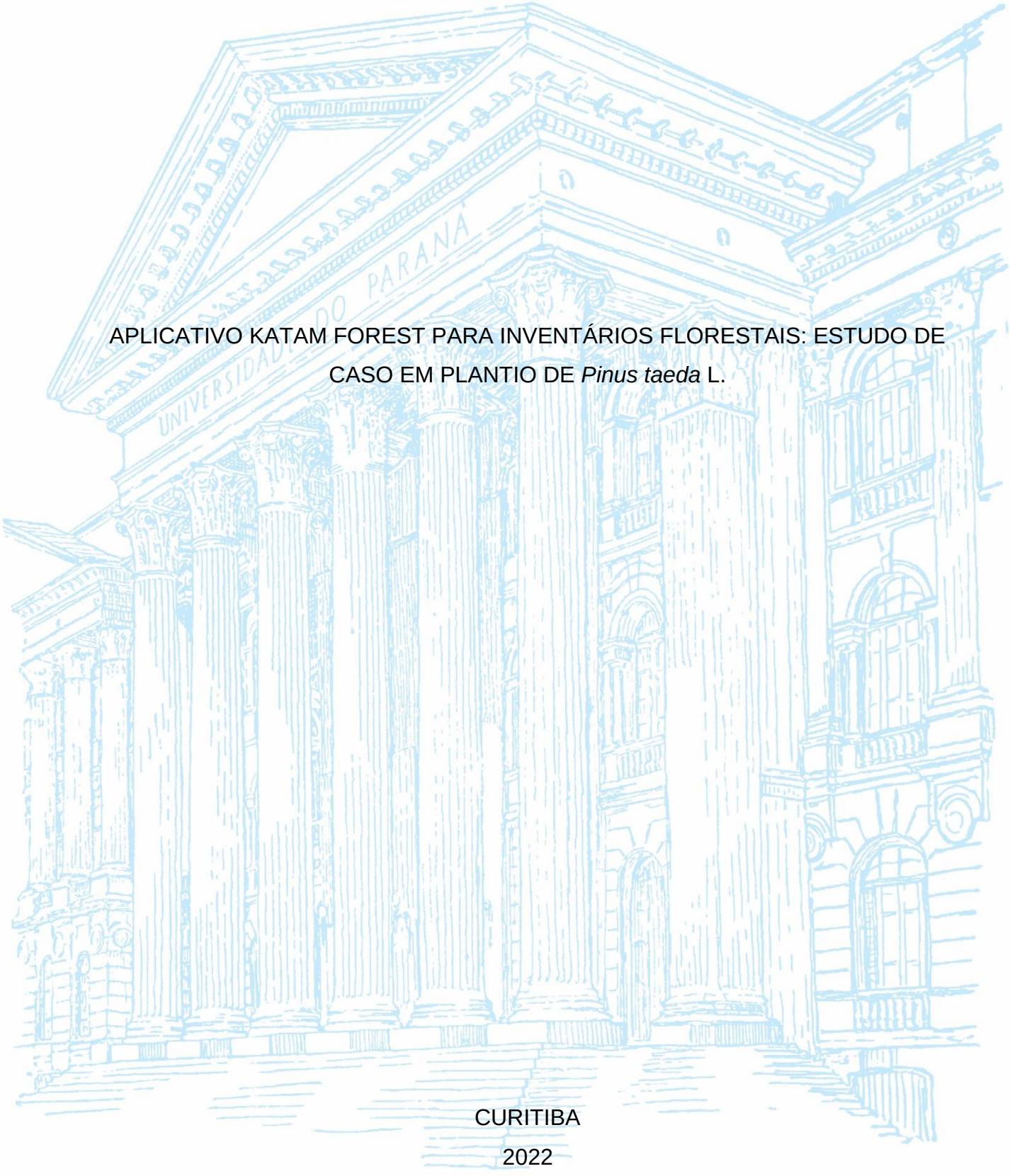
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VINICIUS HENRIQUE GRIS



APLICATIVO KATAM FOREST PARA INVENTÁRIOS FLORESTAIS: ESTUDO DE CASO EM PLANTIO DE *Pinus taeda* L.

CURITIBA

2022

VINICIUS HENRIQUE GRIS

APLICATIVO KATAM FOREST PARA INVENTÁRIOS FLORESTAIS: ESTUDO DE CASO EM PLANTIO DE *Pinus taeda* L.

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao curso de graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari.

CURITIBA

2022

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

PARECER

Defesa nº 294

A Banca Examinadora, instituída pelo Colegiado do Cursó de Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir **Vinicius Henrique Gris** em relação ao seu Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Aplicativo Katam Forest para inventários florestais: estudo de caso em plantio de *Pinus taeda***, é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** na Disciplina ENGF010 - Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Florestal, condicionada a entrega da versão final corrigida.

Me. Gabriel Agostini Orso
1. Avaliador

Me. Iasmin Fernanda Portela Pfutz
2. Avaliadora

Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari
Orientador - Presidente da Banca

Curitiba, 05 de setembro de 2022.

Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari
Vice-Coordenador do Curso de Engenharia Florestal em exercício

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças e determinação para superar os momentos difíceis e me manter otimista frente aos desafios.

A minha família, em especial aos meus pais, Nadir e Delci, padrinho e madrinha, Arnaldo e Clair, minha irmã Vanessa e meu primo Luís por todo amor e incentivo durante todos esses anos e na construção de quem eu me tornei hoje.

A minha parceira e namorada Kahoane, por sempre estar presente em todos os momentos, dos mais felizes aos mais tristes, me alegrando, ensinando e sempre apoiando as minhas decisões. Eu amo você.

Um carinho e agradecimento especial aos meus avós Alice, José, Enore (*in memoriam*) e Ilda, por estarem presentes durante a caminhada da minha vida, onde muito me ensinaram e me apoiaram. Obrigado por estarem sempre olhando para mim.

Aos amigos que ganhei na faculdade: Cléberson Porath, Haron Victor Ferreira e Lucas Baraldi, onde construímos uma amizade para a vida, passando por diversos momentos, dos mais simples aos mais desafiadores, compartilhando das alegrias lado a lado.

Ao meu amigo engenheiro Leon Lucas Mierzva, que me ajudou com a coleta e o fornecimento dos dados utilizados neste trabalho e por todo conhecimento florestal compartilhado para a vida.

Aos meus amigos de anos do grupo Os Sem Floresta, que mesmo em caminhos separados da vida sempre se fizeram presente em todos os meus anos acadêmicos, onde fortalecemos nossas amizades.

Ao meu orientador, professor Allan Libanio Pelissari por todos os ensinamentos e todo o apoio que precisei, principalmente no TCC e a professora Dagma Kratz, que me guiou nos primeiros passos da vida acadêmica.

Aos meus colegas de trabalho da Katam, Anton, Gustavo, Luiza, Kamilo e Magnus com quem tenho o imenso prazer de trabalhar.

A todos os colegas e professores que participaram da minha formação acadêmica por todo apoio durante esses anos.

“Leve é a tarefa quando muitos dividem o trabalho.”

(HOMERO, 928 a 898 A.C)

RESUMO

Os métodos tradicionais de inventário florestal necessitam de intensa mão de obra qualificada e são, normalmente, onerosos, demandando um grande planejamento e investimento. Por isso, novas metodologias de mensuração florestal têm sido desenvolvidas nos últimos anos a fim de proporcionar tecnificação e otimização na coleta de dados dendrométricos. Ferramentas de sensoriamento remoto vem sendo testadas em diversos cenários florestais, em que, inovações como o uso de *smartphone*, também surgem como uma metodologia alternativa ao aprimoramento da tecnologia nos últimos tempos. Diante desse cenário, a *start-up* sueca Katam™ desenvolveu uma metodologia de medição de árvores fundamentada em um aplicativo de *smartphone* e em um *software* SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*). Essa aplicação permite que mensurações de características dendrométricas sejam realizadas a partir de gravações de vídeo, visando reduzir a mão de obra necessária em campo, bem como o tempo consumido com a atividade de mensuração. Ademais, a metodologia desenvolvida possibilita aumentar a intensidade de árvores amostradas nos povoamentos florestais e, consequentemente, sem elevar os custos dos inventários. O presente trabalho objetivou comparar a metodologia desenvolvida pela Katam com o método tradicional de uma amostragem aleatória simples de área fixa em um plantio de *Pinus taeda* com 11 anos localizado no estado do Paraná. Para a comparação entre as metodologias, foram realizados o ajuste de modelos de relação altura-diâmetro e de volume a partir de 30 árvores cubadas no povoamento em estudo. Os modelos selecionados foram responsáveis por estimar os valores de altura e volume da amostragem de área fixa e também a estimativa de altura pelos diâmetros coletados pelo aplicativo Katam™ Forest. Foram alocadas, ao todo, 7 parcelas de área fixa pela amostragem tradicional e 22 vídeos foram coletados pela metodologia Katam. Foram obtidos os valores médios das variáveis diâmetro à altura do peito medido a 1,3 m do solo (DAP), altura total (Hi), área basal ($G.ha^{-1}$), volume ($V.ha^{-1}$) e densidade de árvores (Arv. ha^{-1}) por unidade amostral e realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, e a comparação estatística entre as médias pelo teste t bicaudal para amostras independentes. As médias obtidas do DAP e área basal não apresentaram diferenças estatísticas entre as metodologias pelo teste *t*, ao nível de 5% de significância, assim como para densidade de árvores pelo teste não paramétrico de Wilcoxon, ao nível de 5% de significância. Para a estimativa da altura total pela Katam, dois procedimentos foram abordados, sendo a estimada pelo próprio aplicativo, onde não houve normalidade nos resíduos, e a altura Katam estimada pelo modelo de relação altura-diâmetro, onde houve normalidade dos resíduos e apresentou diferença estatística pelo teste *t*, ao nível de 1% de significância. Como o volume por unidade amostral é reflexo das alturas, essa variável também apresentou diferença estatística com a altura estimada pelo aplicativo, ao nível de 5% de significância pelo test *t*, porém, não apresentou diferenças estatísticas quando a altura foi estimada pelo modelo de relação altura-diâmetro.

Palavras-chave: Digitalização. Inovação Tecnológica. Plantios Florestais. SLAM. Smartphone.

ABSTRACT

Traditional methods of forest inventory require intense and qualified labor and are, usually, expensive, demanding a great deal of investment and planning development, therefore, new methodologies for forest measurement are being developed in the last years in order to bring technification and optimization on dendrometric's data gathering. Remote sensing tools have already been tested in a diverse range of forest scenarios where innovations, such as the use of smartphones, have also emerged as an alternative methodology with the improvement of technology in recent times. Given this scenario, the Swedish *start-up* Katam^{TM} worked on the development of a methodology using a Smartphone application based on a SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) software. This application allows measurements to be carried out based on video recordings, aiming to reduce the number of people required in the field and the time spent at the measurement activity. Furthermore, the methodology developed makes it possible to increase the intensity of trees sampled in the forest stands and, consequently, without increasing the costs of inventory. The present study sought to compare this methodology with a traditional fixed area sampling in a *Pinus taeda* stand with 11 years in the state of Paraná. For the comparison of those methodologies, a height-diameter and a volumetric equation were adjusted based on 30 trees cubed on the stand. Those equations were responsible for estimating the height and volume values of the sampling area and also the height for the diameter collected via the Katam^{TM} Forest *app*. In total, 7 fixed areas were plotted by the traditional sampling and 22 videos were collected by the Katam methodology. The mean values of the Diameter at breast height are measured at 1,3m from the ground (DBH), Height (Hi), Basal area (G.ha^{-1}), Volume (V.ha^{-1}) and Density (Arv. ha^{-1}) were obtained per sampling unit and the Shapiro-Wilk normality test was performed as well as , the statistical comparison between the means by the two-tailed *t* test for independent samples. The averages obtained from DBH and basal area did not show statistical differences between the methodologies by the *t* test, at 5% significance level, as well as for tree density by Wilcoxon's nonparametric test, at 5% significance level. For the estimation of total Height by the katam's app two procedures were approached, one estimating the height by the application itself, where no normality between the residues were found and the Katam height estimated by the height-diameter model, where there was normality of the residues and presented statistical difference by the *t* test, at the 1% significance level. As the volume per sample unit reflects heights, this variable also showed a statistical difference with the estimated height by the application at the level of 5% significance, by the *t* test, however, it did not show statistical differences when the height was estimated by the height-diameter model.

Keywords: Digitalizing, Technological innovation. Forests Plantations. SLAM. Smartphone.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1– LOCALIZAÇÃO DO PLANTIO DE *Pinus taeda* OBJETO DO PRESENTE ESTUDO 26
FIGURA 2– ALINHAMENTO E SUBBOSQUE NO PLANTIO DE *Pinus taeda* OBJETO DO PRESENTE ESTUDO 27
FIGURA 3 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE ÁRVORES ABATIDAS PARA COLETA DE VOLUME REAL POR SMALIAN 28
FIGURA 4 – MARCAÇÃO DAS ÁRVORES 29
FIGURA 5 – MEDIÇÃO COM A SUTA DENDROMÉTRICA MECÂNICA 29
FIGURA 6 e 7 – BALIZAS EM CAMPO.....31
FIGURA 8 - RESUMO DOS DADOS COLETADOS A NÍVEL DE TAHLÃO PELO APLICATIVO KATAM™ FOREST.....33
FIGURA 9 – COLETA DOS DIÂMETROS PELO APLICATIVO KATAM™ FOREST34
FIGURA 10 – FLUXOGRAMA PARA DECISÃO DO TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS 39
FIGURA 11 – GRÁFICO DE RESÍDUOS DOS MODELOS DE ALTURA 41
FIGURA 12 – GRÁFICO DOS MODELOS DE ALTURA.....41
FIGURA 13 – GRÁFICO DE RESÍDUOS DOS MODELOS DE VOLUME 42
FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA NA PARCELA COLETADA PELO APLICATIVO KATAM™ FOREST.....45
FIGURA 15 – RELAÇÃO DO VOLUME COM AS VARIÁVEIS OBTIDAS PELO KATAM™ FOREST.....46

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Modelos testados para a estimativa de altura total em relação do DAP em pinus. 30
TABELA 2 – Modelos testados para a estimativa de Volume em relação do DAP e altura total em pinus. 30
TABELA 3 – Análises estatísticas para comparação entre os modelos 40
TABELA 4 – Valores de dos coeficientes de regressão estimados para os modelos analisados 43
TABELA 5 – Análises estatísticas para comparação entre os modelos 43
TABELA 6 – Resultados das diferenças das variáveis coletadas a nível individual. .44
TABELA 7 – Resultados das médias das amostras entre os métodos. 47
TABELA 8 – Resultados dos testes de hipótese das médias das amostras entre os métodos pela altura estimada pelo aplicativo. 48
TABELA 9 – Resultados das diferenças estatísticas das médias de altura e volume das amostras entre amostragem tradicional e Katam com altura estimada pelo modelo de relação altura-diâmetro ajustado (Katam 2). 49

LISTA DE ABREVIAÇÕES

DAP - Diâmetro à altura do peito

VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado

LiDAR - Light Detection and Ranging

CNN - Convolutional Neural Network

SLAM - Simultaneous Localization and Mapping

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

ALS - Airborne Laser Sacanning

k-MSN - k-Most Similar Neighbor

RF - Random Forest

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 JUSTIFICATIVA 17
1.2 OBJETIVOS 17
Objetivo geral 17
Objetivos específicos 18
2 REVISÃO DE LITERATURA 19
2.1 INVENTÁRIOS FLORESTAIS 19
Definição e características 19
2.2 ESTÁTISTICA APLICADA EM INVETÁRIOS FLORESTAIS 20
Métodos de Amostragem 20
Processos de Amostragem 22
2.3 TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS 23
O uso de técnicas de sensoriamento remoto 23
LiDAR 24
2.4 SOLUÇÕES KATAM™ 25
3 MATERIAL E MÉTODOS 26
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 26
3.2 COLETA DE DADOS DE CUBAGEM 27
3.3 AJUSTES DE MODELOS DE RELAÇÃO ALTURA-DIÂMETRO E VOLUME 30
3.4 METODOLOGIAS DE COLETA DE DADOS EM INVENTÁRIO FLORESTAL 31
3.4.1 METODOLOGIA TRADICIONAL DE AMOSTRAGEM 31
3.4.2 METODOLOGIA DO KATAM FOREST 32
3.4.3 KATAM FOREST COM A ALTURA ESTIMADA PELO MODELO DE RELAÇÃO ALTURA-DIÂMETRO 35
3.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS E ANÁLISES ESTATÍSICAS 36
3.6 ANÁLISES ESTÁTISTICAS PARA COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS DE COLETA DE DADOS EM INVENTÁRIO FLORESTAL 39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 40
4.1 AJUSTE DOS MODELOS DE RELAÇÃO ALTURA-DIÂMETRO E DE VOLUME 40
4.2 DEFINIÇÕES DAS VARIÁVEIS COLETADAS 44

4.3 ANÁLISES ESTÁTISTICAS ENTRE AS METODOLOGIAS DE AMOSTRAGEM 47
4.3.1 ANÁLISE DESCRITIVA.....47
4.3.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS 47
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 50
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 50
REFERÊNCIAS.....51
ANEXO 1 – RECOMENDAÇÕES DE GRAVAÇÃO 57
ANEXO 2 – RELATÓRIO DO TALHÃO VERA CRUZ 60
ANEXO 3 – RELATÓRIO KATAM PARA DIAMETRO E DENSIDADE E ALTURA 61

1 INTRODUÇÃO

O inventário florestal é uma ferramenta crucial para aquisição de dados e de informações qualitativas e quantitativas em áreas florestais. Deles, derivam o que é essencial para tomada de decisão na realização de um adequado manejo (WHITE *et al.*, 2016).Por meio de métodos e processos de amostragem, ou de um censo, algumas variáveis são coletadas, como o diâmetro à altura de peito medido a 1,3 m do solo (DAP), as alturas total e comercial, dentre outras informações daquele povoamento florestal. Usualmente, os métodos amostragem tradicionais, como área fixa, Bitterlich e Prodan, são os escolhidos para essa atividade, pois esses garantem a precisão necessária, porém demandas muita mão de obra, além de serem onerosos (CORTE *et al*., 2020b). Diante desses fatores, considerando ainda o avanço da tecnologia, novas metodologias de mensuração de povoamentos florestais têm sido desenvolvidas, a fim de gerar maior eficiência na obtenção de dados, facilitando assim a realização dos inventários florestais (LIANG *et al.*, 2019).

O crescente uso dos veículos aéreos não tripulados (VANTs) no Brasil, especialmente para áreas de uso do sensoriamento remoto (SANQUETTA, *et al.* 2014) enfatiza o momento de transição das tecnologias que estamos vivenciando. A utilização do *Light Detection and Ranging (*LiDAR) também tem mostrado resultados positivos na aquisição de dados como área basal e altura de árvores individuais, seja pela coleta terrestre de dados, bem como por via aérea através de VANTs (CORTE *et al., ANO.*, WALLACE *et al.*, 2014a, WALLACE *et al.*, 2014b).

Apesar dos sucessos das alternativas mencionadas acima, a utilização da tecnologia LiDAR ainda é cara para diversos cenários. Por isso, outros meios também têm sido utilizados em inventários florestais, como o uso de VANTs equipados com sensores óticos (BIRDAL *et al.*, 2017). Apesar do decréscimo de precisão em relação ao LiDAR, os sensores óticos conseguem providenciar características geométricas da floresta e dados como altura, diâmetro de copas e, até mesmo, com o uso de *Convolutional Neural Networks* (CNN), identificar espécies florestais com boa precisão (MOURA *et al.*, 2021, XIAO *et al.*, 2019, WHITE *et al.*, 2016).

Foi desse cenário de oportunidades tecnológicas que a *startup* sueca Katam Technologies desenvolveu duas soluções para facilitar e proporcionar maior eficiência na coleta de dados em inventários florestais. Sua tecnologia está apoiada no uso de ferramentas acessíveis à maioria das empresas e proprietários florestais, como

smartphones e *drones* de câmera ótica. Com essas ferramentas aliadas ao uso de inteligência artificial, como as redes neurais convulcionais, a realidade aumentada e a visão computacional, a Katam busca implementar a silvicultura de precisão e o interesse no manejo de florestas plantadas ao redor do mundo.

O Katam™ Forest é a principal inovação disponibilizada para *startup*, onde, com o uso de um *smartphone*, são realizadas coletas de vídeos na área de interesse, para posterior processamento em um programa *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM). O SLAM é responsável por criar uma nuvem de pontos 3D, em que, junto às redes neurais convulcionais, detecta as árvores de interesse e coleta variáveis dendrométricas necessárias (TÄLL, 2020).

Como as pesquisas que testaram o desempenho desta inovação ainda são recentes, as variações entre as características do ambiente, como nível de mato competição e a quantidade de plantas daninhas nas linhas, podem alterar a precisão dos dados, e mais testes são necessários para avaliar o desempenho em diferentes ambientes.

1.1 JUSTIFICATIVA

Inventários florestais são atividades essenciais dentro do setor madeireiro, cujas aplicações são indispensáveis ao manejo dos plantios. Portanto, a aplicação de novas metodologias que busquem melhorar os processos, reduzir os custos e aumentar a eficiência são de suma importância. Tendo em vista a requisição dessas novas metodologias, aliadas aos poucos estudos referentes às soluções Katam™, compreender o comportamento dos dados coletados pela Katam e analisar sua validade estatística.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi comparar as estimativas de variáveis dendrométricas obtidas por meio de duas metodologias distintas de coleta de dados em inventário florestal, sendo a amostragem tradicional (aleatória simples) e a abordagem fornecida pelas soluções da Katam, em uma área comercial de *Pinus taeda* L. no munícipio de Mallet, Paraná.

Objetivos específicos

- Ajustar os modelos hipsométricos e volumétricos através da cubagem de árvores na área de estudo para estimar as variáveis coletadas através da amostragem tradicional.
- Avaliar a normalidade e homogeneidade dos dados e também as diferenças descritivas e estatísticas entre as duas metodologias de amostragem para as variáveis de DAP, altura total, área basal, volume e densidade de árvores.

- Identificar o comportamento do aplicativo e as limitações do inventário feito pelo aplicativo Katam^{TM} em áreas com baixa mato competição.
- Analisar e recomendar oportunidades de pesquisa para as tecnologias utilizadas na metodologia a Katam para inventários florestais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 INVENTÁRIOS FLORESTAIS

Definição e características

Os inventários florestais buscam especialmente compreender uma coisa, o potencial dos recursos existentes em determinada área. Esse potencial de recursos pode ser dividido entre diversas classificações e variáveis, mas, essencialmente, o inventário busca a coleta das informações qualitativas e quantitativas essenciais acerca dos recursos existentes no local (PÉLLICO NETTO e BRENA, 1997).

Outra definição do que é um inventário, descrita por LEITE e ANDRADDE (2002), discorre sobre a quantificação do volume de um povoamento florestal através da extrapolação dos resultados, ou seja, medir uma parcela ou unidade amostral e, a partir dos seus resultados, extrapolar para toda a área.

Apesar do termo em consenso sobre o que é um inventário florestal o que realmente confirma essa atividade é a sua representatividade amostral e sua validade estatística (SANQUETTA, *et al;* 2014) e a confirmação dessas duas características é imprescindível para adotarmos as metodologias atuais.

Considerando a definição genérica sobre o objetivo do inventário este pode se dividir em diversas classificações, os inventários irão variar sobre essencialmente quais são as características quantitativas e qualitativas que se deseja saber e os recursos disponíveis e dispostos para serem utilizados para descobrir essas características. Os objetivos mais comuns são os inventários de sobrevivência, pré-cortes, convencionais, contínuos e manejo sustentável.

Em exemplos práticos, inventários comerciais como o de “pré-corte” utilizam informações da área florestal para estimativa do estoque de madeira do povoamento, isso é essencial na visão econômica pois são essas informações que permitem ao proprietário direcionar a matéria-prima existente para os seus diversos usos (STEPKA *et al.*, 2017).

A definição do objetivo do inventário é a primeira etapa para a escolha das estratégias e a análise de quais variáveis serão necessárias no campo de trabalho. A definição do limite de erro e o nível de confiança da estimativairão determinar qual será a precisão do trabalho a ser realizado (SANQUETTA, *et al.* 2014). Naturalmente algumas variáveis são mais difíceis de serem coletadas, portanto, diversas técnicas e

equipamentos são alocados para cada atividade, um exemplo é a utilização de hipsômetros para coleta dos dados de altura.

A altura é uma das variáveis mais importantes dentro de um inventário florestal, ela é essencial para o cálculo do volume e também para o incremento em altura daquele povoamento (JESUS *et al*., 2015)

Muitos inventários florestais utilizam de relações entre as variáveis para conhecê-las, reduzindo assim o custo e as dificuldades para coletá-las (ATANAZIO *et al.,* 2016), um exemplo é o uso das relações hipsométricas, por onde com o conhecimento de algumas variáveis da árvore de interesse, como o diâmetro a altura do peito (DAP), é possível, através de relações matemáticas, estimar a sua altura (IMAÑA ENCINAS *et al.*, 2002; HOSOKAWA *et al*., 2008).

O método tradicional de mensuração normalmente depende da alocação de “grids” em amostras na área de interesse e essa abordagem pode ser custosa e demandar muita mão de obra, reduzindo a eficiência do método (LIANG *et al.,* 2019). Portanto, diversos tem sido as tentativas de encontrar soluções para o desenvolvimento de métodos mais baratos e mais práticos para realização dos inventários florestais (DICK *et al.,* 2010, LIANG *et al.,* 2019).

2.2 ESTÁTISTICA APLICADA EM INVETÁRIOS FLORESTAIS

Métodos de Amostragem

Quando comentamos sobre os métodos amostrais aplicados aos inventários florestais estamos falando do método de área fixa ou do método de área variável, estes métodos de amostragem refletem como a parcela deverá ser abordada para a parte operacional do inventário.

Para o método de área fixa *n* unidades amostrais extraídas de uma população de N unidades, onde cada *n* tenha uma probabilidade igual de ser selecionada (HOSOKAWA e SOUZA, 1987) e essas *n* parcelas podem ser medidas por diferentes formas. Todos os dados coletados e calculados nestas unidades amostrais serão extrapolados para hectare e estão relacionados ao “Fator de Proporcionalidade”. Este fator de proporcionalidade expressa “quantas vezes as variáveis coletadas em uma unidade amostral representam, em termos numéricos, grandezas em um hectare” (SANQUETTA, *et al.* 2014). Esse fator de proporcionalidade estima o número de

árvores, área basal e volume por hectare (PÉLLICO NETTO e BRENA, 1997) e é medido através da fórmula:

$$F = \frac{1}{a}$$

Onde:

1 = A área do hectare a ser extrapolada;

a = Área da unidade amostral (m^2).

Como mencionado há diversas formas em que uma parcela fixa pode ser estabelecida, uma delas é no método amostral circular. Está têm a vantagem de possuírem o menor perímetro e, como explica PÉLLICO NETTO e BRENA (1997) minimizam um problema recorrente das árvores marginais. Outras formas muito aplicadas na metodologia de área fixa são as unidades de amostra quadradas e as unidades de amostra retangulares.

As unidades de amostras quadradas são utilizadas quando temos plantios com alinhamentos bem definidos e esquadrejados e normalmente são utilizadas em inventários pré-cortes. Já as unidades amostrais retangulares são recomendadas para áreas de grandes dimensões e com fatores que gerem heterogeneidade dentro da própria parcela (SANQUETTA, *et. al.* 2014). As fórmulas para o cálculo das duas áreas são respectivamente:

$$a_1 = L^2$$

$$a_2 = B \, . \, H$$

Onde:

a_1 = Área amostral quadrada;

a_2 = Área amostral retangular;

L = Lado da unidade amostral;

B = Lado maior da amostral retangular;

H = Lado menor da unidade amostral retangular;

Outra vantagem referente a implantação das parcelas circulares ao invés de parcelas retangulares e quadradas é encontrada em áreas que sofreram desbaste,

uma vez que se perde a linha do referenciamento para as amostras (SANQUETTA, *et al.* 2014).

Os métodos de amostragem por área variável usualmente são utilizados como estratégias quando a implantação dos métodos fixos é muito custosa ou não são requisitados, tem como características a sua rapidez e sua eficiência (SANQUETTA, *et al.* 2014) e estes métodos podem ser como o de *Bitterlich*, *Strand*, *Prodan*, dentre outros.

Processos de Amostragem

Segundo PÉLLICO NETTO e BRENA (1997) os processos de amostragem se dividem em três diferentes formas, o aleatório o sistemático e o misto. A amostragem aleatória simples normalmente é recomendada para áreas homogêneas em talhões não tão extensos e conta com a probabilidade de que todas as unidades amostrais têm igual chance de serem escolhidas e selecionadas para coleta de dados. Já amostragem sistemática, como o próprio nome já diz, consiste em seguir, sistematicamente, as parcelas amostrais sendo que apenas a primeira unidade amostral é aleatorizada. Está abordagem é recomendada para áreas externas ou heterogêneas onde deseja se conhecer e identificar aspectos além das próprias árvores do povoamento (SANQUETTA, *et al.* 2014).

Dentre os processos de amostragem validados diversos outros também podem ser utilizados em situações atípicas, mas, usualmente em áreas de florestas plantadas em sítios homogêneos a recomendação fica na utilização dos modelos apresentados acima.

Os processos de amostragem, assim como os métodos mencionados anteriormente buscam, conjuntamente, estimar a partir de uma área pequena de estudo todas as variáveis necessárias para qualificar e quantificar uma área florestal. Esses processos são utilizados visando reduzir os custos do censo florestal, e, para que essas unidades amostrais tenham sua validação confirmada elas necessitam de uma validação estatística (SANQUETTA, *et al.* 2014).

As grandezas estatísticas que possuem relação com os processos de amostragem são mencionadas abaixo e os símbolos para identificação das variáveis são:

n = Número de unidades amostrais;

N= Número total de unidades da população;
f = Fração de Amostragem;
x_i = Variável de interesse (i-ésima unidade de amostra);
$\bar{x}$ = Média aritmética;
s^2 = Variância;
s^2_x = Variância da média;
s = Desvio Padrão;
s_x = Erro Padrão;
cv(%) = Coeficiente de Variação;
Ea = Erro da Amostragem Absoluto;
Er = Erro da Amostragem Relativo;
IC = Intervalo de Confiança da Média;
X = Total da População;

2.3 TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS

O uso de técnicas de sensoriamento remoto

O avanço de tecnologias na área e inventários florestais tem se popularizado, especialmente naquelas relacionadas ao uso de sensoriamento remoto, esses avanços resultaram não apenas em um ganho de eficiência, mas na captação de novas informações sobre as florestas e também na digitalização dos dados (TOMPPO *et al.,* 2010).

As informações que podem ser obtidas advindas de sensoriamentos remotos são iguais às que podem ser obtidas por outras técnicas, porém, as suas metodologias são aplicadas de formas diferentes onde os equipamentos utilizados captam a energia refletida ou emitida pelos elementos terrestres e esse sensores são diversos e dependem de fatores como objetivo do mapeamento, a área total a ser coletada, a resolução e a disponibilidade de recursos (SANQUETTA *et al.,* 2014).

Técnicas de sensoriamento remoto são utilizados para alimentar o Sistemas de Informações Geográficas (SIG) assim como as técnicas de fotogrametria e fotointerpretação, sistema de posicionamento por satélite e a videografia (SANQUETTA *et al.*, 2014) e esse SIG permite analisarmos diversas informações sobre as áreas de interesse.

A utilização do SIG dentro da área de inventários florestais já tem sua importância consolidada, exemplos como uso do sistema para coleta de informações em diferentes anos, criação de mapas dinâmicos que permitem visualizar as amostras em relação ao tempo e correlacionar diferentes variáveis dentro do mesmo mapa, o auxílio na escolha das parcelas dentre outras atividades (SANQUETTA *et al.*, 2014).

Com o avanço e a otimização das tecnologias envolta de sensores remotos combinados aos modelos estatísticos estamos dando passos para o futuro e inventários florestais com grande eficiência e que terá um efeito direto no manejo florestal (LEITE *et al*., 2020).

Um ponto importante a se notar é a velocidade em que essas novas tecnologias tendem a evoluir, em um trabalho realizado por HUBBELL *et al.* (2008), os autores chegaram à conclusão de que dados usando de técnicas de sensoriamento remoto ainda não eram suficientes para uma boa estimativa de identificação de espécies, especialmente em áreas de países tropicais, como o Brasil, porém, outro estudo realizado em 2021 (MOURA *et al.,* 2021), já constatou que, com a aplicação de redes neurais convulcionais associadas ao modelo *faster_rcnn_inception_c2_pets* fora possível identificar, com boa acurácia e precisão, as espécies do estudo em áreas de restauração florestal da floresta amazônica.

LiDAR

Segundo WHITE *et al.,* (2016) duas das principais tecnologias associadas ao sensoriamento remoto crescentes nos últimos anos são o *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) e o *Airborne Laser Sacanning* (ALS), ambas baseadas no LiDAR.

O uso do LiDAR para determinação de diversas características da floresta ter ganhado espaço não é surpresa, especialmente com a popularização de ferramentas como os VANTs. Atualmente, já há trabalhos que confirmem a sua acurácia em estimar variáveis como o dossel e a altura de árvores individuais (BIRDAL *et al*., 2017) e na comparação de dados aéreos com dados coletados em nível de solo (WALLACE *et al.,* 2014a).

Os dados coletados por *Airborne Laser Scanning* (ALS) são presenciados desde o começo dos anos 2000 e diversas validações têm sido testadas para calibragem de dados como de diâmetro e altura de árvores individuais, que resultam nas variáveis de importância como volume e área basal das áreas de interesse

(VILLIKKA *et al.,* 2007). Mais recentemente diversos estudiosos buscaram analisar a acurácia das plataformas “UAV-Lidar” como BREINDDENBACH *et al.,* (2010), GLEASON e JUNGHO (2012), WALLACE *et al.,* (2014a) e WALLACE *et al.,* (2014b).

Estudos como o de VAUHKONEN *et al.* (2010) testaram os métodos do *k*-MSN (*k-Most Similar Neighbor*) e RF *(Random Forest)* aliados a tecnologia LiDAR para testes não paramétricos com as variáveis obtidos por ALS, para as estimativas de DAP, Altura e Volume. Foram observados a raiz do erro quadrático médio (REQM), onde para o volume variou entre 28-37%. Importante ressaltar que o uso do método *k*-MSN necessita da alimentação de dados e campo e isto está relacionado com sua precisão.

Alguns outros estudiosos analisaram características fora da área dendrométrica, como KORPELA (2006) que analisou a capacidade de identificação de dados de árvores individuais com o uso de câmeras acopladas a veículos aerotransportados, porém, o resultado deste trabalho mostrou a preocupação nas possíveis complicações relacionadas a não detecção de árvores e a acurácia da identificação das espécies e nas estimativas dos atributos da floresta. Outros trabalhos posteriores reconheceram a capacidade tecnológica do uso de dados advindos de tecnologias ALS, (HOLMGREN, *et al.,* 2008; KORPELA*,* 2006; KORPELA *et al.*, 2018; VAUHKONEN *et al.,* 2010).

Apesar da visão positiva sobre os resultados, o uso dessas alternativas tecnológicas ainda apresenta um grande custo que deve ser considerado para as aplicações em larga escala (GOODBODY *et al.* 2017; WALLACE *et al.* 2012).

2.4 SOLUÇÕES KATAM™

Dentre as diversas inovações sendo pesquisadas e se consolidando no mercado de mensuração e inventário florestal uma tecnologia que se destaca é a apresentada pela Start-up suéca Katam™, a empresa oferece duas soluções principais para inventários, uma delas utilizando de vídeos gravados pela câmera do celular chamada de Katam™ Forest e a outra no processamento de imagens coletadas a partir de câmeras óticas de drones, nomeada de Katam™ TreeMap.

O desenvolvimento destas soluções visa uma metodologia que capture uma maior porcentagem de amostras do talhão do que os métodos tradicionais, aumentando assim a área amostrada e garantindo maior representatividade, eficiência

e precisão nos inventários florestais (Katam) e também que fosse mais acessível do que as tecnologias que utilizem de inovações como o LiDAR.

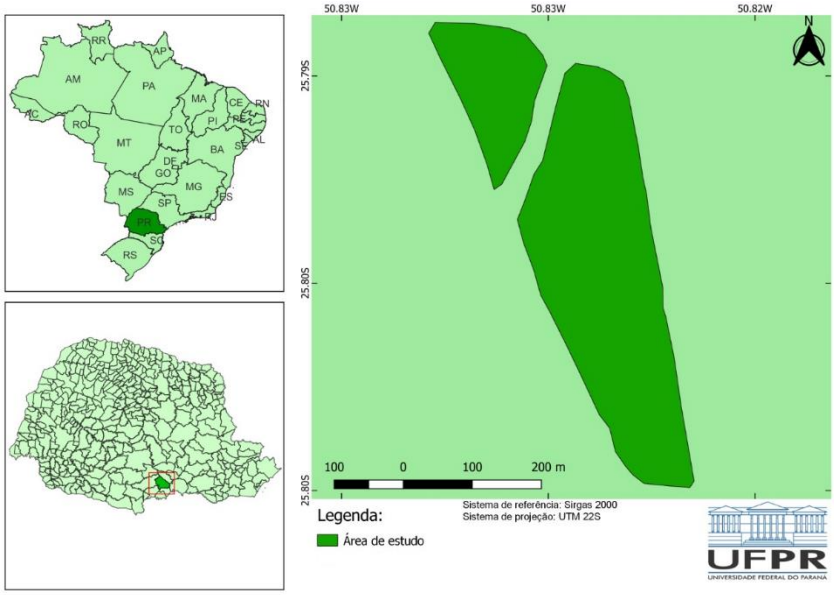
O uso de drones para captura de fatores quantitativos e qualitativos da floresta já fora discutido acima e é uma inovação compartilhada com diversos estudos consolidados, já o uso de gravações feitas por câmeras de celulares ainda é algo muito recente, e até o momento poucos estudos sobre estas (TÄLL, 2020; WERNER, 2022).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área do presente estudo se encontra na região Sul do país, em um local conhecido como Vera Cruz, no município de Mallet, estado do Paraná, sob as coordenadas geográficas 25°47'46.60"S e 50°49'30.89"W (FIGURA 2). A propriedade possui uma área de 12,1 hectares (ha) cultivada com *Pinus taeda* de 11 anos e submetido a um desbaste sistemático de intensidade de 50% sob o número de árvores por hectare (FIGURA 2).

FIGURA 1– LOCALIZAÇÃO DO PLANTIO DE *Pinus taeda* OBJETO DO PRESENTE ESTUDO



FONTE: O autor (2022).

Com relação as características do município e da região do estudo, a área se encontra a uma altitude de 882 metros (m) ao nível do mar. Segundo o Banco de Dados de Informações Ambientais (BDiA, 2021), o solo predominante na região é o

Cambissolo Háplico Alumínico de textura argilosa média, com a região geomorfológica denominada de Patamar de Ponta Grossa - Itapetininga. O clima do município de Mallet, segundo Köppen, é classificado como Cfa, sendo de clima subtropical úmido com verão quente.

Em 2011, o povoamento foi implantado sob o espaçamento inicial de 2,0 m x 2,0 m. O plantio foi submetido a um desbaste sistemático com intensidade de 50% no ano de 2021, sendo realizado um censo em 29 de junho de 2021 para quantificar o número de árvores e o valor médio do diâmetro à altura do peito medido a 1,3 m do solo (DAP) das árvores. Nesse levantamento, quantificou-se 14.266 árvores em 12,1 ha, cujo DAP médio foi de 19,81 cm nos dados de pós desbaste.

Durante o plantio, fora realizado o esquadrejamento para abertura das covas, capinas mecânicas até o terceiro ano e o uso de herbicidas até o segundo ano foram empregados nas linhas de plantio para conter a mato-competição. No momento da realização do presente estudo, o povoamento apresentava pouca mato-competição (FIGURA 2).

FIGURA 2– ALINHAMENTO E SUBBOSQUE NO PLANTIO DE *Pinus taeda* OBJETO DO PRESENTE ESTUDO

FONTE: O autor (2022).

3.2 COLETA DE DADOS DE CUBAGEM

Para o ajuste de modelos de relação altura-diâmetro e volumétricos, foi realizada a cubagem rigorosa de 30 árvores selecionadas aleatoriamente no

povoamento. As árvores foram abatidas por um operador de motosserra no dia 27 de julho de 2022.

A metodologia aplicada consistiu na medição da altura do toco e nas marcações das medidas de 0,10, 0,70, 1,00 e 1,30 m assim como em 10 posições relativas de igual comprimento ao longo do fuste, calculadas através da medição da altura total. Marcações foram realizadas ao longo do fuste das árvores, para posterior coleta dos diâmetros com o uso de uma suta dendrometria. Com isso, foi possível obter os valores das alturas de cada árvore, assim como dos diâmetros de cada seção, possibilitando o cálculo do volume por seção e total por meio da fórmula de Smalian (FIGURA 3, 4 e 5):

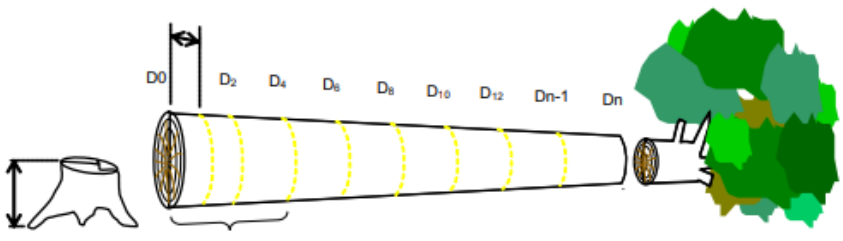
$$V = \frac{\pi \cdot \left(\frac{D^2 + d^2}{2}\right) \cdot L}{40.000}$$

Em que V = Volume da seção (m³); D = Diâmetro maior (cm); d = Diâmetro menor (cm); L = Comprimento da seção (m); e π = 3,1416.

Para o volume da última seção ($Vponta$), utilizou-se a seguinte expressão:

$$Vponta = \frac{\pi \cdot \left(\frac{D^2}{3}\right) \cdot L}{40.000}$$

FIGURA 3 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE ÁRVORES ABATIDAS PARA COLETA DE VOLUME REAL POR SMALIAN



D_{n-1} = diâmetro da última seção inteira
D_n = diâmetro da última seção
D_0 = diâmetro da base
L_1 = comprimento de cada seção
h = altura do toco

FONTE: Adaptado de EMBRAPA (2008).

FIGURA 4 – MARCAÇÃO DAS ÁRVORES

FONTE: O autor (2022).

FIGURA 5 – MEDIÇÃO COM A SUTA DENDROMÉTRICA MECÂNICA

FONTE: O autor (2022).

Após a coleta das diversas seções de cubagem, os dados foram adicionados a uma planilha eletrônica *Microsoft Excel* para o cálculo do volume das seções e da ponteira, gerando os volumes total e (sem ponta) de cada uma das 30 árvores. Com os dados inseridos, uma nova planilha com os resumos foi estruturada para as equações ajuste de modelos de relação altura-diâmetro (hipsométricos) e volumétricas por meio do programa computacional R.

3.3 AJUSTES DE MODELOS DE RELAÇÃO ALTURA-DIÂMETRO E VOLUME

Com base nos dados de cubagem, três modelos de relação altura-diâmetro (Tabela 1) e três modelos volumétricos (Tabela 2) foram ajustados, dentre eles, dois modelos de cada foram de bases logarítmicas. Os modelos testados possuem relevância na literatura e são utilizados por diversos outros pesquisadores (BARROS, *et al.,* 2002; MACHADO *et al.,* 2008; AZEVEDO *et al.,* 2011; SOUZA, 2014).

TABELA 1 – Modelos testados para a estimativa de altura total em relação do DAP em pinus.

Nº	Modelo	Autor
1	$\ln(h) = \beta 0 + \beta 1 \,.\, \ln(d)$	Stoffels & Van Soest
2	$h = \beta 0 + \beta 1 \,.\, d + \beta 2 \,.\, d^2$	Trorey
3	$\ln(h) = \beta 0 + \beta 1 \,.\, (\frac{1}{d})$	Curtis

h = altura da árvore; $\beta 0, \beta 1 \; e \; \beta 2$ = coeficientes do modelo; d = diâmetro a 1,30 m do solo.

Os modelos volumétricos testados neste estudo, são também usualmente utilizados por pesquisadores para a estimativa de povoamentos de *Pinus* (THOMAS *et al.,* 2006; PELISSARI, 2011; STEPKA *et al.*, 2017). Para os modelos de *Schumacher-Hall* e *Spurr*, temos a entrada tanto da variável diâmetro quanto da variável altura (Tabela 2).

TABELA 2 – Modelos testados para a estimativa de Volume em relação do DAP e altura total em pinus.

Nº	Modelo	Autor
1	$\ln(v) = \beta 0 + \beta 1 \,.\, \ln(d)$	Husch
2	$v = \beta 0 + \beta 1 \,.\, (\, d^2 \,.\, h)$	Spurr

3	$\ln(v) = \beta 0 + \beta 1 \,.\, \ln(d) + b2 \,.\, \ln(h)$	Shumacher-Hall

v = volume da árvore; h = altura da árvore; $\beta 0, \beta 1 \; e \; \beta 2$ = coeficientes do modelo; d = diâmetro a 1,3 m do solo.

3.4 METODOLOGIAS DE COLETA DE DADOS EM INVENTÁRIO FLORESTAL

3.4.1 METODOLOGIA TRADICIONAL DE AMOSTRAGEM

A metodologia tradicional de amostragem consistiu na alocação de unidades amostrais de área fixa, por meio do processo de amostragem aleatória simples. Foram utilizadas unidades amostrais quadradas de dimensões 20 m x 20 m, totalizando 400 m^2, alocadas em campo com a ajuda de balizas e medidas por fita métrica. O tamanho das parcelas foi definido com base no espaçamento de plantio de 2,0 m x 2,0 m (FIGURA 6 E 7).

FIGURA 6 e 7 – BALIZAS EM CAMPO

FONTE: O autor (2022).

A coleta dos dados de diâmetros a 1,3 m do solo foi realizada no dia 27 de julho de 2022 e utilizando uma suta mecânica. Foi tomado o cuidado de que o mesmo operador coletasse todos os diâmetros, enquanto a outra pessoa anotava as medidas em campo. Os dados foram tabulados e depurados em planilhas eletrônica *Microsoft Excel*.

O número de amostras foi calculado pela intensidade amostral (*n*), considerando a probabilidade (P) de 95% pela distribuição *t* e o limite de erro (LE) de 10%.

$$n = \frac{t^2 \cdot s^2}{E^2}$$

Em que n = Intensidade amostral; t = Valor tabelado pelo grau de liberdade e nível de significância; s = Desvio padrão da amostra (cm); E = Média da amostra multiplicado pelo limite de erro fixado admitido no inventário.

3.4.2 METODOLOGIA DO KATAM FOREST

Com a utilização do aplicativo de celular Katam™ Forest é possível obter dados dendrométricos essenciais ao inventário florestal. A partir do processamento dos vídeos utilizando do software SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) são detectados o número de árvores e a delimitação da área de coleta (THURUN, 2007, WU *et al.,* 2016, apud TÄLL, 2020). Com o processamento finalizado por estes softwares é possível obter, então, o número de árvores (densidade), as variáveis de Diâmetro a Altura do Peito (DAP) e desvio padrão do diâmetro, a área basal, a estimativa da altura média e o volume. Esses dados são gerados a nível de vídeo e são extrapolados para hectare e dados como volume, DAP e altura podem ser analisados para cada árvore individual.

Para uma gravação de qualidade diversos são os passos que devem ser seguidos e estarão descritas com maiores detalhes no APÊNDICE 1 seguindo as orientações da *start-up*. Vale a pena ressaltar que ao realizar a coleta de dados de um talhão diversas gravações são realizadas, variando de 1 a 2 minutos, para facilitar o processamento e também manter a qualidade exigida dos vídeos.

Ao final das gravações e do processamento de todos os vídeos o aplicativo automaticamente irá fazer a junção dos dados coletados apresentando, na própria interface do aplicativo, os dados médios de todas as coletas, estimando também os

dados para hectares, facilitando assim a observação e comparação dos dados logo ao fim do processamento (FIGURA 8).

FIGURA 8 - RESUMO DOS DADOS COLETADOS A NÍVEL DE TAHLÃO PELO APLICATIVO KATAM™ FOREST.

FONTE: O autor (2022).

O processamento dos dados coletados pelo Katam™ Forest é automatizado, permitindo que próprio operador do smartphone obtenha estas informações de maneira rápida. O uso das informações coletadas pelo Katam™ Forest pode ainda ser acoplado as informações coletadas pelo Katam™ TreeMap, deste modo serão gerados relatórios mais detalhados permitindo uma correlação visual das variáveis de densidade, volume e altura das árvores.

Então, para a coleta pelo Katam™ Forest, efetuou-se a gravação dos vídeos em sentido da linha de plantio, com duração de 1:00 a 2:00 minutos como recomendado. O número de gravações foi planejado visando abranger as possíveis variabilidades dentro do talhão. Cada gravação foi considerada como uma unidade amostral para posteriores procedimentos estatísticos.

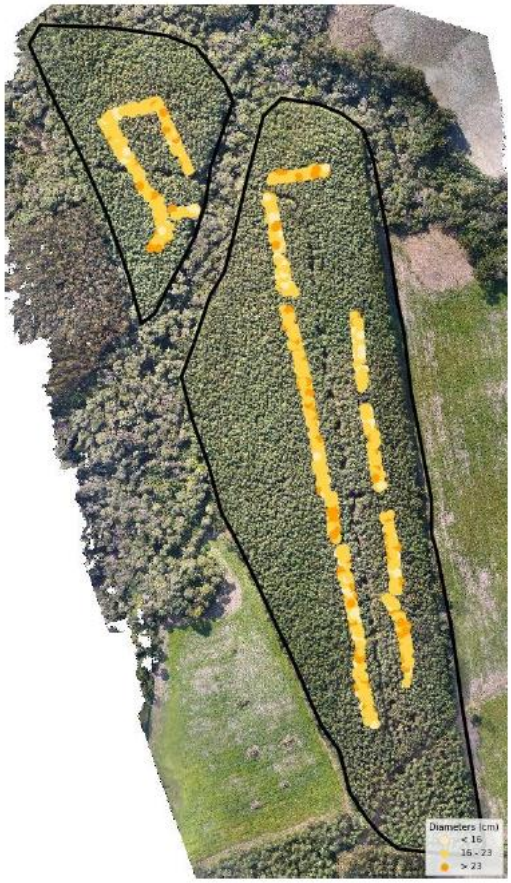
O processamento dos vídeos foi realizado durante as gravações em campo, uma vez que a ferramenta permite processar os dados sem conectividade com *wi-fi* e também em segundo plano, enquanto novas gravações são realizadas. A coleta dos dados foi realizada no dia 03 de junho de 2022, em um *smartphone Sony Xperia* modelo H8266.

O aplicativo permite duas abordagens para a coleta de dados, uma denominada de “profundidade dinâmica” e outra de “profundidade fixa”. Quando o aplicativo está configurado para a profundidade fixa o *software* irá detectar todas as árvores em um campo de visão máximo de área estabelecido pelo próprio operador e enquanto estiver configurado para profundidade dinâmica o próprio *software* delimitara o limite máximo do campo de visão. Os dois modelos de processamento foram analisados neste trabalho para a variável de área basal, para as demais variáveis foram comparados apenas os valores referentes a profundidade dinâmica, uma vez que ela aumenta a quantidade de árvores coletadas por vídeo.

O teste com a profundidade fixa para análise da área basal, foi realizado estabelecendo uma distância fixa de 6,0 m, uma vez que o plantio foi realizado em um espaçamento de 2,0 m x 2,0 m.

Ao todo 22 amostras foram coletadas com o Katam™ Forest, totalizando 878 árvores em uma área de 7.578 m^2, resultando em 6,26% da área total abrangida. Os relatórios do próprio aplicativo permitem o acesso a essas informações assim como a distribuição espacial das árvores (FIGURA 9).

FIGURA 9 – COLETA DOS DIÂMETROS PELO APLICATIVO KATAM™ FOREST



FONTE: O autor (2022).

3.4.3 KATAM FOREST COM A ALTURA ESTIMADA PELO MODELO DE RELAÇÃO ALTURA-DIÂMETRO

O aplicativo Katam^{TM} Forest pode estimar a altura através de uma equação de relação altura-diâmetro (hipsométrica) inserida no próprio código. Porém, ele também permite que o usuário insira a altura média em cada vídeo realizado. Isso permite que possam ser usadas equações hipsométricas específicas para os locais de estudo ou outros métodos de coleta de altura no inventário florestal.

Ambas as alturas foram analisadas no presente trabalho. Para o processo de inserção das alturas médias em cada unidade amostral, todos os DAPs das árvores coletadas na amostra da Katam foram exportados por unidade amostral. Em seguida, as alturas foram estimadas pela equação hipsométrica ajustada, gerando novos dados de altura e de volume. Esses dados são referidos por Katam 2 nas análises apresentadas nos resultados.

3.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS E ANÁLISES ESTATÍSICAS

Para o processamento da base de dados gerada pela cubagem rigorosa, bem como os dados avindos do aplicativo da Katam, foi utilizado o *software R* versão 4.2.1 - “Funny-Looking Kid”) disponível no dia 23 de junho de 2022 (R Core Team 2022) e também o *software R-Studio* versão 2022.07.0 +548 disponível a partir do dia 06 de julho de 2022 (RStudio Team 2022). Gráficos e tabelas foram elaborados através do *Rstudio* e *Microsoft Excel*.

Os dados coletados pelo Katam™ Forest foram exportados para uma planilha *Excel*, possibilitando, então, que fossem realizadas as comparações entre as médias de cada unidade amostral (vídeo) com cada unidade amostral do inventário tradicional.

Os critérios que auxiliariam na seleção dos melhores modelos foram definidos através de análises estatísticas de ajuste com o auxílio do *software R.* Foi possível também a visualização de possíveis *outliers* que podem surgir durante os processos de medição e inserção de valores, dando uma segurança a mais aos dados. Os seguintes critérios estatísticos foram analisados (THOMAS *et al.,* 2006; SANQUETTA *et al.,* 2014):

I. F = Valor de F da análise de variância da regressão (ANOVA);
II. $R^2_{aj.}$ = Coeficiente de determinação ajustado;
III. $R^2_{aj.}$ Corrigido = Coeficiente de determinação ajustado corrigido;
IV. S_{yx} e S_{yx} recalculado = Erro padrão da estimativa;
V. $S_{yx\%}$ e $S_{yx\%}$ recalculado = Erro padrão da estimativa em porcentagem;
VI. Análise gráfica dos resíduos;
VII. Teste de normalidade de Shapiro-Wilk;
VIII. Teste de homoscedasticidade de Breusch-Pagan.

Explicando os critérios estatísticos utilizados para escolha dos melhores modelos iniciamos pelo valor de F. Este é uma comparação entre um valor de F calculado sobre um crítico (F tabelado), que considera os graus de liberdade utilizados a um determinado nível de significância (SANQUETTA *et al.,* 2014). O valor de F significa se há ajuste a determinado nível de significância. Caso o valor de F calculado seja superior ao valor de F tabelado, rejeita-se a hipótese nula, indicando que, pelo menos uma das variáveis independentes está relacionada com uma variável dependente (MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G.; 2012.).

Para o coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), precisamos, primeiramente, calcular o valor do coeficiente de determinação (R^2), que determina se os valores estão sendo bem ajustados e representa o quanto a regressão explica da variação total (MINITAB, 2022), sendo expresso por:

$$R^2 = [\,1 - (\frac{SQresíduo}{SQtotal})]$$

Em que SQresíduo = Soma dos quadrados dos resíduos da regressão; e SQtotal = Soma dos quadrados totais.

Com o R^2, um ajuste é realizado quando há diferença entre os números dos parametros e de observações (MINITAB, 2022), resultando no $R^2_{aj.}$ calculado pela seguinte expressão:

$$R^2_{aj.} = [\,1 - (\frac{QMerro}{QMtotal})]$$

Em que QMerro = Quadrado médio dos erros da regressão; e QMtotal = Quadrado médio do total.

Outros critérios de seleção foram o Erro Padrão da Estimativa (S_{xy}) e o Erro padrão da Estimativa em Porcentagem ($S_{xy\%}$), os quais são responsáveis por indicar a precisão dos modelos (THOMAS *et al.*, 2006). O Erro Padrão da Estimativa foi calculado pela expressão:

$$S_{yx} = \sqrt{QMresíduo}$$

Em que QMresíduo = Quadrado médio dos resíduos da regressão.

Enquanto o Erro Padrão da Estimativa em Porcentagem foi obtido pela formulação:

$$S_{yx\%} = \frac{S_{yx}}{\bar{y}} 100$$

Em que y = Média aritmética da variável dependente;

Segundo Machado *et al.* (2008), por termos modelos que utilizam de base logarítmica, ou seja, sofrem algum tipo de transformação nos dados, é necessário recalcular e corrigir os valores de S_{xy} e $S_{xy\%}$. A correção da discrepância logarítmica foi efetuada por meio do Fator de Correção de Meyer (FCM).

$$FCM = e^{0,5 * QM\ res}$$

Em que e = Base do logaritmo natural; e $QM\ res$ = Quadrado médio dos resíduos;

Apesar das escolhas dos modelos se basearem nas características explicadas acima, outros testes estatísticos são requisitados para confirmarem o atendimento dos pressupostos da regressão linear, como o teste de normalidade de Shapiro-Wilk aplicado aos resíduos dos modelos. Essa estatística testa a nulidade que uma amostra possui, quando retirada de uma população, de ser uma distribuição normal. Em outras palavras, ele analisa se a distribuição dos dados é considerada uma normal (SHAPIRO e WILK, 1965, *apud* SRIVASTAVA e HUI, 1987; MIOT, 2017).

O cálculo desse teste utiliza da soma quadrada dos desvios da amostra (S^2), considerando que n amostras sejam coletadas, onde n determinará o valor tabelado de a_i utilizado no cálculo de b, na seguinte equação:

$$b = \sum_{i=1}^{n} a_{n-i+1} \left(y_{n-i} + 1 - y_i\right)$$

Posteriormente, é possível calcular o valor de W. Se o resultado de W calculado for menor do que o valor de W tabelado, podemos então rejeitar a hipótese de normalidade ao nível de significância de 5%. A expressão que determina W calculado é:

$$W = \frac{b^2}{S^2}$$

Como complemento do teste de normalidade, também foi realizado o teste de homoscedasticidade de Breusch-Pagan, para atestar a presença de variâncias homogêneas nos modelos ajustados, ao nível de 5% de significância. A ausência de

significância estatística atesta a presença de homoscedasticidade, e quando isto ocorre a estimativa dos parâmetros perde precisão.

3.6 ANÁLISES ESTÁTISTICAS PARA COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS DE COLETA DE DADOS EM INVENTÁRIO FLORESTAL

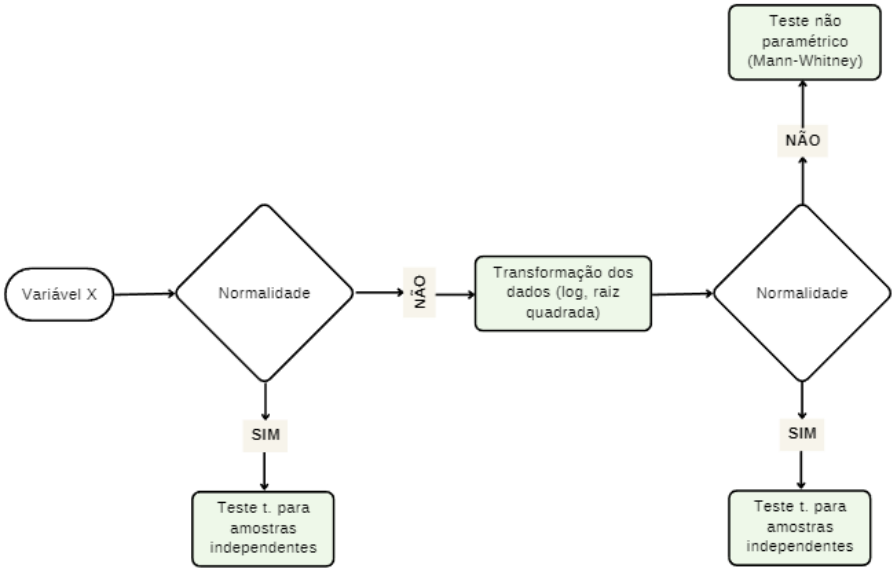
As variáveis extraídas para a comparação estatística entre as duas metodologias de coleta de dados em inventário florestal foram as médias do DAP (cm), altura total (m), volume total ($m^3.ha^{-1}$) e área basal ($m^2.ha^{-1}$) e também a densidade de árvores (árvores.ha^{-1}) por unidade amostral, sendo comparadas utilizando o *software R*, sendo que a altura para a metodologia Katam foi estimada por meio de duas abordagens apresentadas no tópico 3.4.3.

Primeiramente, foram aplicados o teste de Shapiro-Wilk, para atestar a normalidade dos dados, bem como o teste de Bartlett, por analisar a homogeneidade das variâncias entre as amostras. Ambos os testes foram considerados ao nível de 5% de significância.

Para a comparação estatística das variáveis entre as metodologias, foi aplicado o teste *t* bicaudal para amostras independentes, onde é comparado as médias amostrais com a hipótese nula. Quanto maior a diferença entre 0 e o valor de t calculado, maior é a diferença entre as médias (MINITAB, 2022) ao nível de 5% de significância.

Na ausência de normalidade dos dados e/ou de variâncias homogêneas, a transformação logarítmica foi aplicada, com o intuito de atender as suposições da estatística experimental. Em caso de insucesso, a comparação entre as médias das variáveis foi efetuada por meio do teste não-paramétrico de Mann-Whitney, ao nível de 5% de significância, conforme FIGURA 10.

FIGURA 10 – FLUXOGRAMA PARA DECISÃO DO TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS



FONTE: O autor (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AJUSTE DOS MODELOS DE RELAÇÃO ALTURA-DIÂMETRO E DE VOLUME

Os modelos de relação altura-diâmetro foram avaliados por meio dos resultados dos testes estatísticos presentes na TABELA 3. Para o modelo ajustado para a altura, o melhor resultado do valor de F, $R^2_{aj.}$ e $S_{yx\%}$ foi o modelo de Stoffels & Van Soest (1) seguido pelo modelo de Curtis (3). O modelo 2 (Trorey) apresentou um $p - valor$ não significativo para a segunda variável da regressão (DAP^2). Para as variáveis de $R^2_{aj.}$ e para $S_{yx\%}$ o modelo 1 apresentou 0,3984 e 4,33% e o modelo 3 apresentou 0,3938 e 4,35% respectivamente. Portanto, segundo as análises descritas o modelo hipsométrico de Stoffels & Van Soest foi o selecionado (FIGURAS 11 e 12).

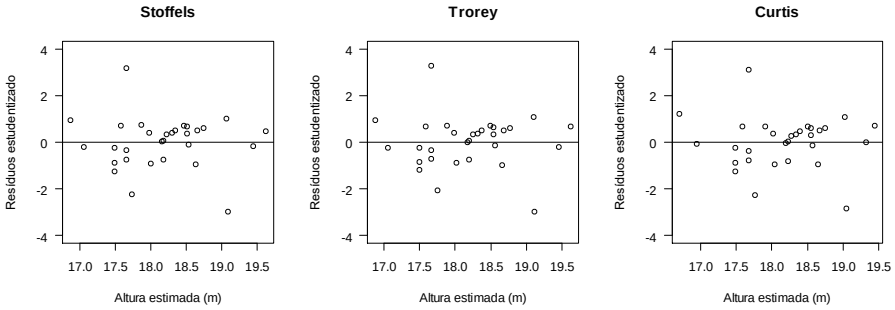
TABELA 3 – Análises estatísticas para comparação entre os modelos

Modelo	$\boldsymbol{p - valor}$	$\boldsymbol{Fc}$	$\boldsymbol{R^2_{aj.}}$	$\boldsymbol{S_{yx\%}}$

Modelos de Altura				
Stoffels & Van Soest	0,0001207 **	1,0009	0,3984	4,33
Trorey	0,0001508 ** 0,7221093 ns		0,3767	4,41
Curtis	0,0001378 **	1,0009	0,3938	4,35
Modelos de Volume				
Husch	$3{,}423 \times 10^{-13}$ **	1,009	0,8365	13,85
Spurr	$8{,}742 \times 10^{-15}$ **	-	0,8829	11,71
Schumacher-Hall	$7{,}250 \times 10^{-16}$** $7{,}184 \times 10^{-5}$**	1,005	0,9016	10,74

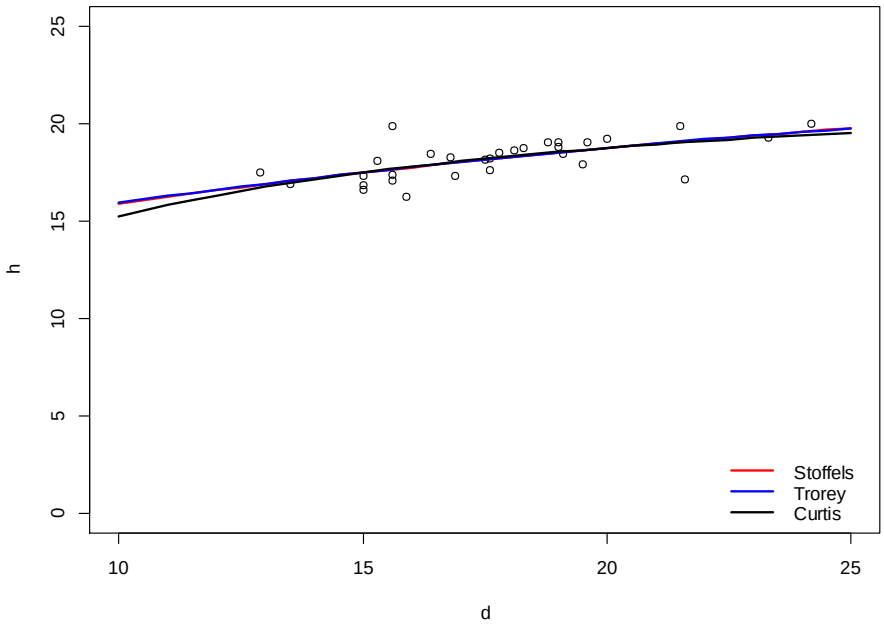
$\boldsymbol{p-valor}$ = Valor da significância dos parâmetros; $\boldsymbol{Fc}$ = Valor de correção da discrepância logarítmica; $\boldsymbol{R^2_{aj.}}$= Coeficiente de determinação ajustado; $\boldsymbol{S_{yx\%}}$ = Erro padrão da estimativa em porcentagem; **ns** = teste não significativo; ***** = teste significativo a 5%; e ****** = teste significativo a 1%.

FIGURA 11 – GRÁFICO DE RESÍDUOS DOS MODELOS DE ALTURA



FONTE: O autor (2022).

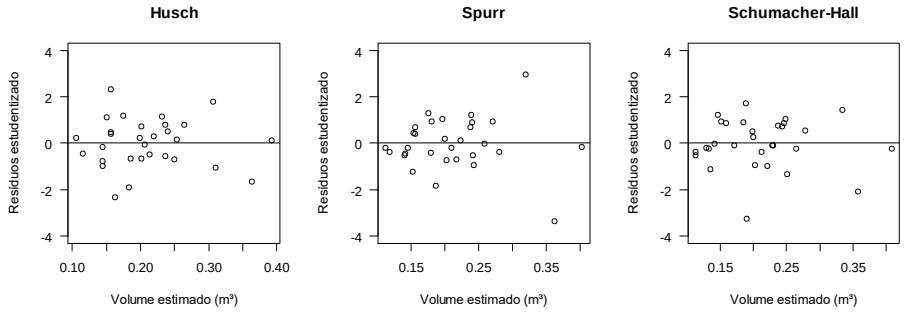
FIGURA 12 – GRÁFICO DOS MODELOS DE ALTURA



FONTE: O autor (2022).

Para a seleção do modelo volumétrico, o melhor valor de F, $R^2_{aj.}$ e $S_{yx\%}$foi do modelo de Schumacher-hall (3), seguido pelos modelos de Spurr (2) e de Hush (1). Para as métricas de R^2_{aj} e $S_{yx\%}$, o modelo 3 apresentou 0,9016 e 10,74%, enquanto o modelo 2 R^2_{aj} de 0,8829 e $S_{yx\%}$ de 11,71%. Portanto, pelas análises descritas, o modelo volumétrico de Schumacher-hall foi o selecionado no presente estudo (TABELA 3) (FIGURA 13).

FIGURA 13 – GRÁFICO DE RESÍDUOS DOS MODELOS DE VOLUME



FONTE: O autor (2022).

Os coeficientes de regressão estimados para os modelos de relação altura-diâmetro e de volume são apresentados na TABELA 4. Para o modelo hipsométrico de Stoffels & Van Soest temos $\beta 0$ = 2,20946 e $\beta 1$ = 0,24083; e para o modelo volumétrico de Schumacher-Hall temos $\beta 0$ = -12,0912, $\beta 1$ = 1,6028 e $\beta 2$ = 2,0322 (TABELA 4).

TABELA 4 – Valores de dos coeficientes de regressão estimados para os modelos analisados

Modelo	$\boldsymbol{\beta 0}$	$\boldsymbol{\beta 1}$	$\boldsymbol{\beta 2}$
Modelos de Relação Altura-Diâmetro			
Stoffels & Van Soest	2,20946	0,24083	-
Trorey	11,95826	0,45616	-0,00578
Curtis	3,14025	-4,18081	-
Modelos de Volume			
Hush	-7,6012	2,0922	-
Spurr	$1{,}736 \times 10^{-2}$	$3{,}288 \times 10^{-5}$	-
Schumacher-hall	-12,0912	1,6028	2,0322

$\boldsymbol{\beta 0}, \boldsymbol{\beta 1}\ e\ \boldsymbol{\beta 2}$ = coeficientes de regressão do modelo.

Os resultados dos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e de homocedasticidade de Breuch-Pagan dos modelos são representados na TABELA 5.

TABELA 5 – Análises estatísticas para comparação entre os modelos

Modelo	**Shapiro-Wilk (p-valor)**	**Shapiro-Wilk (W)**	**Breuch-Pagan (p-valor)**	**Breuch-Pagan** (χ^2)
Modelos de Altura				
Stroffels & Van Soest	0,05916	0,93304	0,82893	0,04668
Trorey	0,05943	0,93311	0,92354	0,00921
Curtis	0,09828	0,94125	0,73532	0,11428
Modelos de Volume				
Hush	0,9931	0,99045	0,99765	0,99990
Spurr	0,6146	0,97267	0,00267	9,01770
Schumacher-hall	0,1861	0,95156	0,40887	0,68207

$\boldsymbol{p - valor}$ = valor de p; $\boldsymbol{W}$ = Valor de W calculado; $\boldsymbol{\chi^2}$ = Valor de Qui-quadrado de Breuch-Pagan.

Podemos concluir que os modelos confirmam a normalidade residual, ao nível de 5% de significância. Para o teste de homogenidade das variâncias de Breuch-Pagan, apenas o modelo volumétrico de Spurr rejeitou a hipótese de homocedasticidade.

4.2 DEFINIÇÕES DAS VARIÁVEIS COLETADAS

Através do método da Katam foram coletados de 6% a 7% da área total enquanto a porcentagem abrangida pelas 7 unidades amostrais pelo método tradicional abrangeu 2,3% da área total.

Os resultados gerados através das duas metodologias descritas são apresentados na TABELA 6 para as variáveis de diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (Hi), volume total (Vi) e área basal (Gi) por árvore. Para os dados de Altura e para os dados de Volume, foram utilizadas as equações advindas dos modelos escolhidos de Stoffels & Van Soest e Schumacher-Hall.

TABELA 6 – Resultados das diferenças das variáveis coletadas a nível individual.

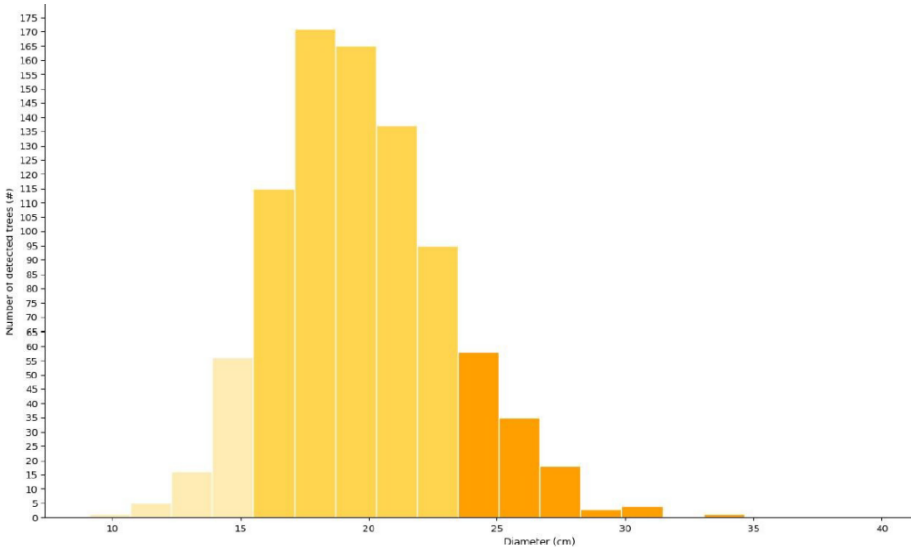
Variável	Mín	Méd	Máx	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
Amostragem					
DAP (cm)	13,1	20,22	29,0	2,733	13,52
Hi (m)	16,9	18,76	20,5	0,619	3,30
Vi (m^3)	0,10875	0,27524	0,57348	0,077	28,07
Gi (m^2)	0,01348	0,03269	0,06605	0,009	26,84
Katam					
DAP (cm)	11,11	19,59	30,59	3,340	16,98
Hi (m)	12,91	16,38	19,27	1,066	6,50
Vi (m^3)	0,06764	0,25650	0,63530	0,096	37,51
Hi estim. (m)	16,30	18,63	21,17	0,761	4,09
Vi estim. (m^3)	0,08000	0,29290	0,76200	0,111	37,41
Gi (m^2)	0,00969	0,03123	0,07348	0,011	34,04
Gi fix. (m^2)	0,00869	0,03118	0,07180	0,019	34,83

$\boldsymbol{DAP}$ = diâmetro a 1,30 m do solo; $\boldsymbol{vi}$= volume individual da árvore estimado; $\boldsymbol{hi}$ = altura individual da árvore estimada; $\boldsymbol{Hi}$ = altura individual da árvore estimada pelo katam; $\boldsymbol{Vi}$= volume individual da árvore estimado pelo katam; $\boldsymbol{Hi\ estim.}$ = altura individual da árvore estimada pela equação hipsométrica; $\boldsymbol{Vi\ estim.}$= volume individual da árvore estimado pelo katam com a altura média inserida por $Hiestim$; $\boldsymbol{Gi}$ = área basal média individual pelo processamento dinâmico; $\boldsymbol{Gi\ fix.}$ = área basal média individual pelo processamento fixo.

O número de árvores analisadas pela metodologia da katam foi aproximadamente o dobro do que a quantia analisada pela amostragem tradicional, totalizando 878 e 349 árvores, respectivamente. Devido a isso, é esperado que haja variações em relação aos valores mínimos e máximos.

Para a variável DAP, podemos observar que os valores mínimos, médios e máximos foram, para a metodologia de amostragem tradicional e para metodologia da katam, de 13,1, 20,22 e 29,0 cm e 11,11, 19,7 e 30,59 cm, respectivamente. A média apresentou uma diferença de 0,50 cm. O diâmetro é a variável de mais fácil medição, cuja informação necessária para estimativa das demais variáveis (FIGURA 14).

FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA NA PARCELA COLETADA PELO APLICATIVO KATAM™ FOREST



FONTE: O autor (2022).

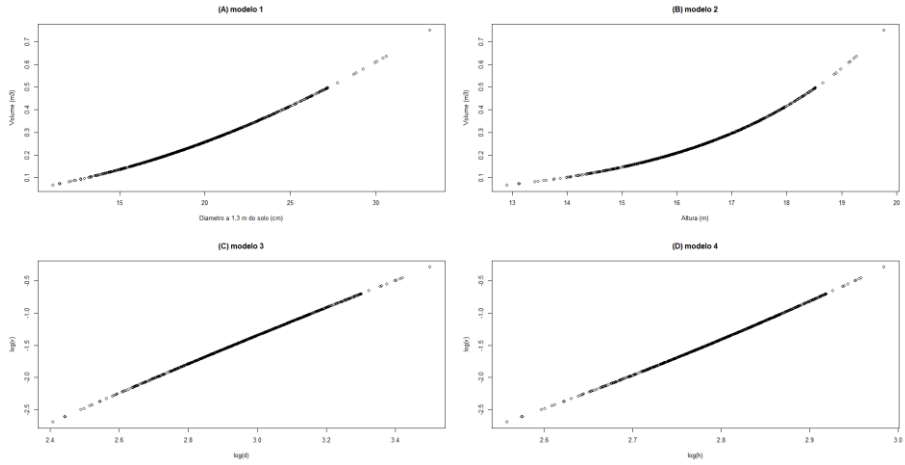
Para a altura estimada para a amostragem tradicional, os valores mínimo, médio e máximo foram de 16,91, 18,76 e 20,5 m, enquanto, para a metodologia da katam, foram de 12,91, 16,42 e 19,27 m. A diferença da média entre as duas metodologias ficou em 2,08 m. A diferença que mais chama a atenção é a altura mínima estimada pelo aplicativo, de 12,91 m, enquanto a altura mínima estimada pela amostragem foi de 16,91 m, resultando em uma diferença de 4,0 m.

Em relação da altura estimada pelo modelo hipsométrico com a entrada dos DAPs da Katam, foram obtidos valores mínimo, médio e máximo de, respectivamente,

16,30 m, 18,63 m e 21,17 m, sendo semelhantes aos estimados pela amostragem tradicional.

O volume é uma das mais importantes variáveis que podemos obter em um plantio (SANQUETTA, *et al.*, 2014) e para a sua estimativa, diversas são as equações que podem ser utilizadas. Os seguintes valores mínimos, médios e máximos foram encontrados entre as metodologias analisadas: 0,1087, 0,2752 e 0,5735 m^3 e 0,0676, 0,2813 e 0,7507 m^3 por árvore, respectivamente para a amostragem tradicional e pela Katam (TABELA 6). A diferença entre as médias dos volumes foi de 0,0187 m^3. O volume individual também sofreu alteração com a inclusão da altura média no aplicativo da Katam, onde os novos volumes apresentaram mínimo de 0,06764 m^3, média de 0,2929 m^3 e máximo de 0,762 m^3. A nova diferença entre as médias dos volumes foi igual a 0,01766 m^3.

FIGURA 15 – RELAÇÃO DO VOLUME COM AS VARIÁVEIS OBTIDAS PELO KATAM™ FOREST



FONTE: O autor (2022).

Podemos observar comportamentos crescentes do volume em função das variáveis preditoras onde os modelos 1 e 2 expressam um comportamento potencial, ao passo que nos modelos 3 e 4 há a linearização da relação (FIGURA 15). A última variável observada na TABELA 6 foi a de área basal, sendo importante ressaltar que esta variável foi analisada sobre duas abordagens na metodologia da Katam, considerando as unidades amostrais com profundidades fixa e dinâmica.

Para os valores mínimos, médios e máximos para a área transversal (g) pela amostragem tradicional foram de, respectivamente, 0,0135, 0,0327 e 0,0661 m^2 por árvore. Para a Katam com área das unidades amostrais com profundidade dinâmica,

foram obtidos os resultados de 0,0097, 0,0341 e 0,0863 m^2 por árvore; enquanto para o processamento da Katam utilizando profundidade fixa, as áreas transversais foram de 0,0087, 0,0312 e 0,0718 m^2 por árvore, respectivamente para os valores mínimos, médios e máximos.

4.3 ANÁLISES ESTÁTISTICAS ENTRE AS METODOLOGIAS DE AMOSTRAGEM

4.3.1 ANÁLISE DESCRITIVA

A média dos vetores foram avaliadas em nível de unidade amostral onde foram alocadas, ao todo, 29 unidades amostrais (u.a.) utilizadas nas duas metodologias de amostragem, sendo sete u.a. para a amostragem tradicional e 22 metodologia da Katam. Os resultados das médias estão dispostos na tabela abaixo (TABELA 7).

TABELA 7 – Resultados das médias das amostras entre os métodos.

Metodologia	**DAP**	**H**	**V.ha^{-1}**	**G.ha^{-1}**	**D**
	(cm)	(m)	(m^3.ha^{-1})	(m^2.ha^{-1})	árvore.ha^{-1}
Tradicional					
Média	20,24	18,77	343,07	40,74	1246
Desvio Padrão	0,68	0,16	20,95	2,44	91,77
Katam 1					
Média	19,59	16,38	302,21	37,98	1201
Desvio Padrão	1,27	0,43	38,27	4,45	122,82
Katam 2					
Média	19,59	18,60	349,37	37,98	1201
Desvio padrão	1,27	0,21	37,00	4,45	122,82

$\boldsymbol{DAP}$ = média do diâmetro à altura do peito medido a 1,30 m do solo; $\boldsymbol{H}$ = média da altura total das árvores; $\boldsymbol{V}$ = volume médio por hectare; $\boldsymbol{G}$ = área basal média por hectare; $\boldsymbol{D}$ = Densidade média por hectare; **Katam 1** = valores da altura estimada pelo próprio aplicativo; **Katam 2** = valores da altura estimada pela equação hipsométrica.

4.3.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

O resultado dos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e de homogeneidade de Bartlett determinaram que as variáveis DAP, Volume, Área Basal e seriam analisadas pelo teste *t* para amostras independentes, ao passo que a variável altura (H) foi avaliada pelo teste não-paramétrico de Mann-Whitney. A variável de densidade por ser considerado uma variável discreta foi comparada pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney (TABELA 8).

TABELA 8 – Resultados dos testes de hipótese das médias das amostras entre os métodos pela altura estimada pelo aplicativo.

Variável	**Shapiro-Wilk** W	**Bartlett** χ^2	t **(p-valor)**	W **(p-valor)**
DAP (cm)	0,4068^{ns}	0,4207^{ns}	0,06387^{ns}	-
H (m)	1,5 x 10^{-5} **	0,1042^{ns}	-	1,281 x 10^{-6} **
V.ha^{-1} (m^3.ha^{-1})	0,9324^{ns}	0,2369^{ns}	0,00130**	-
G.ha^{-1} (m^2.ha^{-1})	0,99^{ns}	0,1144^{ns}	0,05011^{ns}	-
D (arv.ha^{-1})	0,1063^{ns}	0,1663^{ns}	-	0,1931^{ns}

$\boldsymbol{DAP}$ = diâmetro a 1,30 m do solo; $\boldsymbol{V}$ = volume médio por hectare; $\boldsymbol{H}$ = altura média por hectare; $\boldsymbol{G}$ = área basal média por hectare; $\boldsymbol{D}$ = Densidade média por hectare; **ns** = teste não significativo; ***** = teste significativo a 5%; ****** = teste significativo a 1%.

Não houve diferença estatística entre as metodologias de amostragem para a variável de DAP, ao nível de 5% de significância (TABELA 8). A média do DAP das parcelas tende a ser numericamente subestimada pelo aplicativo da Katam em relação ao método tradicional.

Para a comparação entre a variável de altura estimada pelo aplicativo e a da amostragem tradicional, observou-se diferença estatística para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, ao nível de 5% de significância, sendo necessário utilizar um teste não paramétrico para comparação das médias. Com isso, o método da Katam subestimou os valores das alturas, quando comparados com os dados ajustados para a amostragem tradicional.

Dentre todas as variáveis analisadas, a altura (H) foi a única que rejeitou a hipótese de normalidade dos dados, ao nível de 5% de significância, quando estimada pelo próprio aplicativo Katam^{TM} Forest. Posteriores transformações logarítmicas não possibilitaram o atendimento dessa condicionante. Quando analisada a segunda altura da Katam estimadas pela equação hispométrica ajustada, os dados

apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e houve homogeneidade na amostra, ao nível de 5% de significância (TABELA 9).

TABELA 9 – Resultados das diferenças estatísticas das médias de altura e volume das amostras entre amostragem tradicional e Katam com altura estimada pelo modelo de relação altura-diâmetro ajustado (Katam 2).

Variável	**Shapiro-wilk** W	**Bartlett** χ^2	**T** **(p-valor)**	W **(p-valor)**
H (m)	0,4167^{ns}	0,4266^{ns}	0,04462*	-
V.ha^{-1} (m^3.ha^{-1})	0,962^{ns}	0,1315^{ns}	0,5790^{ns}	-

LEGENDA: V = volume médio das árvores; H = altura média das árvores; **ns** = teste não significativo; ***** = teste significativo a 5%; ****** = teste significativo a 1%.

Com essa variação entre os métodos de estimação das alturas, é de se esperar que haja diferença estatística para a variável do volume.

Com a entrada da altura média obtida pela equação hipsométrica, o cenário foi diferente para a Altura, com a presença de normalidade e homogeneidade. Assim, o teste de t resultou em p-valor de 0,0446, apresentando diferença significativa ao nível de 5%.

O volume é o resultado das variáveis de DAP e Altura, em que sua média pela amostragem tradicional foi de 343,07 m^3.ha^{-1}, enquanto para a metodologia da Katam 1, sem a inclusão da altura média obtida pela equação ajustada, foi de 301,65 m^3.ha^{-1} (TABELA 8). Foi observado uma diferença estatística ao nível de significância de 5% onde o valor de $p-valor$ foi 0,0013. Quando analisado o volume estimado pelo aplicativo com a entrada da altura média estimada, a média do volume foi de 349,37 m^3.ha^{-1}. Nesse caso, não foram observadas diferenças estatísticas ao nível de 5% de significância, com o $p-valor$ igual a 0,5790.

Para a área basal, não houve diferença estatística entre a metodologia da Katam (utilizando a profundidade fixa) para a metodologia de amostragem tradicional. O $p-valor$ foi de 0,0501, sendo esperado que não houvesse diferenças, uma vez que a variável de entrada para a área basal por hectare é o DAP. Apesar da variação da densidade de árvores também influenciar as duas metodologias são estatisticamente iguais.

Por fim, a densidade de árvores foi a última variável analisada, onde o $p-valor$ foi de 0,1931, comprovando que não houve diferenças estatísticas entre as duas

metodologias. A densidade média encontrada pela metodologia da Katam foi de 1.201 árvores por hectare, enquanto para a amostragem, foi de 1,246 árvores por hectare.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da metodologia da katam é uma alternativa na realização de inventários para coletar informações dendrométricas, utilizando ferramentas comuns ao nosso dia a dia, como *smartphones*, onde os dados ficam armazenados digitalmente, conferindo provas reais e visuais do povoamento.

Através das análises estatísticas observadas neste estudo pode-se verificar que a utilização da metodologia da Katam se mostrou eficiente para as variáveis Diâmetro a 1,3m do solo, Densidade e Área Basal no povoamento de *Pinus taeda*, onde não fora observado diferenças significativa comparativamente à tradicional amostragem aleatória simples, ao nível de 5%, das unidades amostrais. Já para as variáveis média das alturas totais e volume total das unidades amostrais, fora observado diferença estatística entre os métodos, ao nível de 5% de significância, devido a subestimação dos valores de altura pela metodologia Katam. Porém, com o uso da equação hipsométrica ajustada ao povoamento florestal, a altura estimada por meio dos diâmetros coletados pela metodologia Katam apresentou ausência de diferença estatística ao nível de 1% de significância, com o volume também não apresentando diferenças estatísticas.

Sendo assim, essa metodologia se torna um método atrativo de coleta de informações do povoamento, sendo uma alternativa tecnológica na área e inventários florestais e possui grande espaço para novos estudos.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análises mais profundas da variável de altura, utilizando dos dados de altura média coletados através do processamento do TreeMap do aplicativo Katam^{TM} Forest e por hipsômetros.

REFERÊNCIAS

ATANAZIO, K. A. *et al.* Comparação de modelos para relação hispométrica em florestas de *Pinus taeda* L. no munícipio de Enéas Marques, Paraná. **Scientia Agraria Paranaensis,** v. 16, n. 4, p. 535–541, 2017. Disponível em: https://e-revista.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/download/15336/12157/67765&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br. Acesso em: 20 jul. 2022.

ARAÚJO, E. J. G. *et al.* Relações dendrométricas em fragmentos de povoamentos de pinus em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 72, p. 355–366, 2012. Disponível em: https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/425. Acesso em: 22 jul. 2022.

AZEVEDO, T. L. *et al.* Equações hipsométricas e volumétricas para um povoamento de *Eucalyptus* sp*.* localizado na FLONA do Ibura, 426 Sergipe. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 1, p. 105–112, 2011. Disponível em: https://www.redalyc.org/pdf/1190/119018527016.pdf. Acesso em: 30 jul. 2022.

BARROS, D. A. *et al.* Comportamento de 429 modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantações de *Pinus oocarpa* em diferentes 430 tratamentos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 45. p. 3–28, 2002. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/33608/1/pag3-28.pdf. Acesso em: 30 jul. 2022.

Bartlett's Test. **National Institute of Standards and Technology,** 2022. Disponível em: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda357.htm. Acesso em: 08 aug. 2022.

BDiA – BANCO DE DADOS DE INFORMAÇÕES AMBIENTAIS. **Pedologia from Mallet/PR: banco de dados**. IBGE, 2021. Disponível em: https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia. Acesso em: 05 ago. 2022.

BELSEY, D. A., KUH, E.; WELSCH, R. E.; **Regression diagnostics: identifying influential data and sources of collinearity.** New York: Wiley, 2004.

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. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2017.1300608. Acesso em: 07 jul. 2022.

BREINDDENBACH, J. *et al.* Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 4, p. 911–924, 2010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425709003599. Acesso em: 24 jul. 2022.

CORTE, A. P. D. *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. 105815, 2020b. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344750565_Forest_inventory_with_high-density_UAV-Lidar_Machine_learning_approaches_for_predicting_individual_tree_attributes. Acesso em: 03 jun. 2022.

CORTE, A. P. D. *et al.* Measuring individual tree diameter and height using gator eye high-density UAV-Lidar in an integrated crop-livestock-forest system**. Remote Sensing**, v. 12, n. 5, p. 863, 2020a. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/12/5/863. Acesso em: 03 jun. 2022.

DICK, A. R.; KERSHAW Jr., J. A.; MACLEAN, D. A. Spatial tree mapping using photography. **Northern Journal of Applied Forestry**, v. 27, p. 68–74, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228890424_Spatial_Tree_Mapping_Using_Photography. Acesso em: 03 ago. 2022.

SILVA, J. N. M.; *et al.* **Ferramenta para o cálculo de volumes de Smalian 2.0: manual do usuário.** Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2008.

GLEASON, C. J.; JUNGHO, L. M. Forest biomass estimation from airborne LiDAR data using machine learning approaches. **Remote Sensing of Environment**, v. 125, p. 80–91, 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712002787. Acesso em: 24 jul. 2022.

GOODBODY, T.R. *et al.* Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: A review and case study. **The Forestry Chronicle,** v. 93, n. 1, p. 71–81, 2017. Disponível em: https://pubs.cif-ifc.org/doi/10.5558/tfc2017-012. Acesso em: 02 ago. 2022.

GRANSHAW, S. I.; Photogrammetric Terminology: Third Edition. **Photogrammetric Record**, v. 31, n. 154, p. 210–252, 2016.

HOLMGREN, J., PERSSON, Å., S¨ODERMAN, U. Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi-spectral images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 1537–1552, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/248978089_Species_identification_of_individual_trees_by_combining_high_resolution_LiDAR_data_with_multi-spectral_images. Acesso em: 24 jul. 2022.

HOSOKAWA, R.T.; SOUZA, A.L. Amostragem para fins de manejo. **Curso de Manejo Florestal.** Brasília, v. 5, p. 25, 1987.

HOSOKAWA, R. T.; MOURA, J. B.; CUNHA, U. S**. Introdução ao manejo e economia de florestas**. Curitiba: UFPR, 2008. 164 p.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBA 2021**. São Paulo, 2021. Disponível em: https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf. Acesso em: 20 jun. 2022.

IMAÑA ENCINAS, J.; SILVA, G. F.; TICCHETTI, I. **Variáveis dendrométricas**. Brasília: Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, 2002. 102 p. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/15808. Acesso em: 20 jul. 2022.

JESUS, C. M. *et al.* Modelagem hipsométrica em povoamento clonal *de Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* no Distrito Federal. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 21, p. 1298–1308, 2015. Disponível em: http://www.conhecer.org.br/enciclop/2015b/agrarias/modelagem%20hipsometrica.pdf. Acesso em: 03 ago. 2022.

KORPELA, I. *et al.* Appraisal of seedling stand vegetation with airborne imagery and discrete-return LiDAR – an exploratory analysis. **Silva Fennica**, v. 42, n. 5, p. 753–772, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274306825_Appraisal_of_Seedling_Stand_Vegetation_with_Airborne_Imagery_and_Discrete-Return_LiDAR_-_an_Exploratory_Analysis. Acesso em: 24 jul. 2022.

KORPELA, I. Geometrically accurate time series of archived aerial images and airborne LiDAR data in a forest environment. **Silva Fennica**, V. 40, n. 1, p. 109–126, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/266874997_Geometrically_Accurate_Time_Series_of_Archived_Aerial_Images_and_Airborne_Lidar_Data_in_a_Forest_Environment. Acesso em: 24 jul. 2022.

LEITE, H. G., ANDRADE, V. C. L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, p. 321–328, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/y9BwSZshfCh9zBXpg3ZMYmd/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 20 jul. 2022.

LEITE, R. V. *et al.* Individual Tree Attribute Estimation and Uniformity Assessment in Fast-Growing *Eucalyptus spp*. Forest Plantations Using Lidar and Linear Mixed-Eects Models. **Remote Sensing,** v. 12, p. 3599, 2020. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/12/21/3599. Acesso em: 27 jul. 2022.

LIANG, X. *et al.* Forest *in situ* observations using unnamed aerial veihicle as an alternative of terrestrial measurements. **Forest Ecosystems,** v. 6, n. 20, p. Páginas, 2019. Disponível em: https://forestecosyst.springeropen.com/articles/10.1186/s40663-019-0173-3. Acesso em: 03 ago. 2022.

MACHADO, S. A. *et al.* Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifólia* no capão da Engenharia Florestal da UFPR. **Pesquisa Florestal**

Brasileira, Colombo, n. 56. p. 5–16, 2008. Disponível em: https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/58. Acesso em: 30 jul. 2022.

MINITAB**. Interpretar todas as estatísticas para regressão dos melhores subconjuntos**. 2022. Disponível em: https://support.minitab.com/pt-br/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/best-subsets-regression/interpret-the-results/all-statistics/#r-sq. Acesso em: 08 aug. 2022.

MOURA, M. M. *et al.* Towards amazon forest restoration: automatic detection of Species from UAV Imagery. **Remote Sensing**, v. 13, p. 2627, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/13/13/2627. Acesso em 27 jul. 2022.

MIOT, H. A. Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e experimentais. **Jornal Vascular Brasileiro**, v. 16, n. 2, p. 88–91, 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/j/jvb/a/FPW5hwZ6DTH4gvj5mJYpt6B/?lang=pt. Acesso em: 09 ago. 2022.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to linear regression analysis**. John Wiley & Sons, 2012.

PELISSARI, A. L.; LANSSANOVA, L. R.; DRESCHER, R. Modelos volumétricos para *Pinus* tropicais, em povoamento homogêneo, no estado de Rondônia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 67, p. 173–181, 2011. Disponível em: https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/270. Acesso em: 31 jul. 2022.

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

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. Disponível em: https://www.r-project.org/about.html. Acesso em: 31 jul. 2022.

RStudio Team. (2022). RStudio: Integrated Development for *R. RStudio*, Inc., Boston, MA. Disponível em: https://www.rstudio.com/. Acesso em: 31 jul. 2022.

RUZA, M. S. *et al*. Inventário de sobrevivência de povoamento de *Eucalyptus* com uso de redes neurais artificiais em fotografias obtidas por VANTs. **Advances in Forestry Sciense**, v. 4, n. 1, p. 83–88, 2017. Disponível em: https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/4169. Acesso em: 03 ago. 2022.

SANQUETTA, C. R*. et al.* **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3. ed. Curitiba: Multi-Graphic Gráfica e editora, 2014.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples), **Biometrika**, v. 52, p. 591–611, 1965. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/2333709. Acesso em: 09 ago. 2022.

SILVA, J. N. M. *et al.* **Ferramenta para cálculo de volumes de Smalian 2.0: manual do usuário.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2008. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/410131/1/Doc317.pdf. Acesso em: 30 jul. 2022.

SOUZA, A. S. **Modelagem da relação hispométrica para um povoamento híbrido de eucalipto, na Amazônia brasileira**. 2014. 44 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Pará, Altamira, 2014. Disponível em: https://sigaa.ufpa.br/sigaa/verProducao%3FidProducao%3D39429%26key%3D3e5c1eaf98645cc5ec57d7a706e69dd3&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br. Acesso em: 31 jul. 2022.

SRIVASTAVA, M. S.; HUI, T. K. On Assessing multivariate normality based on Shapiro-Wilk *W* statistic. **Statistics & Probability Letters**, v. 5, p. 15–18, 1987. Disponível em: https://ideas.repec.org/a/eee/stapro/v5y1987i1p15-18.html. Acesso em: 09 ago. 2022.

STEPKA, T. F. *et al.* Modelos volumétricos e funções de afilamento para *Pinus taeda* L. na região dos Campos Gerais, Paraná, Brasil. **Revista Espacios**, v. 38, n. 21, p. 26, 2017. Disponível em: https://www.revistaespacios.com/a17v38n21/a17v38n21p26.pdf. Acesso em: 31 jul. 2022.

TÄLL, K. **Accuracy of mobile forest inventory application Katam Forest –** Evaluation of accuracy in different forest types and comparison to conventional inventory methods. 2020. 55 f. Master thesis in Forest Science. Swedish University of Agricultural Sciences. Alnarp, 2020. Disponível em: https://stud.epsilon.slu.se/15936/7/tall_k_200824.pdf. Acesso em: 09 jun. 2022.

THOMAS, C. *et al.* Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 319–327, 2006. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/1911. Acesso em: 31 jul. 2022.

THRUN, S. Simultaneous localization and mapping. **Robotics and cognitive approaches to spatial mapping**, vol. 38, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 13–41, 2007.

TOMPPO, E. T.; *et al*. **National Forest Inventories: Pathways for Common Reporting**. Springer Netherlands, 2010.

VAUHKONEN, J. *et al.* Imputation of single-tree attributes using airborne laser scanning-based height, intensity, and alpha shape metrics. **Remote Sensing of Environment,** v. 114, n. 6, p. 1263–1276, 2010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425710000386. Acesso em: 24 de jul. 2022.

VILLIKKA, M. *et al.* Alternatives for Predicting Tree-Level Stem Volume of Norway Spruce Using Airborne Laser Scanner Data. **The Photogrammetric Journal of Finland**, v. 20, n. 2, p. 33-42, 2007.

XIAO, C.; QIN, .R.; HUANG, X. Treetop detection using convolutional neural networks trained through automatically generated pseudo labels. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, 3010–3030, 2019.

WALLACE, L. *et al.* Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. **Remote Sensing,** v. 4, p. 1519–1543, 2012. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/4/6/1519. Acesso em: 02 ago. 2022.

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 Geosciense and Remote Sensing,** v. 52, n. 11, p. 7160–7169, 2014b. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/6782747. Acesso em: 22 jul. 2022.

WALLACE, L. *et al*. Evaluating tree detection and segmentation routines on very high-resolution UAV LiDAR data. **IEEE Transactions on Geosciense and Remote Sensing,** v. 52, n. 12, p. 7619–7628, 2014a. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/6805152. Acesso em: 22 jul. 2022.

WERNER, M. S. **Estimativas para inventário florestal em plantios florestais: uma abordagem comparativa entre a aplicação das tecnologias Katam^{TM} e o inventário tradicional.** 2022. 62 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

WHITE, J. C. *et al.* Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: a review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 5, p. 619–641, 2016. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07038992.2016.1207484?scroll=top&needAccess=true. Acesso em: 03 ago. 2022.

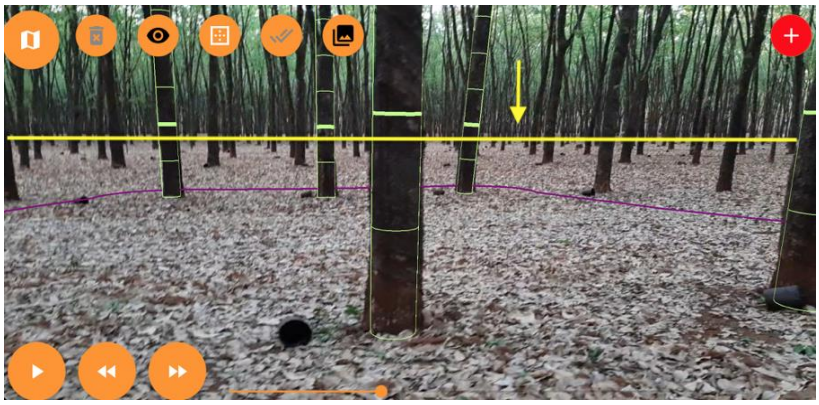
WU, J. *et al*. Quantized convolutional neural networks for mobile devices. **IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, v. 3, p. 4820–4828, 2016. Disponível em: https://arxiv.org/abs/1512.06473. Acesso em: 28 jul. 2022.

ANEXO 1 – RECOMENDAÇÕES DE GRAVAÇÃO

Sinal do GPS: verificar se está funcionando corretamente ao abrir a câmera dentro do aplicativo, um aviso será mostrado na parte inferior da tela para indicar essa funcionalidade. Caso o GPS não esteja conectado, o georreferenciamento das árvores será perdido.

Enquadramento: posicionar a base da árvore na parte inferior da tela, deixando a linha do horizonte no terço superior da tela, mantendo o solo sempre visível para que seja possível realizar a identificação e mensuração das árvores. Esse enquadramento auxilia na obtenção de dados mais precisos.

Figura 1 - Captura de tela mostrando a linha do horizonte



Fonte: KATAM (2022)

Posicionamento: para que as árvores sejam mensuradas, é necessário que a base das árvores da primeira linha esteja visível no vídeo. Para isso, estima-se que a distância ideal entre a árvore e o operador seja de 1,5 - 2 m. Sugere-se essa distância pois fora desta margem, erros podem ser observados.

Scanner na primeira e última árvore: para que as árvores sejam identificadas e mensuradas, é necessário que se tenha vários ângulos de cada árvore em cada gravação. Para isso, recomenda-se andar contornando a primeira e a última árvore de cada gravação, garantindo que sejam mensuradas. Esse detalhe quando ignorado pode subestimar a quantidade de árvores do talhão.

Ritmo de gravação: lento, em um ritmo leve de caminhada, para que o vídeo tenha uma melhor estabilidade. Caso a intenção seja a medição de duas linhas, indica-se uma maior atenção no ritmo da gravação.

Tempo de gravação: é indicado que o tempo seja de 60 - 90 segundos. Desta forma, o processamento dos vídeos, para possíveis checagens, pode ser realizado rapidamente em campo.

Sombra e Luz: gravar preferencialmente a favor do sol. Medições contra o sol podem até ser realizadas, mas a precisão poderá ser comprometida.

Profundidade Dinâmica ou Fixa: a profundidade quando ajustada no modo "dinâmico" faz com que o aplicativo capture árvores até onde a câmera conseguir, podendo alcançar a segunda linha de plantio ou não. Caso a intenção seja capturar apenas a primeira linha, recomenda-se ajustar nas configurações a profundidade para "fixa".

1. **Dicas extras**

- **Evitar movimentos bruscos e/ou quedas:** a gravação neste caso seria perdida pois o vídeo perde referência de localização.
- **Esperar bom sinal de GPS, conforme avisos na tela do app:** para obter o bom georreferenciamento das árvores.
- **Evitar obstruir completamente a câmera no meio da gravação:** a gravação neste caso seria perdida pois o vídeo perde referência de localização.
- **Usar um aparelho celular recomendado pela Katam evita** falhas e imprecisões nas medições.
- **Ir a campo com a bateria do celular 100% carregada:** como o app e os processamentos exigem da capacidade do celular, indica-se ir a campo com 100% da bateria. Para a realização de medições longas em campo, a compra de power banks poderá acelerar ainda mais o inventário. Recomenda-se não processar todas as gravações em campo, para poupar bateria e memória do celular. O processamento de algumas das gravações feitas em cada tarefa é recomendado para avaliar a qualidade e desempenho das medições, promovendo feedback imediato.

- **Gerenciar a memória do celular:** sugere-se que as gravações sejam apagadas do app, assim que os dados forem descarregados no computador e validados, assim, a memória do celular é poupada para novas gravações.
- **Realizar marcação da árvore de início e fim de cada gravação:** caso haja algum problema, sugere-se realizar esta marcação para que a identificação do trecho comprometido seja facilitada, assim é possível refazê-lo rapidamente.

ANEXO 2 – RELATÓRIO DO TALHÃO VERA CRUZ

KATAM

RELATÓRIO DO TALHÃO

Propriedade Florestal:	Vera Cruz	**Data do relatório:**	7 de jul de 2022
Talhão:	Sem Desbaste	**Período de mensuração:**	3 de jun de 2022 - 3 de jun de 2022
Tamanho do talhão:	12,1 ha		
Número de mensurações:	22		
Área mensurada:	6 %		
Localização:	WGS84: -25.794868055098046 -50.825621248431375		

Área basal:	36,4 m²/ha	**Volume total:**	3608 m³sk
Altura média (Ha):	16,4 m	**Volume médio:**	298 m³sk/ha
Diâmetro médio (da):	20 cm	**Densidade do talhão:**	1161 Árvores/ha
Distribuição de espécies:	Não especificado 100 %		

Mapa de satélite:

Gerado por KATAM™ Forest
Katam Technologies AB
katam.se

Vera Cruz_Sem Desbaste_7 de jul de 2022
Samsumg S20 V

ANEXO 3 – RELATÓRIO KATAM PARA DIAMETRO E DENSIDADE E ALTURA

Basic Report - 2022-08-17

KATAM

Vera Cruz

Coordinates	Area	Species
-25.7985, -50.8253	12.0 ha	Pinus

	Ground	Air
Tree height	No data	17 m
Tree density	1164 #/ha	909 #/ha
Tree diameter (dg)	20.0 cm	No data

Avg. tree volume	**0.2472 m³**
Forest volume	**224 m³/ha**
Stand volume	**2702 m³**

Tree height

Data from air

Tree density

Data from air

Tree diameter

Data from ground

Da: 19.7 Dgv: 21.0 Diameter sample: 881 trees