

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

LUCAS JOSÉ TEODORO LOBATO

ESTIMATIVA DO VOLUME DE MADEIRA EMPILHADA UTILIZANDO
PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2021

LUCAS JOSÉ TEODORO LOBATO

ESTIMATIVA DO VOLUME DE MADEIRA EMPILHADA UTILIZANDO
PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

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.

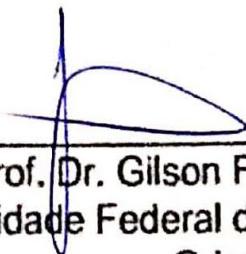
JERÔNIMO MONTERIO
ESPIRÍTO SANTO
2021

ESTIMATIVA DO VOLUME DE MADEIRA EMPILHADA UTILIZANDO PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

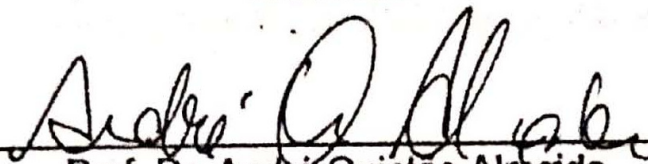
Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da
Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título
de Engenheiro Florestal.

Aprovada em 14 de maio de 2021

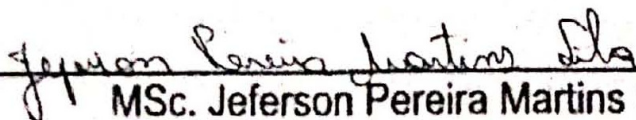
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Orientador



Prof. Dr. André Quintão Almeida
Universidade Federal de Sergipe - UFS
Examinador



MSc. Jeferson Pereira Martins Silva
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre estar ao meu lado, e por ter permitido que o sonho de fazer uma faculdade se tornasse realidade, agradeço pelas pessoas incríveis que Ele colocou no meu caminho no decorrer da trajetória fazendo com que o percurso fosse um pouco menos complicado.

Aos meus pais, pois sempre confiaram em mim e nas minhas decisões, a toda a minha família pelas palavras de incentivo e principalmente ao meu irmão Douglas por ter acreditado no meu potencial desde o início.

Aos amigos que sempre me ajudaram e motivaram na graduação e a turma EF 2016/1 por serem essas pessoas sensacionais e ajudarem a proporcionar os melhores anos da minha vida.

Aos meninos da república *Tri Lambida House* e a agregados, que foram como uma família em Alegre.

A Gabriela e Lunalda que sempre foram companheiras nas caronas e conseguiram me tolerar por longos dois anos e meio e as pessoas de bom coração que sempre se disporem em dar carona.

Aos professores da faculdade e ensino médio por terem repassado o conhecimento que fui adquirindo ao longo da vida, em especial ao professor Gilson pela oportunidade.

E por fim, agradeço a Millena, Laís, André, Jeferson, Edimilson e Bismack por terem me ajudado a coletar e processar os dados, contribuindo para que esse trabalho fosse concluído.

RESUMO

Devido ao constante crescimento no setor florestal brasileiro, as indústrias do setor vêm buscando metodologias que otimizem a estimação do volume de madeira em pátios de estocagem, visto que resultados imprecisos podem ocasionar prejuízos econômicos e problemas relacionados ao planejamento de atividades. Devido a dificuldade de execução dos métodos tradicionais e alto custo de aquisição das novas tecnologias, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver uma metodologia precisa e com baixo custo para estimar o volume de madeira empilhada em pátio de estocagem por meio do processamento de imagens digitais obtidas com o auxílio de *smartphone*. Para implementação de tal metodologia, foi utilizado o processamento de imagens sequenciais obtidas das pilhas de madeira a uma distância de dois e quatro metros e imagens fixas das faces das pilhas, sendo estas tomadas a uma distância de dois e quatro metros para as pilhas de maiores dimensões e 0,8 e 1,1 metros para as de menores dimensões. Após obtenção e análise dos dados, verificou-se que as imagens sequenciais obtiveram um erro absoluto médio de $0,923 \text{ m}^3$, sendo considerado relativamente alto devido a incapacidade de determinar com eficiência os polígonos classificados como madeira, e as imagens fixas obtiveram um erro absoluto médio de $0,073 \text{ m}^3$; $0,05 \text{ m}^3$; $0,058 \text{ m}^3$ e $0,033 \text{ m}^3$ respectivamente para as fotos tomadas a dois, quarto, 0,8 e 1,1 metros de distância. Apesar do erro relativamente alto encontrado no método de imagens sequenciais verificou-se que as metodologias utilizadas na pesquisa foram eficientes para a estimação do volume de madeira em pilhas localizadas em pátio de estocagem.

Palavras chaves: Fotogrametria; *SFM*; Classificação de Imagens; Volume de Madeira; aprendizagem de máquinas.

SUMÁRIO

LISTAS DE TABELAS.....	vi
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
1 INTRODUÇÃO.....	09
1.1 Objetivos	10
1.1.1 Objetivo geral	10
1.1.2 Objetivos específicos	10
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	11
2.1 Cubagem rigorosa.....	11
2.2 Fotogrametria.....	12
2.3 <i>Random Forest</i>	13
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1 Caracterização da área de estudo	15
3.2 Estimativa do volume de madeira	16
3.2.1 Seleção, cubagem das toras e montagem das pilhas	16
3.2.2 Método fotográfico com imagens sequenciais.....	17
3.2.3 Método fotográfico com imagens fixas	19
3.2.4 Processamento dos dados	20
3.2.5 Análise dos dados	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1 Método fotográfico com imagens sequenciais	23
4.2 Método fotográfico com imagens fixas.....	25
5 CONCLUSÃO	29
REFERÊNCIAS	30

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa do volume de madeira das fotos sequenciais.....	24
Tabela 2 - Volume estimado das fotos tomadas de 2 metros de distância.	26
Tabela 3 - Volume estimado das fotos tomadas de 4 metros de distância.	26
Tabela 4 - Volume das pilhas das fotos tomadas de 0,8 metros de distância.....	26
Tabela 5 - Volume estimado das fotos tomadas de 1,1 metros de distância.	27

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Métodos de cubagem rigorosa.....	12
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do empreendimento.....	15
Figura 2 - A. Pilha de maior dimensão. B. Pilha de menor dimensão	17
Figura 3 - Alvos codificados	18
Figura 4 - Obtenção das imagens digitais sequenciais	19
Figura 5 - Obtenção das imagens digitais fixas das pilhas de maior dimensão	20
Figura 6 - Obtenção das imagens digitais fixas das pilhas de menor dimensão	20
Figura 7 - Construção das coordenadas arbitrárias nas fotos	21
Figura 8 - A. Geometria da pilha de madeira. B. Classificação da madeira na nuvem densa	23
Figura 9 - A. Foto original da pilha de madeira. B. Foto da classificação da pilha.....	25

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, as empresas de produtos florestais vêm ganhando destaque em relação aos outros setores industriais. Isso ocorre devido as condições edafoclimáticas favoráveis para o desenvolvimento de florestas plantadas, investimentos tecnológicos na silvicultura e na geração de novos produtos, melhoramento genético, além do aumento na demanda e preço nos produtos gerados (AZEVEDO et al., 2017). Graças a estes fatores, verifica-se um constante crescimento do setor nos últimos anos, aumentando a busca por metodologias eficazes para estimar o volume de madeira contida em cargas de caminhões e em pátio de estocagem, sendo que resultados imprecisos podem gerar prejuízos econômicos no comércio madeireiro e problemas relacionados ao planejamento do sistema de produção nas indústrias (SOARES et al, 2003).

Os principais métodos tradicionais utilizados na mensuração do volume de madeira nos pátios de estocagem são a cubagem rigorosa e os baseados nos princípios de Arquimedes. Apesar desses métodos serem considerados precisos na obtenção do volume de sólidos presente nas pilhas, possuem dificuldades de execução, tais como: necessidade de elevada mão-de-obra, alto custo para aplicação da metodologia, demora na obtenção de resultados e dificuldade na quantificação de grandes volumes de madeira e na realização de monitoramento contínuo, tornando assim inviável economicamente para os empreendimentos do setor florestal (BARROS, 2017; OLIVEIRA, 2018; SOARES et al, 2003).

Com o intuito de diminuir os erros e as dificuldades ocasionadas pelo uso dos métodos tradicionais descritos acima, novas tecnologias vêm sendo utilizadas para a obtenção do volume estocado, sendo elas: o uso de equipamento *laser scanner* 3 D (*Logmeter*), caracterizado como um sistema totalmente automatizado que diminui as interferências humanas no processo e possibilita a quantificação total da madeira que entra nas indústrias através dos caminhões (ALMEIDA, 2011) e a utilização de imagens georreferenciadas, obtidas por aeronaves remotamente pilotadas (ARP), permitindo a avaliação e quantificação precisa do volume de madeira estocado, sendo considerado um método de fácil aplicação, rápido processamento, além de possuir flexibilidade de avaliações periódicas, facilitando a estimativa do volume de madeira empilhado em pátios de estocagem (OLIVEIRA SOBRINHO, 2016; FIGUEIREDO et

al., 2016). Apesar dessas novas tecnologias serem consideradas eficientes para estimar volume de madeira, apresentam custo elevado de aquisição, dificultando a implementação destas em empresas de médio e pequeno porte.

Devido aos problemas acarretados na utilização dos métodos tradicionais e ao elevado custo de aquisição das tecnologias eficientes para estimar o volume de madeira, empresas do setor florestal vêm buscando novas metodologias de baixo custo que otimizem o processo de obtenção precisa do volume contido nos pátios de estocagem (BERTOLA, 2002).

Com isso, a pesquisa se justifica devido ao intuito de desenvolver uma metodologia precisa, com baixo custo para estimar o volume de madeira empilhada em pátio de estocagem por meio do processamento de imagens digitais obtidas com o auxílio de *smartphone*.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia precisa e de baixo custo para estimar o volume de madeira empilhada em pátio de estocagem por meio do processamento de imagens digitais obtidas com auxílio de *smartphone*.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar a eficácia de estimação do volume de madeira em pilhas por meio de imagens digitais obtidas por um *smartphone*;
- Analisar a influência da distância na tomada das fotos no processo de estimação por imagens;
- Averiguar se os valores de volume das pilhas encontrados por cubagem se aproximam dos obtidos nos métodos de imagem sequencial e fixa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cubagem rigorosa

Cubagem rigorosa é uma metodologia que objetiva estimar o volume de madeira contido em um povoamento florestal ou em uma pilha de madeira localizada no pátio de estocagem, através do uso de equações matemáticas (ARAÚJO, 2010). Para tal método é calculado o volume individual de cada torete, por meio de medições sucessivas do diâmetro em uma distância pré-estabelecida, sendo o volume total da pilha de madeira obtido pela soma dos volumes individuais (CAMPOS, 2014).

Segundo Gomes (1957), para quantificar o volume de madeira pela cubagem rigorosa, pode-se utilizar os métodos absolutos, onde o comprimento dos toretes não possuem relação com a altura total da árvore, ou analíticos, em que tamanho do torete representa um percentual da altura total do fuste da árvore, podendo haver a comparação entre o volume individual de um povoamento com mesma forma, mas tamanho diferente. No setor florestal os métodos absolutos são os mais utilizados, sendo *Newton*, *Huber* e *Smalian* as principais equações aplicadas (SILVA et al., 2014).

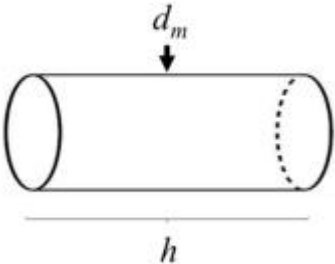
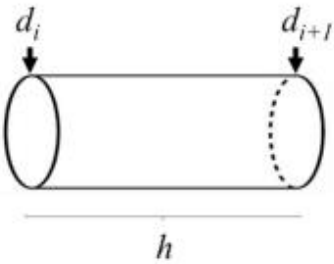
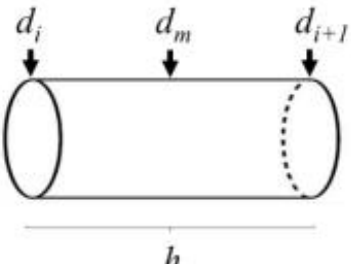
O método de cubagem por *Huber* constitui na medição do diâmetro no ponto médio dos toretes, levando em consideração que a área da base é similar à do ponto médio da seção, sendo o volume determinado pelo produto entre o comprimento da tora e a área média da seção (Quadro 1.A). Este método é considerado o mais preciso quando as toras de interesse apresentam menores dimensões, tendo erros consideráveis quando estas possuem conicidade ou forma neilóide (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009).

O método de *Smalian* leva em consideração a área dos extremos da seção, sendo o volume obtido pelo produto entre o comprimento da tora e a área média obtida (Quadro 1.B). Este procedimento é considerado o mais utilizado para estimação do volume no setor florestal devido a sua praticidade (SILVA; NETO PAULA, 1979; CABACINHA, 2003).

O método de cubagem por *Newton* consiste na medição do diâmetro no ponto médio e nos extremos da secção, sendo o volume obtido pelo produto entre a média ponderada das áreas seccionais e o comprimento total do torete (Quadro 1.C), este

método apresenta maior precisão devido ao número de medições ao longo das toras analisadas (CAMPOS, 2014; CAMPOS, 1988).

Quadro 1 - Métodos de cubagem rigorosa.

Métodos	Caracterização	Equação
(a) <i>Huber</i>		$v = g_m * h$
(b) <i>Smalian</i>		$v = \left(\frac{g_i + g_{i+1}}{2} \right) * h$
(c) <i>Newton</i>		$v = \left(\frac{g_i + 4 * g_m + g_{i+1}}{6} \right) * h$

Fonte: Reis (2015).

2.2 Fotogrametria

Segundo Brito e Coelho (2007) a fotogrametria é considerada uma ciência ou tecnologia, que transforma imagens fotográficas bidimensionais obtidas por sensores, em um modelo espacial tridimensional contendo medidas quantitativas confiáveis do objeto em estudo.

A fotogrametria pode ser classificada de acordo com a utilização de equipamentos para facilitar o processamento das imagens, podendo ser dividida em:

fotogrametria analógica caracterizada como o método mais antigo, que utiliza-se de equipamentos analógicos para realizar cálculos métricos no processamento fotogramétrico devido a incapacidade dos computadores; a fotogrametria analítica, caracterizada pela redução dos equipamentos utilizados, devido a criação de computadores mais tecnológicos aumentando a precisão dos modelos matemáticos e a fotogrametria digital, reduzindo totalmente o uso de equipamentos auxiliares com a utilização de imagens digitais (TOMMASELL, 2009), sendo que o uso da fotogrametria digital é capaz de fornecer acurácia e integridade quantitativa para a criação de um modelo tridimensional a partir de imagens digitais bidimensionais da área ou objeto de interesse (TEMBA, 2000).

A fotogrametria pode ser dividida em aerofotogrametria, onde as imagens digitais são obtidas por uma câmera acoplada a uma aeronave remotamente pilotada (ARP), fotogrametria terrestre sendo as imagens obtidas de um ponto fixo no terreno, fotogrametria espacial em que as imagens utilizadas para o georreferenciamento são extraterrestres, podendo estas ser adquiridas de câmeras em satélites ou de planetas, e a fotogrametria a curta distância, tendo uma pequena diferença entre as imagens obtidas em relação ao objeto de estudo, sua vantagem é a fácil utilização e a possibilidade de obtenção de resultados em tempo real, além do baixo custo de execução (TOMMASELL et al., 1999).

O uso de fotogrametria na mensuração florestal vem ganhando destaque devido sua facilidade de execução se comparado aos métodos tradicionais, Figueiredo et al. (2016) e Silva (2019) utilizaram tal método para estimar o volume de madeira empilhada em pátio de estocagem por meio do processamento de imagens digitais obtidas através de aeronave remotamente pilotada (ARP).

2.3 Random Forest

Random Forest (floresta aleatória) é considerada uma técnica de aprendizagem de máquinas, sendo constituída por um conjunto de árvores treinadas individualmente, em que cada árvore defini um voto de acordo com o valor sobre o objeto de interesse (SCHIKOWSKI, 2016). Segundo Montano (2016), a ferramenta pode ser utilizada para solução de problemas de regressão, em que o resultado é relacionado com a médias

das árvores geradas, e em casos de classificação, sendo o produto obtido através da votação de cada árvore.

As árvores de classificação ou regressão categorizam um conjunto de dados heterogêneos (raiz) em classes homogêneas (folhas), gerando assim as regras de classificação com bases nos atributos (nós), sendo que em cada divisão da árvore são selecionados n atributos aleatoriamente direcionando o crescimento das árvores, o resultado obtido pelo processamento se caracteriza como a média das observações encontradas em cada folha (CARVALHO, 2009).

A utilização do método de treinamento de máquinas possui como vantagem a facilidade de interpretação, a eliminação de procedimentos externos para a seleção de atributos, funciona de modo eficiente com uma grande base de dados e possui rápido processamento dos dados obtidos (NUNES, 2015), o método ainda é pouco utilizado no setor florestal, mas vem ganhando destaque devido as vantagens apresentadas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi realizada em uma serraria no município de Ibitirama, localizado na região sul do estado do Espírito Santo. O empreendimento se localiza ao lado da rodovia ES – 185 a uma distância de aproximadamente 2,2 Km da sede do município (Figura 1), sendo o beneficiamento de toras de *Eucalyptus* spp. Destinado para a confecção de ripas e tábuas a principal atividade executada.

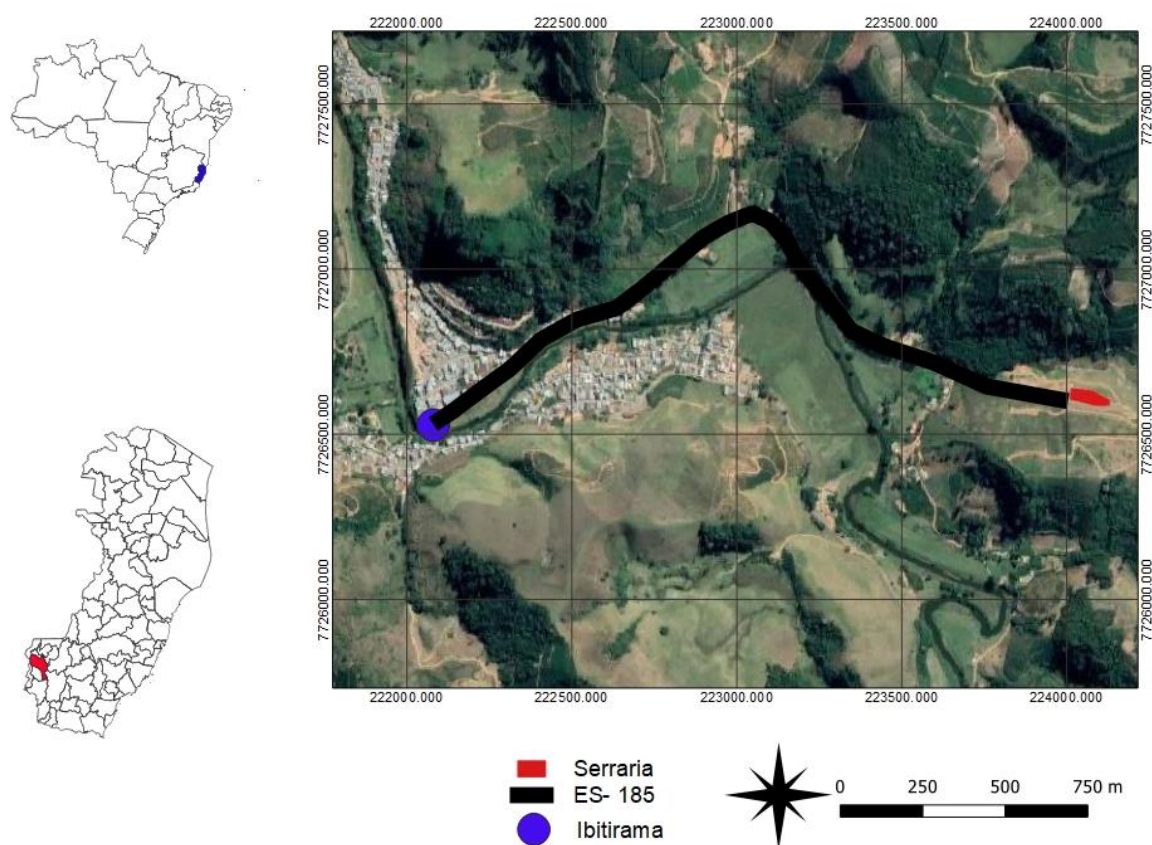


Figura 1. Localização do empreendimento.

Fonte: O autor (2021).

O município situa-se nas coordenadas 20° 32' 25" S e 41° 40' 03" O do meridiano de *Greenwich*, o relevo da região é caracterizado como acidentado variando entre 500 e 2.892 metros de altitude, possui precipitação média de 1.646 mm, temperatura entre 18 e 22 ° C e clima subtropical de altitude, tendo como principal característica inverno seco e verão ameno, a cobertura florestal é composta principalmente por mata atlântica, sendo que cerca de 6,5 % correspondem a plantios comerciais de eucalipto (INCAPER, 2020; ALVARES et al., 2013).

3.2 Estimativa do volume de madeira

Para realização da pesquisa, foi utilizado três metodologias diferentes para estimar o volume de madeira contido na pilha localizada no pátio de estocagem da serraria, sendo a (i) cubagem rigorosa realizada para obter o volume real de madeira da pilha e os métodos de fotografia (ii) fixa e (iii) sequencial para estimação do volume de madeira por meio do processamento de imagens digitais. A metodologia foi dividida em: seleção das toras, cubagem das toras selecionadas, montagem das pilhas, obtenção das imagens digitais, processamento das imagens digitais obtidas em campo e estimação do volume de madeira das pilhas construídas.

3.2.1 Seleção, cubagem das toras e montagem das pilhas

As toras foram selecionadas no pátio de estocagem do empreendimento, sendo utilizadas as que apresentavam mesmo comprimento e não possuíam defeitos devido as operações de corte e transporte. Após a seleção dos toretes, o volume individual das toras foi obtido pela cubagem rigorosa empregando-se para tanto o método de *Newton*. Para empregar o referido método, foi realizada a medição do comprimento total e circunferência de cada torete selecionado, nas seções inicial, média e final da tora, com o auxílio de uma trena curta e fita métrica respectivamente. O volume total com casca da pilha foi estimado pela soma dos volumes de cada torete, sendo o diâmetro, a área basal, o volume individual obtido pelas equações abaixo:

$$D = \frac{CAP}{\pi} \quad (1)$$

$$g = \frac{D^2 * \pi}{40000} \quad (2)$$

$$V_c = \left(\frac{g_i + 4 * g_m + g_{i+1}}{6} \right) * h \quad (3)$$

em que:

CAP – circunferência das seções dos toretes

D – Diâmetro das seções

g – Área basal da seção

g_i – área basal inicial do torete

g_m – Área basal média do torete

g_{i+1} – Área basal final do torete

v_c – Volume com casca individual do torete

Após o processo de seleção e medição das toras, estas foram destinadas para confecção das pilhas, sendo montadas manualmente duas pilhas de madeira com maiores dimensões, utilizando estacas como gabarito para auxiliar na sustentação (Figura 2.A). Utilizando a mesma metodologia foram confeccionadas 21 pilhas de menores dimensões (Figura 2.B), de forma que houvesse um rodízio das toras,

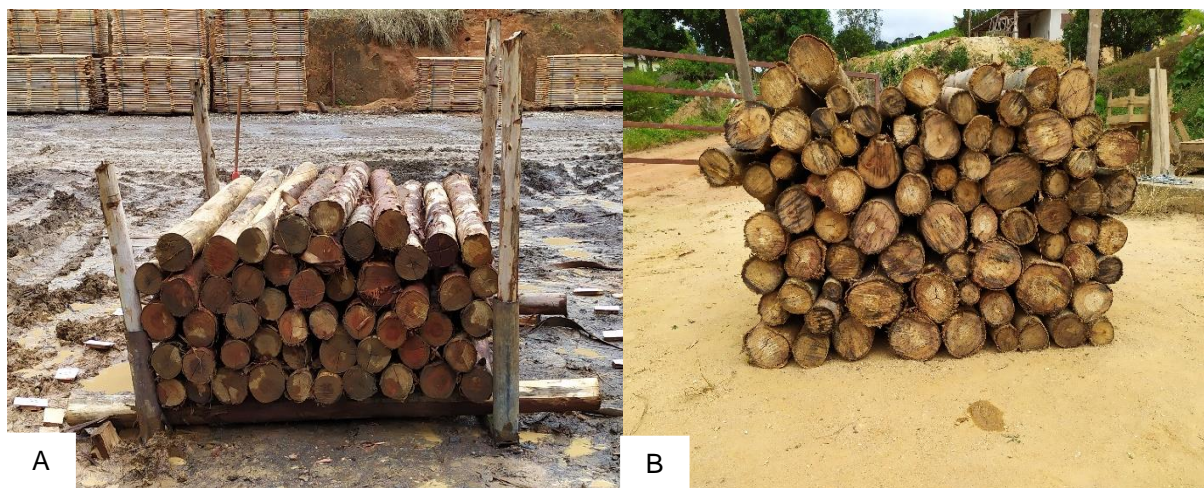


Figura 2 - A. Pilha de maior dimensão. B. Pilha de menor dimensão.

Fonte: O autor (2021).

fazendo com que as pilhas possuíssem diferentes volumes e dimensões. As dimensões das pilhas foram obtidas pela média das três medições de altura em ambas as faces, comprimento e largura.

3.2.2 Método fotográfico com imagens sequenciais

Para realização do método fotográfico com imagens sequenciais foram utilizadas somente as duas pilhas de maiores dimensões, sendo adicionados alvos codificados a uma distância de 50 cm entre eles, ao redor das pilhas (Figura 3). Estes alvos são pontos de referências para o sistema de coordenadas arbitrarias que auxiliam no georreferenciamento e alinhamento das imagens no processamento. Foram utilizados na pesquisa alvos circulares gerados automaticamente pelo *agisoft metashape* profissional versão 1.7.2 (AGISOFT LLC, 2018), sendo estes alvos padrões de 12 bits devido a sua precisão para decodificação.

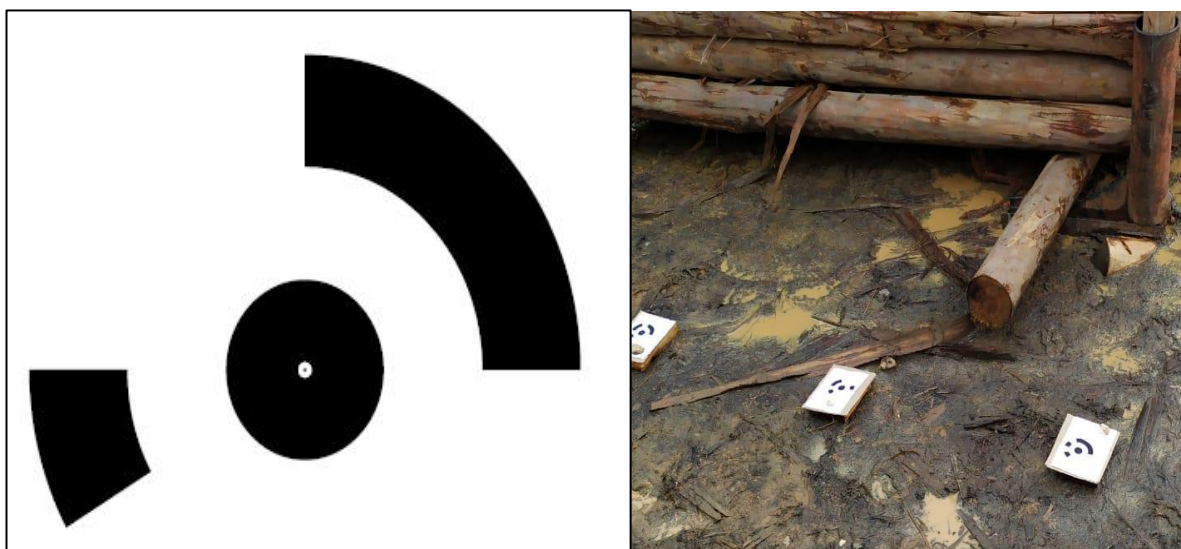


Figura 3 - Alvos codificados.

Fonte: O autor (2021).

As imagens digitais foram obtidas com o auxílio de *smartphone* marca *Xiaomi*, modelo *Redmi Note 7 pro*, com câmera de 48 megapixels, resolução de 8000 x 6000 pixels, tamanho do sensor de 6,4 x 4,8 milímetros e distância focal de 4,74 milímetros. As fotografias foram retiradas de 0,3 em 0,3 metros ao entorno da pilha a uma distância de 2 e 4 metros da borda (Figura 4), tendo 87,5 % e 93,75 % de sobreposição lateral respectivamente. Foi utilizado a ferramenta endireitar disponível na câmera do aparelho, com o intuito de diminuir possíveis erros relacionados a orientação das fotos ocasionados pelo fotógrafo.

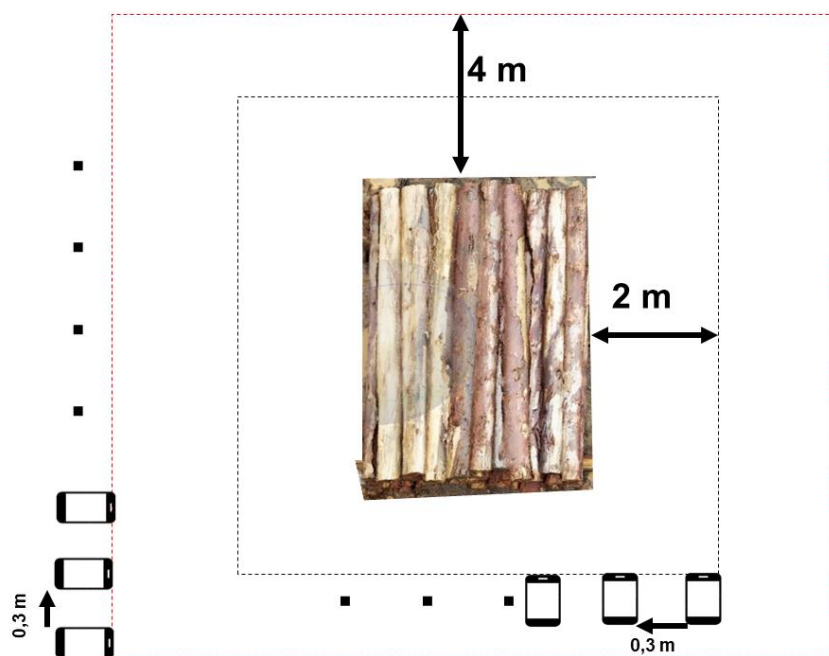


Figura 4 - Obtenção das imagens digitais sequenciais.

Fonte: O autor (2021).

3.2.3 Método fotográfico com imagens fixas

Para a realização do método com imagens fixas foram utilizadas as pilhas de maiores e menores dimensões, totalizando 23 pilhas sendo utilizado o mesmo *smartphone*. As fotos foram tomadas somente das faces das pilhas a uma distância de 2 e 4 metros (Figura 5) da borda para as pilhas de maiores dimensões e 1,1 e 0,8 metros (Figura 6) para as de menores dimensões.

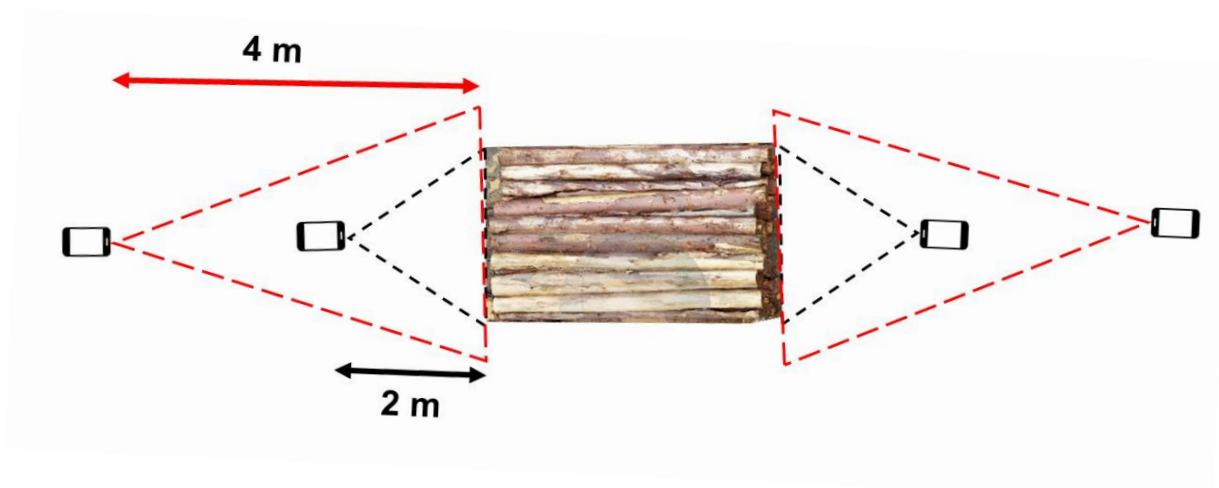


Figura 5 - Obtenção das imagens digitais fixas das pilhas de maior dimensão.

Fonte: O autor (2021).

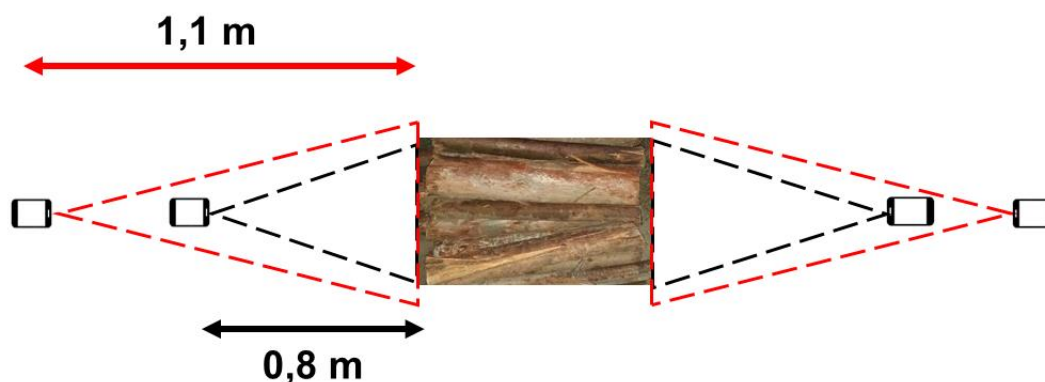


Figura 6 - Obtenção das imagens digitais fixas das pilhas de menor dimensão.

Fonte: O autor (2021).

3.2.4 Processamento dos dados

Após a obtenção dos dados em campo, as fotos obtidas pelo método fotográfico sequencial foram processadas com o auxílio do *agisoft metashape* profissional versão 1.7.2 (AGISOFT LLC, 2018), com o intuito de reconstruir a geometria das pilhas. Para tal processamento, não foi possível realizar o georreferenciamento utilizando os alvos codificados devido a presença de irregularidades no terreno,

originadas pela movimentação de máquinas e excesso de chuvas na região. Com isso houve a necessidade da elaboração manual das coordenadas arbitrárias para o georreferenciamento do modelo (Figura 7).

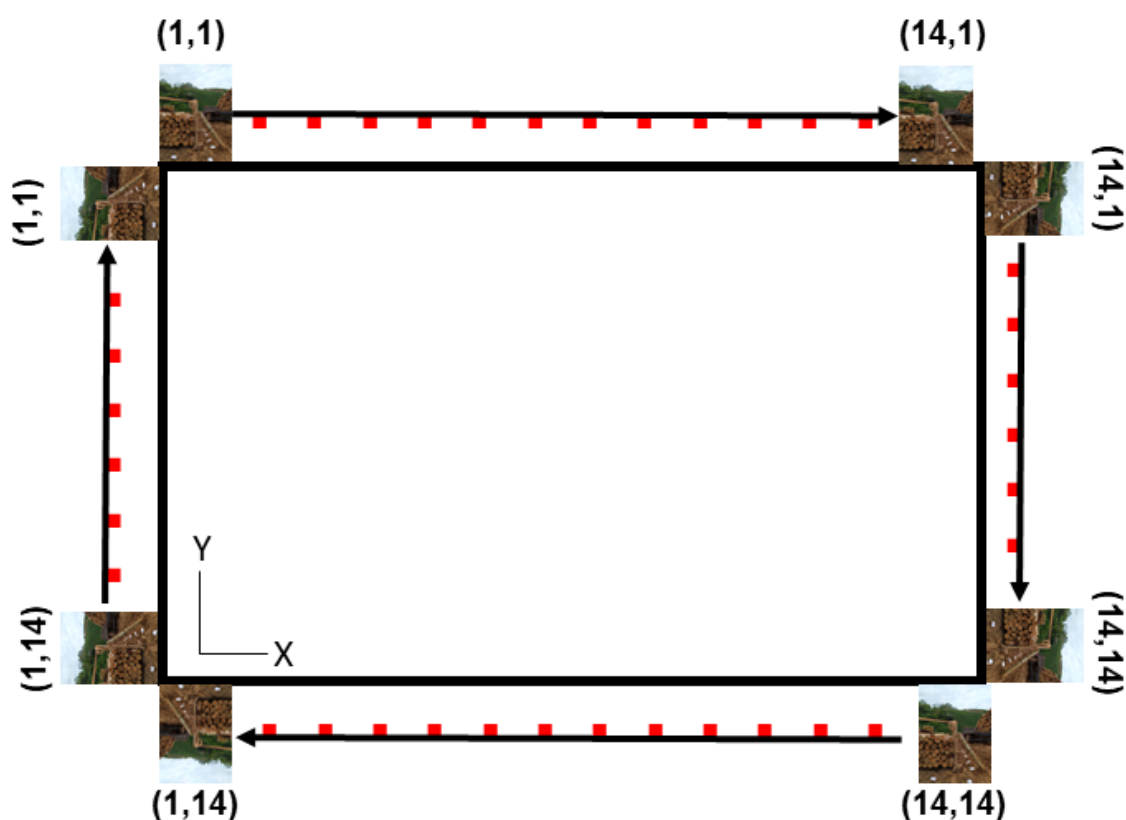


Figura 7 - Construção das coordenadas arbitrárias nas fotos.

Fonte: O autor (2021).

Após a criação das coordenadas arbitrárias, as imagens foram exportadas para o *software* onde foi realizado a importação das coordenadas arbitrárias, alinhamento das fotos, geração da nuvem espaça, geração da nuvem densa, confecção do modelo 3 D, seleção e classificação da madeira na nuvem densa. Após o processo, a classificação da nuvem foi exportada para o *software R* versão 3.6.3 (R CORES TEAM, 2015), realizando a conversão do arquivo laz em raster, sendo este exportado para o *software Quantum GIS (QGIS)* versão 2.18.28 Las Palmas (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2019), determinando a área total dos polígonos classificados como madeira na pilha. O volume de madeira foi estimado pela equação

de *Smalian*, sendo considerado a média da área de cada face multiplicado pelo comprimento da pilha obtido em campo.

As fotos obtidas pelo método fotográfico com imagens fixas foram processadas pelo *software R* versão 3.6.3 (R CORES TEAM, 2015), onde foi retirado as métricas de textura (variância e média) das amostras de madeira e espaços vazios retirados da foto original para treinamento da *ramdon forest*. Foi utilizado na *ramdon forest* 500 árvores, cinco observações por folha e uma variável para divisão. Após o treinamento, a foto de cada face foi classificada, sendo atribuído o número 1 para madeira e 0 para espaço vazio. A área da pilha foi obtida pelo produto entre a quantidade de classe relacionada a madeira e a distância de amostra da pilha (DAPI) (equação 4) de cada distância elevado ao quadrado. Após a obtenção da área de cada face, o volume foi estimado utilizando a fórmula de *Smalian* como apresentado anteriormente.

$$DAPI = D * \left(\frac{T_p}{D_f} \right)^2 \quad (4)$$

$$T_p = \frac{T_s}{T_f} \quad (5)$$

Em que:

DAPI – Distância de amostra da pilha

D – Distância de tomada das fotos

T_p – Tamanho do pixel

D_f – Distância focal

T_s – Tamanho do sensor

T_f – Tamanho da foto

3.2.5 Análise dos dados

Os dados obtidos na pesquisa foram analisados de acordo com o erro entre o volume estimado pelos métodos fotográficos e o volume observado pela cubagem rigorosa por *Newton*, utilizando as seguintes equações:

$$\text{Erro (m}^3\text{)} = X - Y$$

$$\text{Erro (\%)} = \frac{X - Y}{Y} * 100$$

Em que:

X – Volume observado em m³

Y – Volume estimado em m³

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Método fotográfico com imagens sequenciais

Após a etapa de processamento das imagens, foi possível reconstruir e classificar as madeiras que compõem a pilha somente em 3 dos 4 processamentos (pilha 1 com fotos de 4 metros de distância e pilha 2 com fotos de 2 e 4 metros) (Figura 8). Não foi possível a reconstrução da pilha 1 com fotos de 2 metros, pois mais de 50 % das fotos não foram alinhadas, sendo incapaz de gerar os produtos do processamento, indicando, portanto, que a distância da pilha no momento da foto é um fator relevante para este método.

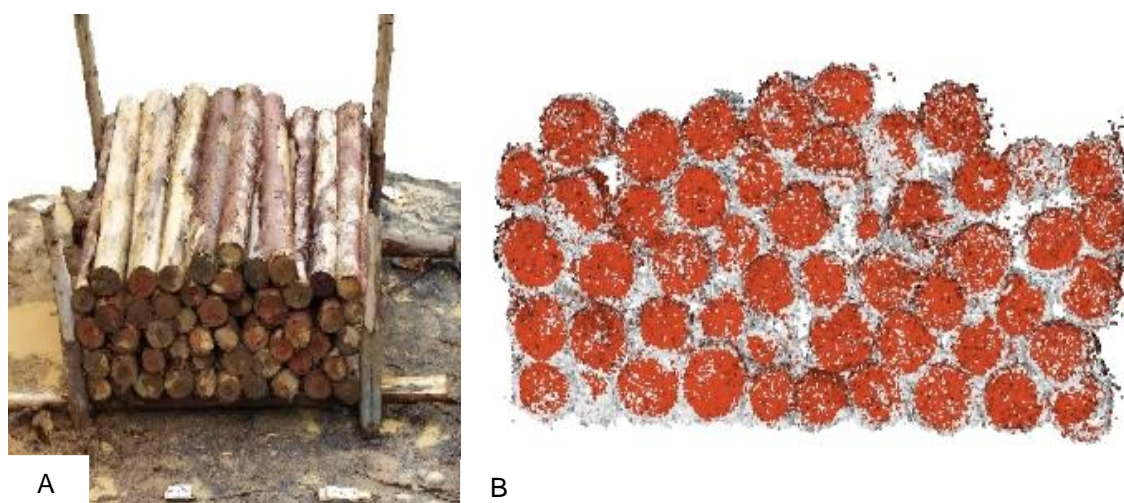


Figura 8 - A. Geometria da pilha de madeira. B. Classificação da madeira na nuvem densa.
Fonte: O autor (2021).

Os volumes estimados pelo método fotográfico de imagens sequenciais podem ser observados na Tabela 1. Note que as fotos tomadas a uma distância de 4 metros das pilhas 1 e 2 subestimaram o volume em relação ao encontrado pela cubagem rigorosa por Newton, com erros de 28,48 % ($0,84 \text{ m}^3$) e 76,89 % ($1,72 \text{ m}^3$) respectivamente. Já as fotos de 2 metros causaram uma superestimação do volume tendo erro de -9,34 % ($-0,21 \text{ m}^3$) em relação ao volume observado. Os erros elevados nas fotos obtidas com maiores distâncias podem ser explicados devido a dificuldade de determinar a área dos polígonos relacionados a classificação de madeira, obtendo assim erro médio absoluto de $0,923 \text{ m}^3$.

Tabela 1 - Estimativa do volume de madeira das fotos sequenciais.

Pilha	Média da área face (m ²)	Comprimento da pilha (m)	Volume estimado (m ³)	Volume Newton (m ³)	Erro (m ³)	Erro (%)
1 – 4 m	0,8610	2,45	2,10958	2,95	0,840	28,48
2 – 4 m	0,2112	2,45	0,51747	2,24	1,72	76,89
2 – 2 m	1,0001	2,45	2,45045	2,24	-0,21	-9,34
Média absoluta					0,923	38,24

Fonte: O autor (2021).

Os resultados obtidos assemelham-se com os encontrados por Figueiredo et al. (2016) utilizando fotogrametria com o uso de aeronave remotamente pilotada (ARP) para estimar o volume de madeira empilhada, sendo observado que planos de voo com altitudes de 50 metros apresentaram erro de 19,63 % no volume de madeira. Por outro lado, com 30 metros o erro foi de 0,58 %. Os dados obtidos pela pesquisa não foram capazes de determinar qual a distância ideal para tomada das fotos sequenciais para o processamento das imagens digitais, uma vez que não foi possível reconstruir a geometria da pilha 1 com fotos de 2 metros. Verificou-se que a metodologia pode se tornar eficiente na estimação do volume de pilhas de madeira devido a ótima reconstrução da geometria da pilha e classificação das madeiras contidas na pilha, necessitando assim de adaptação na obtenção da área dos polígonos classificados como madeira na pilha e de um maior número de repetições com variação nas distâncias de tomada das fotos.

4.2 Método fotográfico com imagens fixas

Após o processamento de cada face das 23 pilhas analisadas com diferentes distâncias de tomadas das fotos, foi possível obter a classificação da madeira da imagem original (Figura 9), separando-se a madeira dos espaços vazios contidos na pilha.



Figura 9 - A. Foto original da pilha de madeira. B. Foto da classificação da pilha.

Fonte: O autor (2021).

O volume estimado pelo método de fotografias fixas para as pilhas de maior dimensão com fotos tomadas de 2 e 4 metros, podem ser observados na Tabela 2 e 3 respectivamente. Nota-se que os erros nas fotos tomadas a 2 metros de distância da pilha foram de - 3,5 % ($-0,078 \text{ m}^3$) a 2,3 % ($0,069 \text{ m}^3$) e para as fotos de 4 metros os erros foram de 1,4 % ($0,042 \text{ m}^3$) e 2,6 % ($0,058 \text{ m}^3$). A média do erro absoluto foi de 2,92 % ($0,073 \text{ m}^3$) para as fotos de 2 metros e de 2,0 % ($0,05 \text{ m}^3$) para as tomadas a 4 metros, ou seja, as fotos tomadas com maior distância tiveram um erro menor do que as de menor distância.

Tabela 2 - Volume estimado das fotos tomadas de 2 metros de distância.

Pilhas	Área face 1 (m ²)	Área face 2 (m ²)	Comprimento da pilha (m)	Volume estimado (m ³)	Volume Newton (m ³)	Erro (m ³)	Erro (%)
1	1,2724	1,0791	2,45	2,88073	2,95	0,069	2,3
2	1,0232	0,8695	2,45	2,31861	2,24	-0,078	-3,5
Média absoluta						0,073	2,92

Fonte: O autor (2021).

Tabela 3 - Volume estimado das fotos tomadas de 4 metros de distância.

Pilhas	Área face 1 (m ²)	Área face 2 (m ²)	Comprimento da pilha (m)	Volume estimado (m ³)	Volume Newton (m ³)	Erro (m ³)	Erro (%)
1	1,1840	1,1896	2,45	2,90778	2,95	0,042	1,4
2	0,9511	0,8297	2,45	2,18163	2,24	0,058	2,6
Média absoluta						0,050	2,0

Fonte: O autor (2021).

O volume estimado pelo método de fotografias fixas para as pilhas de menores dimensões estão apresentados nas Tabelas 4 e 5, com fotos tomadas de 0,8 e 1,1 metros. Observa-se que os erros para as fotos tomadas de 0,8 metros de distância da pilha de madeira variaram de -14,24 % (-0,047 m³) a 19,98 % (0,081 m³), sendo o erro médio absoluto de 0,058 m³. As fotos tomadas a 1,1 metros de distância apresentaram erros entre -14,94 % (-0,045 m³) e 14,81 % (0,043 m³), sendo o erro médio absoluto de 0,033 m³, menor que o das fotos de 0,8 m.

Tabela 4 - Volume das pilhas das fotos tomadas de 0,8 metros de distância.

Pilhas	Área face 1 (m ²)	Área face 2 (m ²)	Comprimento da pilha (m)	Volume estimado (m ³)	Volume Newton (m ³)	Erro (m ³)	Erro (%)
1	0,3422	0,4254	0,8	0,30705	0,29205	-0,015	-5,13
2	0,4177	0,4402	0,8	0,34317	0,30297	-0,040	-13,27
3	0,4021	0,4654	0,8	0,34699	0,31616	-0,031	-9,75
4	0,4699	0,4635	0,8	0,37338	0,32684	-0,047	-14,24
5	0,3437	0,3713	0,8	0,28599	0,33804	0,052	15,40
6	0,4042	0,4050	0,8	0,32367	0,34630	0,023	6,54
7	0,4150	0,3760	0,8	0,31640	0,35766	0,041	11,54
8	0,4152	0,4410	0,8	0,34248	0,36646	0,024	6,54
9	0,4172	0,3912	0,8	0,32337	0,37347	0,050	13,42

continua

10	0,4124	0,3788	0,8	0,31648	0,38525	0,069	17,85
11	0,4947	0,4321	0,8	0,37069	0,39359	0,023	5,82
12	0,3938	0,4215	0,8	0,32611	0,40754	0,081	19,98
13	0,4338	0,4391	0,8	0,34915	0,42029	0,071	16,93
14	0,4352	0,4605	0,8	0,35832	0,42970	0,071	16,61
15	0,4617	0,4722	0,8	0,37353	0,44133	0,068	15,36
16	0,4607	0,4878	0,8	0,37938	0,44804	0,069	15,32
17	0,4688	0,4676	0,8	0,37455	0,45946	0,085	18,48
18	0,4567	0,4858	0,8	0,37700	0,46880	0,092	19,58
19	0,4805	0,4955	0,8	0,39040	0,47790	0,088	18,31
20	0,4665	0,5121	0,8	0,39143	0,48332	0,092	19,01
21	0,4902	0,5117	0,8	0,40077	0,48885	0,088	18,02
Média absoluta						0,058	14,148

Fonte: O autor (2021).

Tabela 5 - Volume estimado das fotos tomadas de 1,1 metros de distância.

Pilhas	Área face 1 (m ²)	Área face 2 (m ²)	Comprimento da pilha (m)	Volume estimado (m ³)	Volume newton (m ³)	Erro (m ³)	Erro (%)
1	0,2144	0,4076	0,8	0,24880	0,29205	0,043	14,81
2	0,4559	0,4147	0,8	0,34824	0,30297	-0,045	-14,94
3	0,4262	0,4505	0,8	0,35067	0,31616	-0,035	-10,91
4	0,3770	0,3630	0,8	0,29601	0,32684	0,031	9,43
5	0,3742	0,3561	0,8	0,29212	0,33804	0,046	13,59
6	0,4622	0,4684	0,8	0,37224	0,34630	-0,026	-7,49
7	0,4719	0,4684	0,8	0,37612	0,35766	-0,018	-5,16
8	0,5254	0,5149	0,8	0,41613	0,36646	-0,050	-13,55
9	0,5346	0,5248	0,8	0,42374	0,37347	-0,050	-13,46
10	0,4058	0,4293	0,8	0,33402	0,38525	0,051	13,30
11	0,4293	0,4315	0,8	0,34432	0,39359	0,049	12,52
12	0,4522	0,4624	0,8	0,36583	0,40754	0,042	10,23
13	0,4371	0,4804	0,8	0,36702	0,42029	0,053	12,68
14	0,4764	0,5597	0,8	0,41446	0,42970	0,015	3,55
15	0,5744	0,5281	0,8	0,44098	0,44133	0,0004	0,08
16	0,5512	0,5312	0,8	0,43297	0,44804	0,015	3,36
17	0,5158	0,5436	0,8	0,42376	0,45946	0,036	7,77
18	0,5984	0,6019	0,8	0,48012	0,46880	-0,011	-2,41
19	0,5502	0,7063	0,8	0,50259	0,47790	-0,025	-5,17
20	0,6501	0,6774	0,8	0,53097	0,48332	-0,048	-9,86
21	0,6155	0,5557	0,8	0,46848	0,48885	0,020	4,17
Média absoluta						0,033	8,97

Fonte: O autor (2021).

Os resultados obtidos pelas pilhas de maiores e menores dimensões no processamento das imagens fixas apresentaram erros menores com fotos tomadas de distâncias maiores. Isso pode ser explicado pelo fato de que fotos tomadas de menores distâncias possuem maior detalhamento das partes internas da pilha, contribuindo para um aumento no número de classes classificadas como madeira, superestimando assim o volume real encontrado na pilha.

Os resultados obtidos pelo processamento das imagens fixas assemelham com os dados apresentados por Silvia (2003), utilizando imagens digitais obtidas com máquina digital. Verificou-se um desvio máximo no erro de 19 % e um médio absoluto de 8 %.

5 CONCLUSÃO

- O método de processamento das imagens digitais apresentou acurácia na estimativa do volume de madeira em pátio de estocagem.
- O método fotográfico com imagens fixas apresentou valores muito próximos de volume se comparado com a da cubagem rigorosa por *Newton*, sendo recomendado a utilização de distâncias maiores para as tomadas das fotos.
- O método fotográfico com imagens sequenciais apresentou erros elevados do volume estimado pelas fotos obtidas com maiores distâncias, não sendo possível determinar qual a distância ideal para a tomada das fotos.

6 REFERÊNCIAS

- AGISOFT LLC. **Metashape** - Intelligent photogrammetry. 2018. Disponível em: https://www.agisoft.com/pdf/metashape_presentation.pdf. Acesso em: 18 maio 2021.
- ALMEIDA, A. de. **Aplicação da metodologia design for seis sigma, na implantação do projeto Logmeter ® (sistema de medição de madeira), em uma empresa de grande porte de celulose e papel no Brasil**. 2011. 39 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- ALMEIDA, A. de. **Aplicação da metodologia design for seis sigma, na implantação do projeto Logmeter ® (sistema de medição de madeira), em uma empresa de grande porte de celulose e papel no Brasil**. 2011. 39 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- ARAÚJO, V.C. de. **Desenvolvimento de metodologia para a obtenção da cubagem de madeira em toras empilhadas através de imagens digitais**. 2010. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2010.
- AZEVEDO, P.K.M de. Os segmentos da indústria de produtos madeireiros derivados do mercado da madeira de reflorestamento no Brasil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 2., 2017, Rio Grande do Norte. **Os segmentos da indústria de produtos madeireiros derivados do mercado da madeira de reflorestamento no Brasil**. Rio Grande do Norte: PDV agro, 2017, v.2, p 1-12.
- BARROS, V.A. de. **Determinação de fatores de empilhamento por meio de classificação de imagem utilizando redes neurais**. 2017. 34 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- BERTOLA, A. **Uso de fotografias digitais para quantificar o volume sólido de madeira empilhada**. 2002. 64 f. Tese (obtenção do título de *Magister Scientiae*) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- CABACINHA, C.D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa**. 2003. 166 f. Dissertação (Mestre em engenharia florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.
- CAMPOS, J.C.C. **Dendrometria**. Viçosa: UFV, 1988.
- CAMPOS, O.J. de. **Cubagem de árvores**. 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado em matemática) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- COELHO, L.; BRITO, J.N. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2007.
- FIGUEIREDO, E.O. et al. Estimativa do volume de madeira em pátios de estocagem de toras por meio de câmeras RGB instaladas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP). **EMBRAPA**, Rio Branco, p. 1- 41, 2006.

FIGUEIREDO, E.O. et al. Estimativa do volume de madeira em pátios de estocagem de toras por meio de câmeras RGB instaladas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP). **EMBRAPA**, Rio Branco, p. 1- 41, 2006.

GOMES, A.M.A. **Medição dos arboredos**. Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957.

INCAPER. **Programa de assistência técnica e extensão rural**. Ibitirama: Instituto de Pesquisa, assistência técnica e extensão rural, 2020.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2.ed. Guarapuava: Unicentro, 2009.

MONTANO, R.A.N. **Aplicação de Técnicas de Aprendizado de Máquina na Mensuração Florestal**. 2016. 102 f. Tese (Obtenção do título de doutor em informática) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

NUNES, A.C.M. **Estimativa do estoque de carbono em plantios de *eucalyptus* spp. a partir de métricas lidar**. 2015. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

OLIVEIRA SOBRINHO, M.F. de. **Uso de vant para mensuração de processos florestais**. 2016. 24 f. Monografia (especialização em manejo florestal de precisão) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

OLIVEIRA, I.S. **Utilização do scanner à laser automático na aferição de volume de madeira sob diferentes diâmetros de tora**. 2018. 28 f. Monografia (especialização em gestão florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

QGIS Development Team, 2019. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. Available at: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 18 maio 2021.

R CORE TEAM. R. **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2015. Available at: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 18 maio 2021.

REIS, M. dos. **Critérios de estratificação para o planejamento da cubagem rigorosa**. 2015. 49 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2015.

SCHIKOWSKI, A. B. **Estimativa do volume e da forma do fuste utilizando técnicas de aprendizado de máquina**. 2016. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SILVA, A.A. da; PAULA NETO, F. de. **Princípios básicos de dendrometria**. Recife: UFRPE, 1979.

SILVA, P.V. de et al. Estimação do volume de árvores de eucalipto utilizando redes neurais artificiais. In: CORTE, A.P.D. et al. **Atualidades em mensuração florestal**. Curitiba: UFPR, 2014, p. 96-99.

SOARES, C.P.B. et al. Determinação de fatores de empilhamento através de fotografias digitais. **Revista árvore**, Viçosa, v.27, n. 4, p. 473-479, 2003.

TEMBA, P. **Fundamentos da fotogrametria**. Viçosa: UFMG, 2000.

TOMMASELL, A.M.G et al. Fotogrametria: aplicação a curta distância. In: MENEGUETE, M.J.; ALVES, N. **Faculdade de ciências e tecnologias 40 anos, perfil científico – educacional**. Presidente Prudente, 1999. p. 147-159.

TOMMASELL, A.M.G. **Fotogrametria**. 2009. Disponível em: <http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/891/introducao_a_fotogrametria.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2021.