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

LUIZ OTÁVIO PORTELLA CANCIO

# USO DO LIDAR PORTÁTIL PARA DETECÇÃO E ESTIMAÇÃO DE ALTURA TOTAL DE ÁRVORES DE EUCALIPTO EM UM SISTEMA SILVIPASTORIL

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2025

LUIZ OTÁVIO PORTELLA CANCIO

# USO DO LIDAR PORTÁTIL PARA DETECÇÃO E ESTIMAÇÃO DE ALTURA TOTAL DE ÁRVORES DE EUCALIPTO EM UM SISTEMA SILVIPASTORIL

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

2025

LUIZ OTÁVIO PORTELLA CANCIO

# USO DO LIDAR PORTÁTIL PARA DETECÇÃO E ESTIMAÇÃO DE ALTURA TOTAL DE ÁRVORES DE EUCALIPTO EM UM SISTEMA SILVIPASTORIL

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.

Aprovada em 01 de setembro de 2025

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
ADRIANO RIBEIRO DE MENDONCA
Data: 05/09/2025 10:20:29-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Orientador

Documento assinado digitalmente
NIVEA MARIA MAFRA RODRIGUES
Data: 04/09/2025 22:42:19-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Nívea Maria Mafra Rodrigues
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM
Examinador

Documento assinado digitalmente
LUCAS DUARTE CALDAS DA SILVA
Data: 05/09/2025 09:57:38-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

MSc. Lucas Duarte Caldas da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Examinador

“A natureza não faz nenhuma pergunta e não responde a nenhuma que nós, mortais, fazemos. Há muito já tomou sua decisão”.

Walden, Henry D. Thoreau

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelas experiências que muito me amadureceram até agora.

Agradeço a minha família, pelo apoio constante e incondicional, meu pai Ricardo, minha mãe Suzana, meus irmãos Pedro Henrique, Ghiordano Bruno, Tia Sueli e a minha vó Orminda, ao longo de minha vida.

Aos amigos que fiz durante essa jornada que muito me apoiaram, ouviram, aconselharam, Raul, Gabriela, Gabriel, Matheus, Eduarda, e inúmeros outros participes e cúmplices nas peripécias sociais.

A Tia Ana e ao Marshall, representando o apoio incondicional da cidade de Alegre, que levarei em meu coração por toda minha vida.

A todos os professores que tive o privilégio de conviver, tão fundamentais na minha jornada acadêmica!

Em especial aos professores Adriano Ribeiro de Mendonça, Gabriel Browne de Deus Ribeiro e a professora Elzimar de Oliveira Gonçalves, pela orientação, paciência, ensinamentos, disponibilidade e, principalmente, por acreditarem e ajudarem a emergir um aluno mais focado e um profissional responsável e comprometido.

Aos meus amigos do GEPEF e do LaMFlor, pelo apoio, ao Lucas Caldas e à Nívea, que foram além, dedicando seu tempo e complementando aplicar a teoria na prática.

A Augusta Gonçalves e toda equipe da Flona de Pacotuba, aos quais foram importantes nos primeiros passos no desenvolvimento profissional e sedimentar a certeza da escolha realizada, e tornar a paixão pela Natureza uma constante em minha vida.

A toda equipe da MV Consultoria pela amizade, e oportunidade de trabalho e aprimoramento profissional.

# RESUMO

A sustentabilidade da produção agropecuária capixaba exige métodos mais eficientes e de maior acurácia para avaliar a estrutura florestal, sobretudo em áreas de relevo acidentado e vegetação multiestrato. Nesse contexto, este estudo avalia o desempenho do LiDAR terrestre portátil (PLS) para estimar a altura total de árvores de eucalipto sob sistema silvipastoril em Jerônimo Monteiro (ES. A área experimental, de relevo declivoso (40,41%) e clima tropical chuvoso, é composta por capim-marandu e eucalipto. Utilizaram-se dados de diâmetro a 1,3m do solo (D) e altura total (H) obtidos de um censo (89 árvores) e dados tridimensionais obtidos com o ZEB Horizon (PLS), percorrendo a área em zigue- zague. A nuvem de pontos foi pré-processada no GeoSLAM Hub® e normalizada no ambiente R por meio do pacote lidR. A detecção automática e a extração de H foram realizadas com o TreeLS. Foram detectadas 90 árvores. A taxa de detecção correta foi de 89,89%, com erros de omissão e de comissão de 10,11% e 11,24%, respectivamente. As estimativas de H por meio do PLS apresentaram raiz do quadrado médio das diferenças (RQMD) de 5,56 m (28,71%), viés (V) de −3,56 m (−18,39%) e médias das diferenças (MD) de 4,06 m (20,96%), indicando estimativas com tendências de superestimação. Para aprimorar a acurácia, aplicou-se predição inversa, reduzindo a RQMD para 4,15 m (21,44%), eliminando o viés (≈ 0,00 m; 0,00%) e diminuindo a MDA para 3,21 m (16,58%). Os resultados demonstram o potencial do PLS como ferramenta eficiente para inventário florestal em sistemas integrados, mesmo sob relevo acidentado e vegetação multiestrato, contribuindo para o manejo florestal e a consolidação de práticas sustentáveis no meio rural capixaba.

**Palavras-chave:** LiDAR portátil; HMLS; TreeLS; detecção individual de árvores; predição inversa.

# SUMÁRIO

**1 INTRODUÇÃO ..... 6**
1.1 Objetivos ..... 8
1.1.1 Objetivo Geral ..... 8
1.1.2 Objetivos Específicos ..... 8
**2 REVISÃO DE LITERATURA ..... 9**
2.1 O Setor Florestal ..... 9
2.2 Uso do Solo e Degradação no Brasil e no Espírito Santo ..... 11
2.3 Sistemas Silvipastoris (SSP) ..... 12
2.4 Inventario Florestal ..... 13
2.5 Inventário com LiDAR Terrestre ..... 14
**3 METODOLOGIA ..... 17**
3.1 Caracterização da área de estudo ..... 17
3.2 Coleta de dados ..... 18
3.2.1. Inventário florestal ..... 18
3.2.2. Coleta de dados com LiDAR terrestre (PLS) ..... 19
3.3 Processamento dos dados da nuvem PLS ..... 20
3.4 Calibração ou predição inversa das alturas totais obtidas pelo PLS ..... 23
3.5 Análise dos dados ..... 24
**4 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 26**
4.1 Detecção de árvores usando o TreeLS ..... 26
4.2 Análise da acurácia das estimativas de altura total de árvores de eucalipto ..... 27
4.3 Análise da acurácia das estimativas de altura total de árvores de eucalipto estimadas por meio da predição inversa ..... 29
**5 CONCLUSÕES ..... 32**
**6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 33**

# 1 INTRODUÇÃO

O Espírito Santo figura entre os maiores produtores florestais do Brasil, com 274 mil hectares de florestas plantadas, o que corresponde a 6% do território estadual (GALVEAS, 2024). A cadeia produtiva florestal é composta por segmentos como celulose, papel, madeira processada e energia de biomassa, e responde por cerca de 7,9% do Produto Interno Bruto (PIB) estadual. Além disso, representa 26,3% do PIB do agronegócio capixaba e quase 50% das exportações do setor agropecuário, o setor também contribui para a geração de empregos e o desenvolvimento regional, especialmente no interior, com forte inserção de produtores familiares (ESPÍRITO SANTO, 2023).

Apesar do protagonismo florestal, o uso do solo no Espírito Santo revela desequilíbrios. Das 4,6 milhões de hectares que compõem o território estadual, apenas 10,9% mantêm florestas preservadas em áreas contínuas; 28,5% (1,31 milhão ha) correspondem a fragmentos inseridos na matriz produtiva; e 28,7% (1,32 milhão ha) são ocupados por pastagens, das quais 18,1% (239 mil hectares) apresentam algum grau de degradação (IFN-ES, 2019; BOLFE *et al.*, 2024). Esse cenário aponta para o subaproveitamento do território e a crescente pressão sobre os serviços ecossistêmicos. Uma alternativa ao plantio em monocultivos, destacam-se os sistemas integrados, como os sistemas Silvipastoris (SSP), Agroflorestais (SAF) e Agrossilvipastoris, que associam produção e conservação em uma mesma área.

Ao promover o aproveitamento racional de áreas já abertas, especialmente pastagens degradadas, os sistemas integrados reduzem a necessidade de expansão da fronteira agrícola, evitando o avanço do desmatamento. Essa estratégia favorece não apenas a proteção dos fragmentos florestais remanescentes, como também contribui para a conectividade ecológica e os serviços ecossistêmicos associados (CONCEIÇÃO, 2022). A adoção de SSP, em especial, é incentivada por políticas públicas como o Programa Reflorestar, iniciativa do Governo do Espírito Santo, promove a restauração florestal e o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) em áreas degradadas, alinhando-se a políticas como o Plano ABC$^{+}$ (GOVERNO DO ESPÍRITO SANTO, 2023).

Os SSP integram árvores, pastagens e animais em uma mesma área, promovendo sinergias produtivas e ambientais: aumento da fertilidade do solo, redução da erosão, sequestro de carbono, sombreamento e conforto térmico para os animais e diversificação da renda (BALBINO *et al.*, 2012). Entretanto, a estrutura espacial complexa, com espaçamentos variáveis, diversidade florística e estágios sucessionais distintos, representa um entrave para o monitoramento preciso, especialmente por meio de inventários florestais convencionais. Conforme demostrado por SCHETTINI *et al.* (2021) e VILLANOVA *et al.* (2018), em SSP, o tempo de campo pode aumentar em até 40% e os erros de estimativa de volume ultrapassam 25% em comparação com formações homogêneas. Essa limitação torna o inventário tradicional, baseado em medições manuais de diâmetro à altura do peito (D), altura e volume, economicamente inviável em muitos casos, sobretudo em propriedades de pequeno porte (SILVA *et al.*, 2023; COSTA, 2023).

Diante desse desafio, o uso de tecnologias de sensoriamento remoto tem se consolidado como uma alternativa promissora. Entre elas, destaca-se o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), tecnologia que permite a obtenção informações tridimensionais da vegetação por meio da emissão e recepção de pulsos laser (Giongo *et al.*, 2010). O LiDAR pode ser classificado quanto à plataforma de coleta em: orbital quando acoplado em satélites (SLS) ou em plataformas aéreas (ALS) e terrestres móveis (MLS), terrestre protátil de mão (PLS) ou estacionárias (TLS). O LiDAR Terrestre (TLS), em particular, é recomendado para levantamentos de alta precisão em ambientes florestais complexos, como os SSP, devido à sua capacidade de gerar dados milimétricos da estrutura individual das árvores, mesmo em arranjos irregulares (BARROS *et al.*, 2023; NEWNHAM *et al.*, 2015).

Para transformar essas informações tridimensionais em informações úteis para o manejo, diversos algoritmos têm sido desenvolvidos, como o TreeLS (CONTO, 2023) que detecta indivíduos arbóreos e estima diâmetro por meio de cortes horizontais e ajustes de circunferência, e aplica uma segmentação baseada em fatias e modelos cilíndricos ajustados via RANdom SAmple Consensus (RANSAC) (KASPI *et al.*, 2017). Em plantios de eucalipto, sua aplicação tem mostrado boa recuperação de

posições e estimativas de D e H compatíveis com o inventário de referência, sustentando sua adoção neste estudo (Dalla Corte *et al.*, 2020).

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo comparar a acurácia do PLS na estimação da H (altura total) em um sistema silvipastoril.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a acurácia do PLS na estimação da altura total de árvores de eucalipto em um sistema silvipastoril em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o uso do TreeLS na detecção de indivíduos a partir da nuvem de pontos obtidas pelo PLS.
- Comparar a acurácia das estimativas obtidas pelo PLS com o inventário tradicional.
- Analisar a aplicação da predição inversa na estimativa da altura total de árvores de eucalipto em um sistema silvipastoril.

# 2 REVISÃO DE LITERATURA

## 2.1 O Setor Florestal

A crescente demanda global por produtos rastreáveis e de baixo carbono tem impulsionado transformações estruturais nas cadeias produtivas, especialmente diante do fortalecimento de regulamentações internacionais, como o Regulamento da União Europeia sobre desmatamento importado (UNIÃO EUROPEIA, 2023), e de compromissos multilaterais assumidos no âmbito da Agenda 2030 e do Acordo de Paris (ONU, 2015; UNFCCC, 2015). Nesse contexto, a valoração de serviços ecossistêmicos, por meio de instrumentos como o mercado global de carbono, amplia o espaço para modelos produtivos sustentáveis, nos quais a economia florestal desempenha papel estratégico (FAO, 2022; ONU, 2023).

Segundo a FAO (2022), produtos florestais sustentáveis e rastreáveis são fundamentais para a bioeconomia global, contribuindo para a segurança alimentar, conservação da biodiversidade e mitigação das emissões. O IPCC (2022) reforça que soluções baseadas em florestas são essenciais para a mitigação das mudanças climáticas, dada sua capacidade de sequestro de carbono, oferta de biomassa renovável e adaptação de paisagens produtivas.

No plano nacional, o setor de árvores cultivadas alcançou R$ 202,6 bilhões em valor bruto da produção em 2023 e respondeu por aproximadamente 0,9% do PIB do país, mantendo elevada relevância econômica (IBÁ, 2024). Inserido no contexto do agronegócio, responde por cerca de 6% do PIB agropecuário, o que corresponde a aproximadamente R$ 188 bilhões (CEPEA, 2024). A cadeia florestal brasileira inclui segmentos como celulose, papel, painéis de madeira, energia de biomassa, carvão vegetal e madeira serrada e produtos não madeireiros, gerando mais de 2,690 milhões de empregos diretos e indiretos (IBÁ, 2024).

O país conta com aproximadamente 10,02 milhões de hectares de florestas plantadas, com destaque para o eucalipto, que representa 76% da área (7,8 milhões ha), seguido pelo pinus (19% ou 1,91 milhão ha), acácia (1,6% ou 163 mil ha), paricá (1,1% ou 112 mil ha), teca (0,8% ou 83 mil ha) e outras espécies (0,7%) (IBÁ, 2024). O relatório também demonstra que a produtividade média nacional do eucalipto alcança

39 m³/ha/ano, posicionando o Brasil em posição de destaque global na eficiência silvicultural.No Espírito Santo, embora o território estadual corresponda a apenas 0,5% do território nacional (4,6 milhões de hectares), a cadeia florestal capixaba destaca-se pela relevância econômica e ambiental. O estado possui cerca de 162 mil hectares de florestas plantadas, o que equivale a 4% da área estadual, ocupando a 5ª posição no ranking nacional de produção florestal (IBÁ, 2023). Em 2022, o Espírito Santo produziu aproximadamente 9,7 milhões de metros cúbicos de madeira cultivada, com predominância da cultura do eucalipto (IJSN, 2023).

A performance do Estado está relacionada ao alto desempenho silvicultural, cuja produtividade média atinge 45 m³/ha/ano, impulsionada por condições edafoclimáticas favoráveis (como temperaturas médias entre 18°C e 26°C e precipitação de 1.000 a 1.500 mm/ano), conforme descrito por Brito (2024). Essa produtividade não apenas consolida a 5º posição do estado no ranking nacional, mas também se reflete em números macroeconômicos. A atividade florestal responde por cerca de 7,9% do PIB estadual, 26,3% do PIB do agronegócio capixaba (R$ 5,2 bilhões de um total de R$ 19,8 bilhões) e representa aproximadamente 50% das exportações do setor agropecuário, com destaque para celulose, madeira processada e biomassa florestal (PIB Estadual, 2022).

Programas como o Plano ABC+ e o Reflorestar têm contribuído para consoLiDAR o Espírito Santo como referência em boas práticas de uso do solo, promovendo a diversificação da produção rural com base em sistemas agroflorestais, silvipastoris e florestas nativas. O Programa Reflorestar, implementado desde 2011 pelo Governo Estadual, já contratou mais de 4 mil projetos e apoiou a restauração de mais de 12 mil hectares até 2023, com foco na ampliação da cobertura vegetal e na inclusão produtiva de agricultores familiares (ESPÍRITO SANTO, 2025).

Apesar dos avanços e do reconhecimento crescente da bioeconomia florestal, persistem desafios estruturais. Barreiras técnicas, acesso limitado a crédito e assistência técnica, logística inadequada e a não ou baixa remuneração pelos serviços ecossistêmicos dificultam a ampliação de sistemas produtivos de base florestal ou integrados. Nesse sentido, a consolidação de políticas como a Política Estadual da Cadeia Produtiva Florestal (2023) e o Plano Estadual de Mudanças Climáticas é fundamental para garantir segurança regulatória, fomentar o mercado de serviços

ambientais e viabilizar a transição para uma economia de baixo carbono no meio rural capixaba (ESPÍRITO SANTO, 2023; CPI, 2023).

## 2.2 Uso do Solo e Degradação no Brasil e no Espírito Santo

O Brasil possui uma área territorial de aproximadamente 851 milhões de hectares, dos quais cerca de 164,6 milhões de hectares são ocupados por pastagens (19,3% do território nacional), superando a extensão atual de formações florestais naturais remanescentes, estimada em 157 milhões de hectares (18,4%) (MAPBIOMAS, 2023b). Entre as áreas de pastagem, aproximadamente 60% apresentam algum nível de degradação, o que corresponde a mais de 98 milhões de hectares, impactando diretamente a produtividade da pecuária, a conservação do solo e os níveis de emissão de gases de efeito estufa (BOLFE *et al.*, 2024).

A expansão do uso agropecuário nas últimas décadas agravou esse cenário. Entre 1985 e 2023, o Brasil perdeu aproximadamente 60,8 milhões de hectares de formações florestais (7,1% do território nacional) e 37,9 milhões de hectares de formações savânicas (4,5%), enquanto as lavouras temporárias aumentaram de 14,1 para 46,3 milhões de hectares (crescimento de 228%) e as pastagens passaram de 91,3 para 164,6 milhões de hectares (aumento de 79%) no mesmo período (MAPBIOMAS, 2023b). Essa condição reduz drasticamente o potencial produtivo das áreas, eleva os custos da pecuária e induz à abertura de novas fronteiras agrícolas sobre ecossistemas naturais.

O Espírito Santo possui uma área de aproximadamente 4,6 milhões de hectares, dos quais apenas 10,9% (cerca de 501 mil hectares) correspondem a florestas contínuas preservadas. O relevo acidentado do território capixaba, com predominância de áreas montanhosas, limita o uso de máquinas agrícolas convencionais e dificulta a adoção de práticas de manejo intensivo. Além disso, a estrutura fundiária marcada por pequenas propriedades torna desafiadora a difusão de tecnologias mais sofisticadas e a adoção de soluções em escala (ROAM-ES, 2018).

Esse cenário evidencia a urgência de ações estruturadas voltadas à recuperação da capacidade produtiva e à contenção dos processos de degradação do solo. A adoção de boas práticas de manejo, como o terraceamento, a cobertura vegetal permanente, a rotação de culturas, o plantio direto, a preservação de Áreas de Preservação Permanente

(APPs) e Reservas Legais (RLs), bem como a implantação de sistemas integrados de produção, tem demonstrado eficácia na redução da erosão, na melhoria das condições físico-químicas do solo e na restauração de serviços ecossistêmicos (SANTOS *et al.*, 2022; SCHEEREN *et al.*, 2023; BEZERRA *et al.*, 2012).

Sem intervenções estruturadas e políticas integradas, estima-se que o Espírito Santo poderá perder até 20% de sua capacidade produtiva em áreas agrícolas prioritárias até 2030, comprometendo a segurança alimentar, a renda rural e a conservação dos recursos naturais (ROAM-ES, 2018; MAPA, 2022). Nesse contexto, a transição para modelos de uso do solo sustentáveis representa não apenas uma alternativa viável, mas uma necessidade frente aos desafios da degradação e da crise climática.

## 2.3 Sistemas Silvipastoris (SSP)

Os Sistemas Silvipastoris (SSP) consistem na integração deliberada de árvores, pastagens e animais em uma mesma unidade de manejo, com arranjos espacial e temporal planejados para potencializar sinergias entre os componentes. Ao combinar espécies arbóreas com a produção pecuária, esses sistemas favorecem o uso eficiente do solo, aumentam a diversidade funcional e promovem serviços ecossistêmicos, como a ciclagem de nutrientes, a proteção do solo contra a erosão e o sequestro de carbono (Souza *et al.*, 2021; Embrapa, 2023).

No Espírito Santo, os SSP têm ganhado destaque como alternativa produtiva viável, especialmente em regiões com relevo acidentado e propriedades de base familiar, onde o uso de maquinário intensivo é limitado. Os dados do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER, 2020) indicam que a adoção de SSP em áreas degradadas tem proporcionado ganhos expressivos em produtividade, com retorno econômico entre R$ 3.000 e R$ 5.000 por hectare/ano, além de melhorias na resiliência ambiental. Esses resultados decorrem da maior cobertura do solo, da redução da amplitude térmica, da produção simultânea de madeira, forragem e carne, e da diversificação das fontes de renda.

Do ponto de vista ambiental, os SSP se destacam pelo potencial de restauração funcional dos solos, especialmente em áreas com pastagens degradadas. Estudos demonstram que a presença de árvores nas áreas de pastejo favorece o acúmulo de

carbono orgânico no solo e a maior infiltração de água, promovendo um microclima mais estável e aumentando a produtividade forrageira (SCHEEREN *et al.*, 2023; BOLFE *et al.*, 2024). Em termos de carbono, a soma dos estoques nas árvores, na pastagem e no solo pode ultrapassar 80 t C/ha em SSP bem manejados, enquanto áreas convencionais apresentam valores significativamente menores (ABREU *et al.*, 2023).

Apesar dos benefícios comprovados, a implantação dos SSP ainda enfrenta entraves, como a escassez de assistência técnica continuada, dificuldades no acesso ao crédito rural e barreiras normativas relacionadas ao uso de espécies arbóreas em áreas produtivas (INCAPER, 2023; SEAMA, 2024). A adoção exige planejamento técnico detalhado, especialmente na escolha de espécies, no espaçamento entre linhas e na adaptação ao relevo. No Espírito Santo, políticas públicas como o Programa Reflorestar e o Plano ABC+ têm atuado no fomento a essas práticas, vinculando o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) à adoção de modelos integrados e à recuperação de áreas com potencial produtivo (SEAMA, 2024).

A complexidade estrutural dos SSP, com múltiplas camadas vegetais e heterogeneidade espacial, impõe desafios relevantes à mensuração de variáveis florestais, como diâmetro, altura e volume das árvores. Métodos de inventário tradicionais, embora amplamente utilizados, podem apresentar limitações operacionais e acurácia reduzida nesse contexto (Silva *et al.*, 2020).

## 2.4 Inventario Florestal

De acordo com Husch *et al.* (2003), o inventário florestal é o conjunto de procedimentos técnicos utilizados para levantar, quantificar e qualificar os recursos florestais presentes em uma determinada área. Cunha (2004) cita que é uma etapa essencial para o manejo florestal, pois permite conhecer a estrutura e o potencial produtivo das florestas, subsidiando decisões silviculturais, econômicas e de conservação. Os inventários podem ser classificados segundo diferentes critérios, como o método de obtenção dos dados (censo ou amostragem), a periodicidade (temporário ou contínuo), o nível de detalhamento (exploratório, semi-detalhado ou detalhado) e a abrangência espacial (local, regional ou nacional) (CAMPOS; LEITE, 2017).

As variáveis comumente mensuradas em campo incluem o diâmetro à altura do peito (D) e a altura total (H) das árvores. O D é tradicionalmente medido com fita métrica ou suta, posicionadas a 1,30 metros do solo, enquanto a altura pode ser estimada por meio de instrumentos como hipsômetros, clinômetros ou trenas verticais, baseados em princípios geométricos e trigonométricos (MORAES, 2023). A partir desses dados primários, derivam-se variáveis como área basal, volume comercial e estocagem de biomassa (CUNHA, 2004).

A coleta desses dados requer acesso físico aos indivíduos arbóreos, visada desobstruída e operação por técnicos capacitados. Isso torna o processo intensivo em tempo e mão de obra, além de suscetível a erros de medição, principalmente em ambientes florestais com alta densidade, relevo acidentado ou múltiplos estratos verticais (CAMPOS; LEITE, 2017). Essas dificuldades se acentuam em formações mais complexas, como os Sistemas Silvipastoris (SSP), onde há a coexistência de árvores, pastagens e animais, o que dificulta a distinção entre indivíduos, a visualização das copas e o posicionamento preciso dos instrumentos (COSTA, 2023).

Além das limitações operacionais em campo, o inventário tradicional exige etapas subsequentes de conferência e processamento dos dados. Os registros obtidos em campo são usualmente transferidos manualmente para planilhas eletrônicas, sendo posteriormente analisados por meio de métodos estatísticos manuais ou semiautomáticos, o que pode representar um gargalo em levantamentos realizados em áreas extensas ou com elevada heterogeneidade estrutural (MATANATIVA, 2023). Uma dessas possibilidades para superar tais entraves é o uso de sensores a laser terrestre (LiDAR), considerados uma solução promissora para inventários em ambientes heterogêneos e de difícil acesso (RIVERA *et al.*, 2023).

## 2.5 Inventário com LiDAR Terrestre

O LiDAR (*Light Detection and Ranging*) é uma tecnologia de sensoriamento remoto ativo que mede a distância de um alvo pelo tempo de ida e volta do pulso laser (time-of-flight), convertendo essa medida em coordenadas 3D (x,y,z) do ponto refletor (WEHR; LOHR, 1999; BALTSAVIAS, 1999). Integrado ao *Global Positioning System*

(GPS) e ao *Inertial Measurement Unit* (IMU), e, em plataformas móveis terrestres, ao algoritmo *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) de trajetória, o sistema produz uma nuvem de pontos tridimensional georreferenciada que representa, com alta precisão, o relevo e a estrutura vertical da vegetação (VOSSELMAN; MAAS, 2010).

Diferentemente dos sensores passivos, o LiDAR independe da iluminação solar pode registrar múltiplos retornos (ou a forma de onda completa), permitindo derivar o *Digital Terrain Model* (MDT/DTM), *Digital Surface Model* (MDS/DSM) e modelos de altura de dossel; quando operado ao nível do solo (TLS/MLS/PLS), possibilita ainda a delimitação de fustes e a estimação de métricas individuais como altura e diâmetro para fins de inventário (GIONGO *et al.*, 2010; RIVERA *et al.*, 2023).

Os sistemas LiDAR podem ser agrupados conforme a plataforma de aquisição. O LiDAR orbital (SLS) é acoplado a satélites como o GEDI e o ATLAS/ICESat-2, LiDAR aerotransportado (Airborne Laser Scanning – ALS) é embarcado em aeronaves tripuladas ou aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) e indicado para levantamentos de grandes áreas. Em relação ao LiDAR terrestre (TLS) é estático e acoplado a uma plataforma fixa, como tripé, quando acoplado a veículos terrestres, ferroviários ou embarcações é chamado de MLS (Mobile Laser Scanning – MLS), e há a versão portátil de mão PLS(Personal Laser Scanning) que é conduzido manualmente pelo operador. O uso do LiDAR permite a captura de nuvens de pontos de altíssima densidade e resolução, ideais para análises estruturais detalhadas, como mensuração de árvores individuais e caracterização de estratos da vegetação (Barros *et al.*, 2021; Rivera *et al.*, 2023).

O PLS realiza varreduras completas com maior agilidade de varredura e alta densidade de pontos, registrando milhões de pontos em segundos e oferecendo alta resolução para obter variáveis dendrométricas, como o diâmetro à altura do peito (D), a altura total (H), a área basal e o volume das árvores. Além dessas métricas, possibilita modelar tridimensionalmente troncos, copas e estratos intermediários, contribuindo para obtenção de estimativas com acurácia de biomassa e estoque de carbono. Estudos como os de Machado (2021) e Silva (2025) demonstram sua precisão em ambientes florestais, mesmo sob dosséis densos ou em sistemas multiestrato. As limitações incluem alcance restrito e a necessidade de múltiplos pontos de escaneamento para evitar oclusões, mas,

ainda assim, o PLS tem se consolidado como uma ferramenta eficiente para o monitoramento e a caracterização estrutural de ecossistemas florestais.

Apesar das vantagens, o PLS apresenta limitações práticas que devem ser consideradas. O volume de dados gerado é elevado, exigindo equipamentos com alto desempenho para o processamento. Estima-se, por exemplo, que o processamento completo de 1 hectare possa demandar até 8 horas de computação com GPU (Graphics Processing Unit) dedicada (RIVERA *et al.*, 2023). Além disso, o processamento da nuvem de pontos envolve etapas de filtragem, classificação, normalização e extração das métricas, exigindo do operador domínio do processo e das ferramentas o que pode representar barreiras à adoção em larga escala (BARROS *et al.*, 2023; VASCONCELLOS *et al.*, 2021).

Ainda assim, o uso do PLS em Sistemas Silvipastoris (SSP) representa uma alternativa promissora, ao possibilitar a extração de métricas mesmo em ambientes com múltiplos estratos, elevada sobreposição de copas e acesso físico restrito (SILVA, 2025).

# 3 METODOLOGIA

## 3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Jerônimo Monteiro, estado do Espírito Santo, situada nas coordenadas 20° 50' 27" Sul e 41° 22' 22" Oeste (Figura 1), com altitude de 120 a 900 m. A temperatura média anual do município é de 24,6 °C e precipitação média anual de 1.732,8 mm (GUIMARÃES; CAIADO; SILVA, 2020). O solo da região é caracterizado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (SILVA *et al.*, 2021). De acordo com a classificação de Koppen, o clima da região é do tipo Aw, caracterizado por apresentar clima tropical chuvoso, com estação seca no inverno (ALVARES *et al.*, 2013)

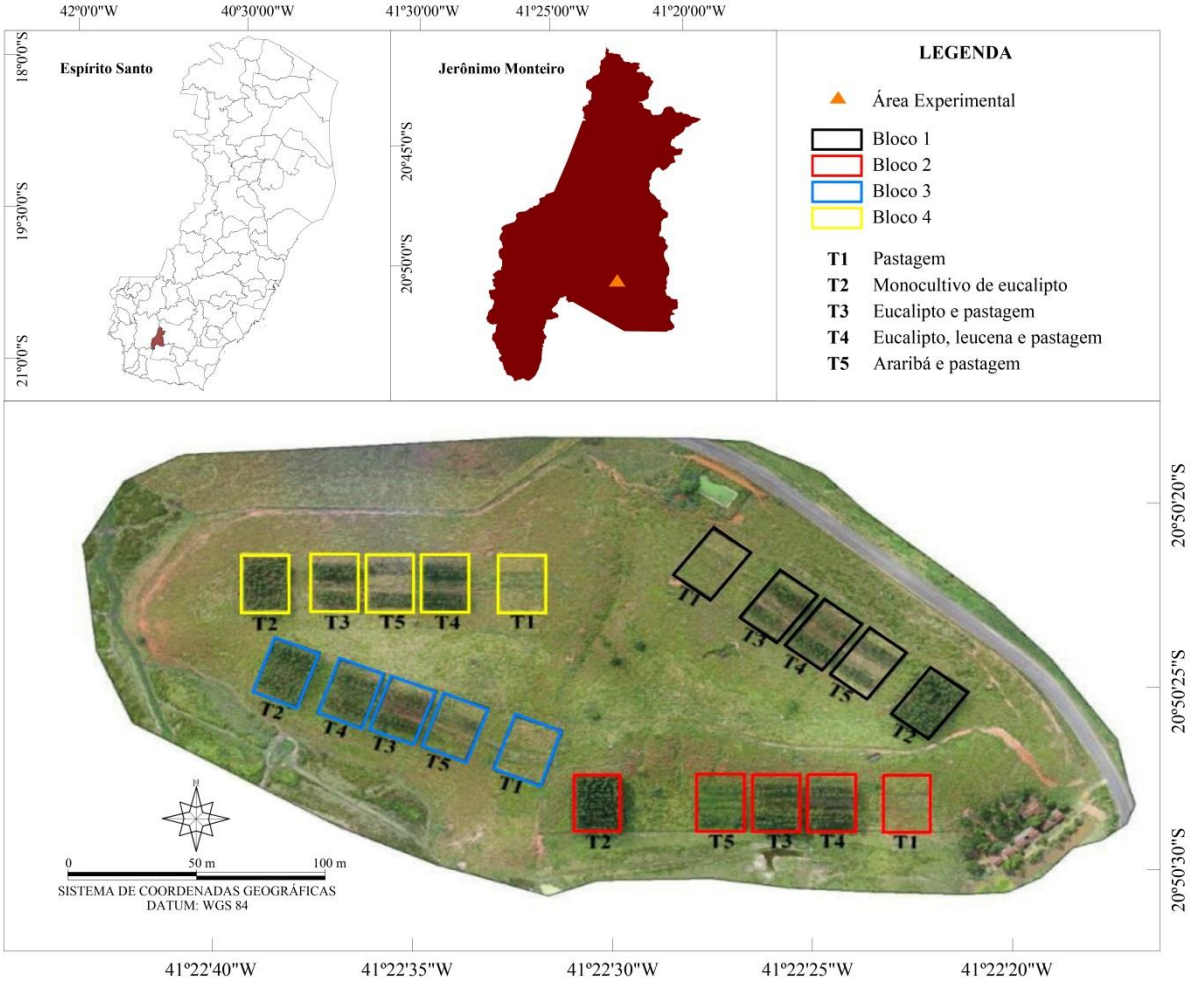


Figura 1 – Localização da área de estudo

Fonte: Silva *et al.* (2021).

Apesar da área experimental ser composta por diferentes sistemas silvipastoris conduzidos sob delineamento em blocos casualizados, este estudo foi desenvolvido exclusivamente no Bloco Sul (Bloco II) localizado na encosta sul do terreno com uma inclinação de 22º, avaliando-se apenas o Tratamento 4 (T4), que corresponde ao Sistema Silvipastoril composto por capim marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu), eucalipto (*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*) e leucena (*Leucaena leucocephala*).

O arranjo experimental do tratamento é formado por dois agrupamentos de três fileiras de eucalipto, plantadas no espaçamento de 3,0 × 2,0 m, separados por uma faixa de 17,0 m ocupada por pastagem. Nesta faixa, foram inseridas duas fileiras de leucena, dispostas em espaçamento de 1,0 × 0,75 m, com distanciamento de 3,0 m entre os conjuntos. A densidade final é de 653 árvores por hectare para o eucalipto e 4.444 árvores por hectare para a leucena. No entanto, conforme registrado por Costa (2023), a leucena não se estabeleceu na área devido a ataques de formigas cortadeiras após o plantio, sendo desconsiderada nas análises deste estudo. A parcela avaliada possui área de 1.750 m² (50 × 35 m).

## 3.2 Coleta de dados

### 3.2.1. Inventário florestal

Neste estudo, foram utilizados os dados de inventário florestal tradicional (IFT) previamente coletados por Costa (2023), na mesma área experimental, aos 60 meses de idade do plantio. Foi feito um censo, com medições de todas as 89 árvores de eucalipto presentes no Tratamento 4, no Bloco II. A medição do foi realizada no diâmetro à altura do peito (D), medido a 1,3m do solo com fita diamétrica, e altura total (H), com uso de clinômetro Suunto. A Tabela 1 demonstra a distribuição do D e da H obtidos no IFT.

Tabela 1 - Distribuição das árvores de eucalipto amostradas no inventário tradicional de um sistema silvipastoril.

| Centro de Classe D (cm) | Centro de classe altura (m) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 9,5 | 14,5 | 19,5 | 24,5 | 29,5 | **Total** |
| 7,5 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 10,5 | 1 | 8 | 2 | 1 | 0 | 12 |
| 13,5 | 0 | 5 | 13 | 0 | 0 | 18 |
| 16,5 | 0 | 0 | 15 | 5 | 0 | 20 |
| 19,5 | 0 | 1 | 12 | 8 | 2 | 23 |
| 22,5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 0 | 10 |
| 25,5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| **Total** | **5** | **15** | **47** | **20** | **2** | **89** |

Fonte: autor.

### 3.2.2. Coleta de dados com LiDAR portátil (PLS)

A coleta de dados tridimensionais foi realizada com o equipamento de varredura a laser terrestre ZEB Horizon – modelo GS_510254 (Figura 2), um sistema portátil manual do tipo *Hand-Held Mobile Laser Scanner* (HMLS), com registro automático das varreduras.

Figura 2 - Equipamento de varredura a laser terrestre ZEB Horizon utilizado na coleta com PLS

Fonte: Machado (2021).

O sensor possui taxa de medição de 300 mil pontos por segundo, alcance de até 100 metros e precisão de um a três centímetros (CPE TECNOLOGIA, 2021), sendo adequado para levantamentos em ambientes com vegetação densa e estruturas complexas, como os sistemas silvipastoris analisados neste estudo.

O equipamento foi conduzido sobre a área, e a trajetória de escaneamento foi conduzida em formato de "loop fechado", ou seja, iniciando e finalizando no mesmo ponto, a fim de garantir o correto registro espacial do trajeto percorrido (Figura 3). Durante o levantamento, o operador executou trajetos em zigue zague entre as linhas de plantio, garantindo sobreposição entre as varreduras e cobertura adequada da vegetação-alvo.

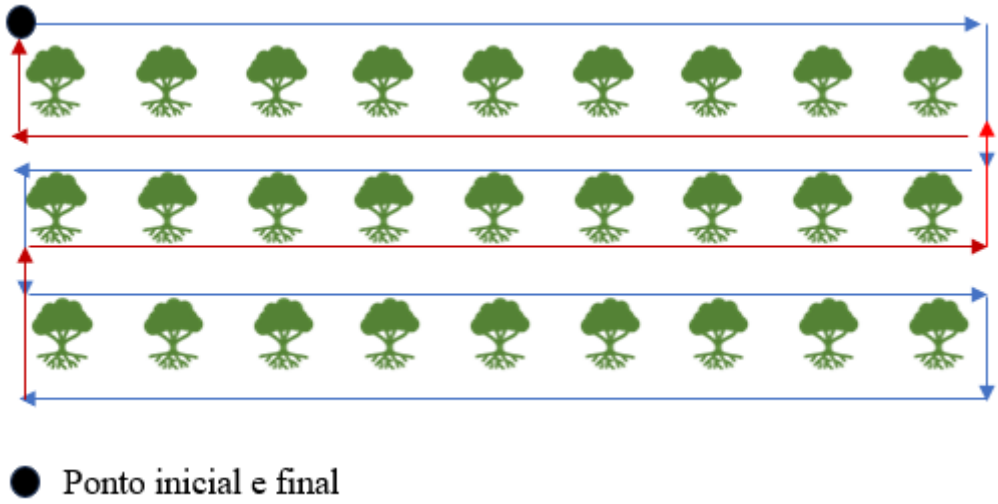


Figura 3 - Caminhamento em "loop fechado".

Fonte: autor.

### 3.3 Processamento dos dados da nuvem PLS

A nuvem de pontos bruta obtida com o escaneamento PLS foi processada inicialmente no software GeoSLAM Hub® (GEOSLAM, 2023) para registro e alinhamento das varreduras, resultando em uma nuvem densa correspondente ao Tratamento 4 (T4), com densidade média de 19.580 pts·m$^{-2}$ (35,79 milhões de pontos distribuídos em 1.828 m²). Posteriormente, os dados foram importados para o ambiente R (R CORE TEAM, 2025), onde foram submetidos a uma série de etapas utilizando o pacote lidR (ROUSSEL; AUTY, 2022).

A classificação dos pontos de solo foi realizada por meio do algoritmo Cloth Simulation Filter (CSF) implementado na função classify_ground() do lidR. O CSF simula a queda de um pano sobre a nuvem de pontos invertida, identificando como "solo" os pontos de contato com esse pano. Os parâmetros utilizados foram: sloop_smooth = TRUE, class_threshold = 0.5, cloth_resolution = 0.1 e rigidness = 2, ajustados com base na rugosidade do terreno da área escaneada. Esse método é especialmente indicado para terrenos inclinados ou irregulares, como é o caso da área de estudo.

A partir da classificação dos pontos do solo, foi gerado o Modelo Digital do Terreno (MDT) por meio do interpolador knnidw() (K-Nearest Neighbors Inverse Distance Weighting), que calcula a elevação do solo a partir dos pontos classificados, considerando os vizinhos mais próximos e ponderando pela distância. O MDT resultante foi utilizado para normalizar a nuvem de pontos por meio da função normalize_height(), ou seja, ajustar todas as elevações em relação à superfície do terreno (etapa fundamental para mensurações verticais padronizadas).

O MDT foi posteriormente rasterizado com resolução de 0,2 m, utilizando o algoritmo point-to-raster (p2r()), que atribui a cada célula do raster o valor de altura máxima dos pontos naquele pixel. Isso permitiu a geração do modelo de altura do dossel (CHM – Canopy Height Model) e a visualização do gradiente vertical da vegetação. A Figura 4 ilustra cada etapa do pré-processamento, desde a classificação dos pontos do solo (A), a geração do MDT (B) e a nuvem normalizada com coloração por faixa de altura (C), evidenciando a estrutura vertical do dossel.

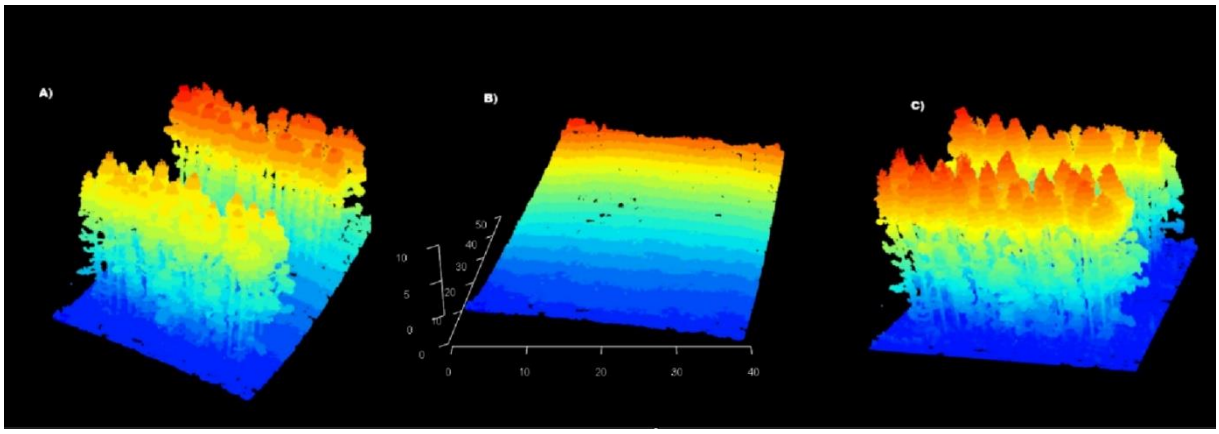


Figura 4 - Classificação dos pontos do terreno (A); Modelo digital do terreno (B) e Nuvem de pontos normalizada (C).

Fonte: autor.

A nuvem normalizada foi processada com o auxílio do pacote TreeLS (CONTO, 2023) para detecção automática dos troncos e extração das alturas. A avaliação dos resultados de detecção foi realizada conforme Almeida *et al.* (2021), calculando o a porcentagem das árvores detectadas corretamente ($D_c$) e os erros de omissão relativa ($E_O$) e comissão ($E_c$):

$$D_c = \left(\frac{N_d}{N_o}\right) 100 \quad (1)$$

$$E_O = \left(\frac{N_{nd}}{N_o}\right) 100 \quad (2)$$

$$E_c = \left(\frac{N_{id}}{N_o}\right) 100 \quad (3)$$

Em que: $N_d$ = número de árvores detectadas corretamente, $N_{nd}$ = número de árvores não detectadas, $N_{id}$ = número de árvores detectadas onde não havia árvores no campo (detectadas incorretamente) e $N_o$ = número de árvores observadas no campo.

A estimação da altura total das árvores foi realizada a partir dos pontos classificados como pertencentes aos troncos e copas dos indivíduos detectados. Para isso, foi aplicada a função tlsInventory() do pacote TreeLS (CONTO, 2023). Essa função combina os dados de posição dos fustes com os pontos identificados como parte de cada árvore, calculando a altura como a diferença entre a coordenada Z máxima e mínima de cada indivíduo (altura relativa ao solo após normalização).

Além da altura total, foram estimadas outras métricas por árvore, como a posição XY dos fustes e o número total de indivíduos detectados. As estimativas extraídas foram exportadas em planilhas no formato .xlsx para posterior comparação com os dados do inventário tradicional, com vistas à análise da acurácia.

### 3.4 Calibração ou predição inversa das alturas totais obtidas pelo PLS

A fim de calibrar os resultados, foi ajustado um modelo de regressão linear (Expressão 4) utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) a partir da função lm do software R.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

Em que a $Y_i$: altura total (m) da i-ésima árvore obtida pelo clinômetro; $X_i$: altura total (m) da i-ésima árvore obtida pelo TreeLS, $\beta_k$: parâmetros do modelo; $\varepsilon_i$: erro aleatório.

As estimativas obtidas pelo uso da Equação gerada após o ajuste do modelo (Expressão 4) foram avaliadas por meio das seguintes estatísticas:

a) Coeficiente de determinação ($R^2$)

$$R^2 = \frac{\text{SQRegressão}}{\text{SQTotal}} \quad (5)$$

Em que: SQRegressão = soma de quadrados da regressão; SQTotal = soma de quadrados total.

b) Erro padrão da estimativa (Syx)

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-p}} \qquad S_{yx}(\%) = \frac{S_{yx}}{\bar{Y}} 100 \quad (6)$$

Em que: n = número de observações; p = número de parâmetros do modelo.

### 3.5 Análise dos dados

Como a estimação da altura total obtida com o clinômetro, que é um método indireto, optou-se por substituir a raiz do quadrado médio do erro (RMSE) pela raiz do quadrado médio das diferenças (RQMD – Expressão 7). Nesse cálculo, os valores obtidos pelo clinômetro foram considerados como $Y$ (valores de referência) e os valores obtidos pelo PLS, via algoritmo TreeLS, como $\hat{Y}$ (valores estimados). Esses valores foram utilizados também para calcular o viés (Expressão 8) e MD (Expressão 9). Essas estatísticas, e o gráfico dos resíduos percentuais, foram utilizadas para avaliar a acurácia das estimativas de H obtidas pelo TreeLS e a predição inversa.

a) Raiz do quadrado médio das diferenças (RQMD):

$$\text{RQMD} = \sqrt{\frac{\sum_{i}^{n}(\boldsymbol{Y_i} - \hat{\text{Y}}_i)^2}{n}} \tag{7}$$

$$\text{RQMD}(\%) = \frac{\text{RQMD}}{\bar{\text{Y}}}100$$

b) Viés (V):

$$\boldsymbol{V} = \frac{\sum_{i}^{n}(\boldsymbol{Y_i} - \hat{\text{Y}}_i)}{\boldsymbol{n}} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{V}(\%) = \left(\frac{\boldsymbol{V}}{\bar{\boldsymbol{Y}}}\right)100$$

c) Média das diferenças (MD):

$$MD = \frac{\sum_{i}^{n}|\boldsymbol{Y_i} - \hat{\text{Y}}_i|}{n} \tag{9}$$

$$MD(\%) = \left(\frac{MDA}{\bar{\text{Y}}}\right)100$$

Em que: RMDQ = Raiz do quadrado médio das diferenças (m); V = viés (m); MD = Média das diferenças (m).

# 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1 Detecção de árvores usando o TreeLS

A partir da nuvem normalizada, procedeu-se à detecção dos troncos e à extração da altura total das árvores por meio dos algoritmos do pacote TreeLS (Figura 5).

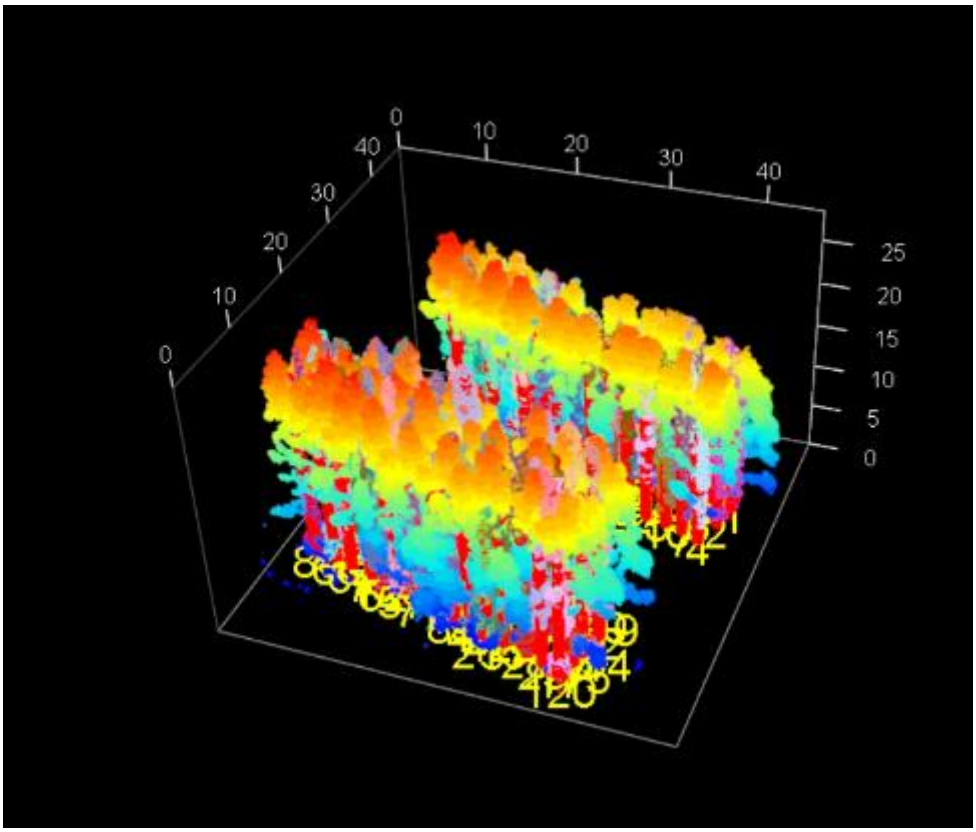


Figura 5 - Nuvem de pontos da área de estudo e identificação das árvores de eucalipto após o processamento dos dados.

Fonte: autor.

Com o processamento da nuvem de pontos foram detectadas 90 árvores. Os indivíduos foram identificados e numerados automaticamente pelo algoritmo, com rótulos que não correspondem aos do inventário de campo. Para a comparação, realizou-se pareamento espacial 1:1 entre detecções e árvores do inventário (89 no campo), resultando em 80 pares válidos. Assim, nove árvores não foram detectadas (erro de omissão) e 10 detecções não tinham correspondente em campo (erro de

comissão). Na Tabela 3 estão os valores das estatísticas para detecção individual das árvores de eucalipto em um sistema silvipastoril.

Tabela 3 - Estatísticas de detecção individual das árvores de eucalipto em um sistema silvipastoril.

| Estatísticas | Valor (%) |
|---|---|
| Detecções corretas ($D_c$) | 89,89% |
| Erro de omissão ($E_o$) | 10,11% |
| Erro de comissão ($E_c$) | 11,24% |

Fonte: autor.

Paulo (2023), na mesma área de estudo, utilizando a fotogrametria área digital (FAD), obteve $D_c$ de 68,8%, $E_o$ de 31,1% e $E_c$ de 8,8%. Enquanto o TreeLS detecta posições de fuste, a FAD identifica topos de copa. Em povoamento com copas adensadas, a FAD, por não penetrar o dossel, apresentando maior erro de omissão (GUIMARÃES *et al.*, 2020).

Em outro trabalho usando o PLS com a detecção por meio do TreeLS, Machado *et al.* (2025) em uma área de *Eucalyptus grandis* (espaçamento 3×2 m em terreno plano), detectou 100% dos fustes nas densidades de 36.000 e 1.000 pts·m$^{-2}$, 98,6% com 500–100 pts·m$^{-2}$ e 23,9% com 10 pts·m$^{-2}$, evidenciando o papel da densidade de pontos e da cobertura das entrelinhas na taxa de detecção correta. Em floresta de *Pinus ponderosa*, Donager *et al.* (2021) reportaram 94,7% de detecção média do PLS ($E_o$ de 5,3% e $E_c$ de 1,8%), reforçando a vantagem do móvel multiângulo para reduzir oclusões.

## 4.2 Análise da acurácia das estimativas de altura total de árvores de eucalipto

Na Tabela 4 são apresentados os valores das estatísticas de acurácia para as estimativas de altura total de árvores de eucalipto com dados LiDAR. O V% negativo obtido, caracteriza uma superestimação sistemática das alturas encontradas nas árvores menores, o algoritmo tende a considerar a altura máxima, na maioria das vezes, alturas referentes a troncos, galhos e copas de árvores vizinhas do estrato superior (Machado, 2023). Ainda, nota-se um valor considerável de RQMD e MD, o que acarretou em medidas de baixa acurácia.

Tabela 4 – Estatísticas de acurácia para as estimativas de altura total de árvore de eucalipto com dados LiDAR portátil. Em que: RQMD = raiz do quadrado médio das diferenças; V = viés, MD = média das diferenças absolutas.

| Método | RQMD | RQMDQ (%) | V (m) | V (%) | MD (m) | MD (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PLS | 5,56 | 28,71 | -3,56 | -18,39 | 4,06 | 20,96 |

Fonte: autor.

Para identificar a origem dessa baixa acurácia e alto viés, foi realizada uma análise estratificada por classes de altura total (Tabela 5). Observa-se que os maiores erros de superestimação ocorrem nas classes inferiores (9,5 m e 14,5 m), com altos valores de V%. À medida que a altura total das árvores aumenta, o viés torna-se menos pronunciado, chegando a valores positivos na classe mais alta (29,5 m), indicando leve subestimação, o que evidencia uma mudança de tendência nas faixas superiores.

Tabela 5 – Estatísticas de acurácia para as estimativas de altura total de árvores de eucalipto com dados LiDAR portátil para diferentes classes de altura total (m).

| Centro de classe altura total (m) | RQMD (m) | RQMDQ (%) | V (m) | V (%) | MD (m) | MD (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 9,5 | 12,33 | 126,65 | -13,50 | -138,76 | 13,50 | 138,75 |
| 14,5 | 7,80 | 53,83 | -8,03 | -54,02 | 8,03 | 55,4 |
| 19,5 | 1,12 | 5,60 | -2,30 | -11,46 | 7,48 | 37,35 |
| 24,5 | 1,50 | 6,33 | -0,50 | -2,13 | 10,10 | 42,46 |
| 29,5 | 3,03 | 10,80 | 3,02 | 10,79 | 8,95 | 31,90 |

Fonte: autor.

Os resultados demostraram menor acurácia aos obtidos em cenários PLS bem controlados e com alta densidade de pontos obtidos em outros estudos. Machado *et al.* (2025), em uma área de *Eucalyptus grandis*, com espaçamento 3×2 m, encontraram RMSE de 14,4% e V de −1,4 % pelo método de detecção automática, e RMSE de 4,2% e V de 1,5% para o método semiautomático com densidade de 36.000 pts/m$^{-2}$. Estes autores, quando reduziram a densidade para ~10 pts/m², encontraram RMSE de 28,4% e V de 18,4%, enquanto o semi-automático RMSE de 17,1% e V de 14,2%. Solares-Canal *et al.* (2023) em um plantio *Eucalyptus globulus* adulto, destaca a vantagem do PLS sobre o TLS para H, reportando RMSE em metros (PLS: 3,415 m; TLS: 10,712 m),

sem normalização em %, o que limita comparações proporcionais, mas sustenta a escolha por plataformas portáteis em povoamentos plantados.

O gráfico das diferenças percentuais dos resíduos (Figura 6) explica a diferença entre a H campo com a H PLS. A predominância de valores negativos no eixo das ordenadas indica que, na maior parte dos casos, o PLS superestimou as alturas das árvores e aumentou a variabilidade das diferenças em relação às medições de campo. Isso corrobora o valor das estatísticas de acurácia (Tabela 3), apresentando baixa acurácia nas estimativas.

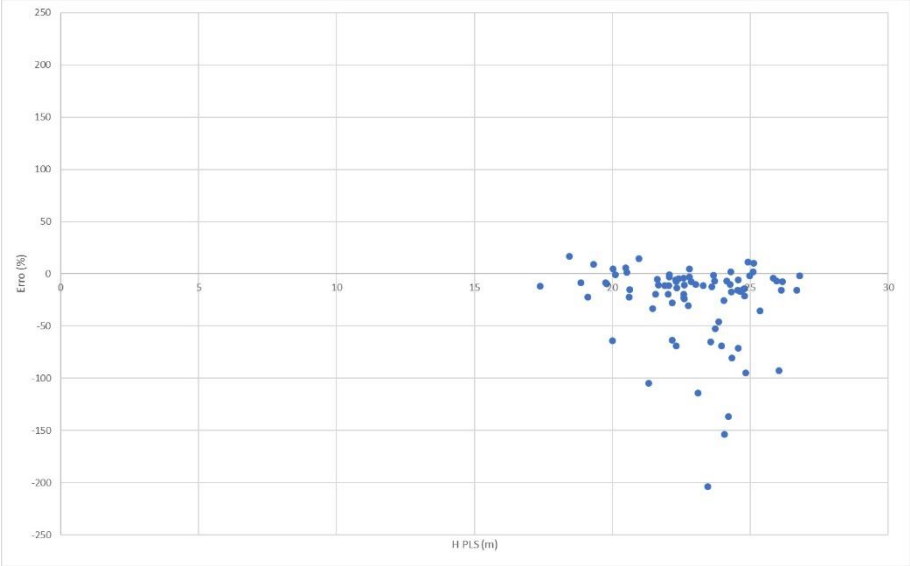


Figura 6 – Distribuição das diferenças percentuais em função das alturas totais obtidas pelo LiDAR Móvel (PLS)

Fonte: autor.

## 4.3 Análise da acurácia das estimativas de altura total de árvores de eucalipto estimadas por meio da predição inversa

Verificou-se um valor relativamente grande para o viés (Tabela 3) e, por isso, optou-se por calibrar as estimativas aplicando a predição inversa. Os coeficientes estimados e as estatísticas de ajuste do modelo de predição inversa estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Estimativa dos parâmetros e estatísticas do ajuste do modelo obtidos para calibração das estimativas.

| Coeficientes $\hat{\beta}_0$ | $\hat{\beta}_1$ | $R^2$ | Syx (%) |
|---|---|---|---|
| 7,6586ns | 0,5093* | 0,058 | 21,72 |

Em que: * e ns: significativo e não significativo a 5% de significância pelo teste t.
Fonte: autor.

As estatísticas obtidas a partir das estimativas da predição inversa para estimar a altura das árvores estão representados na Tabela 7 e na Figura 7.

Tabela 7 - Resultados e estatísticas obtidas a partir da predição inversa.

| RQMD (m) | RQMD (%) | V (m) | V (%) | MD | MD (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 4,15 | 21,44 | ≈0,00 | 0,00 | 3,21 | 16,58 |

Fonte: autor.

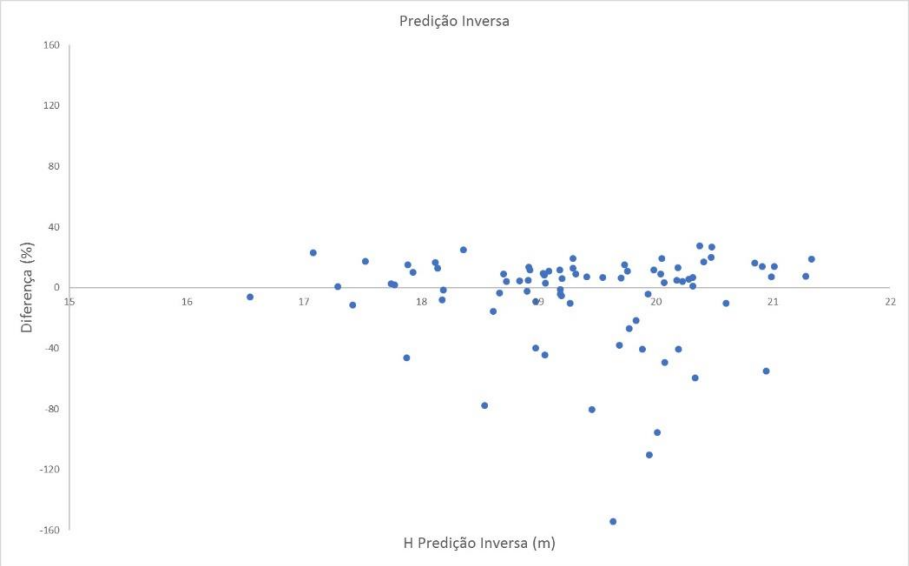


Figura 7 – Distribuição das diferenças percentuais em função das alturas totais obtidas pela predição inversa.
Fonte: autor.

Analisando os resultados da predição inversa (Tabela 7 e Figura 7), verificou-se a melhoria na acurácia em relação as estimativas obtidas da nuvem de pontos. As estimativas obtidas pela Predição Inversa (Tabela 4) apresentaram melhor desempenho, verificando-se uma redução de 25,3% no RQMD, de 20,9% para MD e 100% do V. Esses resultados indicam uma maior exatidão e grau de concordância entre os valores

estimados e os de referência após calibração, além de eliminar a tendência. Esse resultado corrobora com os resultados encontrados por Carvalho (2018).

# 5 CONCLUSÕES

O PLS/TreeLS apresentou bom desempenho de detecção automática, porém não reconheceu todos os indivíduos da parcela. As estimativas de altura total (H) obtidas pelo PLS apresentaram viés e diferenças percentuais elevadas, com superestimação mais acentuada em árvores menores. No entanto, a aplicação da predição inversa permitiu calibrar os resultados, aumentando a acurácia e eliminando o viés das estimativas.

# 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ABREU, M. R.; STEIN, A. de Q.; MISSIO, F. J.; AMARAL, P. V. M. do; FREITAS, E. E. **Heterogeneidade estrutural e complexidade econômica na agropecuária brasileira.** Brasília, DF: IPEA, 2023.

ALMEIDA, A.; GONÇALVES, F.; SILVA, G.; MENDONÇA, A.; GONZAGA, M.; SILVA, J.; SOUZA, R.; LEITE, I.; NEVES, K.; BOENO, M.; SOUSA, B. Individual tree detection and qualitative inventory of a *Eucalyptus sp.* stand using UAV photogrammetry data. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3655, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/rs13183655.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, Dez. 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

BALBINO, L. C.; KICHEL, A. N.; BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. Sistemas de integração: o que são, suas vantagens e limitações. In: BUNGENSTAB, D. J. (Ed.). Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável. 2. ed. Brasília, DF: **Embrapa**, 2012. p. 11–18.

BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2–3, p. 199–214, 1999. DOI: 10.1016/S0924-2716(99)00015-5.

BARROS, Q. S.; RODRIGUES, N. M. M.; PINHEIRO, R. de M.; FERREIRA, E. J. L. Potencial da tecnologia LiDAR terrestre na área florestal. **Scientia Naturalis** (Rio Branco), v. 5, n. 1, p. 419–431, 2023. DOI: 10.29327/269504.5.1-29.

BEZERRA, P. H. S. C.; OLIVEIRA, Y. M. M. O Programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC). Brasília, DF: **Embrapa**, 2012. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/944513/o-programa-agricultura-de-baixo-carbono-abc

BOLFE, É. L.; VICTORIA, D. C.; SANO, E. E.; SILVA, G. B. S.; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; OLIVEIRA, A. F. Potential for agricultural expansion in degraded pasture lands in Brazil based on geospatial databases. **Land**, [Basel], v. 13, n. 2, p. 200, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/land13020200.

BRASIL. Serviço Florestal Brasileiro**.** Inventário Florestal Nacional: principais resultados – ano 2019. Brasília, DF: **SFB**, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/sfb/pt-br.

BRITO, T. T.; PANTOJA, P. H. B.; ZIVIANI, G. G. C**.** Atlas climatológico do Espírito Santo. Vitória, ES: **Incaper**, 2024. Disponível em: https://meteorologia.incaper.es.gov.br/atlas_clima_es.

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

CARVALHO, R. C. **Predição inversa aplicada a medições de altura comercial na região Amazônica**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) — Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2018.

CONCEIÇÃO, J. C. P. R. da. NT 32 – Integração pecuária-lavoura**:** avanços e principais desafios**.** Brasília, DF: **MAPA**, 2022.

COSTA, E. R. **Quantificação de volume, biomassa e carbono do fuste em diferentes sistemas silvipastoris no sul do Espírito Santo**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) — Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2023.

COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M. Erros de medição de altura em povoamentos de Eucalyptus em região plana. Piracicaba, SP: **IPEF**, Circular Técnica n. 39, p. 21–31, 1988. Disponível em: https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr39/cap03.pdf. Acesso em: 05 jul. 2025.

CPE TECNOLOGIA. **Laser Scanner GEOSLAM – ZEB HORIZON**. 2021. Disponível em: https://www.cpetecnologia.com.br/produto/679/zeb-horizon.

CUNHA, U. S. **Dendrometria e inventário florestal**. Goiânia: UFG, 2004. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/284/o/dendroinv.pdf. Acesso em: 1 jul. 2025

DALLA CORTE, A. P.; VALE, R. S.; SANTOS, R. M.; SILVA, T. S.; OLIVEIRA, M. A.; PEREIRA, L. F. Measuring Individual Tree Diameter and Height Using GatorEye High-Density UAV-LiDAR in an Integrated Crop-Livestock-Forest System. **Remote Sensing**, [Basel], v. 12, n. 5, art. 863, 2020. DOI: 10.3390/rs12050863.

DONAGER, J. J.; SÁNCHEZ MEADOR, A. J.; BLACKBURN, R. C. Adjudicating perspectives on forest structure: How do airborne, terrestrial, and mobile LiDAR-derived estimates compare? **Remote Sensing**, v. 13, n. 12, p. 2297, 2021. DOI: 10.3390/rs13122297.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistemas silvipastoris: produção animal com benefícios ambientais. Brasília: **Embrapa**, 2023. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1012584

ESPÍRITO SANTO. Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN**). Relatório anual de monitoramento e avaliação** – Ciclo 2023. Vitória, ES: **IJSN**, 2023. Disponível em: Relatório IJSN 2023.

ESPÍRITO SANTO. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEAMA). Programa Reflorestar. Vitória, ES: **SEAMA**, [2025]. Disponível em: Portal Reflorestar.

ESPÍRITO SANTO. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEAMA. Sumário executivo do plano de adaptação de mudanças climáticas do Espírito Santo. Vitória, ES: **SEAMA**, [2025]. Disponível em: Plano Clima ES.

FAO. The State of the World's Forests 2022: Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies. Rome: **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2022. Disponível em: FAO Report 2022.

GALVEAS, R. C.; SILVA, G. F.; GONÇALVES, F. G.; PEZZOPANE, J. R. M.; CALDEIRA, M. V. W. Plano de desenvolvimento florestal do Estado do Espírito Santo "Madeira – ES". Vitória, ES: **CEDAGRO**, 2024. 52 p. Disponível em: Plano Madeira – ES.

GARCÃO, C. A.; SILVA, G. F.; SANTOS, L. F.; OLIVEIRA, M. C.; NASCIMENTO, R. L. Uso do LiDAR na estimativa de atributos florestais. **ISPRS Archives**, v. 48, p. 457–464, 2023.

GEOSLAM. ZEB HORIZON: **The ultimate mobile mapping solution.** 2023a. Disponível em: GeoSLAM ZEB Horizon. Acesso em: 08 jul. 2025.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. do A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira,** [S. l.], v. 30, n. 63, p. 231, 2010. DOI: 10.4336/2010.pfb.30.63.231.

GUIMARÃES, M. A. P.; CAIADO, L. H. L.; SILVA, G. S. PROATER – Programa de assistência técnica e extensão rural de Jerônimo Monteiro – ES (2020–2023): planejamento e programação de ações. Vitória, ES: **INCAPER**, 2020.

GUIMARÃES, N. *et al*. **Forestry** Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: A Review Focusing on the Data, Processing and Potentialities**. Remote Sensing**, v.12, n.6, 1046, 2020. DOI: 10.3390/rs12061046.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR., J. A. **Forest Mensuration**. 4. ed. New Jersey: Wiley, 2003.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual 2024**. Brasília, DF: **IBÁ**, 2024. Disponível em: https://iba.org/relatorio2024.pdf

IUCN; SEAMA – Estado do Espírito Santo. Avaliação das oportunidades de restauração de paisagens e florestas para o Estado do Espírito Santo (ROAM-ES). Vitória: **SEAMA/IUCN**, 2018. Disponível em: https://www.seama.es.gov.br/Media/Seama/Documentos/ROAM-ES%202018.pdf.

KASPI, O.; YOSIPOF, A.; SENDEROWITZ, H. RANdom SAmple Consensus (RANSAC) algorithm for material-informatics: application to photovoltaic solar cells. **Journal of Cheminformatics**, v. 9, n. 1, p. 34, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s13321-017-0223-1.

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

MACHADO, M. D. **Uso de equipamentos analógicos, digitais e scanner laser na estimação de variáveis dendrométricas.** 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2023.

MACHADO, M. D.; SILVA, G. F. da; ALMEIDA, A. Q. de; MENDONÇA, A. R. de; MARTINS-NETO, R. P.; SCHIMALSKI, M. B. Estimating Position, Diameter at Breast Height, and Total Height of Eucalyptus Trees Using Portable Laser Scanning. **Remote Sensing**, v. 17, n. 16, art. 2904, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/rs17162904

MAPBIOMAS. **Carbono no solo (0–30 cm) – Coleção 2**. 2021. Disponível em: https://plataforma.brasil.mapbiomas.org..

MAPBIOMAS. **Destaques do mapeamento anual de cobertura e uso da terra no Brasil de 1985 a 2023 – Coleção 9**. 2025. Disponível em: https://data.mapbiomas.org.

MAPBIOMAS. **Perda de vegetação nativa por bioma – Coleção 9.** 2025. Disponível em: https://plataforma.brasil.mapbiomas.org.

MORAES, M**. Inventário florestal: conheça tudo sobre essa atividade.** 2020. Disponível em: https://agropos.com.br/inventario-florestal/.

PAULO, M. V. **Detecção individual de árvores e estimativa de altura total em um sistema silvipastoril de eucalipto e capim marandu por meio da fotogrametria aérea digital.** 2023. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) — Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2023.

R CORE TEAM. **The R project for statistical computing.** Vienna: R Core Team, 2025. Disponível em: https://www.r-project.org.

REGULATION – 2023/1115 – EN – EUR-Lex**. Regulation (EU) 2023/1115 of the European Parliament and of the Council.** Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1115/oj.

RIVERA, G,; PORRAS, R,l; FLORENCIA, R,; SÁNCHEZ-SOLÍS, J. P,. LiDAR applications in precision agriculture for cultivating crops: A review of recent advances. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 207, art. 107737, 2023. DOI:

ROUSSEL, J.; AUTY, D. **Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications**. R Package Version 3.1.4, 2022. Disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/lidR/lidR.pdf. Acesso em: 08 jun. 2025.

SCHETTINI, B. L. S.; SILVA, G. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; GONÇALVES, F. G.; CALDEIRA, M. V. W. Sistemas silvipastoris com eucalipto: estocagem de carbono em diferentes espaçamentos e clones. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 3, p. 1047–1062, 2021.

SILVA, G. F.; MENDONÇA, A. R.; TORRES, C. M. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; SILVA, J. P. M.; ROCHA, Q. S.; RODRIGUES, N. M. M.; SILVA, E. F.; BARROS, Q. S. **Avaliação econômica de diferentes modelos de sistemas silvipastoris**. In**:**

GONÇALVES, F. G.; CALDEIRA, M. V. W.; SILVA, G. F.; SOUZA, G. S**.** (Orgs.). Sistemas Integrados de Produção: pesquisa e desenvolvimento de tecnologias. 1. ed. Guajará, SP: **Científica Digital**, 2021. cap. 12, p. 217–252.

SILVA, V. A. da; SILVA, G. F. da; ALMEIDA, A. Q.; COSENZA, D. N.; MENDONÇA, A. R. de; LAVAGNOLI, G. L. da S. Single tree detection algorithm oriented to plantation forest inventories using mobile laser scanning data. **Revista DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, v. 18, n. 63, e3562, 2025. DOI: 10.55905/rdelosv18.n63-072.

SILVA, A. A.; SCHMITT FILHO, A. L.; KAZAMA, D. C. S.; LOSS, A.; SOUZA, M.; PICCOLO, M. C.; FARLEY, J.; SINISGALLI, P. A. de A. Estoques de carbono e nitrogênio no Sistema Silvipastoril com Núcleos: a nucleação aplicada viabilizando a pecuária de baixo carbono. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 9, n. 10, p. e2799108589, 2020. DOI: .

SOLARES-CANAL, A.; ALONSO, L.; PICOS, J.; ARMESTO, J. Automatic tree detection and attribute characterization using portable terrestrial LiDAR. **Trees**, v. 37, p. 963–979, 2023. DOI: 10.1007/s00468-023-02399-0.

TUPINAMBÁ-SIMÕES, F.; PASCUAL, A.; GUERRA-HERNÁNDEZ, J.; ORDÓÑEZ, C.; DE CONTO, T.; BRAVO, F. Assessing the Performance of a Handheld Laser Scanning System for Individual Tree Mapping—A Mixed Forests Showcase in Spain. **Remote Sensing**, v. 15, n. 5, art. 1169, 2023. DOI: 10.3390/rs15051169.

VASCONCELLOS, B. N. de; HOLLER, W. A.; DALLA CORTE, A. P.; PESCK, V. A. Guia metodológico para uso do laser scanner terrestre (TLS) em ambiente florestal. Colombo**: Embrapa Florestas**, 2021. 18 p. (Comunicado técnico, 467). Disponível em: Guia TLS – Embrapa Florestas.

VOSSELMAN, G.; MAAS, H.-G. (Eds.). **Airborne and terrestrial laser scanning**. Dunbeath: Whittles Publishing, 2010. ISBN 978-1904445876.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning—an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,** v. 54, n. 2–3, p. 68–82, 1999. DOI: 10.1016/S0924-2716(99)00011-8.