferenças de área de 96 a 110%, com diferença relativa de 8,8% a -4,5%, respectivamente. Em relação a taxa de detecção do número de árvores, o valor paramétrico ficou incluído nos intervalos de confiança para taxas a partir de 94%, com diferenças relativas que variaram de 13,8 a -0,9%, respectivamente.

Neste caso, como a amostragem sistemática ocasionou maior erro de estimativa no volume por hectare, e o acerto de 100% na área do talhão (FIGURA 21) não produziu a menor diferença entre os volumes da simulação, indicando que nem sempre a estimativa acurada da área do talhão vai proporcionar o menor erro de estimativa, pois também depende da estimativa do volume médio por hectare.

FIGURA 21 – VOLUME TOTAL ESTIMADO (VMI AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA) PELA SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO EM ÁREA (A) E DE DIFERENTES TAXAS DE DETECÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES (B) NO TALHÃO 2

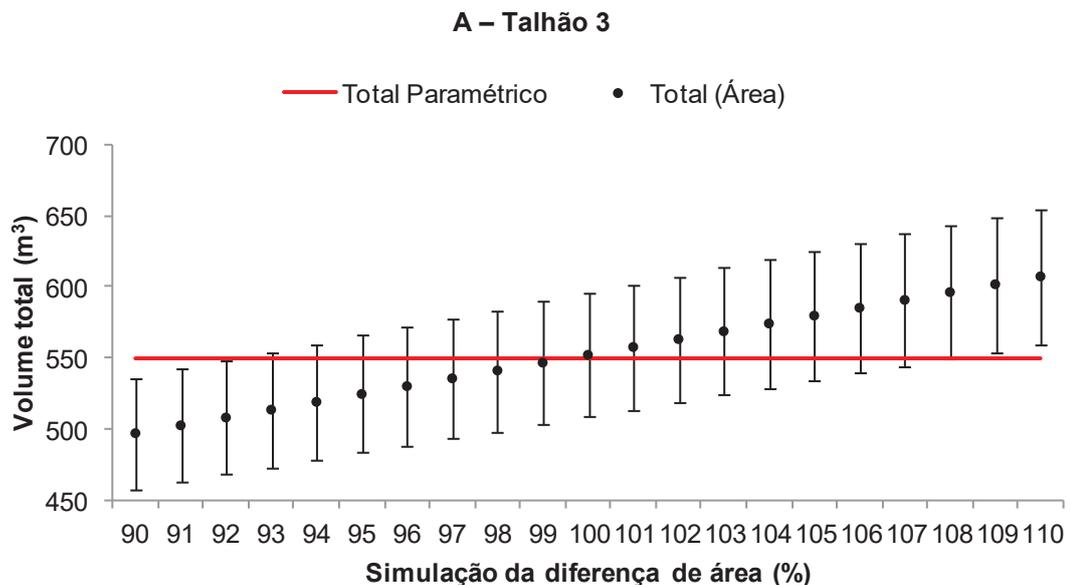


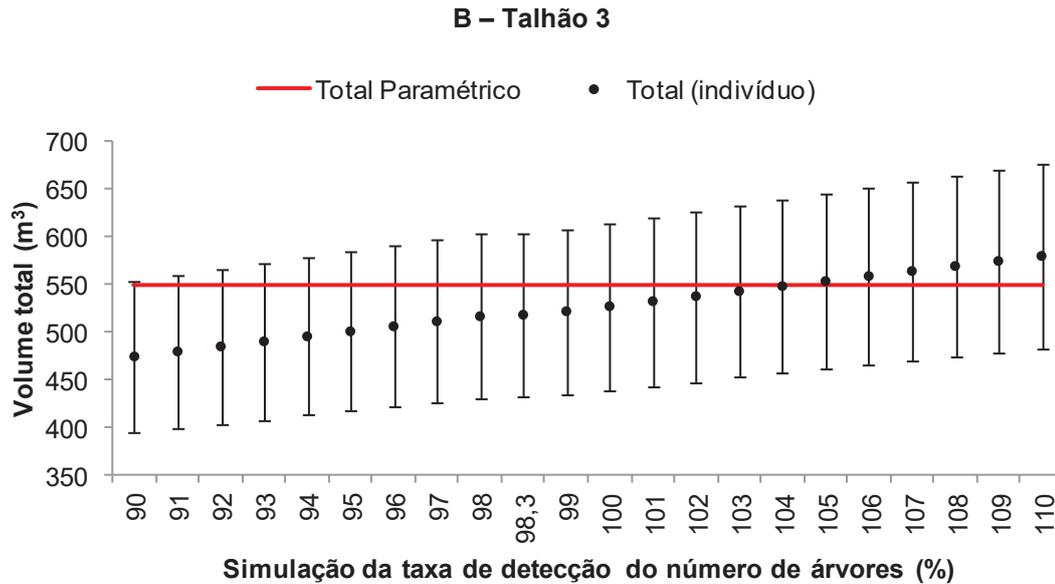


FONTE: A autora (2021)

No talhão 3 (FIGURA 22) o valor paramétrico ficou dentro do intervalo de confiança para as diferenças de área de 93% a 108%, com diferenças relativas de 6,6% a -8,5%, respectivamente. Em relação à taxa de detecção do número de árvores, o valor paramétrico ficou incluído nos intervalos de confiança para todas as taxas de detecção, com diferenças relativas que variaram de 13,7 a -5,5%, respectivamente.

FIGURA 22 – VOLUME TOTAL ESTIMADO (VMI AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA) PELA SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO EM ÁREA (A) E DE DIFERENTES TAXAS DE DETECÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES (B) NO TALHÃO 3





FONTE: A autora (2021)

Os resultados obtidos mostraram que apesar do método 2 não apresentar as menores diferenças relativas, foi eficiente na estimativa do total da população ao se utilizar o volume médio individual da amostragem sistemática e o número de árvores detectadas automaticamente, com taxas de detecção variáveis para cada talhão.

Estes resultados mostram que o método 2 proposto neste trabalho pode ser utilizado para a estimativa do volume total, especificamente quando for observada que as áreas dos talhões não apresentam confiabilidade no mapeamento, ou ainda quando for observada áreas não homogêneas, como presença de falhas e clareiras.

Para escolher o melhor método é necessário observar as particularidades de cada um e de cada talhão conforme a realidade de cada empresa, pois os dois métodos apresentaram o seu grau de eficiência que certamente não é constante, além de apresentarem vantagens e desvantagens operacionais como, por exemplo, o custo de levantamento da área ou da contagem do número de árvores.

Outro ponto a se considerar nos dois métodos diz respeito à acurácia da estimativa do volume individual, pois os dois métodos dependem desta estimativa, seja o volume por hectare ou o volume médio individual. Neste trabalho foi utilizado o método tradicional de estimativa (modelagem com dados de cubagem), em que há o erro inerente ao método de cubagem (não mensurada neste trabalho) e o erro de estimativa da equação de Schumacher-Hall.

A evolução do inventário florestal consiste em realizar levantamentos com maior acurácia e em menor tempo, e neste quesito as geotecnologias tem sido

utilizadas também com o propósito de automatizar processos. White et al. (2016) citam a importância das tecnologias avançadas de sensoriamento remoto para apoio na demanda de informações para os inventários florestais, sendo cada vez mais utilizadas nos levantamentos e projetos florestais.

O laser terrestre (TLS - *Terrestrial Laser Scanning*) tem sido utilizado para obtenção do volume individual de árvores em unidades amostrais (HACKENBERG et al., 2015; SAARINEN et al., 2017); FAN et al., 2020) ou para a estimativa do diâmetro e da altura total (LIU et al., 2018). Buck et al. (2019) obtiveram 100% de acurácia na detecção de indivíduos na parcela e a filtragem da nuvem 3D permitiu a modelagem de 70% do fuste. Panagiotidis et al. (2021) avaliaram dois métodos para a estimativa de alturas a partir da nuvem de pontos 3D (Trimble TX8 - TLS) e um algoritmo de análise hierárquica de cluster para a obtenção do diâmetro, que possibilitou a estimativa do volume individual com erro médio absoluto de 0,048 m<sup>3</sup> e RMSE% de 10,84.

Corte; Rex; et al. (2020) citam que o TLS é amplamente utilizado para a obtenção do diâmetro das árvores, porém apresenta limitações para seu uso em campo, uma vez que algumas áreas florestais apresentam dificuldade de acesso. Neste sentido, os veículos aéreos não tripulados apresentam a vantagem de não possuir restrições quanto ao acesso de áreas. Corte; Rex; et al. (2020) utilizaram uma nuvem de pontos LiDAR de alta densidade obtida por VANT para obter diâmetros e alturas em sistema lavoura, pecuária e floresta, no qual obtiveram RMSE de 11,3% na estimativa do diâmetro e 7,9% na estimativa de altura de *Eucalyptus benthamii*.

Recentemente o trabalho de Puliti et al. (2020) avaliaram a estimativa do volume de árvores a partir do diâmetro e altura oriundos de nuvem de pontos de um sistema LiDAR-VANT sem o uso de dados de campo para calibração, onde os autores puderam concluir que é possível fazer tal inferência, com maior precisão em áreas menos densas, e ainda que a precisão aumentou conforme a escala espacial, sendo maior para a escala floresta e menor na escala de unidade amostral.

Em análise geral, observa-se que todos os métodos apresentam erros de estimativas, e a escolha do método deve avaliar conjuntamente a eficiência dos métodos e processos de levantamentos de dados, assim como o custo de cada um.

Porém, a nova abordagem apresentada neste trabalho, demonstrou que o método de inferência por indivíduo pode ser utilizado para a estimativa do volume total

da população com erros menores de 5% e com o valor de estimativa dentro do intervalo de confiança.

## 5 CONCLUSÃO

O melhor procedimento para a estimativa do volume individual neste estudo foi o do modelo de Schumacher-Hall.

O método tradicional de inventário florestal (inferência por área) apresentou as menores diferenças em relação ao volume do censo.

O método 2 (inferência por número de árvores) pode ser utilizado para a estimativa do volume total da população.

O processo de amostragem aleatório (método 1) possibilitou o menor erro para a estimativa do volume total no talhão 2, enquanto o processo sistemático foi o melhor nos talhões 1 e 3, em que o volume total paramétrico foi incluído nos intervalos de confiança respectivos ao melhor processo de amostragem.

A distribuição espacial do volume nos talhões estudados influencia nos resultados obtidos pelos diferentes processos de amostragem (método 1), de modo que o processo de amostragem aleatório proporcionou os maiores erros de estimativa em relação ao volume do censo para os talhões 1 e 3 e o volume total paramétrico não foi incluído nos intervalos de confiança determinados por este processo de amostragem.

No método 2 (inferência por número de árvores) os menores erros para a estimativa do total da população foram obtidos quando se utilizou o número de árvores detectadas pelo *TreeDetect* e o volume médio individual de cem árvores selecionadas aleatoriamente, com frequência proporcional ao número de árvores por classes de diâmetro, em que o volume total paramétrico foi incluído nos intervalos de confiança nos três talhões.

O volume médio individual estimado pelo processo de amostragem sistemática, em conjunto com o número de árvores detectadas pelo *TreeDetect* não foi eficiente em estimar o total da população no talhão 1, pois o volume total paramétrico não foi incluído no intervalo de confiança e a diferença em relação ao volume do censo foi de -12,9%.

A variação em área e em número de árvores permitiu verificar que os dois métodos dependem da acurácia da estimativa do volume individual para se obter os

melhores resultados, pois uma elevada acurácia na determinação da área dos talhões ou na contagem do número de árvores não garante o menor erro de estimativa para o total, assim como uma elevada acurácia na estimativa do volume individual, caso haja problemas na delimitação de áreas ou na contagem das árvores.

## **6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Em pesquisas futuras para complementar este estudo, algumas recomendações são sugeridas a seguir.

Avaliar e comparar os resultados obtidos pelos métodos de inferência por área e por indivíduo com o volume real do talhão (colheita).

Para a modelagem do volume, testar métodos não destrutivos para estimativa do volume individual, como o LiDAR (terrestre ou aéreo), de modo que o processo seja ainda mais automatizado e com menor intensidade amostral.

Em relação à contagem automática do número de árvores, considerar outros algoritmos de contagem e outros sensores, pois há de se considerar que é uma área em estudo e aperfeiçoamento com resultados cada vez mais promissores.

Considerando que se tenha obtido o melhor método para estimativa do volume individual, pode-se avaliar onde se erra mais, no levantamento das áreas (mapeamento) ou na contagem do número de árvores? Além disso, qual é o custo das operações? Qual apresenta maior facilidade operacional?

Estes métodos devem ser aplicados e testados em outras áreas de estudo, visto que há talhões com outras características, que certamente irão apresentar resultados diferentes, inclusive nos métodos de estimativa do volume individual.

## REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ARAÚJO, E. J. G. DE; PELISSARI, A. L.; DAVID, H. C.; et al. Relações dendrométricas em fragmentos de povoamentos de pinus, em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 72, p. 355–366, 2012.
- ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; LEITE, H. G.; CASTRO, R. V. O.; et al. Modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos de eucalipto utilizando a função Gama. **Cerne**, v. 19, n. 2, p. 307–314, 2013.
- AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest Measurements**. 5<sup>o</sup> ed. New York: Waveland Press, 2015.
- BEETS, P. N.; BRANDON, A. M.; GOULDING, C. J.; et al. The national inventory of carbon stock in New Zealand's pre-1990 planted forest using a LiDAR incomplete-transect approach. **Forest Ecology and Management**, v. 280, p. 187–197, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.035>>.
- BERRA, E. F.; BRANDELERO, C.; PEREIRA, R. S.; et al. Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 4, p. 853–864, 2012.
- BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. DOS; MANZATTO, C. V.; et al. **Mapa de Solos do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro, 2007.
- BIRDAL, A. C.; AVDAN, U.; TÜRK, T. Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 1144–1156, 2017.
- BONAZZA, M.; NICOLETTI, M. F.; CRUZ, G. S.; et al. Métodos para estimativas volumétricas de Pinus patula. **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 2, p. 673–679, 2019.
- BUCK, A. L. B.; LINGNAU, C.; NETO, S. P.; MACHADO, Á. M. L.; MARTINS-NETO, R. P. Stem modelling of eucalyptus by terrestrial laser scanning. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, 2019.

BUONGIORNO, J.; ZHU, S. Assessing the impact of planted forests on the global forest economy. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 44, n. Suppl. 1, p. 1–9, 2014.

CHEN, Y.; HAKALA, T.; KARJALAINEN, M.; et al. UAV-Borne profiling radar for forest research. **Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 1–17, 2017.

CIARNOSCHI, L. D. **Estimadores biométricos para avaliação e manejo sustentável no sudoeste da Amazônia**. 2020. 143 f. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

COCHRAN, W. G. **Sampling Techniques**. 3<sup>o</sup> ed. New York: JOHN WILEY & SONS, 1977.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79–97, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000501>>.

CORTE, A. P. D.; REX, F. E.; ALMEIDA, D. R. A.; et al. Measuring individual tree diameter and height using gatoreye high-density UAV-lidar in an integrated crop-livestock-forest system. **Remote Sensing**, v. 12, n. 5, p. 1–15, 2020.

CORTE, A. P. D.; SOUZA, D. V.; REX, F. E.; et al. Forest inventory with high-density UAV-Lidar: machine learning approaches for predicting individual tree attributes. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, p. 1–14, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105815>>.

COSENZA, D. N.; SOARES, V. P.; LEITE, H. G.; et al. Airborne laser scanning applied to *Eucalyptus* stand inventory at individual tree level. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 12, p. 1373–1382, 2018.

COUTINHO MENEGUZZI, C.; FERNANDES DA SILVA, G.; REGIS MAURI, G.; RIBEIRO DE MENDONÇA, A.; ALMEIDA DE BARROS JUNIOR, A. Routing model applied to forest inventory vehicles planning. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 175, n. June, p. 105544, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105544>>.

CULVENOR, D. S. TIDA: an algorithm for the delineation of tree crowns in high

spatial resolution remotely sensed imagery. **Computers & Geosciences**, v. 28, n. 1, p. 33–44, 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300400001102>>.

DAVID, H. C.; MIRANDA, R. O. V.; WELKER, J.; et al. Estratégias de amostragem de fustes para medição: uma abordagem estatística da modelagem do volume de árvore individual. **Cerne**, v. 22, n. 3, p. 249–260, 2016.

DOLÁCIO, C. J. F.; DE OLIVEIRA, T. W. G.; OLIVEIRA, R. S.; CERQUEIRA, C. L.; COSTA, L. R. R. Different approaches for modeling *Swietenia macrophylla* commercial volume in an Amazon agroforestry system. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 3, p. 1011–1022, 2020.

EMILIEN, A.-V.; THOMAS, C.; THOMAS, H. UAV & satellite synergies for optical remote sensing applications: a literature review. **Science of Remote Sensing**, v. 3, n. October 2020, p. 100019, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100019>>.

EUGENIO, F. C.; SCHONS, C. T.; MALLMANN, C. L.; et al. Remotely piloted aircraft systems and forests: a global state of the art and future challenges. **Canadian Journal Forest Research**, v. 50, p. 705–716, 2020.

FAN, G.; NAN, L.; DONG, Y.; SU, X.; CHEN, F. AdQSM: A new method for estimating above-ground biomass from TLS point clouds. **Remote Sensing**, v. 12, n. 18, 2020.

FAO. **Main report**. Roma, 2020.

FEKETY, P. A.; FALKOWSKI, M. J.; HUDAK, A. T. Temporal transferability of LiDAR-based imputation of forest inventory attributes. **Canadian Journal Forest Research**, v. 45, n. 4, p. 422–435, 2015.

FERRARI, L. S.; NAKAJIMA, N.; DA SILVA, S. A.; et al. Equações de volume para condução da regeneração natural de *Pinus elliottii* Engelm. **Espacios**, v. 38, n. 42, 2017.

FIGUEIREDO-FILHO, A.; BORDERS, B. E.; HITCH, K. L. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 83, n. 1–2, p. 39–46, 1996.

GARCÍA-ESPINOZA, G. G.; AGUIRRE-CALDERÓN, O. A.; QUIÑONEZ-BARRAZA, G.; et al. Taper and volume systems based on ratio equations for *Pinus pseudostrobus* Lindl. in Mexico. **Forests**, v. 9, n. 6, p. 1–14, 2018.

GOGOI, A.; AHIRWAL, J.; SAHOO, U. K. Plant biodiversity and carbon sequestration potential of the planted forest in Brahmaputra flood plains. **Journal of Environmental Management**, v. 280, n. May 2020, p. 111671, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111671>>.

GOLDBERGS, G.; MAIER, S. W.; LEVICK, S. R.; EDWARDS, A. Efficiency of individual tree detection approaches based on light-weight and low-cost UAS imagery in Australian Savannas. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 1–19, 2018.

GORGENS, E. B.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. DO N.; GLERIANI, J. M. Estimação do volume de árvores utilizando redes neurais artificiais. **Revista Árvore**, v. 33, n. 6, p. 1141–1147, 2009.

GREEN, P. C.; BURKHART, H. E.; COULSTON, J. W.; RADTKE, P. A novel application of small area estimation in loblolly pine forest inventory. **Forestry**, v. 93, n. 3, p. 444–457, 2020.

GÜLCI, S. The determination of some stand parameters using SfM-based spatial 3D point cloud in forestry studies: an analysis of data production in pure coniferous young forest stands. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 8, p. 495, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7628-4>>.

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

HAWRYŁO, P.; WEZYK, P. Predicting growing stock volume of scots pine stands using Sentinel-2 satellite imagery and airborne image-derived point clouds. **Forests**, v. 9, n. 5, p. 1–15, 2018.

HENTZ, Â. M. K. **Obtenção de informações dendrométricas para inventário florestal automatizado por meio de veículo aéreo não tripulado (VANT)**. 2018. 238 f. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

HENTZ, Â. M. K.; CORTE, A. P. D.; NETTO, S. P.; STRAGER, M. P.; SCHOENINGER, E. R. Treedetection: automatic tree detection using UAV- based data. **Floresta**, v. 48, n. 3, p. 393–402, 2018.

HEURICH, M. Automatic recognition and measurement of single trees based on data from airborne laser scanning over the richly structured natural forests of the Bavarian Forest National Park. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 7, p. 2416–2433, 2008.

HILL, A.; BRESCHAN, J.; MANDALLAZ, D. Accuracy assessment of timber volume maps using forest inventory data and LiDAR canopy height models. **Forests**, v. 5, p. 2253–2275, 2014.

HU, T.; SUN, X.; SU, Y.; et al. Development and performance evaluation of a very low-cost UAV-LiDAR system for forestry applications. **Remote Sensing**, v. 13, n. 1, p. 77, 2021.

HUI, Z.; JIN, S.; LI, D.; ZIGGAH, Y. Y.; LIU, B. Individual tree extraction from terrestrial lidar point clouds based on transfer learning and gaussian mixture model separation. **Remote Sensing**, v. 13, n. 2, p. 1–32, 2021.

HYYPPÄ, J.; HYYPPÄ, H.; LECKIE, D.; et al. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 1339–1366, 2008.

JASKIERNIAK, D.; LUCIEER, A.; KUCZERA, G.; et al. Individual tree detection and crown delineation from Unmanned Aircraft System (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 171, n. December 2020, p. 171–187, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.10.016>>.

JUNTTILA, V.; FINLEY, A. O.; BRADFORD, J. B.; KAURANNE, T. Strategies for minimizing sample size for use in airborne LiDAR-based forest inventory. **Forest Ecology and Management**, v. 292, p. 75–85, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112712007426>>.

KOHLER, S. V. **Erros amostrais e não amostrais em inventários de florestas plantadas**. 2017. 173 f. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

KOHLER, S. V.; KOEHLER, H. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; MACHADO, S. DO A. Evolution of tree stem taper in *Pinus taeda* stands. **Ciência Rural**, v. 46, n. 7, p. 1185–1191, 2016.

KOTIVUORI, E.; KUKKONEN, M.; MEHTÄTALO, L.; et al. Forest inventories for small areas using drone imagery without in-situ field measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 237, n. July 2018, p. 111404, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111404>>.

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, n. 7, p. 1–18, 2019.

KRŮČEK, M.; KRÁL, K.; CUSHMAN, K. C.; MISSAROV, A.; KELLNER, J. R. Supervised segmentation of ultra-high-density drone lidar for large-area mapping of individual trees. **Remote Sensing**, v. 12, n. 19, p. 1–16, 2020.

KWAK, D. A.; LEE, W. K.; LEE, J. H.; BIGING, G. S.; GONG, P. Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data. **Journal of Forest Research**, v. 12, n. 6, p. 425–434, 2007.

LEAL, F. A.; LEAL, G. DA S. A.; SILVA, T. C. DA. Redes neurais artificiais e modelos alométricos aplicados para estimativa de volume e altura em *Eucalyptus urophylla* S.T.Blacke. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 3, p. 1181–1188, 2020.

LEITE, R. V.; SILVA, C. A.; MOHAN, M.; et al. Individual tree attribute estimation and uniformity assessment in fast-growing *Eucalyptus* spp. forest plantations using LiDAR and linear mixed-effects models. **Remote Sensing**, v. 12, n. 21, p. 1–20, 2020.

LI, W.; FU, H.; YU, L.; CRACKNELL, A. Deep learning based oil palm tree detection and counting for high-resolution remote sensing images. **Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 1–13, 2017.

LI, W.; GUO, Q.; JAKUBOWSKI, M. K.; KELLY, M. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 78, n. 1, p. 75–84, 2012.

LIU, G.; WANG, J.; DONG, P.; CHEN, Y.; LIU, Z. Estimating individual tree height and diameter at breast height (DBH) from terrestrial laser scanning (TLS) data at plot level. **Forests**, v. 8, n. 2, p. 1–19, 2018.

MACEDO, F. L. DE; OLIVEIRA SOUSA, A. M. DE; GONÇALVES, A. C.; SILVA, H. R.; RODRIGUES, R. A. F. Estimativa do volume de madeira para *Eucalyptus* sp.

com imagens de satélite de alta resolução espacial. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, p. 237–247, 2017.

MACEDO, R. DE C.; SANTOS, J. R. DOS; SOARES, J. V. TREEX (Tree Extractor) – uma ferramenta para análise de dossel florestal e contagem de árvores a partir de dados LiDAR. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 4, p. 673–680, 2013.

MACHADO, S. D. A. Tabela de volume para *Pinus taeda* na região de Telêmaco Borba-PR. **Revista Floresta**, v. 10, n. 1, p. 29–35, 1979.

MACHADO, S. DO A.; FIGUEIREDO-FILHO, A. **Dendrometria**. 2º ed. Irati: Unicentro, 2014.

MARTINS, J. F. C.; RIBEIRO, J. C.; PADILHA, C. L.; et al. Modelagem volumétrica de árvores de acácia-negra em povoamentos de regiões do Rio Grande do Sul. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 2, p. 195–202, 2020.

MARTINS, T. G. V.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; et al. Potential planting areas for native tree species in Minas Gerais state, Brazil, based on environmental variables and wood demand. **Ecological Modelling**, v. 432, p. 1–13, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109211>>.

MATURBONGS, B.; WING, M. G.; STRIMBU, B.; BURNETT, J. Forest inventory sensitivity to UAS-based image processing algorithms. **Annals of Forest Research**, 2019.

MCROBERTS, R. E.; CHEN, Q.; GORMANSON, D. D.; WALTERS, B. F. The shelf-life of airborne laser scanning data for enhancing forest inventory inferences. **Remote Sensing of Environment**, v. 206, n. June 2017, p. 254–259, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.017>>.

MCROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. The effects of uncertainty in model predictions of individual tree volume on large area volume estimates. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 34–42, 2014.

MIRANDA, D. L. C. DE; JUNIOR, V. B.; GOUVEIA, D. M. Fator de forma e equações de volume para estimativa volumétrica de árvores em plantio de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Plena**, v. 11, n. 3, p. 1–8, 2015.

MLENEK, D. C.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, D.; SANQUETA, C. R. Systematic review of literature on tree detection using remote sensing. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 71–79, 2020.

MOHAN, M.; SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; et al. Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest. **Forests**, v. 8, n. 9, p. 1–17, 2017.

MÔRA, R.; FILHO, A. F.; KOHLER, S. V.; MIRANDA, R. O. V. DE. Modelos para estimativas volumétricas de fustes de *Pinus taeda* L. **Enciclopédia biosfera**, v. 10, n. 19, p. 1320–1332, 2014.

MORALES, G.; KEMPER, G.; SEVILLANO, G.; et al. Automatic segmentation of *Mauritia flexuosa* in unmanned aerial vehicle (UAV) imagery using deep learning. **Forests**, v. 9, n. 12, p. 1–14, 2018.

MOURÃO, K. S. **Detecção de árvores em povoamentos de *Pinus* spp. a partir de nuvens de pontos derivados de imagens ópticas de RPAS a partir da análise de máximo global**. 2018. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

NÆSSET, E. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, p. 88–99, 2002.

NÆSSET, E. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 19, n. 2, p. 164–179, 2004. Disponível em: <<http://10.0.4.56/02827580310019257>>.

NÆSSET, E. Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 22, n. 5, p. 433–442, 2007. Disponível em: <<http://10.0.4.56/02827580701672147>>.

NEPAL, P.; KORHONEN, J.; PRESTEMON, J. P.; CUBBAGE, F. W. Projecting global planted forest area developments and the associated impacts on global forest product markets. **Journal of Environmental Management**, v. 240, n. November 2018, p. 421–430, 2019.

NHADUCO, O. P. E. **Sistema de equações aditivas e estimadores por razão de biomassa de *Pinus* spp . no sul do Brasil**. 2019. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

NOORDERMEER, L.; BOLLANDSÅS, O. M.; ØRKA, H. O.; NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T. Comparing the accuracies of forest attributes predicted from airborne laser scanning and digital aerial photogrammetry in operational forest inventories. **Remote Sensing of Environment**, v. 226, n. 1, p. 26–37, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425719301178>>.

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

NURUDEEN, T. A.; ABIOLA, J. K.; SALAMI, K. D.; ERINLE, O. A.; OLANIYI, W. A. Regression Models for Tree Volume Prediction in Stands of *Tectona grandis* ( Linn ) at Federal College of Forestry, Jericho, Ibadan, Oyo State Nigeria. **Science Journal of Agricultural Research and Management**, p. 1–9, 2014.

OLIVEIRA, L. F. R.; LASSITER, H. A.; WILKINSON, B.; et al. Moving to automated tree inventory: Comparison of uas-derived lidar and photogrammetric data with manual ground estimates. **Remote Sensing**, v. 13, n. 1, p. 1–16, 2021.

OLIVEIRA, L. T.; CARVALHO, L. M. T. DE; FERREIRA, M. Z.; OLIVEIRA, T. C. DE A.; BATISTA, V. T. F. P. Influência da idade na contagem de árvores de *Eucalyptus* sp. com dados LiDAR. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 557–565, 2014.

OLIVEIRA, L. T. DE; FERREIRA, M. Z.; CARVALHO, L. M. DE; et al. Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 9, p. 692–700, 2014.

OLIVEIRA, M. L. R. DE; LEITE, H. G.; GARCIA, S. L. R.; et al. Estimação do volume de árvores de clones de eucalipto pelo método da similaridade de perfis. **Revista Árvore**, v. 33, n. 1, p. 133–141, 2009.

OLIVEIRA, R. K. DE; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; SILVA, I. C.; DA PENHA MOREIRA GONÇALVES, M. Emergy-based sustainability assessment of a loblolly pine (*Pinus taeda*) production system in southern Brazil. **Ecological Indicators**, v. 93, n. April, p. 481–489, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.027>>

ONISHI, M.; ISE, T. Explainable identification and mapping of trees using UAV RGB image and deep learning. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1–15, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-020-79653-9>>

OTA, T.; OGAWA, M.; MIZOUE, N.; FUKUMOTO, K.; YOSHIDA, S. Forest structure

estimation from a UAV-based photogrammetric point cloud in managed temperate coniferous forests. **Forests**, v. 9, n. 3, p. 1-11, 2017.

PACHECO, A. DA P.; CENTENO, J. A. S.; ASSUNÇÃO, M. G. T. DE; BOTELHO, M. F. Classificação de pontos LIDAR para a geração do MDT. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 17, n. 3, p. 471–438, 2011. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1982-21702011000300006&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-21702011000300006&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 27/8/2020.

PANAGIOTIDIS, D.; ABDOLLAHNEJAD, A.; SLAVÍK, M. Assessment of stem volume on plots using terrestrial laser scanner: a precision forestry application. **Sensors (Switzerland)**, v. 21, n. 1, p. 1–17, 2021.

PANAGIOTIDIS, D.; ABDOLLAHNEJAD, A.; SUROVÝ, P.; CHITECULO, V. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8–10, p. 2392–2410, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1264028>>.

PAWSON, S. M.; BRIN, A.; BROCKERHOFF, E. G.; et al. Plantation forests, climate change and biodiversity. **Biodiversity and Conservation**, v. 22, n. 5, p. 1203–1227, 2013.

PÉLLICO NETTO, S.; BEHLING, A. Rational volumetric models: tested in forest stands of *Acacia mearnsii* de wild in Southern Brazil. **Cerne**, v. 25, n. 4, p. 491–505, 2019a.

PÉLLICO NETTO, S.; BEHLING, A. Additivity of tree biomass components using ratio estimate. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, n. 3, p. 1–31, 2019b.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário Florestal**. 1º ed. Curitiba: Os autores, 1997.

PERTILLE, C. T.; SANQUETTA, C. R.; NICOLETTI, M. F.; TOPANOTTI, L. R. Volume prediction through form factor and regression models by age class for *Pinus taeda* L. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 3, p. 431–436, 2018.

PICOS, J.; BASTOS, G.; MÍGUEZ, D.; ALONSO, L.; ARMESTO, J. Individual tree detection in a eucalyptus plantation using unmanned aerial vehicle (UAV)-LiDAR. **Remote Sensing**, v. 12, n. 5, p. 1–17, 2020.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H. Seeing the trees in the forest: using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 70, n. 5, p. 589–604, 2004.

PULIDO, D.; SALAS, J.; RÖS, M.; PUETTMANN, K.; KARAMAN, S. Assessment of tree detection methods in multispectral aerial images. **Remote Sensing**, v. 12, n. 15, p. 1–22, 2020.

PULITI, S.; BREIDENBACH, J.; ASTRUP, R. Estimation of forest growing stock volume with uav laser scanning data: can it be done without field data? **Remote Sensing**, v. 12, n. 8, p. 1–19, 2020.

PULITI, S.; ENE, L. T.; GOBAKKEN, T.; NÆSSET, E. Use of partial-coverage UAV data in sampling for large scale forest inventories. **Remote Sensing of Environment**, v. 194, n. 1, p. 115–126, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717301220>>.

PULITI, S.; ØRKA, H. O.; GOBAKKEN, T.; NÆSSET, E. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. **Remote Sensing**, v. 7, n. 8, p. 9632–9654, 2015.

PULITI, S.; SAARELA, S.; GOBAKKEN, T.; STÅHL, G.; NÆSSET, E. Combining UAV and Sentinel-2 auxiliary data for forest growing stock volume estimation through hierarchical model-based inference. **Remote Sensing of Environment**, v. 204, n. February 2017, p. 485–497, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.007>>.

REIS, A. A. DOS; FRANKLIN, S. E.; DE MELLO, J. M.; JUNIOR, F. W. A. Volume estimation in a *Eucalyptus* plantation using multi-source remote sensing and digital terrain data: a case study in Minas Gerais State, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 40, n. 7, p. 2683–2702, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1530808>>.

REX, F. E.; CORTE, A. P. D.; MACHADO, S. A.; SANQUETTA, C. R. Identificação e extração de copas de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze a partir de dados LiDAR. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 2, p. 319–323, 2018. Disponível em: <<http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/5815>>.

RODRIGUES, C. K.; LOPES, E. D. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; PELISSARI, A. L. Identidade de modelos hipsométricos e volumétricos de povoamentos de pinus com

diferentes idades submetidos ao desbaste mecanizado. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2, n. 1, p. 54–59, 2017.

SAARINEN, N.; KANKARE, V.; VASTARANTA, M.; et al. Feasibility of terrestrial laser scanning for collecting stem volume information from single trees. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 123, p. 140–158, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.012>>.

SACKOV, I.; SANTOPUOLI, G.; BUCHA, T.; LASSERRE, B.; MARCHETTI, M. Forest inventory attribute prediction using lightweight aerial scanner data in a selected type of multilayered deciduous forest. **Forests**, v. 7, n. 12, p. 1–16, 2016.

SANQUETTA, C. R.; DO CARMO DOLCI, M.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, M. N. I.; PELISSARI, A. L. Form factors vs. regression models in volume estimation of *Pinus taeda* L. stem. **Científica**, v. 45, n. 2, p. 175–181, 2017.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; WATZLAWICK, L. F. **Inventários Florestais: planejamento e execução**. 3º ed. Curitiba: Multi-Graphic Gráfica e editora, 2014.

SANQUETTA, C. R.; DOLCI, M.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, M. N. I.; PELISSARI, A. L. Estimação de volumes de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze por fatores de forma em classes diamétricas e modelos de regressão. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23, p. 588–597, 2016.

SANTOS, R. M. M.; DIAS, A. N.; ARCE, J. E.; et al. Modelos de volume e afilamento para florestas de *Pinus taeda* L. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 4, n. 1, p. 35–42, 2019.

SCHMITT, M.; ZHU, X. X. Demonstration of single-pass millimeterwave SAR tomography for forest volumes. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 13, n. 2, p. 202–206, 2016.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. 2º ed. Santa Maria: FACOS, 2009.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. DOS S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719–734, 1933.

SCHUMACKER, R.; TOMEK, S. **Understanding statistics using R**. 1º ed. New

York: Springer, 2013.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria Florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005.

SILVA, C. A.; HUDAK, A. T.; VIÉRLING, L. A.; et al. Imputation of Individual Longleaf Pine (*Pinus palustris* Mill.) tree attributes from field and LiDAR data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 2016.

SOUZA, D. V.; NIEVOLA, J. C.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. K-nearest neighbor and linear regression in the prediction of the artificial form factor. **Floresta**, v. 50, n. 3, p. 1669–1678, 2020.

SOUZA, D. V.; OLIVEIRA, T. W. G. DE; PIVA, L. R. O.; et al. **Introdução ao R: Aplicações Florestais**. Curitiba, 2018.

STÄHL, G.; SAARELA, S.; SCHNELL, S.; et al. Use of models in large-area forest surveys: comparing model-assisted, model-based and hybrid estimation. **Forest Ecosystems**, v. 3, n. 1, p. 5, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40663-016-0064-9>>.

TÉO, S. J.; ROCHA, S. P. DA; BORTONCELLO, A. C.; PAZ, R. A.; COSTA, R. H. DA. Dinâmica da distribuição diamétrica de povoamentos de *Pinus taeda*, na região de Caçador, SC. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 67, p. 183–192, 2011.

TIANYANG, D.; JIAN, Z.; SIBIN, G.; YING, S.; JING, F. Single-tree detection in high-resolution remote-sensing images based on a cascade neural network. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 9, p. 1–20, 2018.

TINKHAM, W. T.; SWAYZE, N. C. Influence of agisoft metashape parameters on uas structure from motion individual tree detection from canopy height models. **Forests**, v. 12, n. 2, p. 1–14, 2021.

TORRESAN, C.; BERTON, A.; CAROTENUTO, F.; et al. Forestry applications of UAVs in Europe: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8–10, p. 2427–2447, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1252477>>.

TOTH, C.; JÓZKÓW, G. Remote sensing platforms and sensors : a survey. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 22-36, 2016.

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

UBIALLI, J. A. **Tabelas de volume para *Pinus taeda* L. nos principais eixos de reflorestamento do Estado do Paraná**, 1981. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1981.

VATRAZ, S.; BORGES, F. Q. Procedimentos de controle do volume de madeira estimado e colhido em um plantio de *Pinus* spp. no Paraná. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 445–453, 2014.

VAUHKONEN, J.; ENE, L.; GUPTA, S.; et al. Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. **Forestry**, v. 85, n. 1, p. 27–40, 2012.

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, n. 3, p. 1–16, 2016.

WALLACE, L.; MUSK, R.; LUCIEER, A. An assessment of the repeatability of automatic forest inventory metrics derived from UAV-borne laser scanning data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2014.

WANG, B. H.; WANG, D. B.; ALI, Z. A.; TING TING, B.; WANG, H. An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle. **Measurement and Control (United Kingdom)**, v. 52, n. 7–8, p. 731–739, 2019.

WARING, B.; NEUMANN, M.; PRENTICE, I. C.; et al. Forests and decarbonization – roles of natural and planted forests. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 3, n. May, p. 1–6, 2020.

WEST, P. W. **Tree and Forest Measurement**. 3<sup>o</sup> ed. Switzerland: Springer, 2015.

WHITE, J. C.; COOPS, N. C.; WULDER, M. A.; et al. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: a review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 5, p. 619–641, 2016.

ZAREA, A.; MOHAMMADZADEH, A. A novel building and tree detection method from LiDAR data and aerial images. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9, n. 5, p. 1864–1875, 2016.