

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

ESTEFANY VAZ BRISSON

ESTIMAÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA DE ÁRVORES DE  
*Khaya ivoresensis* A. Chev. POR MEIO DO PERSONAL LASER  
SCANNING (PLS) COM SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND  
MAPPING (SLAM)

JERÔNIMO MONTEIRO  
ESPÍRITO SANTO

2023

ESTEFANY VAZ BRISSON

ESTIMAÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA DE ÁRVORES DE  
*Khaya ivoresensis* A. Chev. POR MEIO DO PERSONAL LASER  
SCANNING (PLS) COM SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND  
MAPPING (SLAM)

Monografia apresentada ao  
Departamento de Ciências  
Florestais e da Madeira da  
Universidade Federal do Espírito  
Santo, como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro  
Florestal.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2023

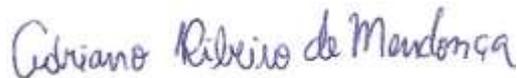
ESTEFANY VAZ BRISSON

ESTIMAÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA DE ÁRVORES DE *Khaya  
ivorensis* A. Chev. POR MEIO DO PERSONAL LASER SCANNING (PLS)  
COM SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING (SLAM)

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira  
da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Aprovado em 14 de julho de 2023

COMISSÃO EXAMINADORA



---

Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça

DCFM/CCAЕ/UFES

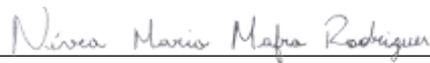
Orientador



---

Prof. Dr. André Quintão de Almeida

DEAGRI/CCAA/UFES



---

MSc. Nívea Maria Mafra Rodrigues

DCFM/CCAЕ/UFES

## RESUMO

No setor florestal, o conhecimento da produção das florestas é obtido por meio do inventário florestal, que são ferramentas essenciais para o levantamento de informações qualitativas e quantitativas, sendo importante para qualquer planejamento estratégico sob os recursos naturais. Entretanto, as técnicas de amostragem tradicionalmente aplicadas nos inventários florestais, possuem uma elevada demanda de tempo, são atividades onerosas além do alto custo de execução. Diante disso, a utilização de equipamentos do sensoriamento remoto vem crescendo no cenário florestal, por permitir a aquisição de dados em grandes áreas de forma rápida e custo reduzido. Os equipamentos de varredura laser terrestre (*Terrestrial Laser Scanner* - TLS) utilizam a tecnologia *Light Detection and Ranging* – (LiDAR), que gera modelos tridimensionais a partir do escaneamento da superfície de objetos. Assim neste estudo objetivou-se verificar a acurácia de sensores laser por meio do Personal Laser Scanning (PLS) com Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), na estimativa diâmetro na altura de 1,30m ( $D$ ) e na altura total de árvores de *Khaya ivorensis* A Chev. (mogno africano). O diâmetro foi coletado por meio de uma fita diamétrica e pelo PLS-SLAM. A estimativa via sensoriamento remoto foi realizada com a medida do  $D$  à altura de apenas 1,30 m, e, também medindo nas alturas de 1,20; 1,30 e 1,40 e obtendo-se assim o valor de  $D$  a partir da média aritmética destas três posições. A altura total, pelo método tradicional, foi obtida pelo uso dos hipsômetros Suunto e Vertex IV. A nuvem de pontos obtida pela varredura laser terrestre utilizada foi de 3000 pontos por m<sup>2</sup>. O processamento das nuvens foi realizado por meio da divisão da nuvem completa em nuvens de cada linha de plantio separadamente, totalizando em oito nuvens. Foram inventariados 72 indivíduos de origem seminal plantado em espaçamento 3x2m com 12 anos de idade. Por meio da análise da nuvem de pontos PLS-SLAM foram identificados todos os indivíduos de mogno africano. Em relação a variável diâmetro ( $D$ ), houve maior acurácia realizando a média de alturas próximas ao 1,30 m do solo (Estratégia 3). Para estimação da altura total das árvores ( $H$ ), a utilização da nuvem de pontos PLS-SLAM não obteve acurácia nas estimativas, tendo valores muito discrepantes dos hipsômetros analisados, subestimando valores maiores e superestimando valores menores.

Palavras-chave: Inventário Florestal; Sensoriamento remoto; PLS-SLAM; Estimativas dendrométricas.

# SUMÁRIO

RESUMO

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 O problema e sua importância .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2 Objetivo geral .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3 Objetivos específicos .....</b>	<b>10</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Inventário Florestal .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Personal Laser Scanning (PLS) com Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) .....</b>	<b>12</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Área de estudo .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Coleta de dados .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.1 Inventário florestal pelo método tradicional .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.2 Inventário utilizando o PLS-SLAM .....</b>	<b>19</b>
<b>3.3 Processamento de dados .....</b>	<b>20</b>
<b>3.4 Análise das estratégias de obtenção das variáveis dendrométricas .....</b>	<b>22</b>
<b>4 RESULTADO E DISCUSSÃO.....</b>	<b>24</b>
<b>4.1 Comparação dos métodos na medição do diâmetro D .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2 Comparação entre os métodos de medição de altura total .....</b>	<b>29</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>31</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da obtenção do diâmetro pelos métodos tradicional e escaneamento laser (PLS-SLAM).

Tabela 2 - Resultados da raiz do quadrado médio do erro (RMSE%), viés (V%) e a média das diferenças (MD%) encontrados pelo PLS-SLAM, utilizando diâmetro a 1,30m do solo e diâmetro médio para cada linha com base na nuvem de pontos de cada linha de plantio.

Tabela 3 - Resultados da raiz do quadrado médio do erro (RMSE%), viés (V%) e a média das diferenças (MD%) encontrados pelo PLS-SLAM, utilizando diâmetro a 1,30m do solo e diâmetro médio, sem as árvores discrepantes.

Tabela 4 - Resultados referentes à raiz das diferenças médias ao quadrado (RMDQ), viés (V) e média das diferenças absolutas (MD), encontrados por meio da comparação dos métodos estimados pelos hipsômetros Suunto e de Haga, com o obtido com o uso do TLS, para cada linha com base na nuvem de pontos separada por linhas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Área experimental do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em Jerônimo Monteiro – Espírito Santo.

Figura 2 - Representação da área experimental referente aos talhões presentes na área, sendo em vermelho o talhão de *Khaya ivorensis* utilizado no experimento e em verde suas 8 linhas de plantio.

Figura 3 - Fita diamétrica utilizada para medição do diâmetro a 1,30 do solo (D) em campo.

Figura 4 - Equipamentos Hipsômetro Vertex IV (A) e Hipsômetro portátil Suunto PM5 – 1520D (B) utilizados na obtenção das alturas (H) das árvores.

Figura 5 - Figura 5. Exemplificação dos pontos de medição em campo com os hipsômetros (A) Vertex IV; (B) Hipsômetro Suunto PM5 – 1520D.

Figura 6 - Equipamento laser scanner ZEB Horizon utilizado na obtenção das informações deste estudo.

Figura 7 - Trajetória do caminhão realizado no plantio de *Khaya ivorensis* A Chev.

Figura 8 - Etapas do processamento no software R Studio, sendo (A) normalização da nuvem; (B) identificação dos troncos; (C) Estimativas dos valores de D; (D) estimativas dos valores de H.

Figura 9 - Esquema explicativo das etapas seguidas para o processamento dos dados obtidos do escaneamento.

Figura 10 - Nuvem de pontos separadas por linhas referentes a parcela de estudo, em que A corresponde a linha 1, B linha 2, C linha 3, D linha 4, E linha 5, F linha 6, G linha 7 e H linha 8.

Figura 11 – Gráficos de D obtidos pela fita diamétrica versus aqueles obtidos com o uso do PLS-SLAM a 1,30 m do solo e de resíduos em função dos valores estimados pela nuvem de pontos PLS-SLAM a 1,30 m do solo das 72 árvores de mogno africano.

Figura 12 – . Gráficos de D obtidos pela fita diamétrica versus aqueles obtidos com o uso do PLS-SLAM a 1,30 m do solo e de resíduos em função dos valores estimados pela nuvem de pontos PLS-SLAM com diâmetro médio das 72 árvores de mogno africano.

Figura 13 – Nuvem de pontos obtida pelo software R representando o adensamento das linhas 1, 2 e 3 no plantio de *Khaya ivorensis* A Chev.

Figura 14 - Gráficos de H obtidos pelo Suunto versus aqueles obtidos com o uso do PLS-SLAM e de resíduos em função dos valores estimados pela nuvem de pontos PLS-SLAM das 72 árvores de mogno africano.

Figura 15 – Gráficos de H obtidos pelo Suunto versus aqueles obtidos com o uso do PLS-SLAM e de resíduos em função dos valores estimados pela nuvem de pontos PLS-SLAM das 72 árvores de mogno africano.

Figura 16 – Exemplificação de situações como tortuosidade e indivíduos quebrados, que dificultaram o reconhecimento e aferição das medidas precisas das árvores da parcela de estudo, em que 2 indivíduos nessa situação correspondem a linha 1; 2 indivíduos na linha 2; 2 indivíduos na linha 8 e 1 indivíduo na linha 7.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 O problema e sua importância

O Brasil tinha uma média de vendas anual de 175 mil m<sup>3</sup> de mogno brasileiro até sua proibição de extração para evitar riscos de extinção, iniciando os plantios de mogno africano (CANAL RURAL, 2018). A *Khaya ivorensis* A. Chev. foi introduzido no Brasil durante a década de 70. No entanto, os plantios experimentais foram iniciados pela Embrapa nas décadas de 80 e 90 em várias regiões do país, com destaque para o estado de Minas Gerais, onde houve uma concentração significativa de plantações dessa espécie (IBF, 2023). O gênero *Khaya* nativo da África, pertence à família Meliaceae (IUCN, 2018), com madeira de alta qualidade, se destacando no mercado internacional de madeiras nobres (EMBRAPA, 2019).

O alto valor comercial agregado da madeira da espécie, conhecida popularmente como mogno africano, justifica o interesse pelo cultivo destas no Brasil. A *Khaya ivorensis* A. Chev. é uma das espécies de mogno africano mais utilizada. Ela se caracteriza por possuir um fuste retilíneo, crescimento rápido e alta resistência ao *Hypsiphyla grandella*, o que causa a broca do ponteiro. Os plantios são recentes no país, sendo necessário o desenvolvimento de estudos que possam colaborar com o estabelecimento destes (RASCÃO, 2019).

Diante dessa importância econômica da espécie, é necessário a implementação de levantamentos da produção florestal. A obtenção das variáveis relacionadas ao crescimento e produção de espécies florestal é realizada por meio dos inventários florestais. Nesses inventários são mensuradas variáveis dendrométricas para gerar estimativas como o volume individual ou populacional de um povoamento, biomassa e estoque de carbono (WHITE et al., 2016). As variáveis dendrométricas básicas obtidas nos inventários são o diâmetro a 1,30 metros do solo (*D*) e altura total (*H*) das árvores. Com estimativas acuradas da produção é possível o planejamento e a análise de cenários para decisões como implantação, colheita e condução do manejo florestal (ASSIS et al., 2009). Entretanto, a obtenção de dados de inventário no campo é uma atividade onerosa e demorada.

Diante disso, novas tecnologias vêm sendo empregadas para se estimar a produção florestal com base fundamentalmente em processamento de imagens multiespectrais, obtidas de satélites, e nuvem de pontos obtidas por aeronaves remotamente pilotadas ou por escaneamento *laser* (sensores LiDAR). O Light Detection and Ranging (LiDAR) é uma tecnologia acurada para obter informações para levantamento de dados florestais. Pode ser utilizada sob plataformas aéreas ou terrestres para registrar, construir e transformar nuvem de pontos em modelos tridimensionais da floresta real (CHAVES, 2016). Atualmente, tem-se aumentado os estudos (LIU et al., 2018; MOKROŠ et al.,

2018; PIERMATTEI et al., 2019) utilizando a varredura *laser* terrestre por ser o mais preciso método de medição de diâmetro a 1,30 m do solo e altura total em inventários florestais, apresentando ótimos resultados (IGLHAUT et al., 2019). Entretanto o *Personal Laser Scanner* (PLS) que utiliza a tecnologia LiDAR necessita de uma boa cobertura de *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e dentre as tecnologias terrestres, destaca-se o PLS com *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM).

O SLAM é um algoritmo que combina os dados do laser e do *Inertial Measurement Unit* (IMU) que mede taxas angulares, orientações e acelerações, para localizar o scanner em um ambiente desconhecido e registrar toda a nuvem de pontos (DEL-PERUGIA et al., 2019). Onde as informações podem ser calculadas em tempo real e a nuvem de pontos é gerada sem a necessidade de um sistema GNSS (QIAN et al., 2016).

Diante do exposto, estudos para testar a viabilidade do PLS-SLAM se justificam pela necessidade de se encontrar uma metodologia fácil de ser empregada no campo e com acurácia suficiente para ser utilizada em inventários florestais ao ser comparada com os métodos tradicionais. Além disso, analisar seu uso em *Khaya ivorensis* A. Chev. em acurácia das estimativas obtidas por este tipo de tecnologia.

## 1.2 Objetivo geral

Analisar o uso de PLS-SLAM, em termos de acurácia, para estimar o diâmetro à 1,3m do solo ( $D$ ) e altura total ( $H$ ) de árvores de mogno africano.

## 1.3 Objetivos específicos

- a) Medir altura total e diâmetro à 1,30 do solo de árvores de mogno africano pelo método de inventário tradicional (IFT) e pelo PLS-SLAM;
- b) Comparar a acurácia do uso do PLS-SLAM com as estimativas obtidas do IFT, para  $D$  e  $H$  das árvores de mogno africano.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Inventário florestal

O uso da madeira como recurso direto ou indireto na produção de bens é importante, o que justifica a necessidade de adotar procedimentos eficientes para quantificar e avaliar os povoamentos florestais. Dentre as técnicas utilizadas para quantificar a produção, destaca-se o inventário florestal (IF) (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2011). Sendo um método que utiliza

variáveis qualitativas e quantitativas para dimensionar os recursos florestais, além da coleta de outras informações sobre a área, que são essenciais para um manejo adequado (VIBRANS; GASPER; MÜLLER, 2012).

O IF é considerado como base para estabelecer o planejamento estratégico, tático e operacional, por gerar resultados sobre a quantificação de volume de madeira, avaliação de crescimento de florestas plantadas e exploração de florestas nativas, assim auxiliando em decisões sustentáveis e benéficas (CARDOSO et al., 2018). Existem vários tipos de IF, que são classificados quanto: (a) aos objetivos de sua aplicação; (b) a forma de coleta de dados, entre censo e amostragens; (c) à abordagem da população no tempo, entre temporários ou contínuo; e (d) quanto ao detalhamento dos resultados, podendo ser exploratório, reconhecimento ou detalhado (HENTZ, 2018).

O diâmetro a altura do peito ( $D$ ) é uma das variáveis de mais fácil obtenção em um inventário florestal, sendo obtido por meio da suta, fita métrica e diamétrica ou medidores óticos, a uma altura padrão de 1,30 m do nível do solo no Brasil (SILVA et al., 2012; BINOTI et al., 2013). A medição da altura das árvores é realizada por meio de hipsômetros baseados, principalmente, em princípios trigonométricos, que se baseiam em ângulos e distâncias (HENTZ, 2018). Além disso, a altura apresenta diferentes classificações, como: altura total, dada como a distância entre a base e o topo da árvore; altura comercial, definida a partir da parte do fuste sem deformação até o diâmetro comercial; altura do fuste, distância entre a base até o início da copa; e altura da copa, compreendida entre o início (base) da copa e o topo da árvore (VALERI; PAULA, 2018).

Existem diversos tipos de amostragem em inventário florestal, que são determinantes na precisão dos resultados, certo que a escolha da amostragem ideal vai de acordo com a situação e objetivo em campo encontrados, assim escolhendo o melhor método e equipamentos a serem utilizados (BRASIL FLORESTA, 2023). Os métodos de amostragem são: amostragem de área fixa, que consiste em uma área amostral permanente, onde a seleção dos indivíduos a serem amostrados se limita a área já estabelecida, sendo possível acompanhar o desenvolvimento da floresta por meio dessas áreas, como volume e distribuição diamétrica. E a amostragem de área variável, comumente utilizado em inventários rápidos de estoque ou de pré-corte, não sendo algo permanente e sim mais para saber o nível que se encontra o plantio ou floresta (MATA NATIVA, 2021).

Já em relação ao processo de amostragem no inventário florestal, se refere a abordagem populacional sobre o conjunto de amostras, podendo ser aleatória geralmente utilizando em florestas pequenas e homogêneas. Sistemática utilizada em florestas mais densas e extensas, justamente para conhecer a distribuição espacial das espécies ali encontradas. E a estratificada, utilizada em

florestas plantadas, aplicando a plantios de diferentes idades e manejos, pois divide a população em diferentes estratos ou classes (FLORIANO, 2021).

## **2.2 Personal Laser Scanning (PLS) com Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)**

A tecnologia *laser* vem sendo implementada desde os anos de 1960, em que os equipamentos eram utilizados na área meteorológica para os estudos da composição das nuvens, aerossóis, velocidade do vento e para dados batimétricos (GORGENS; SILVA, 2014). Já nas décadas de 1970 e 1980 surgiu a tecnologia de *Airborne Laser Profiling System*, um sistema de *laser* aéreo utilizado para levantamento de dados da superfície terrestre e oceanos (GIONGO et al., 2010). Na década de 1990 foi desenvolvida a tecnologia de *Terrestrial Laser Scanner* (TLS), um equipamento *Light Detection and Ranging* – (LiDAR) capaz de realizar varreduras *laser* junto com o georreferenciamento de GPS (RASCÃO, 2019).

Os equipamentos de varredura *laser* terrestre (*Terrestrial Laser Scanner* - TLS) utilizam a tecnologia *Light Detection and Ranging* – (LiDAR). Esse equipamento gera modelos tridimensionais a partir do escaneamento (MEGA; KUPLICH, 2019). O LiDAR funciona por meio da luz que é refletida pelo objeto ou superfície escaneada, onde o equipamento calcula a distância percorrida por meio do retorno do sinal refletido (EMBRAPA, 2017). As distâncias de diversos ângulos diferentes são obtidas e armazenadas em coordenadas (x, y, z), gerando assim a nuvem de pontos contendo detalhes com precisão dos contornos da região escaneada (FORLIDAR, 2023).

A partir de 2010 com o surgimento da tecnologia de *Mobile Laser Scanner* (MLS) foi possível transportar o equipamento LiDAR em veículos e realizar a varredura *laser* de forma móvel, deixando de ser um equipamento fixo, facilitando na questão da mobilidade do equipamento e aumentando a superfície de contato com *laser* nas áreas florestais (GOLLOB et al., 2021; GOLLOB et al., 2020; LIANG et al., 2014). A tecnologia de MLS foi aprimorada em 2013, sendo desenvolvida o *Personal Laser Scanner* (PLS), podendo ser transportada manualmente (BELAND et al., 2019; LIANG et al., 2016; RASCÃO, 2019).

As vantagens ao ser utilizada a tecnologia LiDAR no setor florestal é a alta densidade amostral, capacidade de penetração em espaços reduzidos, sensibilidade a pequenas variações na superfície e a geração de um grande volume de informações em um curto período de tempo (LIANG et al., 2016). As pesquisas com TLS e PLS já vêm sendo desenvolvidas para árvores individuais visando buscar maior precisão nas métricas obtidas (GOLLOB et al., 2021;

LIANG et al., 2016). A obtenção das métricas pode ocorrer por meio de modelagem computacional ao escanear a árvore individualmente, ou o escaneamento a nível de parcela e posteriormente realizar a segmentação das árvores de interesse dentro da nuvem de pontos (LIANG et al., 2016).

O PLS surgiu com a intenção de facilitar o uso em outras plataformas que utilizam o sensor LiDAR por ser um equipamento leve, portátil e altamente móvel. Podendo ser utilizado em áreas de difícil acesso, como encostas íngremes (GOLLOB et al., 2020). O PLS utiliza o algoritmo SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) e o IMU (*Inertial Measurement Unit*). O IMU é um dispositivo composto por acelerômetros e giroscópios responsáveis por medir a taxa angular, aceleração, orientação e outras formas gravitacionais (VECTORNAV, 2023). O algoritmo SLAM combina os dados do laser e do IMU para localizar o scanner em um ambiente desconhecido e registrar toda a nuvem de pontos (DEL-PERUGIA et al., 2019) ou seja, o SLAM não oferece o posicionamento e localização de objetos com base em satélites, mas mapeia a área enquanto o equipamento se localiza no ambiente (GEOSLAM, 2023), ele encontra seu caminho por conseguir identificar os marcadores e sinais presentes no ambiente, enquanto os pulsos laser calculam a distância entre o equipamento e os marcadores (FLYABILITY, 2022, ARAÚJO, 2018).

Dentre as variáveis dendrométricas amplamente pesquisadas para os diferentes tipos de LiDAR estão o  $D$  e a  $H$ , por serem variáveis de maior interesse no desenvolvimento de projetos na área florestal (ALMEIDA, 2017; BIENERT et al., 2006; FONSECA, 2018). Com relação a obtenção de  $D$  a nível de indivíduo por meio de LiDAR, pesquisas já vêm apresentando que é possível obter dados com exatidão (LICHTI et al., 2006). Contudo, problemas na obtenção de diâmetros vêm sendo apresentados ao trabalhar com árvores com multifustes, devido aos softwares e algoritmos não conseguirem diferenciar troncos e fustes das árvores, o que é encontrado em árvores de floresta nativa (VAN-LEEUEWEN; NIEUWENHUIS, 2010). Os problemas podem chegar a ser contornados por meio de mais varreduras ou aumento da densidade da nuvem de pontos, o que é viável até o limite de poder computacional suporta (HENTZ, 2018).

A obtenção da altura das árvores está apresentando resultados consistentes, tanto para árvores individuais como também a nível de parcela (ALMEIDA, 2017; MENGESHA et al., 2015). Contudo, a partir de certas alturas as métricas podem apresentar resultados menos precisos, isso devido a presença de ruídos e oclusões em maiores alturas, agregando assim erros (LIANG et al., 2016). Os ruídos podem ser causados por galhos, folhas, arbustos ou qualquer outro objeto que seja um obstáculo a trajetória do laser até a superfície desejada de interesse a medição (GARCÍA et al., 2015; LEEUEWEN, VAN; 21 NIEUWENHUIS, 2010). Nesse caso, pode aumentar o erro nas estimativas, com o aumento da área encoberta. Sendo assim, é necessário a

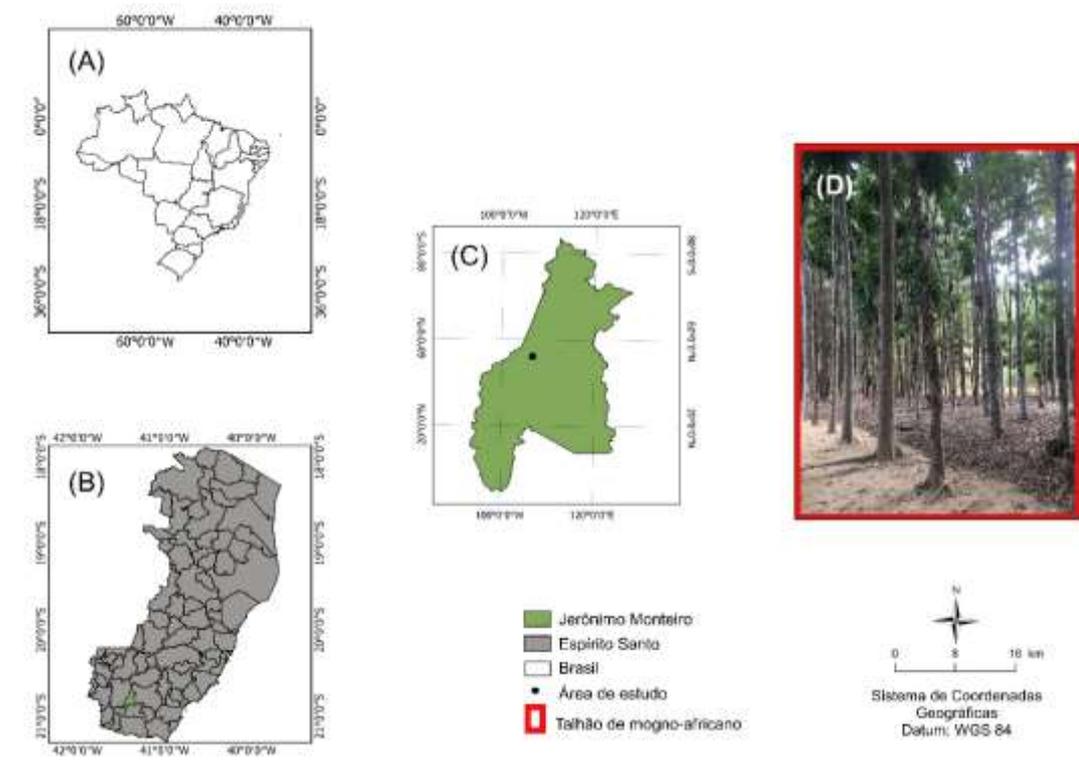
eliminação dos mesmos por meio da sua identificação e limpeza da nuvem de pontos brutos por meio de algoritmos (ALMEIDA, 2017).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em um povoamento florestal da área experimental pertencente à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), localizado no município de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo (Figura 1) sob as coordenadas de longitude 20°47'44.57" S e latitude 41°24'19.72". O clima é classificado de acordo com Köppen como "Cwa", ou seja, tropical quente úmido em que a temperatura média é de 23,1 °C e a precipitação média anual de 1.341 mm (SILVA et al., 2023).

Figura 1. Brasil (A); Estado do Espírito Santo (B); Município de Jerônimo Monteiro com marcador na região da área experimental da UFES; talhão de mogno-africano em estudo (D).



Fonte: Autora (2023).

A área experimental possui 16 talhões demonstrativos (Figura 2) de povoamentos de diversas espécies florestais plantadas a partir de 2010 em

espaçamento 3x2 metros, tais como, seringueira (*Hevea brasiliensis*), mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla* King), angico (*Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan), ipê (*Handroanthus* sp.), teca (*Tectona grandis* Linn. F.), cedro (*Cedrela fissilis* Vellozo), cedro-australiano (*Toona ciliata* M. Roem.), mogno africano (*Khaya ivorenses*.), sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess.), sucupira (*Pterodon emarginatus* Vogel.), Jequitibá rosa (*Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze), Pinus (*Pinus caribaea* Morelet), pau-brasil (*Paubrasilian echinata* Lam.), Pau-ferro (*Machaerium scleroxylon* Tul.), eucalipto clonal e eucalipto seminal.

Figura 2. Representação da área experimental referente aos talhões presentes na área, sendo em vermelho o talhão de *Khaya ivorenses* utilizado no experimento e em verde suas 8 linhas de plantio.



Fonte: Autora (2023).

Para este estudo, utilizou-se o talhão da espécie *Khaya ivorensis* seminal, contendo 72 indivíduos com idade de 12 anos.

### 3.2 Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada de duas formas, sendo a primeira pelo método tradicional (IFT) e a segunda utilizando um PLS-SLAM. Em ambas

coletaram dos indivíduos as medições dendrométricas: diâmetro a 1,3m do solo ( $D$ ) e altura total ( $H$ ).

### 3.2.1 Inventário pelo método tradicional

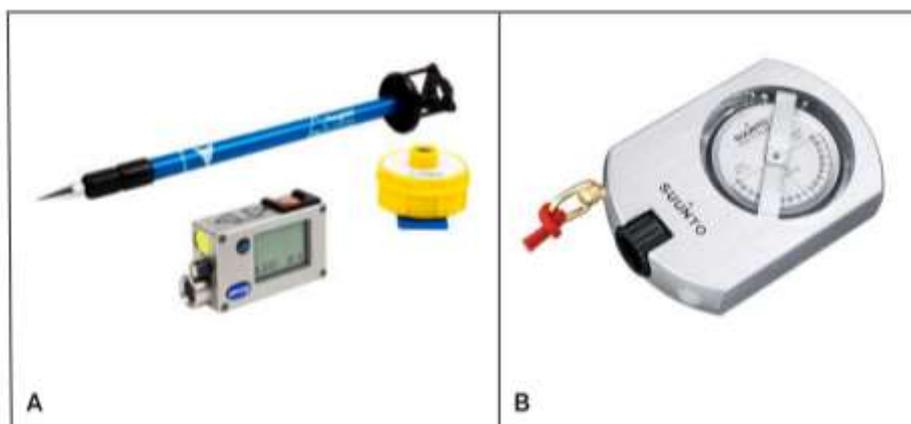
Foi realizado um censo do talhão de *Khaya ivorensis*. Para obtenção dos diâmetros a 1,30m do solo ( $D$ ) foi utilizada a fita diamétrica (Figura 3) e um gabarito contendo 1,30 metros. E para a medição das alturas totais ( $H$ ), foram utilizados dois equipamentos: o hipsômetro Suunto PM5 – 1520D e o hipsômetro Vertex IV (Figura 4).

Figura 3. Fita diamétrica utilizada para medição do diâmetro a 1,30 do solo ( $D$ ) em campo.



Fonte: Autora (2023).

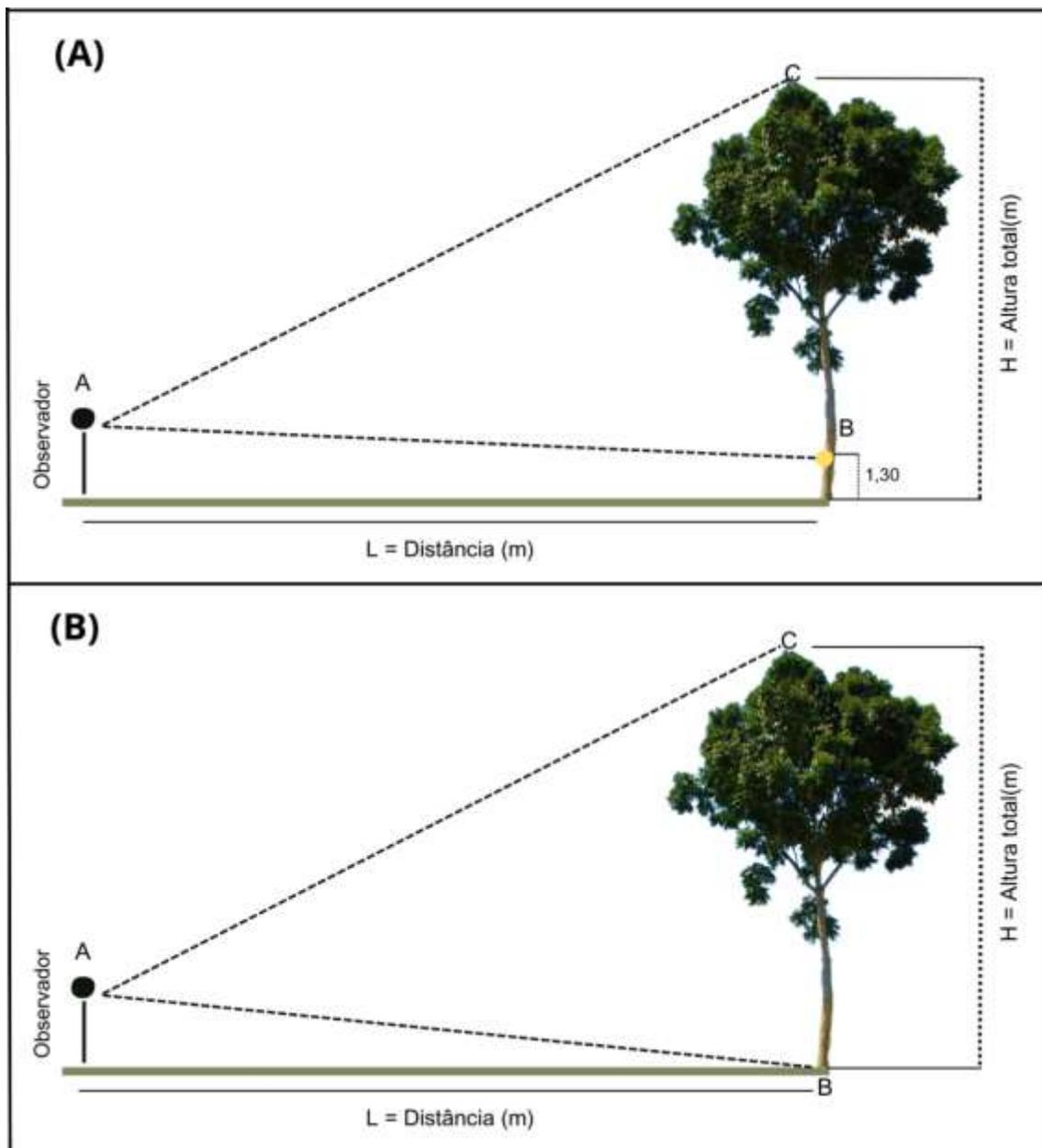
Figura 4 - Hipsômetro Vertex IV com o bastão e transponder (A) e Suunto PM5–1520D (B) utilizados na obtenção das alturas ( $H$ ) das árvores.



Fonte: Autora (2023).

Esses equipamentos possuem basicamente os mesmos princípios, sendo necessário conhecer a distância entre o observador e a árvore. Porém, no Vertex IV a primeira leitura é realizada no transponder que fica fixado a altura de 1,30 m na árvore a ser medida (ponto B da Figura 5A), enquanto com o hipsômetro Suunto a leitura é na base da árvore (ponto B da Figura 5B), sendo a segunda leitura no ponto mais alto, além de ser necessário considerar a topografia do terreno (SOARES; NETO; SOUZA, 2017).

Figura 5. Exemplificação dos pontos de medição em campo com os hipsômetros (A) Vertex IV; (B) Hipsômetro Suunto PM5 – 1520D.



Fonte: Autora (2023).

O ideal para comparação das alturas medidas pelo PLS-SLAM seria utilizar a medida de altura total de forma direta. Porém obter medidas de forma direta é uma tarefa onerosa e arriscada, devido à idade e porte das árvores. Com isso, optou-se por medir as alturas totais pela forma indireta, utilizando hipsômetros com base em princípios trigonométricos.

### 3.2.2 Inventário utilizando o PLS-SLAM

Foi realizado uma varredura com o PLS-SLAM no talhão de mogno africano utilizando o equipamento PLS-SLAM ZEB Horizon, modelo GS-510254 (Figura 6). Este equipamento é portátil com registro automático das varreduras, taxa de medição de 300 mil pontos por segundo, precisão de um a três centímetros e alcance de 100 metros (GEOSLAM, 2020).

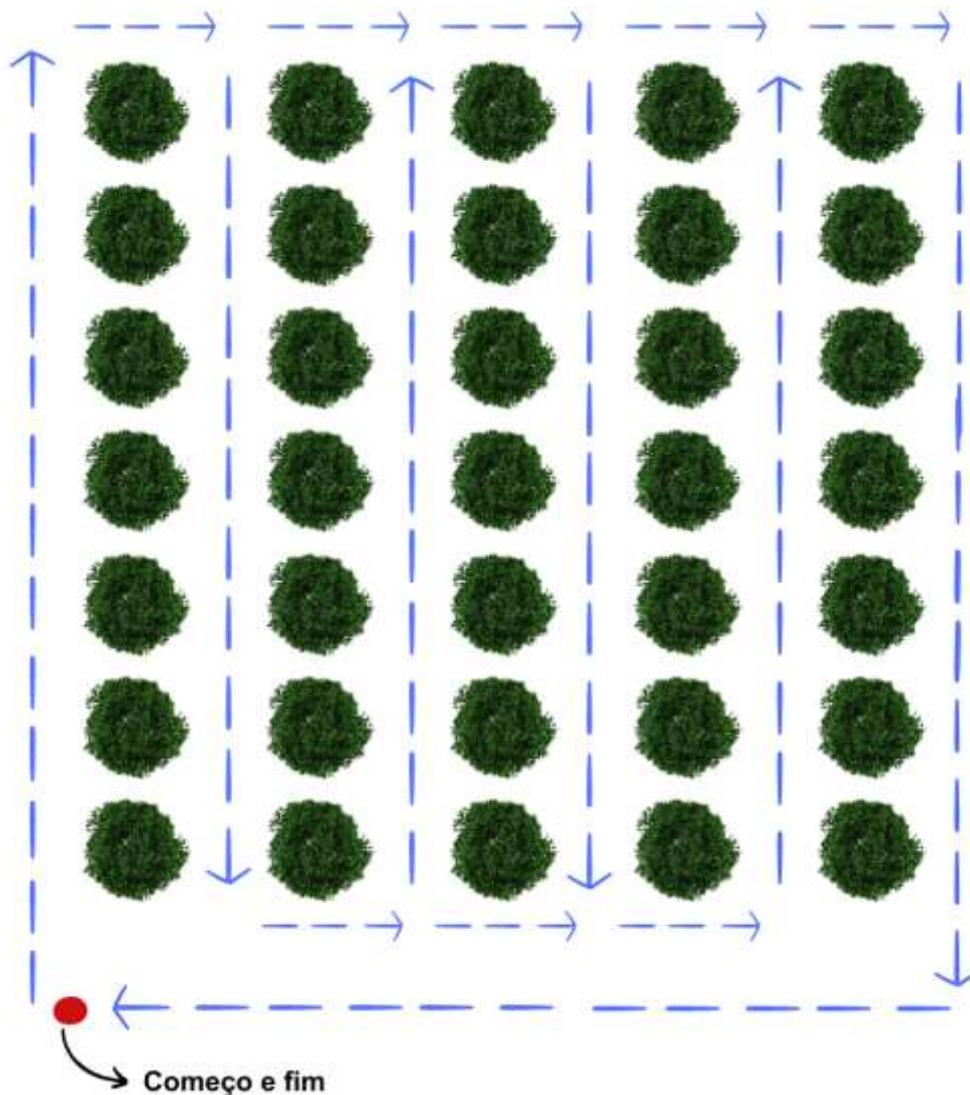
Figura 6 - Equipamento laser scanner ZEB Horizon utilizado na obtenção das informações deste estudo.



Fonte: Autora (2023).

O equipamento foi ligado em uma superfície plana (chão) e o caminhamento foi em “loop fechado”, ou seja, o escaneamento foi iniciado e finalizado no mesmo ponto (Figura 7).

Figura 7. Trajetória do caminhamento como o PLS-SLAM no plantio de *Khaya ivorensis* A Chev.



Fonte: Autora (2023).

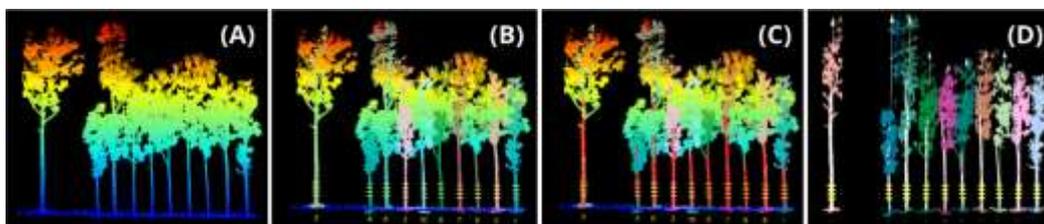
### 3.3 Processamento dos dados

Primeiramente, os dados foram transferidos a um computador e extraídos pelo software GeoSLAM Hub, gerando a nuvem de pontos referente toda a área caminhada, sendo exportada com 3000 pontos por m<sup>2</sup>. Posteriormente, foi realizado o pré-processamento da nuvem de pontos no software CloudCompare

versão 2.6.1. Primeiro se extraiu a nuvem correspondente ao talhão, contendo os 72 indivíduos de mogno-africano, por meio da nuvem de toda a área caminhada junto com a “limpeza” manual, para eliminar os pontos discrepantes em excesso, evitando que prejudiquem o processamento na identificação dos indivíduos arbóreos por meio do algoritmo. A partir desta nuvem de pontos, foi feita a segmentação em oito novas nuvens, correspondente as linhas do plantio, com o intuito de melhorar a visualização e identificação dos indivíduos, tornando o resultado mais preciso.

Em seguida, no software R, utilizou-se os pacotes TreeLS e lidR, que possui diversas funções para o processamento de nuvens de pontos 3D em áreas florestais, para adquirir as informações dendrométricas das oito nuvens de pontos de cada linha do plantio de forma automática. Inicialmente foi realizada a normalização da nuvem e reamostrada por um algoritmo de amostragem pontual, em uma grade sistemática de voxels, sendo seu comprimento de 0,02 m (Figura 8a). A posição e identificação dos troncos foi realizada pelo *Hough Transform*, com valor de densidade mínima de pontos igual a 0,1 (Figura 8b). Com os troncos identificados foi realizada a segmentação para obtenção das estimativas de  $D$  e  $H$  (Figura 8c e 8d).

Figura 8. Etapas do processamento no software R Studio, sendo (A) normalização da nuvem; (B) identificação dos troncos; (C) Estimativas dos valores de  $D$ ; (D) estimativas dos valores de  $H$ . Fonte: Autora (2023).

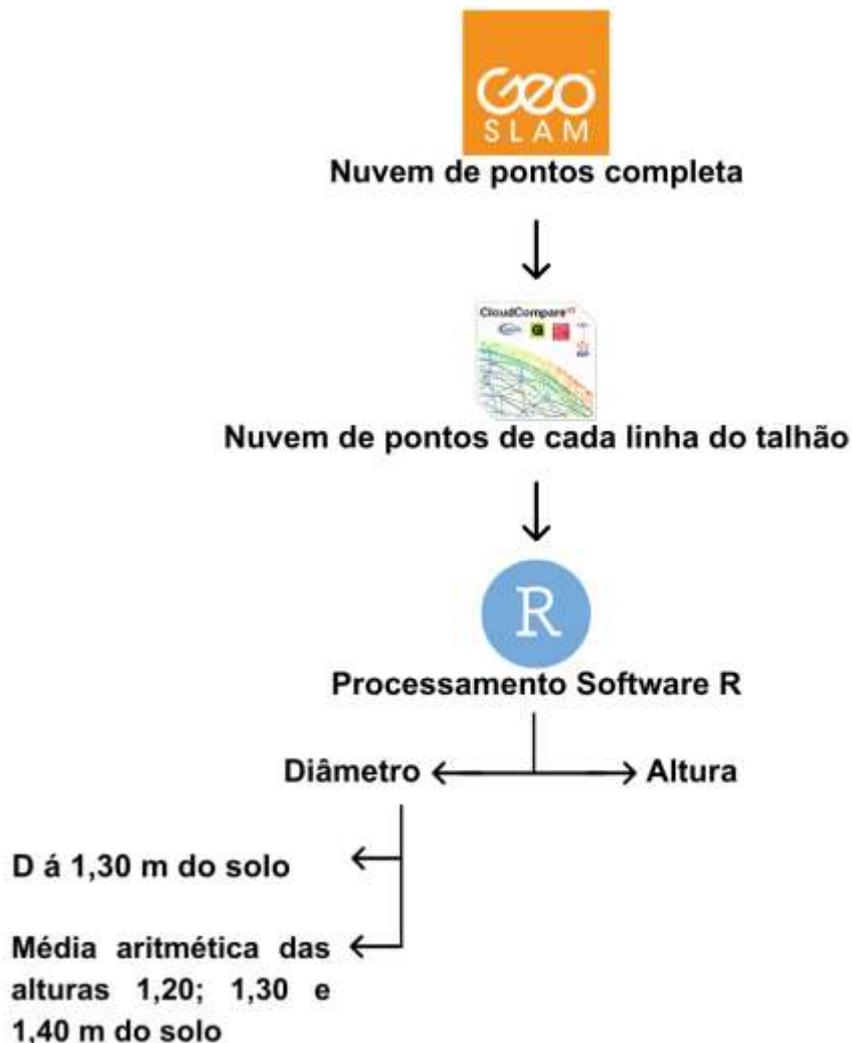


Após a segmentação dos indivíduos, foi realizada a classificação dos pontos (*stemPoints*), tendo o seguimento do tronco de forma circular (*circle*) com os valores de  $D$  e  $H$  ajustado pelo algoritmo *Ransac*, contendo o número de pontos selecionados em 20 ( $n$ ), nível de confiança de 0,95 ( $conf$ ), proporção entre os pedaços da nuvem de pontos dos segmentos do caule em 0,9 ( $inliers$ ), parâmetro ótimo em 10 ( $n\_best$ ) e ângulo, em graus que o círculo pode inclinar em relação ao eixo vertical ( $z\_dev$ ) de 40 graus.

Para a variável  $D$  foi realizado duas formas de processamento: (i) estimativas aferidas a uma altura de 1,30 m do nível do solo; (ii) aquisição das estimativas nas alturas de 1,20; 1,30 e 1,40 m do nível do solo, realizando uma média aritmética desses valores óbitos, considerado assim o valor de  $D$  estimado. Para  $H$  foi realizado o processamento com o algoritmo *Ransac* que estimou o valor da base do tronco detectado com o ponto mais alto do indivíduo.

Na figura 9 se encontra um esquema contendo todas as etapas que foram descritas anteriormente.

Figura 9. Esquema explicativo das etapas seguidas para o processamento dos dados obtidos do escaneamento.



Fonte: Autora (2023).

### 3.4 Análise das estratégias de obtenção das variáveis dendrométricas

Com o intuito de comparar as medidas obtidas pelo inventário tradicional e pelo PLS-SLAM considerando  $D$  e  $H$ , foram consideradas as seguintes estratégias:

- Diâmetro ( $D$ )

a) Estratégia 1:  $D$  medido pela fita;

b) Estratégia 2: D obtido pela nuvem de pontos PLS-SLAM na altura de 1,3m do solo.

c) Estratégia 3: D obtido pela nuvem de pontos PLS-SLAM considerando a média aritmética daqueles obtidos nas alturas de 1,2 m; 1,3 m e 1,4 m do solo.

- Altura total (D)

a) Estratégia 1: H medida pelo hipsômetro Suunto;

b) Estratégia 2: H medida pelo hipsômetro Vertex IV;

c) Estratégia 3: H obtida pela nuvem de pontos PLS-SLAM.

Assim, considerando as estratégias de medição, foram calculadas as estatísticas a seguir:

a) Variável D:

Considerando que a fita diamétrica é um método direto de obtenção de diâmetro, os valores obtidos por esse equipamento foram considerados os verdadeiros (Y) e os obtidos pelo PLS-SLAM os estimados ( $\hat{Y}$ ).

Raiz quadrada do erro médio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad RMSE(\%) = 100 \frac{RMSE}{Y} \quad (1)$$

Viés (V):

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{n} \quad V(\%) = \left(\frac{V}{Y}\right) * 100 \quad (2)$$

Média das diferenças (MD):

$$MD = \left(\frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n}\right) \quad MD(\%) = \left(\frac{MD}{Y}\right) * 100 \quad (3)$$

Em que: RMSE = Raiz do quadrado médio do erro (cm ou %); V = Viés (cm); MD = Média das diferenças (cm ou %); Y = Valor observado em campo (cm);  $\hat{Y}$  = valor estimado pelo PLS-SLAM (cm); n = tamanho da amostra.

b) Variável  $H$ :

No caso da altura, considerando que os hipsômetros Suunto e Vertex IV são do método indireto de obtenção de altura total, os valores obtidos por esses equipamentos foram considerados os verdadeiros ( $Y$ ) e os obtidos pelo PLS-SLAM os estimados ( $\hat{Y}$ ).

Raiz do quadrado médio das diferenças (RQMD):

$$RQMD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_h - H_{PLS})^2}{n}} \quad RQMD(\%) = 100 \frac{RMSE}{\bar{H}_h} \quad (4)$$

Viés ( $V$ ):

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n (H_h - \hat{H}_{PLS})}{n} \quad V(\%) = 100 \left( \frac{V}{\bar{H}_h} \right) \quad (5)$$

Média das diferenças (MD):

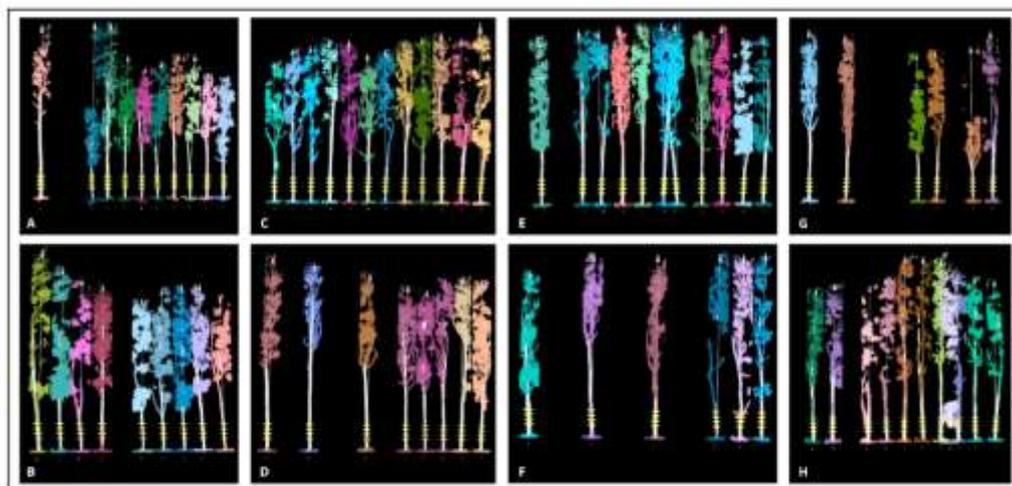
$$MD = \left( \frac{\sum_{i=1}^n |H_h - \hat{H}_{PLS}|}{n} \right) \quad MD(\%) = 100 \left( \frac{MD}{\bar{H}_h} \right) \quad (6)$$

Em que:  $H_{PLS}$  = altura total obtida por meio do PLS-SLAM (m);  $H_h$  = altura total obtida por meio do hipsômetro  $h$ , em que  $h$  = Suunto (1) ou Vertex IV (2) (m).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na área de estudo foram contabilizados 72 indivíduos de mogno africano, os quais foram 100% identificados na nuvem de pontos pelo escaneamento laser terrestre. Com o processamento da nuvem de cada linha separada (Figura 10), observa-se que os indivíduos foram enumerados aleatoriamente, de acordo com o algoritmo do sistema lidR-LAS. Mesmo assim, é possível identificá-los na ordem que aparecem no campo devido a riqueza de detalhes que a nuvem possui.

Figura 10. Nuvem de pontos da parcela de estudo, separadas por linhas, em que A corresponde a linha 1, B linha 2, C linha 3, D linha 4, E linha 5, F linha 6, G linha 7 e H linha 8.



Fonte: Autora (2023).

Nas nuvens A, B, D, E, F, G e H é possível observar falhas de plantio, sendo as mesmas encontradas em campo, devido desbastes e mortalidades ao longo do tempo.

#### 4.1 Comparação dos métodos na medição do diâmetro $D$

Os valores médios da variável  $D$  obtido pela fita diamétrica, que foi de 20,13 m, e com o uso de PLS-SLAM foram próximos (Tabela 1) nos dois tipos de processamento, sendo que o valor obtido pelo PLS quando se fez a média aritmética de diâmetros obtidos em três posições (Estratégia 3) ficou mais próximo da medida direta com a fita diamétrica.

Tabela 1. Resultados da obtenção do diâmetro pelos métodos tradicional e escaneamento laser (PLS-SLAM).

MÉTODO	D MÉDIO (cm)
Estratégia 2	19,31 (-4,92%)
Estratégia 3	20,79 (2,36%)

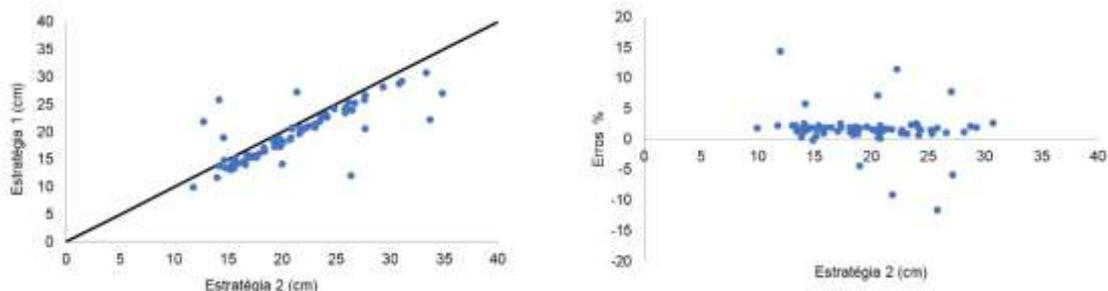
Na Tabela 2 estão os resultados das estatísticas da raiz do quadrado médio do erro (RMSE), viés e a média das diferenças (MD) para o diâmetro via PLS-SLAM. Observa-se que quando obteve a estimativa por meio da média das três posições teve maior acurácia, como também encontrado por Machado (2021) em um povoamento *Eucalyptus* sp. com 11 anos de idade.

Tabela 2. Resultados da raiz do quadrado médio do erro (RMSE%), viés (V%) e a média das diferenças (MD%) encontrados pelo PLS-SLAM, utilizando diâmetro a 1,30m do solo (Estratégia 2) e diâmetro médio (Estratégia 3) para cada linha com base na nuvem de pontos de cada linha de plantio.

LINHA	Estratégia 2			Estratégia 3		
	RMSE%	V %	MD%	RMSE%	V%	MD%
1	35,94	0,01	0,03	30,22	0,01	0,02
2	26,23	16,38	16,38	22,05	13,36	13,36
3	16,06	3,15	11,20	11,50	3,13	8,66
4	6,18	5,76	5,76	5,59	5,00	5,00
5	8,95	8,86	8,86	5,15	4,78	4,78
6	8,22	7,69	7,69	7,28	6,30	6,30
7	7,51	7,37	7,37	6,71	6,45	6,45
8	10,67	8,10	8,10	7,91	5,94	5,94
Geral	17,27	7,52	11,68	14,03	5,95	8,98

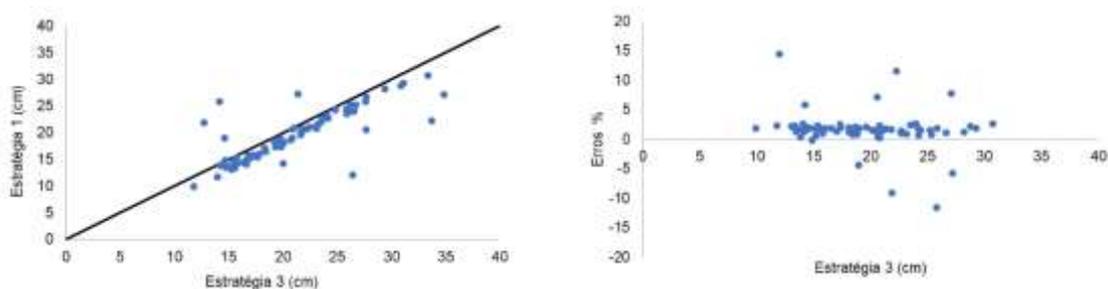
Os resultados de RMSE entre o método tradicional (fita diamétrica) e pelo escaneamento com PLS-SLAM (estimado), obtiveram subestimação (Figura 11), principalmente as três primeiras linhas.

Figura 11. Gráficos de D obtidos pela fita diamétrica versus aqueles obtidos com o uso do PLS-SLAM a 1,30 m do solo e de resíduos em função dos valores estimados pela nuvem de pontos PLS-SLAM a 1,30 m do solo das 72 árvores de mogno africano.



Fonte: Autora (2023).

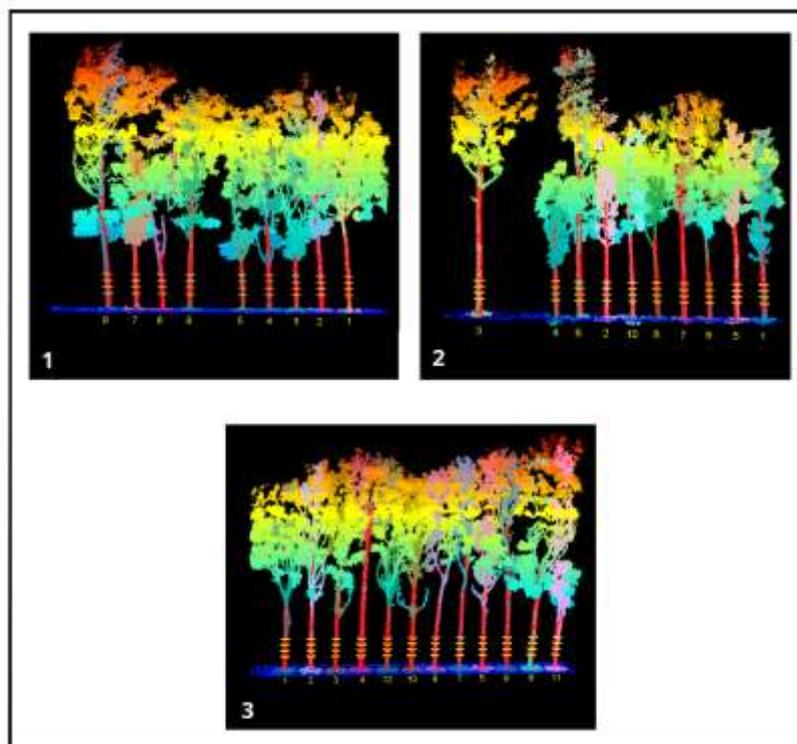
Figura 12. Gráficos de D obtidos pela fita diamétrica versus aqueles obtidos com o uso do PLS-SLAM a 1,30 m do solo e de resíduos em função dos valores estimados pela nuvem de pontos PLS-SLAM com diâmetro médio estimado das 72 árvores de mogno africano.



Fonte: Autora (2023).

De acordo com os valores representados na Tabela 2, é possível observar que as linhas 1 (árvores 1, 2, 3, 8 e 10), 2 (árvores 1 e 9) e 3 (árvore 10) tiveram valores de RMSE bem elevados, sendo os resultados do PLS-SLAM com valores superestimados aos encontrados em campo, representação nítida na distribuição nos gráficos de erros (Figura 11 e 12). As linhas em questão são as que possuem quase nenhuma falha, sendo elas as mais adensadas (Figura 13) em relação às outras, que possuem mais falhas e com isso gerando maior espaço entre elas garantindo maior visibilidade para o equipamento PLS-SLAM, facilitando o algoritmo no reconhecimento dos indivíduos e suas limitações.

Figura 13. Nuvem de pontos obtida pelo software R representando o adensamentos das linhas 1, 2 e 3 no plantio de *Khaya ivorensis* A Chev.



Fonte: Autora (2023).

Excluindo especificamente as árvores citadas anteriormente nas linhas 1, 2 e 3, há aumento de acurácia com a redução dos valores de RMSE, V e MD (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados da raiz do quadrado médio do erro (RMSE%), viés (V%) e a média das diferenças (MD%) encontrados pelo PLS-SLAM, utilizando diâmetro a 1,30m do solo (Estratégia 2) e diâmetro médio (Estratégia 3, sem as árvores discrepantes).

	Normal			Retirado		
	RMSE%	V%	MD%	RMSE%	V%	MD%
<b>Estratégia 2</b>	17,27	7,52	11,68	8,32	6,92	7,62
<b>Estratégia 3</b>	14,03	5,95	8,98	6,12	5,28	5,52

#### 4.2 Comparação entre os métodos de medição de altura total

O valor médio da altura total obtido foi de 17,88 cm para o Hipsômetro Suunto e de 17,40 cm para o Hipsômetro Vertex IV e 17,86 cm para o PLS-SLAM. Os valores encontrados para o PLS e Suunto foram semelhantes, tendo maior discrepância para o Vertex IV.

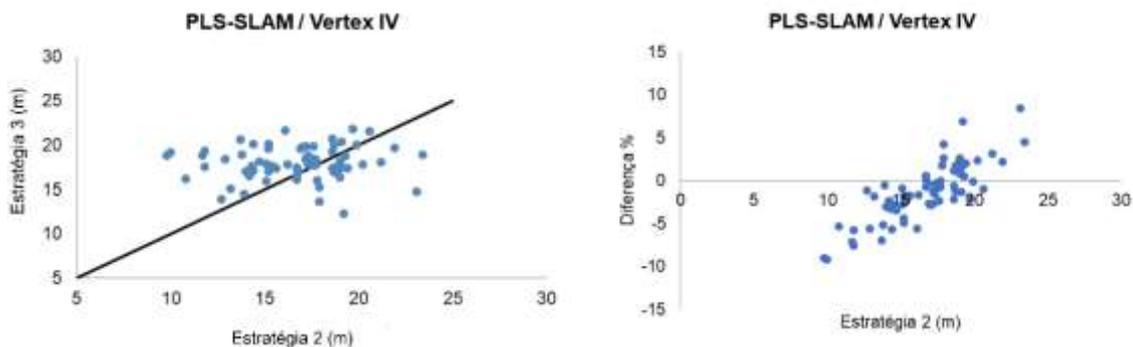
Também foi possível observar indivíduos discrepantes, assim analisando cada linha separadamente obtendo o V, RMDQ e MD como representado na Tabela 4. Isso devido a sobreposição das copas, que prejudicam a filtragem e modelagem das nuvens de pontos, assim não obtendo resultados precisos de altura total (MACHADO, 2021).

Tabela 4. Resultados referentes à raiz do quadrado médio das diferenças (RQMD), viés (V) e média das diferenças absolutas (MD), encontrados por meio da comparação dos métodos estimados pelos hipsômetros Suunto (Estratégia 1) e Vertex (Estratégia 2), com o obtido com o uso do PLS-SLAM, para cada linha com base na nuvem de pontos separada por linhas.

LINHA	HIPSÔMETRO SUUNTO			HIPSÔMETRO VERTEX IV		
	RQMD (%)	V (%)	MD (%)	RQMD (%)	V (%)	MD (%)
<b>1</b>	28,12	-5,56	22,73	24,80	-7,15	20,94
<b>2</b>	22,36	-7,43	18,23	23,69	-13,34	17,91
<b>3</b>	17,65	-3,93	15,06	27,66	-18,06	22,92
<b>4</b>	12,72	-3,93	10,11	14,58	-9,43	11,84
<b>5</b>	11,27	1,68	12,93	7,74	0,20	11,41
<b>6</b>	10,54	1,57	8,43	7,51	0,19	6,16
<b>7</b>	37,66	-26,21	31,13	26,65	-17,40	21,56
<b>8</b>	21,14	16,16	16,60	17,11	8,41	13,30
<b>Geral</b>	21,51	-1,94	16,50	20,34	-6,95	15,54

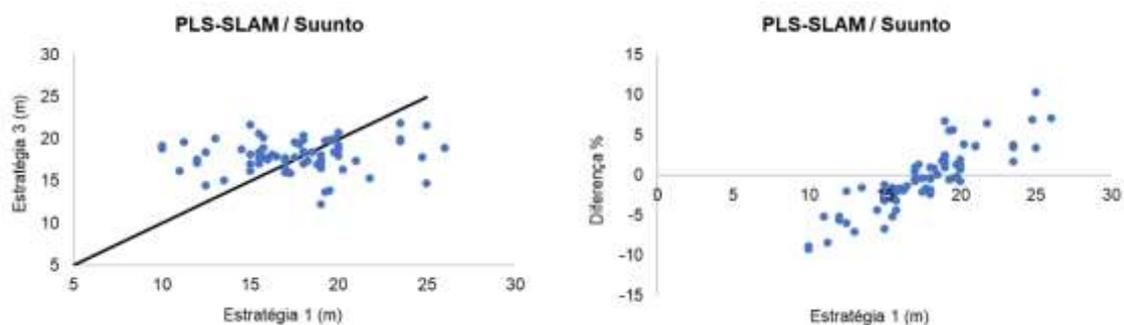
Nas Figuras 14 e 15, é possível observar a relação da altura total estimada com o PLS-SLAM e as estimadas com os equipamentos hipsômetros Vertex IV e Suunto. Pode-se notar que em ambos os gráficos as distribuições foram semelhantes, onde o PLS-SLAM em relação ao Vertex IV e ao Suunto tendeu a superestimação dos valores.

Figura 14. Gráficos de H obtidos pelo Vertex IV versus aqueles obtidos com o uso do PLS-SLAM e de resíduos em função dos valores estimados pela nuvem de pontos PLS-SLAM das 72 árvores de mogno africano.



Fonte: Autora (2023).

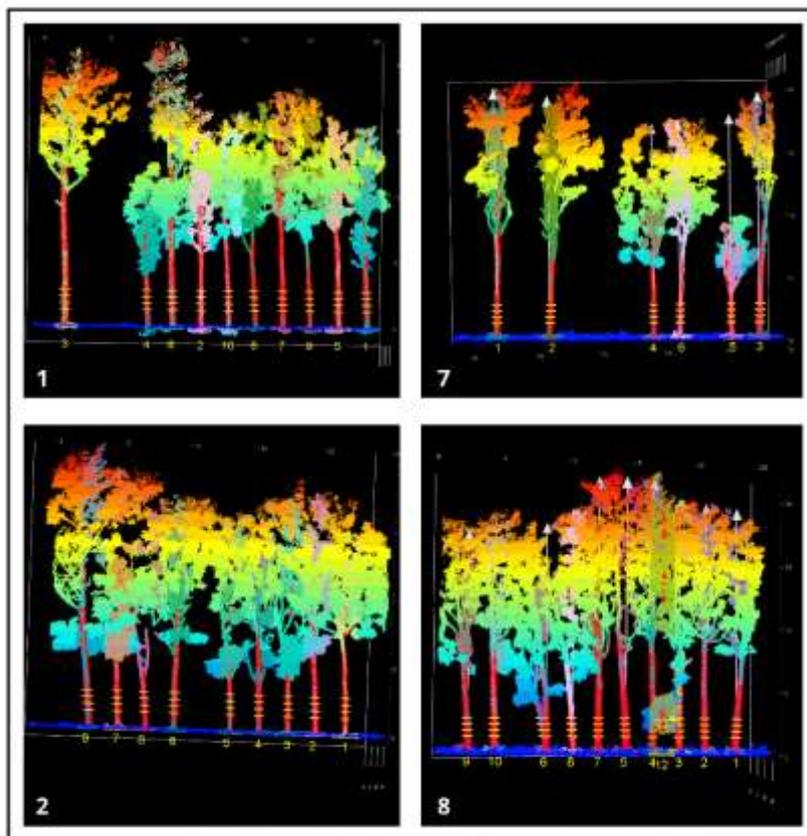
Figura 15. Gráficos de H obtidos pelo Suunto versus aqueles obtidos com o uso do PLS-SLAM e de resíduos em função dos valores estimados pela nuvem de pontos PLS-SLAM das 72 árvores de mogno africano.



Fonte: Autora (2023).

Com base nos dados representados na Tabela 4, foi possível notar que as linhas um, dois, sete e oito obtiveram percentuais de RMDQ acima de 20%, o viés da linha oito bem elevado em relação a maioria, isso devido a grande diferença entre os valores estimados pelos equipamentos hipsômetros em relação ao estimados pelo PLS-SLAM. Essa elevada diferença entre os valores pode acontecer devido às características físicas das árvores, como bifurcação, indivíduos com excessos de galhos ou quebrados, fustes tortos ou até mesmo a dificuldade de identificar e diferenciar as copas das árvores devido seu adensamento de galhos e folhas. Com isso ajudando o algoritmo a falhar no reconhecimento por conta dessas adversidades (Figura 16).

Figura 16. – Exemplificação de situações como tortuosidade e indivíduos quebrados, que dificultaram o reconhecimento e aferição das medidas precisas das árvores da parcela de estudo, em que 2 indivíduos nessa situação correspondem a linha 1; 2 indivíduos na linha 2; 2 indivíduos na linha 8 e 1 indivíduo na linha 7.



Fonte: Autora (2023).

## 5. CONCLUSÃO

Por meio da análise da nuvem de pontos PLS-SLAM foram identificados todos os indivíduos de mogno africano do talhão em estudo. Em relação a variável diâmetro (D), houve maior acurácia realizando a média de alturas próximas ao 1,30 m do solo (Estratégia 3). Para estimação da altura total das árvores (H), a utilização da nuvem de pontos PLS-SLAM não obteve acurácia nas estimativas, tendo valores muito discrepantes dos hipsômetros analisados, subestimando valores maiores e superestimando valores menores de altura total das árvores de mogno africano.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G. J. F. **Uso do laser scanner terrestre na estimativa de parâmetros biométricos em povoamentos florestais**. Universidade de São Paulo. 2017.

ARAÚJO, V. M. U. de. **UMA ABORDAGEM DIRETA E DESACOPLADA DE SLAM VISUAL**. 2018. 112 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação

em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Disponível em: <Arquivototal.pdf (ufpb.br)>. Acesso em: 19 de jul. 2023.

ASSIS, A. L. De et al. **Development of a sampling strategy for youn stands of Eucaliptus sp. using geostatistics**. Cerne, v. 15, p. 166–173. 2009.

BIENERT, A. et al. **Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters**. International archives of Photogrammetry , Remote Sensing and Spatial Information Science, 2006. v. 36., 2012.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; SILVA, A. Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 1, p. 128-129, 2013. Disponível em:< <https://www.redalyc.org/pdf/1190/119025752012.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2023.

BRASIL FLORESTA. **Tipos de amostragem para inventário florestal**. 2023. Disponível em:<[https://www.brasilflorestal.com/blog.php?id\\_noticia=12](https://www.brasilflorestal.com/blog.php?id_noticia=12)>. Acesso em: 07 de jul. 2023.

CANAL RURAL. **O Brasil terá a maior floresta de mogno africano do mundo**. São Paulo. 2018. Disponível em: <<https://www.canalrural.com.br/sites-especiais/brasil-tera-a-maior-floresta-de-mogno-africano-do-mundo/>>. Acesso em: 27 de mai. 2023.

CHAVES, A. G. S. **Modelagem tridimensional (3D) de fustes e toras comerciais de *Tectona grandis* L.F.** 2016. Monografia (Especialização em Manejo Florestal de Precisão) – Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

CARDOSO, D. J et al. **Procedimentos para melhoria da qualidade dos resultados de inventários florestais: aspectos do processamento de dados**. Embrapa Florestas, Paraná. 2018.

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

DEL-PERUGIA, B.; GIANNETTI, F.; CHIRICI, G.; TRAVAGLINI, D. Influence of Scan Density on the Estimation of Single-Tree Attributes by Hand-Held Mobile Laser Scanning. **Forests**, v. 10, n. 3, p. 277-289, 2019. <https://doi.org/10.3390/f10030277>

FONSECA, A. L. B. **Estimação de volume de madeira em povoamento de eucalipto utilizando dados de laser scanner terrestre**. Tese, (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal de Viçosa, p. 115. 2018.

FLORIANO, E. P. 2021. **Inventário florestal**. Rio Largo: Edição do autor, 2021. 135f.

FORLIDAR. **Escaneamento LiDAR terrestre em aplicações florestais**. 2019. Disponível em:< <https://www.forlidar.com.br/team-1>>. Acesso em: 03 mar. 2023.

FLYABILITY. **WHAT IS SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING (SLAM)?**. 2022. Disponível em: O que é localização e mapeamento simultâneos (SLAM)? (flyability.com). Acesso em: 19 jul. 2023.

GARCÍA, M. et al. Canopy clumping appraisal using terrestrial and airborne laser scanning. **Remote Sensing of Environment**, v. 161, p. 78–88. 2015.

GEOSLAM. **ZEB HORIZON The ultimate mobile mapping solution**. 2023a. Disponível em: <ZEB Horizon: The Ultimate Mobile Mapping Solution (geoslam.com)>. Acesso em: 19 jul. 2023.

GIONGO, M. et al. **LiDAR: princípios e aplicações florestais**. Pesquisa Florestal Brasileira, 2010. v. 30, n. 63, p. 231–244.

GOLLOB, C. et al. Forest inventory with long range and high-speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technology. **Remote Sensing**, v. 12, n. 9. p. 43. 2020.

GOLLOB, C. et al. Measurement of forest inventory parameters with apple ipad pro and integrated lidar technology. **Remote Sensing**, v. 13, n. 16, p. 1–35. 2021.

GORGENS, E. B.; SILVA, A. G. P. **LiDAR: aplicações florestais**. 1. ed: Editora CRV, Curitiba, 2014.

HENTZ, A. M. K. **Obtenção de informação dendrométricas para inventário florestal automatizado por meio de veículo aéreo não tripulado (VANT)**. 2018. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) –Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

IGLHAUT, J. et al. Structure from motion photogrammetry in forestry: a review. **Springer Nature**. v. 5, n. 3, p. 155-168, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS. **Mogno Africano**. Disponível em: <<https://www.ibflorestas.org.br/conteudo/mogno-africano>>. Acesso em: 27 de mai. 2023.

IUCN. **International Union for Conservation of Nature and Natural Resources**. IUCN Red List. Cambridge, [2018]. Disponível em: <<https://www.iucnredlist.org/search?query=Khaya&searchType=species>>. Acesso em: 27 mai. 2023.

LEEUWEN, M. VAN; NIEUWENHUIS, M. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. **European Journal of Forest Research**, v. 129, n. 4, p. 749–770. 2010. Disponível em: <Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing >.

LIANG, X. et al. Possibilities of a personal laser scanning system for forest mapping and ecosystem services. **Sensors**, 2014. v. 14, n. 1, p. 1228–1248.

LIANG, X. et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 63–77. 2016.

LIU, J. et al. Extraction of sample plot parameters from 3D point cloud reconstruction based on combined RTK and CCD continuous photography. **Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 1299, 2018.

MACHADO, M. D. **Uso de sensor laser terrestre para estimação de diâmetro e altura de *Eucalyptus sp.*** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2021.

MATA NATIVA. 2021. **Diferenças entre métodos e processamentos de amostragem em um inventário florestal.** Disponível em: <<https://matanativa.com.br/metodos-e-processos-de-amostragem-em-um-inventario-florestal/>>. Acesso em: 07 de jul. 2023.

MEGA, C. P.; KUPLICH, T. M. Aplicações florestais do LiDAR aerotransportado no Brasil – uma revisão. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2019, Santos. **Anais...** São José dos Campos, INPE, 2019.

MENGESHA, T.; HAWKINS, M.; NIEUWENHUIS, M. Validation of terrestrial laser scanning data using conventional forest inventory methods. **European Journal of Forest Research**, v. 134, n. 2, p. 211–222. 2015.

MOKROŠ, M. et al. High precision individual tree diameter and perimeter estimation from close-range photogrammetry. **Forests**, v. 9, n. 11, p. 696, 2018.

PAPA, D. de A.; FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, M. V. N. d'; RODRIGUEZ, L. C. E.; CAMARGO, A. P.; PRATA, G. A.; AMARAL, L. G. de C.; LARANJA, D. C. F. **Uso do LiDAR no manejo florestal.** 1. Ed. EMBRAPA, 2017. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1078727/uso-do-lidar-no-manejo-florestal>>. Acesso em: 03 de mar. 2023

PEÑA-CLAROS, M. et al. Regeneration of commercial tree species following silvicultural treatments in a moist tropical forest. **Forest Ecology and Management**, 2008. v. 255, n. 3–4, p. 1283–1293

PIERMATTEI, L. et al. Terrestrial structure from motion photogrammetry for deriving forest inventory data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 8, 950, 2019.

QIAN, C.; LIU, H.; TANG, J.; CHEN, Y.; KAARTINEN, H.; KUKKO, A.; ZHU, L.; LIANG, X.; CHEN, L.; HYYPPÄ, J. Na Integrated GNSS/INS/LiDAR-SLAM Positioning Method for Hiighly Accurate Forest Stem Mapping. **Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 3-18, 2016. <https://doi.org/10.3390/rs9010003>

RASCÃO, M. S. R. C. **Aquisição de dados LiDAR com TLS e HMLS para detecção de árvores individuais.** 2019. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal e Recursos Florestais) – Universidade de Lisboa, Portugal, 2019.

REIS, C. A. F.; OLIVEIRA, E. B.; SANTOS, A. M. Mogno-africano (*Khaya spp.*): atualidades e perspectivas do cultivo no Brasil. **Embrapa Florestas**. Brasília, DF: 21 ed, v. 1, p. 378. 2019.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. 2019. **Inventário florestal nacional**. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/inventario-florestal-nacional>>. Acesso em: 03 de mar. 2023.

SILVA, G. F. da; CURTO, R. A.; SOARES, C. P. B.; PIASSI, L. C. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 36, n. 2, p. 341-348, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000200015>

SILVA, S. F. da et al. Caracterização do uso e ocupação da terra do município de Jerônimo Monteiro, ES. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, XV, 2011, São José dos Campos, SP. **Anais...** São José dos Campos, SP: Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP, 2011.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. P.; SOUZA, A. L. de. **DENDROMETRIA E INVENTÁRIO FLORESTAL**. 2. Ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2011. 272p.

VALERI, S. V.; PAULA, R. C. de. **Dendrometria: medição de diâmetro e altura**. 2018. Disponível em: <https://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/producaovegetal/SERGIOVALIENGOVALERI/medicao-de-diametro-e-altura-2018.pdf>. Acesso em: 03 de mar. 2023.

VECTORNAV. **INERTIAL NAVIGATION ARTICLES**. 2023. Disponível em: <[What is an Inertial Measurement Unit? · VectorNav](#)> . Acesso em: 19 jul. 2023.

VIBRANS, A. C.; GASPER, A. L. de; MÜLLER, J. J. V. Para que inventariar florestas? Reflexões sobre a finalidade do inventário florístico florestal de Santa Catarina. **Revista de estudos ambientais**, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 6-13, 2012.

WHITE, J. C. et al. Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 2016. v. 42, n. 5, p. 619–641