

**SIMONE SILVA**

**MODELAGEM DE ATRIBUTOS FLORESTAIS A PARTIR DE DADOS DE  
AEROFOTOGRAMETRIA DIGITAL EM PLANTIOS COMERCIAIS DE  
EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para a obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: José Marinaldo Gleriani

Coorientador: Helio Garcia Leite

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S586m  
2021  
Silva, Simone, 1989-  
Modelagem de atributos florestais a partir de dados de  
aerofotogrametria digital em plantios comerciais de eucalipto /  
Simone Silva. – Viçosa, MG, 2021.  
1 tese eletrônica (72 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: José Marinaldo Gleriani.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2021.

Referências bibliográficas: f.47-61.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.054>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Levantamentos florestais. 2. Drone. 3. Fotogrametria  
aérea. I. Gleriani, José Marinaldo, 1966-. II. Universidade  
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal.  
Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

CDO adapt. CDD 634.9587

**SIMONE SILVA**

**MODELAGEM DE ATRIBUTOS FLORESTAIS A PARTIR DE DADOS DE  
AEROFOTOGRAMETRIA DIGITAL EM PLANTIOS COMERCIAIS DE  
EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para a obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

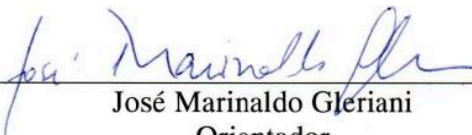
APROVADA: 26 de novembro de 2021.

Assentimento:



---

Simone Silva  
Autora



---

José Marinaldo Gleriani  
Orientador

*Ao meu pai,  
Homero Flávio da Silva (In Memoriam).  
Dedico*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus;

À minha família;

Ao meu orientador, Prof. Marinaldo com quem aprendi muito sobre fotogrametria e sensoriamento remoto, sempre muito solícito e atencioso, um grande professor e amigo;

Ao meu coorientador e grande amigo, Prof. Helio pelos ensinamentos para toda a vida e que sempre esteve presente na minha jornada acadêmica;

Ao Pof. Gustavo Marcatti, Dr. Daniel Binoti e Dr<sup>a</sup> Aline Mazon pelas suas considerações e por aceitarem ao convite de compor a banca, certeza de que suas contribuições acrescentaram e muito na minha pesquisa.

Aos amigos da Pós-graduação;

Aos amigos de Viçosa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

## RESUMO

SILVA, Simone, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2021, **Modelagem de atributos florestais a partir de dados de aerofotogrametria digital em plantios comerciais de eucalipto**. Orientador: José Marinaldo Gleriani. Coorientador: Helio Gracia Leite.

No ano de 2021 o setor florestal gerou R\$ 97,4 bilhões de reais, sendo responsável por 1,2% do PIB nacional. Dentre as etapas fundamentais da indústria florestal destaca-se o inventário florestal (IF). Essa atividade tem sido alvo de pesquisas para que seja preciso, de baixo custo e de rápida execução. Dentre os avanços recentes, os *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS), cuja execução de voo, com localização em datas/horas a gosto do usuário, superou as desvantagens de dados orbitais de alta resolução. Assim, este estudo objetivou avaliar a eficiência da aerofotogrametria digital para estimar a altura total (Ht) e, indiretamente, o diâmetro a 1,30 m de altura (*dap*) e volume de árvores, em um povoamento comercial de eucalipto. A altura das árvores foi estimada a partir de um *Canopy Height Model* (CHM) derivado da subtração de um *Digital Surface Model* (DSM) por um *Digital Terrain Model* (DTM) provindos de uma nuvem de pontos gerada a partir de dados de aerofotogrametria digital e *Light Detection and Ranging* (LiDAR), respectivamente. A partir das alturas estimadas pelo CHM, foram ajustados modelos sigmóides para a obtenção das estimativas de diâmetro a 1,30 m (*dap*). Uma equação volumétrica ajustada para a área de estudo foi utilizada para estimar os volumes das árvores. As variáveis estimadas a partir da metodologia proposta foram comparadas com os valores de Ht e *dap* mensurados no IF. As estimativas dos *Canopy Height Model* (CHM), originado a partir do aerolevanteamento com RPA, resultaram nos respectivos valores de média, máximo e mínimo: 26,8; 32,6 e 8,8 m para Ht, enquanto os dados de campo apontavam o seguinte resultado: 25,0; 32,3 e 9,6 m, respectivamente, gerando um erro médio absoluto e relativo de 1,84 m e 7,35%, respectivamente. As estimativas do *dap* obtidas através do modelo sigmóide selecionado originou nos respectivos valores de média, máximo e mínimo: 17,2; 20,2 e 4,8 cm. Os valores de *dap* mensurados no IF para média, máximo e mínimo foram: 15,9; 24,5 e 5,3 cm, o que resultou em *EMA* 1,29 cm e *EMR<sub>%</sub>* de 8,12 %, respectivamente. O valor do volume total observado no IF foi de 176,59 m<sup>3</sup>, enquanto o volume total estimado pela metodologia proposta, foi de 171,85 m<sup>3</sup>. Esses valores resultaram em *EMA* de 4,71 m<sup>3</sup> e *EMR<sub>%</sub>* de 2,66 %. Assim, o emprego da aerofotogrametria digital para estimação

de altura, dap e volume de florestas plantadas com eucalipto pode ser eficiente, mas ainda requer investigação, especialmente em relação a distribuição de pontos de controle, modelagem e algoritmos de segmentação.

Palavras-chave: Drone. Mensuração Florestal. Aerofotogrametria digital

## ABSTRACT

SILVA, Simone, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2021. **Modeling forest attributes from digital aerial photogrammetry data in eucalypts stands.** Advisor: José Marinaldo Gleriani. Co-advisor: Helio Gracia Leite.

In 2021, the forest sector generated R\$ 97.4 billion reais, accounting for 1.2% of the national GDP. Among the fundamental steps of the forest industry, the forest inventory (FI) stands out. This activity has been the subject of research so that it is accurate, low cost and quick to carry out. Among the recent advances, the Remotely Piloted Aircraft System (RPAS), whose flight execution, with location in dates/times at the user's taste, has overcome the disadvantages of high-resolution orbital data. Thus, this study aimed to evaluate the efficiency of digital aerophotogrammetry to estimate total height (Ht), diameter at 1.30 m height (dap) and tree volume in a commercial eucalyptus stand. The height of the trees was estimated from a Canopy Height Model (CHM) derived from the subtraction of a Digital Surface Model (DSM) by a Digital Terrain Model (DTM) from a point cloud generated from digital aerophotogrammetry data and Light Detection and Ranging (LiDAR), respectively. From the heights estimated by the CHM, sigmoid models were adjusted to obtain diameter estimates at 1.30 m (dap). A volumetric equation adjusted for the study area was used to estimate tree volumes. The variables estimated from the proposed methodology were compared with the values of Ht and dap measured in the FI. The estimates of the Canopy Height Model (CHM), originated from the aerial survey with RPA, resulted in the respective mean, maximum and minimum values: 26.8; 32.6 and 8.8 m for Ht, while field data indicated the following result: 25.0; 32.3 and 9.6 m, respectively, generating a mean absolute and relative error of 1.84 m and 7.35%, respectively. The estimates of the dap obtained through the selected sigmoid model originated in the respective mean, maximum and minimum values: 17.2; 20.2 and 4.8 cm. The values of dap measured in the FI for mean, maximum and minimum were: 15.9; 24.5 and 5.3 cm, which resulted in 1.29 cm and 8.12%, respectively. The value of the total volume observed in the FI was 176.59 m<sup>3</sup>, while the total volume estimated by the proposed methodology was 171.85 m<sup>3</sup>. These values resulted in 4.71 m<sup>3</sup> and 2.66 %. Thus, the use of digital aerophotogrammetry to estimate height, dap and volume of forests planted with eucalyptus can be efficient, but it still requires investigation, especially in relation to control point distribution, modeling, and segmentation algorithms.

Keywords: RPA. Forest Measurement. Digital Aerial Photogrammetry

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....   | 10 |
| LEGISLAÇÃO.....  | 12 |
| TIPOS DE RPAS.....   | 15 |
| PLANEJAMENTO DE VOO.....   | 17 |
| CONDIÇÕES CLIMÁTICAS.....  | 18 |
| GROUND SAMPLE DISTANCE (GSD).....                                      | 19 |
| SOBREPOSIÇÃO.....  | 20 |
| ALTURA DE VOO.....   | 22 |
| PONTOS DE CONTROLE ( <i>Ground Control Points - GCP</i> ).....         | 23 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS.....   | 25 |
| 2.1 <i>Caracterização da área de estudo</i> .....                      | 25 |
| 2.2 <i>Coleta e processamento dos dados</i> .....                      | 25 |
| 2.3 <i>Pontos de Controle (GCP)</i> .....                              | 28 |
| 2.4 <i>Correção das altitudes ortométricas</i> .....                   | 28 |
| 2.5 <i>Modelos digitais e obtenção da altura total</i> .....           | 29 |
| 2.6 <i>Estimativas do dap</i> .....                                    | 30 |
| 2.7 <i>Inventário Florestal (IF)</i> .....                             | 31 |
| 2.8 <i>Análise Comparativa</i> .....                                   | 31 |
| 2.9 <i>Estimativa do volume</i> .....                                  | 32 |
| 3. RESULTADOS.....   | 33 |
| 3.1 <i>Processamento das imagens</i> .....                             | 33 |
| 3.2 <i>Modelagem de atributos</i> .....                                | 33 |
| 3.3 <i>Estimativa do dap através de modelos sigmoidais</i> .....       | 36 |
| 3.4 <i>Análise Comparativa das variáveis dap e altura total</i> .....  | 38 |
| 3.5 <i>Volume estimado a partir do modelo volumétrico</i> .....        | 39 |
| 4. DISCUSSÃO.....  | 42 |
| 4.1 <i>Processamento, alinhamento das imagens e plano de voo</i> ..... | 42 |
| 4.2 <i>Modelagem de atributos</i> .....                                | 44 |
| 4. CONCLUSÕES.....   | 47 |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                     | 47 |
| APÊNDICE.....  | 61 |
| <i>Processamento de imagens</i> .....                                  | 61 |

## 1. INTRODUÇÃO

A espécie do gênero eucalipto é uma das espécies comerciais com maior valor econômico no Brasil (FREITAS et al., 2020), país no qual ocupa aproximadamente 9,6 milhões de área plantada destinada de indústrias de base florestal (IBGE, 2021).

Dentre as etapas fundamentais da indústria florestal destaca-se o manejo florestal, assim, a eficiência do mesmo depende da consistência e exatidão das estimativas de estoques de crescimento e de colheita que está subordinada à modelagem do crescimento e da produção (BURKHART E TOMÉ, 2012), a qual depende da disponibilidade e qualidade dos dados de inventários florestais (CAMPOS E LEITE, 2017). Dessa forma, torna-se necessário conhecer os estoques de crescimento e de colheita em cada inventário florestal, para isto, é preciso dispor de medições e estimativas consistentes de altura total, diâmetro e volumes individuais (SOARES et al., 2011).

Além de apresentar correlação significativa com o volume das árvores, a altura total é uma variável indicadora da capacidade produtiva de um local (CLUTTER et al., 1983; LAAR E AKÇA, 2007; SILVA et al., 2018; RESENDE et al., 2018; NOORDERMEER et al., 2020), portanto, quanto maior a exatidão das alturas, melhores são as estimativas. Esta exatidão é dependente de erros de medição que variam em função de fatores ambientais, condições do plantio e de erros de estimação (SOARES et al., 2011) que ocorrem ao empregar regressões ou alguma técnica e aprendizado de máquinas (COSTA-FILHO et al., 2019) para gerar estimativas de altura. A medição da altura demanda mais tempo em relação a outras variáveis como o dap, e isto resulta em aumento de custos (COLBERT et al., 2002; POPESCU et al., 2002; CASTAÑO-SANTAMARÍA et al., 2013; BINOTI et al., 2013).

Por questão de tempo e custo geralmente são feitas medições de altura apenas para algumas árvores em cada parcela de inventário. As alturas das demais árvores são estimadas por regressão (CURTIS, 1967; HUSCH et al., 2002; DORADO et al., 2005; VENDRUSCOLO et al., 2017) ou preditas com emprego de métodos de aprendizado de máquinas (COSTA-FILHO et al., 2019), principalmente, redes neurais artificiais (RNA)(DIAMANTOPOULOU E MILIOS, 2010; BINOTI et al., 2013; ÖZÇELIK et al., 2013; SILVA et al., 2020).

Adicionalmente, tecnologias recentes de Sensoriamento Remoto (SR) permitem mais avanços nessa área, com medições espacialmente explícitas e temporalmente mais uniformes,

sob demanda. Essas técnicas também facilitam a operação em áreas de difícil acesso e permitem um grande ganho com a visada sinóptica (MORA et al., 2013; HILL et al., 2014; LEMAIRE et al., 2014; MILLER et al., 2017; BARBOSA et al., 2019; JURJEVIĆ et al., 2020; LI et al., 2021).

Imagens obtidas por *Remotely Piloted Aircraft Systems* (RPAS) vêm apresentando grande potencial em diversas áreas do conhecimento, principalmente, na silvicultura (NELSON et al., 2009; FAYE et al., 2016; DASH et al., 2017; WALLACE et al., 2014; WEBSTER et al., 2018; WANG et al., 2021). Essa abordagem utiliza algoritmos computacionais denominados *Structure from Motion* (SfM), os quais por meio de conceitos de estereofotogrametria permitem a elaboração de modelos tridimensionais (3D)(DITTMANN et al., 2017).

A aerofotogrametria digital pode viabilizar a coleta de dados em campo em um pequeno intervalo de tempo, onde as informações adquiridas são de altíssima resolução espacial (MESSINGER et al., 2016). Ainda há a vantagem de as imagens apresentarem menor interferência de cobertura de nuvens, serem mais acuradas, e possíveis de serem obtidas a qualquer momento, e cuja autonomia de obtenção, está a cargo do usuário, diferentemente das obtidas por sensores orbitais (JAAKKOLA et al., 2010; WHITEHEAD et al., 2014; BOHLIN, et al., 2017)

Dentre as aplicações da aerofotogrametria digital em ciência florestal destaca-se: avaliação da biodiversidade (GETZIN et al., 2012), monitoramento de pragas e doenças (GETZIN et al., 2014; FORNACE et al., 2014), fenômenos ecológicos naturais (EERSON E GASTON, 2013), levantamentos topográficos (GETZIN et al., 2014), contagem de indivíduos (FRITZ et al., 2013; RUZA et al., 2017) (FAVARIN et al., 2013), a quantificação da fitomassa (HAMDAN et al., 2014), e até mesmo, estimativa de variáveis dendrométricas (DANDOIS et al., 2013; NURMINEN et al., 2013; PANAGIOTIDIS et al., 2017).

Deois e Ellis (2013), Nurminem et al., (2013), Lisein et al., (2013) e Panagiotidis et al., (2017) apresentaram resultados satisfatórios, em termos de construção de um modelo 3D. Porém, ainda há necessidade de pesquisas com foco na modelagem acurada da topografia do terreno, por meio de modelos digitais de terreno (DTM). Isto, principalmente em áreas de plantios adensados, diante da maior dificuldade de construção do modelo 3D (VASTARANTA, et al., 2013; WHITE et al., 2016).

O uso da aerofotogrametria digital em povoamentos adensados, principalmente em terrenos declivosos é ainda um grande desafio para os pesquisadores. No presente estudo avaliamos a eficiência do uso da aerofotogrametria digital para estimar a altura total, diâmetro a 1,30 m de altura (*dap*) e volume de árvores, em um povoamento comercial de eucalipto. A hipótese avaliada foi: as estimativas de altura, *dap* e volume obtidas a partir de levantamentos feitos com DTM não resultam em exatidão compatível com aquela observada no inventário feito na forma tradicional.

## LEGISLAÇÃO

Aeronaves Remotamente Pilotadas ou *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS) é uma terminologia utilizada pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO) e legislação brasileira, para se referir a toda aeronave com ausência de tripulação e piloto a bordo, que é controlada por meio de controle remoto ou estação de pilotagem. Segundo a regulamentação do ICA 100-40/2020, a ICAO classifica as aeronaves não tripuladas em três categorias sendo estas: RPA, aeromodelos e autônomas. As duas primeiras categorias se diferem em relação ao uso da atividade, uma vez que, os aeromodelos são aeronaves remotamente pilotadas destinadas estritamente à uso recreativo enquanto as RPA podem ser empregadas para diversas aplicações desde que o uso da atividade seja sustentável e seguro. Com relação a classe das aeronaves não tripuladas autônomas, essas por sua vez, se distinguem das demais classes por não carecerem da presença de um operador para controlar o voo após início do mesmo (DECEA, 2020).

A legislação sobre o uso de aeronaves remotamente pilotadas ou *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS) foi regulamentada em maio de 2017, tendo sido fundamentada no Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017 (RBAC-E nº 94/2017) (ANAC,2017). Atualmente as atividades que envolvem o uso de RPA são regulamentadas por três órgãos: Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL)

A ANATEL é responsável por reger sobre os assuntos pertinentes a radiofrequência das aeronaves a fim de evitar quaisquer problemas de interferência. Assim, torna-se necessário que a aeronave e seu sistema de rádio passem pelos processos de cadastro e homologação na ANATEL. Após a emissão do certificado de homologação, o piloto deverá anexar o número da certificação de homologação junto ao chassi da aeronave (ANATEL, 2016).

A ANAC é um órgão federal que tem como funções regulamentar e fiscalizar as atividades da aviação civil, sendo também o órgão responsável pela formação de pilotos, certificação das aeronaves e cadastro de RPA. O cadastro de RPA é feito pelo Sistema de Aeronaves não Tripuladas (SISANT) que recebe dados de RPA de uso recreativo e não recreativo.

O DECEA é um órgão da aeronáutica responsável pelo planejamento e administração de questões relacionadas ao acesso ao espaço aéreo, com intuito de manter a segurança e o controle das operações com RPAS. Dessa forma, este órgão utiliza o Sistema de Solicitação de Acesso ao Espaço Aéreo (SARPAS) para que o piloto possa realizar o cadastro e solicitar a autorização para a operação de voo, que virá com um número do protocolo emitido pelo sistema (DECEA, 2020).

A ANAC categorizou os RPAS conforme o uso, assim, aeromodelos são aeronaves remotamente pilotadas empregadas para fins recreativos, enquanto os RPAS propriamente ditos possuem uso comercial e experimental.

De acordo com a ANAC (2017) os RPAS são subdivididos em três classes conforme o peso de decolagem:

Classe 1 - Acima de 150 Kg;

Classe 2 - Acima de 25 Kg e abaixo ou igual a 150 Kg;

Classe 3 - Abaixo ou igual a 25 Kg;

As aeronaves acima de 250g devem ser cadastradas no Sistema de Aeronaves não Tripuladas (SISANT) da ANAC, após o cadastro será emitida uma certidão que deverá ser anexada na aeronave. Para as aeronaves com peso abaixo de 250g os registros e cadastros na ANAC são dispensados dado que, estas são consideradas para uso recreativo (ANAC, 2017).

Como este estudo foi realizado empregando-se um RPAS de classe 3, toda a apresentação deste tema será abordada conforme esta classificação

Tipos de operações com RPAS:

VLOS (*Visual Line of Sight*) – Operação em que o piloto consegue manter o contato visual direto com a aeronave.

EVLOS (*Extended Visual Line of Sight*) – Operação em que o piloto não consegue manter o contato visual direto com a aeronave, sendo necessário o auxílio de terceiros e/ou equipamentos.

BVLOS (*Beyond Visual Line-Of-Sight*) – Operação em que o piloto não consegue manter o contato visual com a aeronave, mesmo com auxílio de terceiros e/ou equipamentos. De acordo com as normas da ANAC, atualmente esta operação é proibida no Brasil.



Figura 1. Representação dos tipos de operação de voo realizadas com RPAS.  
Fonte: DECEA, 2020.

De acordo com o DECEA (2020) para se pilotar um RPA é necessário seguir uma série de requisitos, iremos apresentar alguns:

O piloto deve estar em posse do manual de voo da aeronave, certidão de cadastro, certificado da matrícula e apólice do seguro.

Altura de voo máxima permitida é de 120 m acima do solo (400 pés). Acima disso, torna-se necessária a autorização prévia do órgão regulamentador.

Ao sobrevoar uma determinada área é necessário manter uma distância horizontal de no mínimo 30 m distante de terceiros. Para sobrevoar áreas próximas a terceiros é necessário que estes concordem por meio de um termo de anuência.

O operador deverá ter conhecimento sobre as limitações da sua aeronave e estar com a manutenção da mesma em dia.

Manter distância horizontal de 30 m de instalações, linhas de energia, edificações e outros. Caso deseje sobrevoar é necessário obter autorização prévia do responsável.

É proibido sobrevoar áreas de segurança (presídios, delegacias, postos de gasolina e outros combustíveis, áreas militares, usinas e outros) sem autorização prévia do responsável pelo local.

A realização de aerolevantamentos deverá ser feita diante da autorização do Ministério da Defesa.

É proibido sobrevoar nas proximidades de aeródromos sem autorização prévia, a qual deve ser obtida através do SARPAS. Assim, voos até 40 m deverão ser realizados a 5,4 km de distância de aeródromos, enquanto voos acima desta altura deverão ocorrer a distância de 9 km.

## **TIPOS DE RPAS**

Atualmente, existem dois tipos de RPAS que vem sendo largamente utilizados sendo: as aeronaves de asa fixa e as multirrotoras. A utilização dessas aeronaves irá depender objetivo do operador e/ou disponibilidade de recursos.

As aeronaves de asa fixa são aquelas que se assemelham a aviões, onde a decolagem e pouso são realizados na horizontal. Essas aeronaves podem ser utilizadas para o mapeamento de grandes áreas, pois apresentam maior velocidade e autonomia de voo, garantindo maiores ganhos de produtividade (NASCIMENTO et al., 2018). De acordo (FIGUEIREDO E FIGUEIREDO, 2018), RPAS de asa fixa são capazes de sobrevoar 5500 hectares em um único dia, assumindo as condições climáticas e ambientais ideais para tal. Um exemplar deste modelo é o ebee fabricado pela empresa Suíça *Sense Fly* (*senseFly* Ltd, Cheseaux-Lausanne, Switzerland), este vem sendo utilizado corriqueiramente no setor sulcroalcooleiro (PONTI et al., 2016; SOUZA, et al., 2017) e também em outras culturas agrícolas como trigo (HUNT et al., 2010)

Os produtos finais, obtidos a partir do mapeamento por meio dos RPAS de asa fixa, podem atingir resolução espacial centimétrica, ainda, há a possibilidade da realização de aerolevantamentos com alturas de voo maiores. Entretanto, esses RPAS podem apresentar algumas desvantagens como, por exemplo, por serem mais leves estão mais susceptíveis à ventos causando uma instabilidade maior no aerolevantamento, além de exigirem um espaço aberto e extenso para decolagem e pouso (TANG E SHAO, 2015),o que pode inviabilizar alguns projetos, os quais dificilmente se observará áreas abertas para decolagem como mapeamentos de talhões florestais, por exemplo. Adicionalmente, sob a ação de ventos podem resultar em erros verticais em seus produtos cartográficos (BOON et al., 2017; PRUDKIN E BREUNIG, 2019), além do mais, possui um preço relativamente mais alto em relação as aeronaves multirrotoras (TSOUROS et al., 2019).



Figura 2. Representação de um modelo de RPAS de asa-fixa: eBee X da *senseFly*.  
Fonte: SenseFly.

Nas aeronaves multirrotoras a decolagem e o pouso ocorrem na vertical, são mais adequadas para o levantamento de pequenas áreas, podendo alcançar uma resolução espacial superior aos modelos de asa fixa. Ao contrário deste último, os multirrotadores não exigem grandes áreas abertas para realização do pouso e decolagem, além disso, por serem mais robustas podem suportar ventos e cargas como RADAR e sensores LiDAR (CAO et al., 2019) ,por exemplo.

Dentre os modelos de RPAS multirrotadores mais difundidos no Brasil, destaca-se a linha Phantom fabricado pela empresa Chinesa DJI, sua popularidade se deve, principalmente, ao baixo valor de aquisição. Além disso, o uso deste modelo vem ganhando diversos mercados como agricultura, construção civil, silvicultura, meio ambiente, engenharia e outros (PESSI et al., 2020).

A desvantagem do uso das multirrotoras está associado à sua menor autonomia de voo, velocidade e a sua limitada cobertura de voo à pequenas áreas. Assim, as multirrotoras requerem mais paradas para troca de bateria necessitando de maior experiência do piloto (JU E SON, 2018; SIEBERT E TEIZER, 2014). O alto consumo de energia e a carga útil da bateria são fatores que podem influenciar na performance da aeronave. Tal fato pode refletir nos menores ganhos de produtividade das multirrotoras em relação aos modelos de asa fixa (LIU et al., 2019).



Figura 3. Representação de um modelo de RPAS multirrotor: Phantom 4 Pro da *DJI*.

Fonte: DJI. (<https://www.dji.com/br>)

Aeronaves híbridas do tipo *vertical take-off and landing* (VTOL) unem vantajosas características dos modelos de asa fixa e multirrotores. Desse modo, sua decolagem e pouso são realizados na vertical, como nos multirrotores, o que dispensa a necessidade de grandes áreas abertas ou pistas para realização dessas operações. Adicionalmente, modelos híbridos apresentam asas fixas, o que lhes permitem uma maior aerodinâmica para sobrevoar grandes áreas com maior velocidade, conferindo uma maior autonomia de voo (CABREIRA e al., 2019).

## **PLANEJAMENTO DE VOO**

O planejamento de voo é uma das etapas mais importantes na aerofotogrametria, uma vez que, é partir da metodologia empregada nesta etapa que irá se obter sucesso ou não, na geração dos produtos. Contudo, antes de se planejar um voo é necessário saber qual o objetivo do voo e a precisão requerida, ou melhor seu *Ground Sample Distance* (GSD), o qual iremos abordar nos próximos tópicos.

A partir da definição desses dois fatores, pode-se elaborar a metodologia para a resolução do problema. Atualmente, na aerofotogrametria digital com RPAS, o plano de voo pode ser realizado através de aplicativos de voos que estão disponibilizados no mercado de forma gratuita ou paga como: Drone Deploy, Mission Planner, Skydrones, Map Pilots, Pix4d e outros.

Além disso, é importante também levar em consideração qual aplicativo possui compatibilidade com o modelo da sua aeronave. A Figura 4 apresenta um exemplo de plano de

voo realizado por meio do aplicativo Map Pilots, neste podemos observar os parâmetros de voo adotados, tempo gasto para a realização do aerolevanteamento e número de baterias a serem utilizadas.

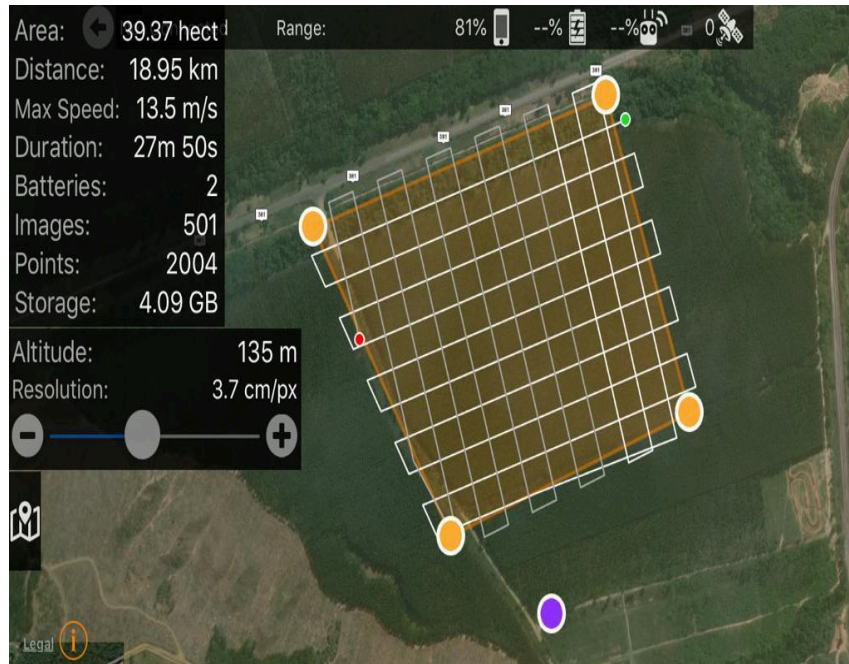


Figura 4. Plano de voo elaborado através do aplicativo Map Pilot.

## CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Apesar da menor dependência das condições climáticas em relação aos dados orbitais, ainda deve ser levado em consideração as condições de luminosidade e ventos para a realização de aerolevanteamentos com RPA.

A exposição da aeronave a ventos fortes pode comprometer a autonomia de voo, dado que, utilizará boa parte da potência aeronave, reduzindo o tempo de bateria. Além do mais, a ação dos ventos também poderá comprometer a estabilidade da RPA, principalmente das RPA de asa fixa, por serem mais leves. Tal fato, prejudicará diretamente a qualidade da nuvem de pontos (DANDOIS et al., 2015).

Dentro do plano de voo existem parâmetros de voo, os quais seus valores irão variar de acordo com as características do produto cartográfico que se deseja obter e da área de interesse, desse modo, alguns parâmetros de voo são:

## **GROUND SAMPLE DISTANCE (GSD)**

O GSD ou *Ground Sample Distance*, traduzindo ao pé da letra, pode ser denominado como distância da amostra no terreno, ou seja, é uma porção do terreno que o pixel irá representar em unidades centimétricas (MIKHAIL et al., 2001; PRUDKIN E BREUNIG, 2019).

À medida que se diminuiu o GSD de uma imagem, maior é o nível de detalhamento da mesma, conferindo-a uma maior resolução espacial e conseqüentemente menor altura de voo (KÜNG et al., 2011). Desse modo, antes de se planejar um voo é necessário determinar qual o GSD requerido, posto que, a precisão está atrelada a resolução espacial e a altura de voo. Tal fato foi constatado por Figueiredo et al., (2016) ao estimarem o volume de pilhas de madeira. Os autores testaram três alturas de voo (30m, 40m e 50m) distintas o que refletiu nos respectivos GSD (1,30 cm/pix, 1,73 cm/pix, 2,16 cm/pix).

Ao estimarem a biomassa e o estoque de carbono em pastagens semi-áridas, na região do Novo México, Estados Unidos, Cunliffe et al., (2016) planejaram um GSD de 0,4 cm a 0,7 cm. Para chegar a esses valores de GSD os autores empregaram alturas de voo mais baixas (15 m e 20 m), contudo, apesar da vantagem de se trabalhar com GSD menores, existem algumas objeções como a segurança do aerolevante, quando se utiliza alturas de voo menores e o tempo de processamento das imagens.

A primeira objeção está relacionada à altura de voo mínima, dessa forma, a aeronave deverá sobrevoar a uma altura de voo que esteja acima de obstáculos como construções, postes, árvores, pessoas e outros, com intuito de evitar colisões. Isso destaca a importância do reconhecimento da área onde se deseja realizar o aerolevante, assim como, a determinação do melhor local de preferência abertos e localizados no ponto mais alto) para decolagem. A segunda está associada à redução do GSD, o que promoverá o aumento do número de imagens e, conseqüentemente, aumento do tempo de voo, gasto com baterias, aumento do tempo de processamento das imagens e gasto computacional. (WESTOBY et al., 2012).

De acordo com He et al., (2012), o GSD pode ser calculado conforme a expressão abaixo:

$$GSD = \frac{H_v * T_p}{f}$$

Em que:

$H_v$  = Altura de voo (m);

$GSD$  = amostra do terreno na imagem (cm);

$f$  = distância focal (mm);

$T_p$  = Tamanho do pixel;

## **SOBREPOSIÇÃO**

Para a formação de estereopar e conseqüentemente construção de modelo tridimensional, por paralaxe é necessário que haja sobreposição entre as imagens, esta por sua vez, é expressa em percentagem (REDWEIK, 2007; HAALA et al., 2013). A sobreposição das imagens pode ocorrer em dois sentidos, sendo estes, longitudinal e lateral. No primeiro, ocorre a sobreposição de imagens que estão inseridas em uma mesma linha de voo. Já no segundo, a sobreposição ocorre em imagens que estão inseridas em linhas de voo distintas e adjacentes (WOLF et al., 2014).

À medida que se eleva a sobreposição das imagens, aumentam-se as chances de formação do estereopar, uma vez que, a alta sobreposição promove uma maior área de interseção entre imagens e, assim, ocorrendo a formação de pontos tridimensionais conferindo uma maior precisão na nuvem de pontos 3D (HIRSCHMUGL et al., 2007) e também a redução de distorções na ortofoto (LEITÃO et al., 2016) Por outro lado, o aumento da sobreposição irá acarretar no aumento do número de imagens, o que exigirá mais tempo durante o voo, e também durante o processamento das imagens, exigindo maior esforço computacional (ZHANG et al., 2018; DANDOIS et al., 2015; FIGUEIREDO E FIGUEIREDO, 2018).

DANDOIS et al., (2015) também realizaram testes com diferentes níveis percentuais de sobreposição lateral (20%, 40%, 60% e 80%) e longitudinal (60%, 64%, 68%, 72%, 76%, 80%, 84%, 88%, 92% e 96%) quando avaliaram as características da nuvem de pontos em relação à diferentes parâmetros e condições de voo em florestas temperadas. Os autores não observaram diferenças significativas na precisão da nuvem de pontos ao alterar os níveis de sobreposição lateral mantendo uma alta sobreposição longitudinal. Contudo, obtiveram um aumento no erro de posicionamento da nuvem de pontos quando se reduzia os percentuais de sobreposição

longitudinal. Diante disso, os autores sugerem que a sobreposição longitudinal possui grande influência na precisão da nuvem de pontos, constatação também evidenciada por FREY et al., (2018).

Desse modo, quando o objetivo do voo é obter modelos tridimensionais com a finalidade de se extrair a altura ou o volume de objetos, é interessante que se utilize altos níveis de sobreposição, contudo, deve-se ter cautela para não comprometer a autonomia de voo (NOOR et al., 2018).

Para assegurar a cobertura estereoscópica de uma determinada área sem que haja formação de falhas na imagem, devido às variações das características do terreno e altura de voo, a fotogrametria estabelece que a percentagem da sobreposição longitudinal deve ser superior a 50% (WOLF E DEWITT, 2004) permitindo que um mesmo ponto seja visível em seis fotos. Segundo (LEITÃO et al., 2016) este valor é teórico e deverá ser superior quando se utiliza RPAS, como no trabalho de Prudkin e Breunig (2019) aonde utilizaram sobreposição acima de 80 % .

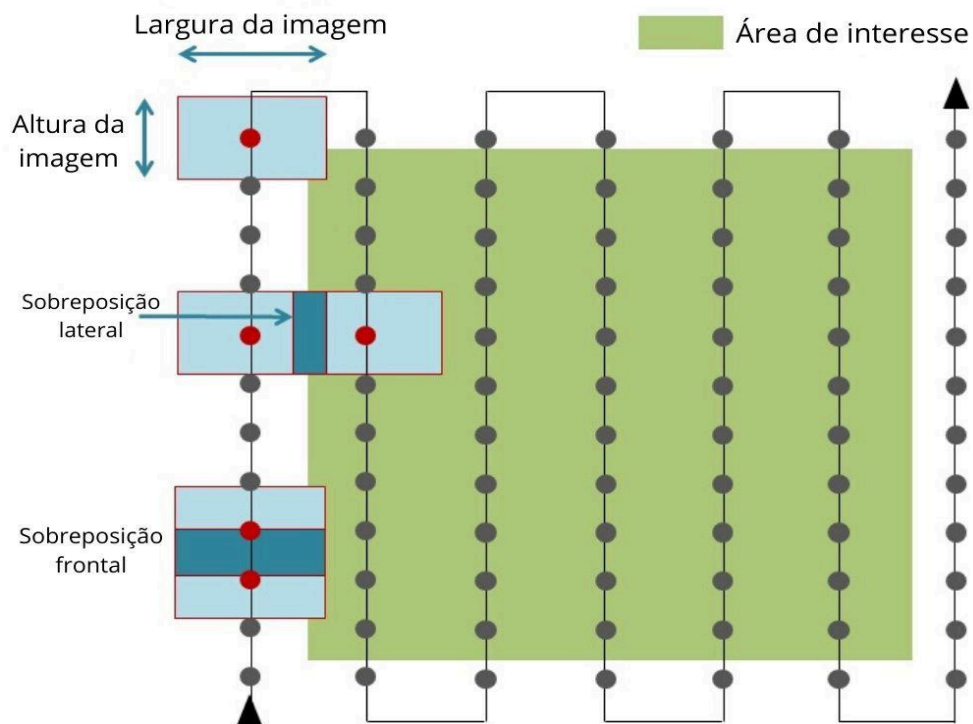


Figura 5. Representação de um plano de voo contendo sobreposição longitudinal e lateral.

Fonte: (Mappa/Horus Aeronaves) (<https://mappa.ag/>)

## ALTURA DE VOO

A altura de voo pode ser definida como a distância vertical entre o solo e a aeronave após a decolagem da mesma. Este parâmetro de voo está relacionado com o GSD da imagem, dessa forma, quanto menor a altura de voo maior será a resolução espacial dos produtos finais do aerolevanteamento (REIPS E GUBERT, 2019). Fato que também está relacionado com a precisão da nuvem de pontos, pois quanto maior o número de pixels por centímetro maior a densidade da nuvem de pontos (FREY et al., 2018).

Tais constatações corroboram com os resultados observados por Flores-de-Santiago et al., (2020), ao testarem diferentes alturas de voo e taxas de sobreposição para obtenção do ortomosaico e modelo digital de superfície, em uma área de ambiente costeiro. Alturas de voo menores são recomendadas quando se requer alto nível de precisão no levantamento como em casos que se deseja modelar atributos da superfície do terreno (LEITÃO et al., 2016) ou na realização de monitoramento de mudas, através de inventários de sobrevivência (SOBRINHO et al., 2018). Contudo, é necessário ter cautela na determinação da altura de voo, uma vez que, esta tem que estar dentro das normas estabelecidas pela regulamentação brasileira (ANAC, 2017).

$$H_v = \frac{GSD * f}{T_p}$$

onde:

$H_v$  = Altura de voo (m);

$GSD$  = amostra do terreno na imagem (cm);

$f$  = distância focal (mm);

$T_p$  = Tamanho do pixel;

O  $T_p$  pode ser obtido através da seguinte relação:

$T_s$  = Tamanho do sensor da câmera (mm);

$R_i$  = Resolução da imagem;

## PONTOS DE CONTROLE (*Ground Control Points - GCP*)

Os Pontos de Controle ou *Ground Control Points* (GCP) são alvos demarcados a nível do solo e que irão aparecer nas fotografias processadas, onde as coordenadas geográficas dos mesmos são utilizadas na correção geométrica do modelo tridimensional originado pelo software fotogramétrico e na otimização dos parâmetros da câmera (BERVEGLIERI et al., 2016). As coordenadas dos GCP são coletadas através de receptores GNSS (GPS) de alta precisão utilizando métodos pós-processados e pré-processado (LO et al., 2015; MESAS-CARRASCOSA et al., 2016). Existem outros tipos de GCP, os quais também são conhecidos como pontos de verificação ou *Check Points*. Esses pontos são utilizados para a avaliação da qualidade espacial dos produtos cartográficos, desse modo, suas coordenadas são utilizadas como valores de referência, não sendo inclusas na correção geométrica do modelo tridimensional (MESAS-CARRASCOSA et al., 2016).

Segundo (LINDER, 2009) os GCP podem assumir a forma de alvos artificiais ou naturais, a utilização de cada tipo de alvo irá depender da área onde será realizado o voo e também da disponibilidade de recursos financeiros. Na ausência de alvos naturais, são utilizados alvos artificiais, por exemplo, cruzamentos, esquinas, faixas ou algum objeto do terreno que possa ser utilizado como referência na imagem.

Geralmente os alvos artificiais mais utilizados são demarcações com tinta, CAL, gesso, spray, carvão, lonas de plástico, EVAs, papelão e outros.



Figura 6. Pontos de Controle (GCP) artificial (A) e natural (B, C)

Fonte: A autora e Gamarra e Macedo (2020)

Küng et al., (2011) realizaram um mapeamento com e sem a utilização de GCP e, ao avaliarem a acurácia do ortomosaico, obtiveram erros médios de 1,25 m com e 7,84 sem esses pontos (SANZ-ABLÁNEDO *et al.*, 2018). Graça et al., (2017), com objetivo de detectar alterações ambientais em uma área com ocorrência de desastre ambiental, também obtiveram maiores erros no ortomosaico e MDS, gerados a partir do processo fotogramétrico, quando não utilizaram GCP. Os erros foram acima de 7 m sem GCP e cerca de 3 m com utilização dos GCP. Já RUZGIENĖ *et al.*, (2015) avaliaram a qualidade dos produtos cartográficos obtidos com e sem os pontos de controle e encontraram erros médios de 2,255 m (sem pontos de controle), 0,072 com 5 pontos e 0,057 m com 10 pontos de controle.

Esses resultados revelam a importância dos GCP quando se objetiva obter a acurácia posicional dos produtos cartográficos. Ao elaborar um plano de voo, devemos nos atentar em relação ao número e a distribuição espacial desses GCP, uma vez que isso irá influenciar na qualidade dos produtos cartográficos. O número de GCP pode variar de acordo com as características do terreno, assim, terrenos com variações de inclinação exigem uma maior amostragem de GCP distribuídos de forma representativa ao longo do mesmo (SANZ-ABLÁNEDO *et al.*, 2018), enquanto terrenos mais homogêneos e /ou planos dispensam um alto nível de amostragem. Alguns estudos relatam que o aumento no número de GCP, proporciona maior precisão no modelo 3D (TAHAR *et al.*, 2013). Entretanto, devemos salientar que a demarcação de GCP no terreno é uma operação onerosa, principalmente em grandes áreas (ALMEIDA *et al.*, 2020) podendo custar até 50% do valor total do aerolevanteamento (WARNER *et al.*, 1996), sendo assim, devemos avaliar até quanto o uso de muitos GCP é viável economicamente.

Wang *et al.*, (2012) sugerem que os GCP distribuídos uniformemente e dispersos no terreno podem resultar em maiores ganhos de precisão na correção geométrica dos produtos cartográficos. Ainda, recomenda-se que pontos de controle sejam demarcados nas bordas da área a ser mapeada para redução de distorções na imagem, uma vez que nessas regiões borda ocorre um menor nível de sobreposição.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização da área de estudo

Os dados de campo deste estudo foram obtidos em um talhão florestal de eucalipto sob espaçamento de plantio 3,33 x 3,00 m, com 6 anos de idade, localizado no município de Belo Oriente (MG). O município apresenta clima do tipo Aw e altitude média de 301 m (Figura 7). A temperatura média anual gira em torno de 22,6 °C, enquanto a precipitação mínima anual ocorre no mês de julho (14 mm) e a máxima em dezembro (275 mm) (ALVARES et al., 2013).

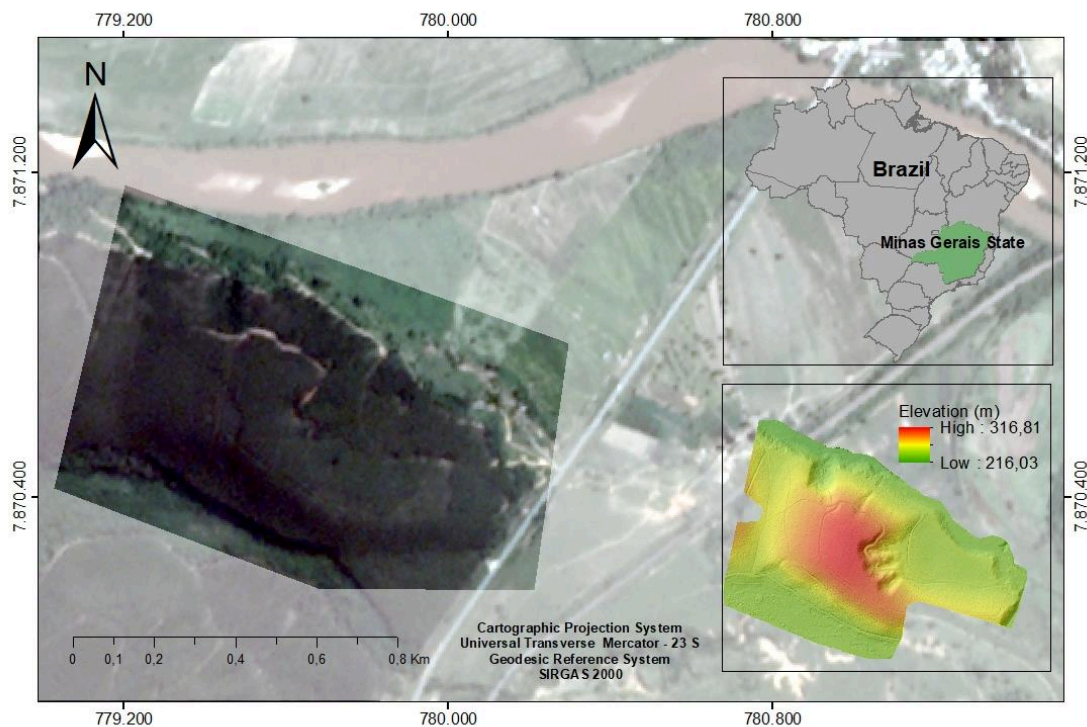


Figura 7. Localização área de estudo

### 2.2 Coleta e processamento dos dados

Em abril de 2018 foram realizados dois voos (duração aproximada de 15 min cada voo) (Figura 8), no talhão florestal de 49,83 hectares, com intuito de se coletar fotografias aéreas. Essas, por sua vez, foram obtidas pelo RPA *DJI Phantom 3 Professional quadcopter* (DJI, Shenzhen, China). O plano de voo foi elaborado com auxílio do aplicativo de voo *Map Pilot*.



Figura 8. Esquema de voo no talhão.

Os parâmetros da câmera e as informações adotadas no plano de voo estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 Parâmetros da câmera (adaptado de Zhang et al., 2018) e informações sobre o plano de voo.

| Camera model - FC300X |  |
|-----------------------|--|
| Parâmetro             | Valor  |
| Camera lens           | FOV 94° 20 mm<br>1/2.3" CMO                        |
| Image sensor          | Effective pixels: 12.4 M (total pixels<br>12.76 M) |
| Aperture              | f/2.8  |
| ISO range             | 100-1600   |
| RGB color space       | sRGB   |
| Shutter speed         | 1 / 800 s  |
| Photo size            | 4000 x 3000 pixels                                 |
| Photo Format          | JPEG   |
| Photo Number          | 421  |
| Flight Height         | 115 m  |
| Overlap               | 80% longitudinal e 70% lateral                     |
| Focal Length (f)      | 3,61 mm  |
| Pixel size            | 0,00156192 x 0,00156192 mm                         |

O processamento das fotografias RGB foi feito utilizando algoritmos fotogramétricos *Structure from Motion* (SfM) contidos no software do *Agisoft Metshape* versão 1.5.3 (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia). Este método utiliza da sobreposição das fotografias aéreas para fornecer uma nuvem de pontos 3D e, a partir desta, o *Digital Surface Model* (DSM) e o ortomosaico. O DSM é um modelo que representa a topografia do solo e a superfície (porção superior) de árvores, vegetação, construções entre outros (DITTMANN et al., 2017).

Uma descrição das etapas utilizadas no fluxo de execução do software, seguidos dos seus parâmetros e configurações adotadas no processamento das fotografias aéreas, é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Descrição do fluxo de trabalho do software, parâmetros e configurações de entrada para realização do processamento das fotografias aéreas.

| Fluxo de trabalho | Parâmetros              | Configurações               |
|-------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Align             | Accuracy                | High                        |
|                   | Preselection            | Reference                   |
|                   | Key Point Limit         | 120000                      |
|                   | Tie Point Limit         | 0                           |
| Dense Cloud       | Quality                 | High                        |
|                   | Depth Filtering         | Agressive                   |
| Mesh              | Surface Type            | Arbitrary                   |
|                   | Source Data             | Dense Cloud                 |
|                   | Face Count              | High                        |
|                   | Interpolation           | Enable                      |
| DSM               | Projection              | SIRGAS 2000/UTM<br>zone 23S |
|                   | Source Data             | Dense Cloud                 |
|                   | Interpolation           | Enable                      |
| Tiled Model       | Source Data             | Dense Cloud                 |
|                   | Tile size               | 256                         |
| Orthomosaic       | Surface                 | DSM                         |
|                   | Enable color correction | No                          |
|                   | Projection              | SIRGAS 2000/UTM<br>zone 23S |

Fonte: Modificado de Iizuka et al., (2017).

Para a construção da nuvem de pontos, foram testadas várias configurações dos parâmetros *Key Point Limit* e *Tie Point Limit*. Dentre as configurações testadas, os valores encontrados nesse estudo (120000 e 0) foram os que resultaram em melhor desempenho na nuvem de pontos.

### 2.3 Pontos de Controle (GCP)

Para georreferenciar a nuvem de pontos e o ortomosaico foram coletados 15 Pontos de controle terrestre (GCP) e suas respectivas coordenadas no talhão através de uma imagem obtida do Basemap, ferramenta do software *ArcGIS 10.6* (*Environmental Systems Research Institute, Redles, California*) e também com auxílio do Google Earth Pro. Posteriormente, as coordenadas dos GCP foram inseridas no *Agisoft Metshape* versão 1.5.3 (*Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia*) para que o mesmo pudesse realizar a correção geométrica.

Como a demarcação dos GCP não foi realizada diretamente no campo, tornou-se necessário um segundo georreferenciamento do ortomosaico e DSM no software *ArcGIS 10.5* (*Environmental Systems Research Institute, Redles, California*). A ortoimagem e o modelo digital foram registrados adotando-se como referência uma imagem da área de estudo obtido pelo comando Basemap, para isso foi empregado o polinômio de 2ª ordem.

### 2.4 Correção das altitudes ortométricas

O RPA determinou as altitudes do DSM por meio de um receptor de Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS). Entretanto, estas altitudes denominadas altitudes elipsoidais, não estão correlacionadas com o nível médio do mar ou geóide. Assim, é necessário a conversão das altitudes elipsoidais em altitudes ortométricas por meio de um modelo de ondulação geoidal. O cálculo das altitudes geoidais foi realizado pelo software MAPGEO2015 (MATOS et al., 2016). Logo em seguida, foi realizada a conversão das altitudes ortométricas através da seguinte operação matemática ilustrada pela figura 9:

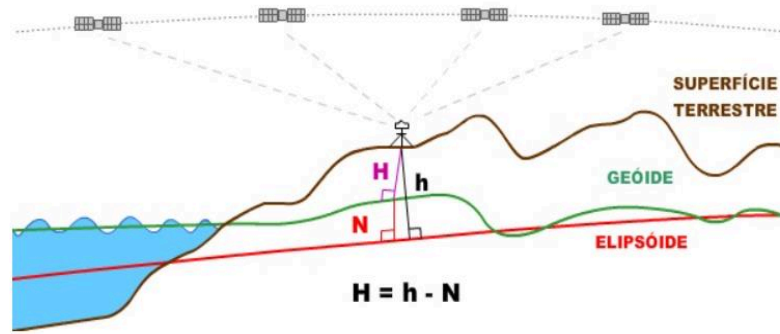


Figura 9. Modelo de elevação geoidal do MAPGEO.

Fonte: De Matos et al., (2016)

Em que:

$H$  : altitude ortométrica (m),  $h$  : altitude elipsoidal (m),  $N$  : altura geoidal (m).

### 2.5 Modelos digitais e obtenção da altura total

As alturas das árvores foram extraídas a partir do *Canopy Height Model* (CHM), que representa todas as informações de altura das feições contidas acima da superfície do solo (POPESCU, 2007). O CHM do presente estudo foi gerado partir da subtração do DSM, originado da aerofotogrametria digital, por um DTM obtido a partir de dados de *Light Detection e Ranging* (LiDAR) (PANAGIOTIDIS et al., 2016). Esse último foi adotado como base de dados de referência para área de estudo. Conforme Peckham e Gyozo (2007), o DTM é um modelo que representa a topografia do solo desconsiderando os elementos que estão acima da sua superfície.

O DTM utilizado nesse estudo foi disponibilizado por meio de um voo de LiDAR realizado em 2014. Os dados foram coletados de um sensor acoplado a aeronave Cessna modelo 206, operando a uma frequência de pulsos de 300kHz. A aeronave sobrevoou o talhão a 618 m de altura com velocidade média de 198 Km $h^{-1}$ . O ângulo de abertura utilizado foi de 60° e o diâmetro do feixe (footprint) de 0,31 m, assim originando uma densidade de pontos de cinco pontos por metro quadrado. O DTM resultante deste voo apresentou resolução espacial de 0,5 cm. Para esses dados, também foi necessária uma correção das altitudes ortométricas devido a presença de um receptor GNSS nesse sensor.

Após a subtração do DSM pelo DTM, o CHM resultante foi invertido e posteriormente, foi feita uma aplicação de filtro para o preenchimento das depressões espúrias. A extração das

alturas das árvores foi feita por meio do software *ArcGIS 10.6 (Environmental Systems Research Institute, Redles, California)*, onde os ponteiros de cada árvore foram demarcados através de uma ferramenta segmentadora de bacias hidrográficas, cujo método é denominado *Watershed* e, posteriormente, extraído os valores das coordenadas X, Y e Z (longitude, latitude e altitude) através das ferramentas *Add XY coordinates* e *Add Surface Information*.

## 2.6 Estimativas do dap

Para estimar o diâmetro das árvores, foram ajustados no software *Curve Expert* os modelos sigmóides logístico (Modelo 1), Gompertz (Modelo 2) e Richards (Modelo 3):

$$dap = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{-\beta_2 Ht}} + \varepsilon \quad (\text{Modelo 1})$$

$$dap = \beta_0 e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 Ht}} + \varepsilon \quad (\text{Modelo 2})$$

$$dap = \frac{\beta_0}{1 + e^{\beta_1 - \beta_2 Ht^{\frac{1}{\beta_3}}}} + \varepsilon \quad (\text{Modelo 3})$$

em que:

*dap*: diâmetro a 1,30 m de altura (cm), *Ht*: altura total (m),  $\beta_n$ : parâmetros estatísticos,  $\varepsilon$ : erro aleatório.

Os modelos 1, 2 e 3 foram ajustados com todo o banco de dados de inventário florestal do povoamento onde se encontra o talhão utilizado no estudo.

A seleção do modelo que melhor se ajustou aos dados observados foi realizada com base no Raiz Quadrada do Erro Médio ( $RQEM_{\%}$ ) (1), Bias (2) Correlação entre os valores estimados e observados ( $r_{y,\hat{y}}$ ) (3), Erros Relativos Percentuais ( $ER_{\%}$ ) (4) e gráfico dos valores observados e estimados:

$$RQEM_{\%} = 100 \bar{Y}^{-1} \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2} \quad (1)$$

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

$$r_{y\hat{y}} = 100 \frac{n^{-1} \left( \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)(Y_i - \bar{Y}) \right)}{\sqrt{\left( n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)^2 \right) \left( n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right)}}; Y_m = n^{-1} \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i \quad (3)$$

$$ER_{\%} = 100 \left( \frac{\hat{Y}_i - Y_i}{Y_i} \right) \quad (4)$$

em que:

$\bar{Y}$ : média dos valores observados;  $n$ : número de observações;  $\hat{Y}_i$ : valores estimados;  $Y_i$ : valores observados;  $\hat{Y}_m$ : média dos valores estimados

Após a seleção do melhor modelo, o mesmo foi aplicado ao banco de dados contendo as alturas totais estimadas pelo CHM.

## 2.7 Inventário Florestal (IF)

Com a finalidade de comparar as alturas estimadas pelo RPA com as medidas de altura obtidas em campo, foram delimitadas no talhão 3 regiões com área média de 2960 m<sup>2</sup>. Para isso, realizou-se o IF com intuito de se obter os dados de referência.

O IF consistiu na mensuração do diâmetro a 1,30 m (*dap*) e altura total de (743) árvores. O *dap* foi mensurado por meio de uma suta e a altura total pelo hipsomêtro digital Haglöf Sweden.

## 2.8 Análise Comparativa

As estimativas de altura total e *dap*, geradas pelo RPA, foram comparadas com os dados de campo (IF) por meio das estatísticas descritivas dos valores médio, máximo e mínimo dessas variáveis, número de observações, histograma da frequência relativa do número de árvores em função das classes de altura total e pelo Erro Médio Absoluto (EMA) (6) e Erro Médio Relativo ( $EMR_{\%}$ ) (7).

$$EMA = \bar{H}_{RPA} - \bar{H}_{IF} \quad (6)$$

$$EMR_{\%} = \frac{\bar{H}t_{RPA} - \bar{H}t_{IF}}{\bar{H}t_{IF}} \times 100 \quad (7)$$

em que:

EMA: erro médio absoluto (m), EMR: erro médio relativo (%),  $\bar{H}_{t_{RPA}}$  : altura total média estimada pelo RPA (m),  $\bar{H}_{t_{IF}}$  : altura total média obtida pelo IF (m).

### 2.9 Estimativa do volume

As estimativas do volume individual das árvores, por parcela, foram obtidas por pela aplicação de uma equação ajustada para os dados de árvores-amostra abatidas para cubagem no talhão, sendo:

$$\ln V = -10,32724366 + 1,820607 \ln dap + 1,175653 \ln Ht \quad (\text{Modelo 4})$$

$$RQEM_{\%} = 7,38$$

$$Bias = 0,0007$$

Em que: V é o volume, em m<sup>3</sup>, *dap* é o diâmetro a 1,30 m, em cm, *Ht* é a altura das árvores, em metros e Ln é o logaritmo neperiano.

Um resumo das etapas metodológicas realizadas na obtenção das estimativas de altura total e *dap* do talhão é apresentado na Figura 10.

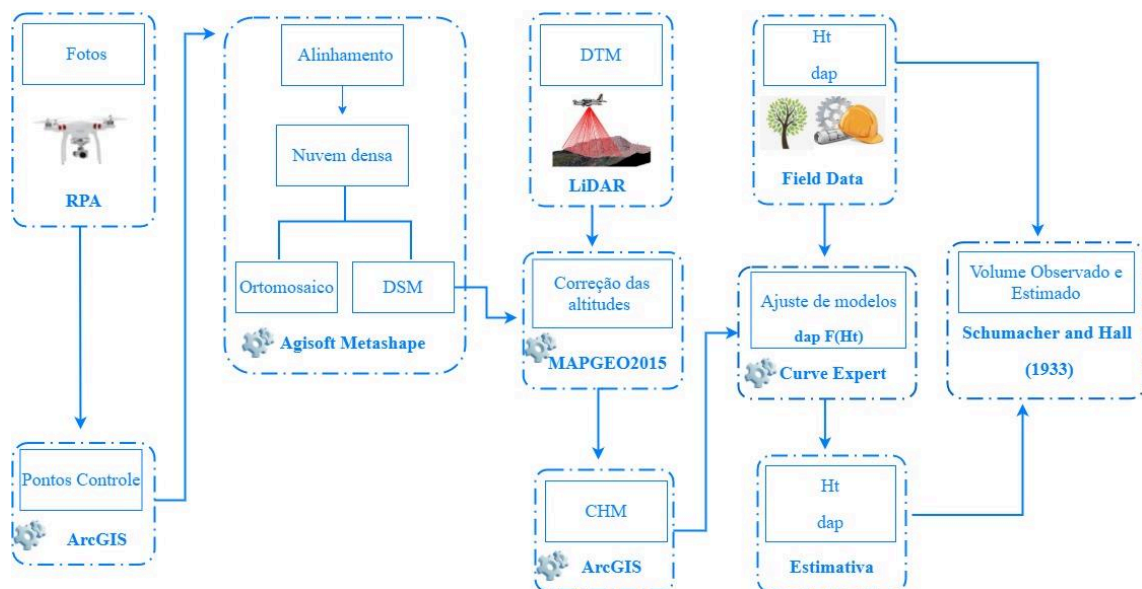


Figura 10. Síntese dos procedimentos metodológicos.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Processamento das imagens

O processamento das fotografias aéreas resultou em uma nuvem de pontos que é apresentada na Figura 11. Em determinados locais do talhão, não foi possível gerar esta nuvem, devido à perda do sinal do controle do RPA durante o voo e consequente falha da triangulação do GPS, impedindo a aquisição das fotografias. Outra observação feita durante o processamento dos dados foi o não alinhamento das fotografias em alguns locais, contudo, a aquisição das fotografias no momento do voo não foi alterada nesses locais.

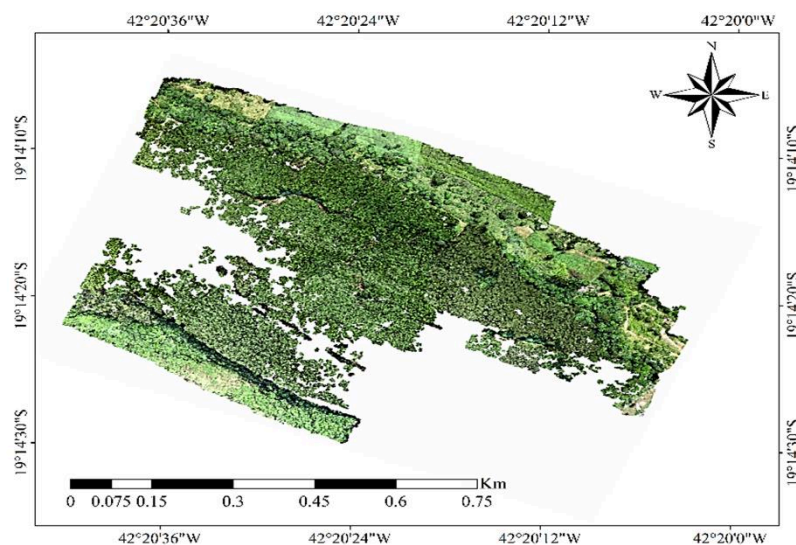


Figura 11. Nuvem de pontos densa do talhão.

As configurações dos parâmetros de alinhamento *Key Point Limit* e *Tie Point Limit* utilizados no processamento das imagens influenciaram na qualidade da nuvem de pontos que originou o DSM e o ortomosaico. Foram realizados testes durante o processamento das imagens, sendo observado que alguns valores adotados para esses parâmetros resultavam em boa qualidade da nuvem de pontos enquanto outros não. Os valores que geraram os melhores resultados para nuvem de pontos foram: 120000 para *Key Point Limit* e 0 para *Tie Point Limit*.

#### 3.2 Modelagem de atributos

A partir da nuvem de pontos, foram gerados o ortomosaico com resolução espacial de 0,0665 m e o DSM de 0,1014 m. A resolução espacial do DSM (0,1014 m) foi reamostrada para a resolução do DTM-LiDAR (0,50 m) a fim de permitir os co-registros das imagens e a correta

obtenção do CHM (0,50 m). Logo após esta operação, o DSM foi subtraído pelo DTM-LiDAR resultando no CHM. A Figura 5 apresenta os mapas do talhão contendo o ortomosaico (a), DTM (b), DSM (c) e CHM (d). (Figura 12).

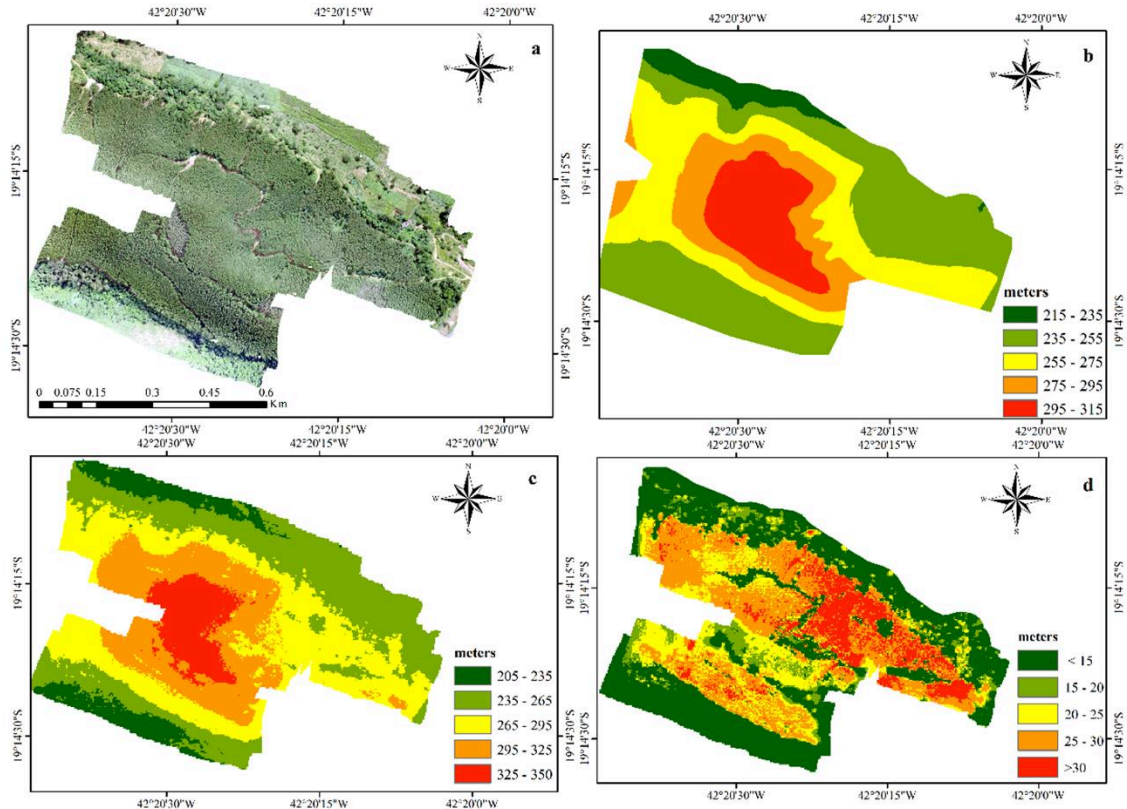


Figura 12. Mapas do talhão: (a) ortomosaico, (b) DTM, (c) DSM e (d) CHM.

O ortomosaico resultante apresentou pequenas distorções e ruídos em determinadas regiões e a formação de manchas brancas na região mais central. A altitude média do DSM foi de 265 a 295 m. A maioria das informações contidas no DSM foram consistentes com as do DTM (altitudes médias de 255 a 275 m), com exceção de algumas regiões onde houveram subestimativas por parte do DSM.

As alturas obtidas por meio do CHM predominaram em média nas classes de 25 a 30 metros. As características das feições apresentadas pelo CHM, foram condizentes com as originadas pelo ortomosaico e DSM, onde o talhão apresentou regiões de vegetação arbustiva e nativa, clareiras e estradas. No entanto, observou-se que o CHM subestimou os valores de altura nas regiões onde cortavam as estradas e nas extremidades da área de estudo. Apesar disso, o CHM conseguiu estimar satisfatoriamente as alturas de grande parte do talhão.

Um histograma da frequência relativa do número de árvores em função da classe de altura total para os dados de IF e estimados pelo CHM é apresentado na Figura 13.

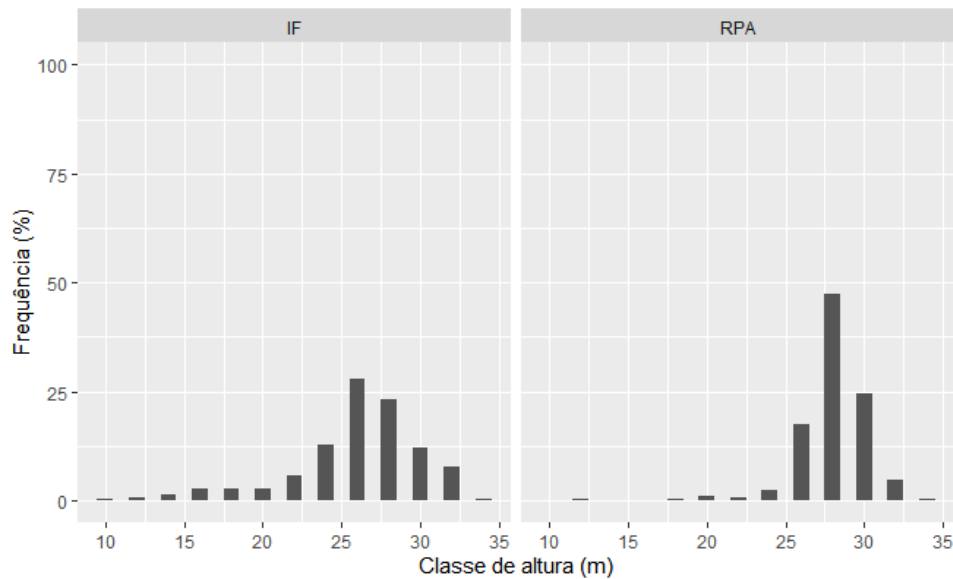


Figura 13. Histograma da frequência relativa do número de árvores em função das classes de altura total para o Inventário Florestal (IF) e RPA.

Em termos de valores absolutos, foram mensuradas as alturas totais de 743 indivíduos por meio do IF, enquanto a extração das alturas por meio do CHM contabilizou 613 indivíduos.

O histograma obtido por meio da aerofotogrametria digital mostra tendências de distribuição de frequência de forma similar àquela observada nos dados do inventário. As alturas estimadas pelo CHM resultaram em maior frequência de indivíduos (47%) concentrados na classe de altura total de 28 m. Para os dados de campo (IF), esta frequência (28%) se concentrou na classe 26 m. Observa-se também, para o histograma oriundo dos dados do CHM, uma maior frequência de indivíduos nas maiores classes de altura e uma menor frequência nos indivíduos nas menores classes de altura em relação ao histograma que retrata os dados de campo (IF).

### 3.3 Estimativa do *dap* através de modelos sigmoidais

Os valores das estatísticas de avaliação e estimativas dos parâmetros dos modelos ajustados podem ser visualizados na Tabela 3.

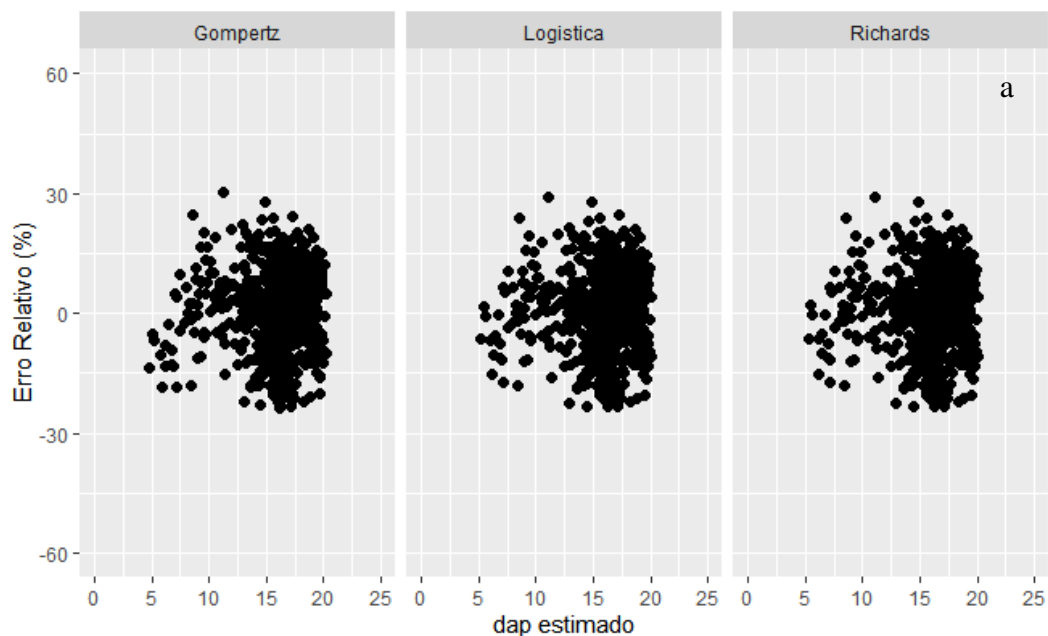
Tabela 3. Estatísticas de avaliação e estimativas dos parâmetros dos modelos ajustados para estimar o *dap* das árvores.

| Modelo | Parâmetros |           |           |           | Estatísticas |         |                |
|--------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------|---------|----------------|
|        | $\beta_0$  | $\beta_1$ | $\beta_2$ | $\beta_3$ | $RQEM_{\%}$  | Bias    | $r_{y\hat{y}}$ |
|        | Estimated  |           |           |           |              |         |                |
| 1      | 23,7915*   | 12,3476*  | 0,1299*   | -         | 10,09        | -0,0003 | 0,8655         |
| 2      | 27,8132*   | 1,2812*   | 0,0752*   | -         | 10,10        | -0,0008 | 0,8652         |
| 3      | 23,6709*   | 2,62867   | 0,1328*   | 1,0519    | 10,09        | -0,0003 | 0,8655         |

\* ( $p < 0,05$ )

As estatísticas dos modelos ajustados foram similares, apresentando valores próximos de  $RQEM_{\%}$  e  $r_{y\hat{y}}$ . O modelo 1 apresentou significância em todos os seus parâmetros e demonstrou precisão e suas estatísticas como:  $RQEM_{\%}$  de 10,09 %, Bias de -0,0003, e  $r_{y\hat{y}}$  de 0,8655. O modelo 2 foi o que apresentou o valor de bias mais distante de zero (-0,0008), e o menor valor para  $r_{y\hat{y}}$  (0,8652). O modelo 3, apesar da precisão e similaridade apresentada por suas estatísticas em relação ao modelo 1, não obteve significância em todos os seus parâmetros.

A Figura 14 apresenta os gráficos da distribuição dos erros relativos percentuais (ER%) em relação ao *dap* estimado, e a frequência do erro relativo percentual em relação a classe de erro relativo.



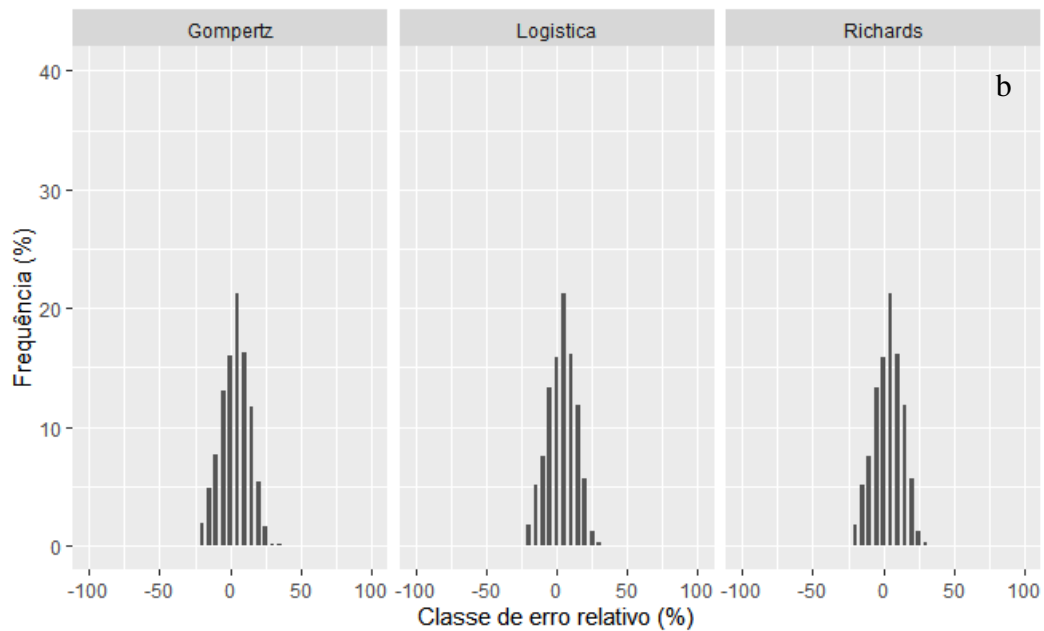


Figura 14. Distribuição dos erros relativos percentuais em função do dap (a), frequência do erro relativo percentual em função da classe de erro relativo (b), para os modelos: Gompertz, Logística e Richards.

Todos os modelos ajustados apresentaram distribuição normal dos erros relativos percentuais, com aproximadamente 98% dos erros concentrados nas classes de + ou – 20%. Apesar do desempenho similar demonstrado pelos modelos testados, o modelo Logístico (modelo 1) foi o selecionado para estimar o dap das árvores devido á significância de todos os seus parâmetros.

Posteriormente, o modelo 1 (logística) foi aplicado aos dados de altura total estimados pelo RPA e, assim, obteve-se o dap estimado. A Figura 15 ilustra a relação dap em função da altura total obtida para os dados de IF e RPA.

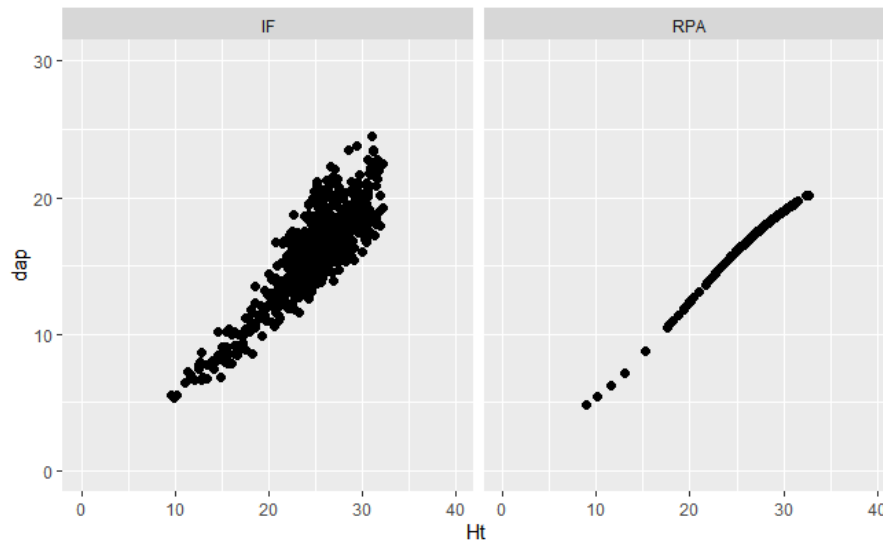


Figura 15. Relação hipsométrica dos dados de IF (a) e estimados pelo RPA (b).

### 3.4 Análise Comparativa das variáveis dap e altura total

As estatísticas descritivas das estimativas de altura total e dap geradas pelo IF, RPA e modelo 1 estão indicadas na Tabela 4.

Tabela 4. Estatísticas descritivas e Bias para os dados de Ht (m) e dap (cm) obtidos por meio do inventário florestal, RPA e Modelo 1.

|         | Ht (m) |      | dap (cm) |          |
|---------|--------|------|----------|----------|
|         | IF     | RPA  | IF       | Modelo 1 |
| Média   | 25,0   | 26,8 | 15,9     | 17,2     |
| Máximo  | 32,3   | 32,6 | 24,5     | 20,2     |
| Mínimo  | 9,6    | 8,8  | 5,3      | 4,8      |
| n       | 743    | 613  | 743      | 613      |
| EMA     | -      | 1,84 | -        | 1,29     |
| EMR (%) | -      | 7,35 | -        | 8,12     |

Em média, o RPA originou estimativas de altura próximas às do IF, com EMA de 1,84 (m) e  $EMR_{\%}$  de 7,35 %. Os valores médio, máximo e mínimo para as estimativas de Ht geradas pelo RPA foram 26,8, 32,6 e 8,8 m respectivamente, enquanto os dados mensurados pelo IF resultaram em 25,0, 32,3 e 9,6 m.

Para os diâmetros estimados a partir da equação oriunda do ajuste do modelo 1, a partir das alturas estimadas pelo RPA, observou-se que o valor médio do dap estimado (17,2 cm) está

próximo da média encontrada para o IF (15,9 cm). Os valores máximos (24,5 cm para IF e 20,2 cm para o modelo 1) e mínimo (5,3 cm para IF e 4,8 para modelo 1) também se aproximaram dos dados de campo. As estimativas do dap foram próximas dos valores médios observados apresentando valor de 1,29 (cm) para o EMA, o que corresponde a 8,12 % de EMR.

### 3.5 Volume estimado a partir do modelo volumétrico

As estimativas dos parâmetros e estatísticas de ajuste do modelo volumétrico ajustado para o talhão encontra-se na Tabela 5. Na Tabela 6 é apresentada uma análise comparativa entre os resultados das estimativas de volume (m<sup>3</sup>), por parcela, obtidas por meio do RPA e IF.

Tabela 5. Estatísticas de avaliação e parâmetros estatísticos do modelo ajustado para estimar o volume das árvores.

| Modelo | Parâmetros |           |           |           | Estatísticas |        |                |
|--------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------|----------------|
|        | $\beta_0$  | $\beta_1$ | $\beta_2$ | $\beta_3$ | $RQEM_{\%}$  | Bias   | $r_{y\hat{y}}$ |
|        | Estimativa |           |           |           |              |        |                |
| 4      | 10,3272*   | 1,8206*   | 0,1299*   | 1,1756*   | 7,38         | 0,0007 | 0,9885         |

\* (p < 0,05)

Tabela 6. Volume individual totalizado para a população amostrada, calculado com a equação volumétrica (Modelo 4) e utilizando as variáveis mensuradas no IF e aquelas estimadas pelo RPA e Modelo 1.

| Região | Dimensão (ha) | Número de árvores | Volume (m <sup>3</sup> ) |                           |                              |                             |
|--------|---------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|        |               |                   | Método 1                 | Método 2                  | Método 3                     |                             |
|        |               | IF                | RPA                      | $Ht_{IF} \times dap_{IF}$ | $Ht_{RPA} \times dap_{mod1}$ | $Ht_{IF} \times dap_{mod1}$ |
| 1      | 0,25          | 246               | 207                      | 73,67                     | 64,55                        | 74,34                       |
| 2      | 0,23          | 228               | 225                      | 46,14                     | 56,18                        | 44,02                       |
| 3      | 0,27          | 269               | 181                      | 56,75                     | 51,12                        | 56,92                       |
| Total  | 0,75          | 743               | 613                      | 176,56                    | 171,85                       | 175,28                      |

Em que:  $Ht_{IF}$  : Altura total obtida através do inventário florestal;  $dap_{IF}$  : Diâmetro a 1,30 m do solo obtido através do inventário florestal;  $Ht_{RPA}$  : Altura total estimada a partir de dados oriundos de aerolevantamento com RPA;  $dap_{mod1}$  : Diâmetro a 1,30 m do solo estimado através do modelo logístico.

O número de árvores mensuradas no inventário florestal foi de 246, 228 e 269 em cada região demarcada ocasionando em total de 743 indivíduos. Este número foi superior quando comparado com os valores extraídos pelo algoritmo segmentador a partir dos dados originados pelo RPA (207,225,181) no qual resultou em um total de 613 indivíduos. Desse modo, a metodologia proposta subestimou o número de arvores em 17,50 % em relação aos dados observados em campo.

O volume individual total estimado ( $m^3$ ), pela aplicação do Modelo 1, a partir dos dados de Ht obtido no IF foi de 175,28  $m^3$ . Esse valor se aproximou do volume individual observado (176,56  $m^3$ ), a partir dos dados de altura total e *dap* coletados no IF, o que originou em EMR (%) e EMA de 0,72 % e 1,28  $m^3$ , respectivamente.

Com relação ao volume individual total estimado (171,85  $m^3$ ) por meio das alturas obtidas do CHM originado do aerolevantamento com RPA, e do *dap* estimado por meio do Modelo I, foi observado que, este resultou em EMR (%) de 2,66 % e EMA de 4,71  $m^3$ , quando comparado com o valor obtido através dos dados observados no IF (176,56  $m^3$ ), esses resultados apresentam uma subestimativa por parte da metodologia proposta.

Contudo, apesar da proximidade encontrada entre os valores estimado e observado de volume total, observou-se que as estimativas de Ht e *dap* estavam apresentando uma ligeira subestimativa e superestimativa, respectivamente. Esse resultado pode contribuir para o balanceamento das estimativas de *dap* e Ht e originando valores de EMR (%) 2,66 % e EMA de 4,71  $m^3$ .

A curva volumétrica resultante das estimativas do RPA apresentou uma tendência similar à originada através das variáveis mensuradas no IF (Figura 16).

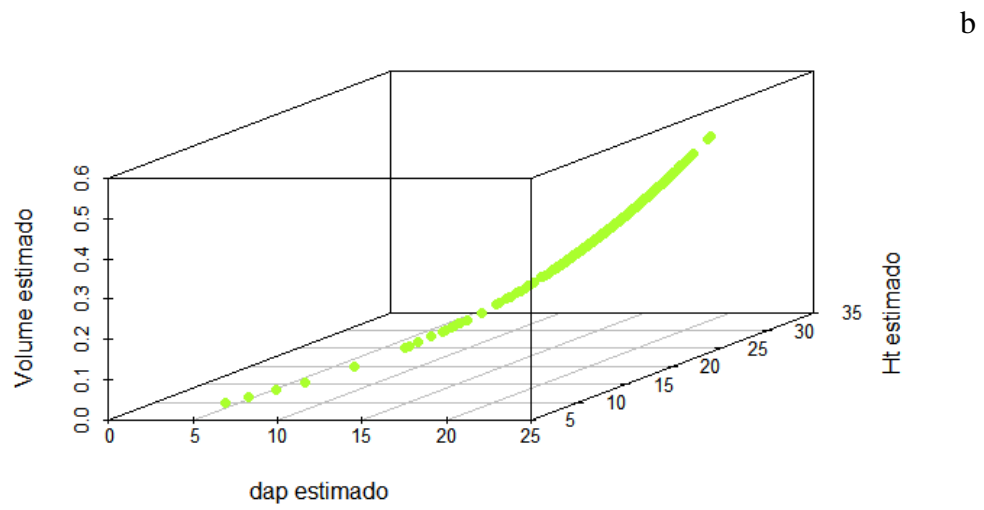
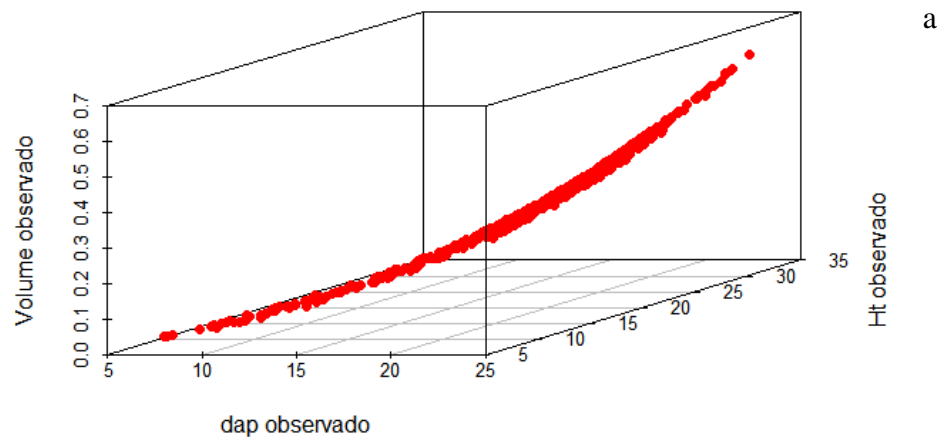


Figura 16. Curvas volumétricas obtidas, através de uma superfície tridimensional, contendo as variáveis dap, altura e volume observados (IF) (a) e estimado (RPA)(b).

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1 Processamento, alinhamento das imagens e plano de voo

A aerofotogrametria digital cada vez mais vem se tornando uma grande ferramenta para o setor florestal (PIERZCHAŁA et al., 2014; AICARDI et al., 2016; DASH et al., 2017; NEVALAINEN et al., 2017). Diante da sua ampla aplicabilidade, esta geotecnologia pode auxiliar e facilitar a vida dos gestores florestais perante as tomadas de decisões. Seu uso é diverso, e dentro da indústria florestal, pode ser direcionado à monitoramentos, controle da mata-competição, fitossanidade, mapeamentos, composição do banco de dados de inventário florestal entre outros (NÄSI et al., 2015; SOBRINHO et al., 2018; THAPA et al., 2021). Contudo, a precisa modelagem do terreno para grandes áreas de plantios adensados e terrenos declivosos ainda é complexa (TRAJKOVSKI et al., 2020), o que requer estudos.

Com relação ao processamento das imagens, foi observado que as configurações dos parâmetros do software como *Key Point Limit* e *Tie Point Limit*, podem influenciar no alinhamento das imagens (OSTROWSKI E BAKULA, 2016). À medida que se reduz os valores desses parâmetros, aumenta-se a disponibilidade de pontos de amarração dentro da imagem. De acordo com Tagle e Zabala (2017) valores muito altos ou muito baixos de *Tie Points* podem comprometer a nuvem de pontos. Porém, os resultados encontrados no presente estudo, apontam que, as melhores configurações para estes parâmetros foram de 120000 (*Key Point Limit*) e 0 (*Tie Point Limit*), as quais proporcionaram o alinhamento do maior número imagens. Iizuka et al., (2017) também obtiveram resultados satisfatórios em seu DSM, ao estimarem a altura de ciprestes japoneses, em uma área montanhosa, utilizando valores de *Key Point Limit* de 160000 e *Tie Point Limit* de 0. Desse modo, sugere-se que para áreas homogêneas com a presença de dossel florestal adensado, zerar o *Tie Point Limit* poderia contribuir para a formação do estereopar e, conseqüentemente, no alinhamento de um maior número de imagens.

Mesmo diante do alinhamento de grande parte das imagens do talhão foi observado o não alinhamento das imagens em duas regiões no talhão. Uma possível justificativa para tal ocorrido pode estar associado aos parâmetros de voo adotados. De acordo com alguns estudos, o planejamento do voo também é um fator que pode afetar na qualidade do alinhamento das imagens (MESAS-CARRASCOSA et al., 2016; ROTH et al., 2018). Parâmetros como, altura de voo, precisão da câmera, tamanho da lente e sobreposição, dependendo do objetivo do operador, acabam influenciando na formação do estereopar (STELLINGWERF E HUSSIN, 1997) ou modelo 3D (YU et al., 2004).

A melhoria na qualidade do alinhamento das imagens do talhão poderia ser alcançada através de um voo cruzado, por exemplo. Dessa forma, aumentaria a sobreposição e o número de imagens do talhão evitando a formação de “lacunas” na nuvem de pontos (DEOIS et al., 2015). Outro parâmetro importante que também pode ser levado em consideração é a sobreposição longitudinal e lateral (YU-HSUAN et al., 2020), alguns autores como Carrivick e Smith (2016) recomendam uma sobreposição superior a 80%. No entanto, é preciso ter cautela quando se eleva a sobreposição, e também ao realizar voos cruzados, uma vez que, pode gerar uma menor produtividade em campo diante das trocas de baterias, e também no momento do processamento das imagens, pois ocasionará um maior esforço computacional (ZHANG et al., 2018).

Em contrapartida, outra possível justificativa em relação ao não alinhamento das imagens seria a homogeneidade da área estudo, o que dificulta o reconhecimento de pontos homólogos entre imagens, pelos algoritmos do software (GRAÇA et al., 2017). Nessa situação, o que tem sido feito na prática é o aumento da altura de voo, que por sua vez, resultará no aumento da área a ser imageada, e assim capturando uma maior variação das feições na imagem reduzindo a homogeneidade. Porém, deve-se ter muita atenção ao aumentar a altura de voo, pois acarretará o aumento do GSD da imagem e conseqüentemente na diminuição a resolução espacial (ÇELIK et al., 2020) e da precisão dos produtos cartográficos (LONG et al., 2020).

A partir da nuvem de pontos 3D foram originados o DSM e o ortomosaico. Este último resultou em manchas brancas na região central do talhão e distorções nas extremidades do mesmo. Tal fato pode ser ocasionado pelo retroespalhamento, causado pela reflexão especular que ocorre quando o ângulo de visada situa-se no plano oposto do ângulo da iluminação ou no mesmo plano, culminando em machas brancas na imagem. A declividade do terreno também pode ter sido um dos fatores influentes, pois, grande parte destas manchas ocorreram nas regiões de maior altitude no talhão (SCHOTT, 2007). Além do mais, pode-se inferir que em áreas contendo plantios florestais é possível que, os algoritmos do software de processamento apresentem certa dificuldade na geração do ortomosaico, acarretando distorções em regiões de vegetação (PRUDKIN E BREUNIG, 2019).

Adicionalmente, a velocidade do obturador da câmera também é um fator que pode ter contribuído para o aparecimento destas manchas brancas no ortomosaico. Segundo Figueiredo e Figueiredo (2018), quanto menor a velocidade do obturador maior a entrada de luz, assim, maior a possibilidade de formação de machas na imagem. Em vista disso, sugere-se que o emprego de uma câmera com maior velocidade do obturador, ou se possível a regulagem do mesmo, possa contornar este tipo de problema.

#### 4.2 Modelagem de atributos

Ao se comparar as estimativas de altitude do DTM com o DSM, observou-se que, este último, subestimou as altitudes da área de estudo em alguns locais como as bordas, por exemplo, o que conseqüentemente influenciou em algumas estimativas de altura pelo CHM. Mesmo diante desses impasses a metodologia abordada conseguiu estimar satisfatoriamente a altura de grande parte das árvores a nível de talhão. A subestimação é comumente observada quando se emprega modelos digitais obtidos por meio de nuvem de pontos 3D (SUÁREZ et al., 2005; DANDOIS E ELLIS, 2013; JENSEN E MATHEWS, 2016), principalmente, quando se trata de terrenos declivosos, o que torna esta modelagem desafiadora (GUERRA-HENRNÁNDEZ et al., 2018).

Resultados como esse são comuns de serem observados nas extremidades dos modelos digitais, uma vez que, as bordas possuem uma menor sobreposição de imagens (PRUDKIN E BREUNIG, 2019). Em nosso estudo, planejamos o voo de forma que excedesse a área do talhão florestal para garantir a sobreposição dentro da área de interesse. Por outro lado, a subestimação fora das bordas pode ter ocorrido diante de algum erro associado à demarcação dos GCP. Geralmente os receptores GNSS de RPAs são de baixa precisão, isso acaba comprometendo a qualidade geométrica do DSM (GRENZDÖRFFER et al., 2008; PRUDKIN E BREUNIG, 2019). Dessa forma, é necessário a demarcação de GCP dentro da área de interesse para que se estabeleça uma precisa correlação entre as coordenadas do terreno e do DSM (BERVEGLIERI E TOMMASELLI, 2016).

O uso de GPS de alta precisão para coleta de GCP é necessário para qualidade geométrica dos modelos digitais (MESSINGER et al., 2016). Todavia, mesmo com o uso desses GPS, a distribuição dos GCPs dentro de dosséis florestais exige cautela principalmente se tratando de plantios adensados (BIRDAL et al., 2017). A distribuição deve ser representativa, sendo os GCP demarcados em locais livres de floresta alta e/ou construções que impeçam a visualização dos mesmos na imagem (SANZ-ABLANEDO et al., 2018). Neste estudo, a demarcação dos GCPs no software fotogramétrico foi trabalhosa e, muitas vezes, sua visualização foi dificultada pelo dossel, o que pode ter afetado um pouco na qualidade geométrica do DSM. No caso de plantios comerciais, a demarcação dos GCP carece de mais pesquisas sobre o número e alocação dos mesmos.

Todavia, o método de coleta dos GCPs, desenvolvido por este estudo, foi viabilizado diante da disponibilidade de um DTM derivado de LiDAR. A metodologia abordada foi vantajosa do ponto de vista econômico, uma vez que, a demarcação de GCPs no campo torna a

operação onerosa (WOLF E DEWITT, 2000). O DTM-LiDAR foi adotado como base de dados de referência devido a sua grande acurácia. Assim, o DSM foi georreferenciado em cima do DTM-LiDAR, tal fato, refletiu no resultado satisfatórios das alturas estimadas nas regiões amostradas. Alguns estudos relatam a importância de se trabalhar com um DTM acurado quando se trata de áreas florestais (WHITE et al., 2013; GOODBODY et al., 2018). Dessa forma, os resultados desta pesquisa podem demonstrar que é possível a obtenção de um co-registro provindo de bases de dados distintas, como por exemplo o sensoriamento passivo (RPA) e ativo (LiDAR) (DSM - RPA e DTM - LiDAR), o que contraria algumas constatações feitas por outros estudos como: Naesset, 2009, Ni et al., (2014) e Deois et al., (2015).

No que diz respeito as estimativas de altura total, em média as alturas estimadas pelo CHM-RPA foram próximas das obtidas pelo IF, conferindo um erro médio absoluto de 1,84 m (7,35%). Ganz et al., (2019) obtiveram resultados mais acurados quando utilizaram CHM-RPA para estimar a altura de plantios de Douglas Fir na Alemanha, em dois anos consecutivos. Esses resultados quando comparados com as medições de campo, apresentaram erro médio absoluto de 0,06 m para o ano de 2017 e 0,03 m para 2018. Alguns estudos indicaram grande variação na acurácia das estimativas da altura de dosséis florestais obtidas por meio de CHM-RPA, onde o RMSE pode assumir valores de 0,35m (ZARCO-TEJADA et al., 2014), 1,30m (WALLACE et al., 2014) e 3,00 m (PANAGIOTIDIS et al., 2017). Sugere-se que, tal fato, pode ocorrer diante das diferentes condições dos plantios e abordagens metodológicas utilizadas nesses estudos.

Ao se comparar os resultados obtidos por meio do histograma da frequência relativa do número de árvores em função das classes de altura total para os dados de IF e para os estimados pelo CHM, observou-se uma maior frequência de indivíduos nas maiores classes de altura total e uma menor frequência dos mesmos nas menores classes de altura por parte deste último. Ao observarmos o número total de arvores mensuradas no IF (743) em relação ao número total de arvores contabilizadas pela metodologia proposta (613), verificamos uma subestimativa de 17,5 %, dessa forma, o algoritmo conseguiu segmentar 82,43% das arvores. Sugerimos que esse comportamento pode ter ocorrido em virtude do algoritmo segmentar as arvores de maior porte, excluindo as demais árvores suprimidas e, também, por apresentar dificuldades de segmentação quando as copas das arvores se sobrepõem. Resultados como este também foram observados nos estudos conduzidos por Wallace et al., (2017), Nevalainen et al., (2017) e Navarro et al., (2020). Em vista disso, áreas com plantios mais adensados é comum que a segmentação das arvores não seja tão precisa (WANG et al., 2016), o que requer mais pesquisas.

Com relação aos modelos ajustados para estimar o dap, todos foram precisos e consistentes biologicamente. Devido à esta última característica, os modelos sigmóides vêm sendo utilizados em ciência florestal para estimar variáveis dendrométricas (MORAES NETO et al., 2010; VENDRUSCOLO et al., 2017; MEDEIROS et al., 2019). No estudo em questão o modelo que apresentou os melhores resultados em termos de significância dos parâmetros e ajuste dos dados e acurácia foi a modelo logística (modelo 1).

Analisando o Bias (-0,0003 cm) obtido pelo modelo logístico ajustado para os dados do nosso estudo em relação ao Bias (0,38 cm) obtido pelo modelo ajustado por Guerra-Hernández et al., (2019) para estimar dap em função da altura e área da copa, em um plantio de eucalipto, aos 7 anos de idade, em Portugal, observou-se que o modelo proposto em nosso estudo foi mais preciso.

Com relação as estimativas volumétricas, verificou-se que, a metodologia proposta foi satisfatória, uma vez que, o volume total estimado (171,85 m<sup>3</sup>) originou um EMR (%) de 2,66 % quando comparado com os valores de volume observado no IF (176, 56 m<sup>3</sup>) No entanto, esses valores foram resultantes do balanceamento dos valores de dap e Ht, uma vez que, estes apresentavam ligeiras superestimativas e subestimativas, respectivamente. Como dito anteriormente neste estudo é comum que as estimativas de alturas possam apresentar subestimativas, uma vez que, os modelos digitais oriundos nuvem de pontos apresentam esta característica (JENSEN E MATHEWS, 2016), em relação as estimativas de dap, os modelo sigmóides foram testados, pois a princípio, tratava-se de um plantio homogêneo, onde não há muita variação de idade, arranjo espacial e outros, contudo, as estimativas nos provaram que pode haver variação, o que requer aprimoramentos na modelagem do dap.

Nosso estudo sugere o modelo proposto por Schumacher e Hall (1933) para estimar o volume individual das árvores, a partir de alturas oriundas de CHM, obtidos via RPA. Tal recomendação é interessante do ponto de vista prático-econômico, dado que este modelo volumétrico é muito utilizado e disponibilizado nas empresas florestais devido as suas propriedades estatísticas (CAMPOS E LEITE, 2017).

Na literatura vem sendo observado o emprego de métricas de nuvem de pontos 3D (TONOLLI et al., 2011; LARANJA et al., 2015; BOHLIN et al., 2017; JAYATHUNGA et al., 2018), e parâmetros morfométricos (GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2019) como variáveis de modelos matemáticos para se estimar variáveis dendrométricas, a partir de dados de RPA. Uma alternativa seria o uso de modelos utilizados no inventário convencional. Desse modo, nossos resultados podem ser interessantes do ponto de vista prático-econômico, uma vez que aborda o emprego de modelos usuais para estimar as variáveis dap e volume.

A metodologia desenvolvida neste estudo retrata que modelagem a nível de talhão, ainda que necessite de melhores aprimoramentos é promissora. Tal fato pode ter decorrido, uma vez que, a modelagem fotogramétrica em terrenos declivosos é complexa, diante da dificuldade de alocação de GCP, e ainda requer uma atenção especial (GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2018). Já a modelagem em nível de parcela pode ser mais satisfatória, por exemplo, a metodologia proposta pode viabilizar o aumento da área útil das parcelas em relação ao que vem sendo comumente empregado nos inventários florestais.

#### 4. CONCLUSÕES

O RPA é uma ferramenta de grande potencial para estimar altura de povoamentos de eucalipto e, por consequência, o volume de madeira. No entanto, é necessário mais investimento em pesquisas relacionadas à metodologia de modelagem do DSM e DTM e, também, desenvolver e avaliar alternativas para alocação de GCP em povoamentos de eucalipto, principalmente naquelas com densidade relativamente alta de plantas por hectare.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AICARDI, I. et al. Monitoring post-fire forest recovery using multitemporal digital surface models generated from different platforms. **EARSeL eProceedings**, v. 15, n. 1, p. 1-8, 2016. doi:10.12760/01-2016-1-01.

ALMEIDA, A. et al. Estimating structure and biomass of a secondary Atlantic forest in Brazil using fourier transforms of vertical profiles derived from UAV photogrammetry point clouds. **Remote Sensing**, v. 12, n. 21, p. 3560, 2020.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. Resolução nº 419, de 2 de maio de 2017. Aprova o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial nº 94. Diário Oficial da União: seção 1, p. 52, 03 mai. 2017.

ANATEL, Agência nacional de telecomunicações. Instrução Para Homologar Drones. Brasília, DF, 2016. Disponível

em:<http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=344063&filtro=1&documentoPath=344063.pdf>. Acessado no dia 29 de Outubro de 2019

ANDERSEN, H. et al. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 5, p. 355-366, 2006.

ANDERSON, K; GASTON, K. J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 11, n. 3, p. 138-146, 2013. doi:10.1890/120150

ANDREASSEN, K.; TOMTER, S. M. Basal area growth models for individual trees of Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in Norway. **Forest ecology and management**, v. 180, n. 1-3, p. 11-24, 2003.

BARBOSA, J. M. et al. Remotely sensed biomass over steep slopes: An evaluation among successional stands of the Atlantic Forest, Brazil. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 88, p. 91-100, 2014.

BERVEGLIERI, A. et al. Identification of successional stages and cover changes of tropical forest based on digital surface model analysis. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9, n. 12, p. 5385-5397, 2016.

BINOTI, D. H. B. et al. Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 1, p. 125-129, 2013A.

BINOTI, M. L. M. S. et al. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 37, p. 639-645, 2013B.

BIRDAL, A. C, et al. Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 1144-1156, 2017.

BOHLIN, J. et al. Mapping Forest attributes using data from stereophotogrammetry of aerial images and field data from the national forest inventory. **Silva Fenn**, v. 51, n. 2, p. 1-18, 2017.

- BOHLIN, Jonas et al. Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 27, n. 7, p. 692-699, 2012.
- BOON, M. A. et al. Comparison of a fixed-wing and multi-rotor uav for environmental mapping applications: A case study. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, p. 47, 2017.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling Forest trees and stands**. Springer Science & Business Media, 2012.
- CABREIRA, T. M. et al. Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles. **Drones**, v. 3, n. 1, p. 4, 2019.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**, 5ª edição. Editora UFV, Viçosa, 2017.
- CAO, L. et al. Comparison of UAV LiDAR and digital aerial photogrammetry point clouds for estimating forest structural attributes in subtropical planted forests. **Forests**, v. 10, n. 2, p. 145, 2019.
- CARRIVICK, J. L. et al., **Structure from Motion in the Geosciences**. John Wiley & Sons, 2016. <https://doi.org/10.1111/nzg.12161>, 2016.
- CASTAÑO-SANTAMARÍA, J. et al. Tree height prediction approaches for uneven-aged beech forests in northwestern Spain. **Forest Ecology and Management**, v. 307, p. 63-73, 2013.
- ÇELIK, M. Ö. et al. The Effect of Different Flight Heights on Generated Digital Products: Dsm And Orthophoto. **Mersin Photogrammetry Journal**, v. 2, n. 1, p. 1-9, 2020.
- CLUTTER, J. L. et al. **Timber management: A quantitative approach**. John Wiley & Sons, Inc., 1983.
- COLBERT, K. C. et al. Height-diameter equations for thirteen midwestern bottomland hardwood species. **Northern Journal of Applied Forestry**, v. 19, n. 4, p. 171-176, 2002.
- COSTA-FILHO, S. V. S. et al. Configuração de algoritmos de aprendizado de máquina na modelagem florestal: um estudo de caso na modelagem da relação hipsométrica. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 1501-1515, 2019.

CURTIS, R. O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. **Forest science**, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967. <https://doi.org/10.1093/forestscience/13.4.365>

DANDOIS, J. P. et al. Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. **Remote Sensing**, v. 7, n. 10, p. 13895-13920, 2015.

DANDOIS, J. P. et al. Remote sensing of vegetation structure using computer vision. **Remote sensing**, v. 2, n. 4, p. 1157-1176, 2010.

DANDOIS, J. P.; ELLIS, E. C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 259-276, 2013.

DASH, J. P. et al. Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 131, p. 1-14, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.007>

DECEA. **Departamento de Controle do Espaço Aéreo**. Portaria DECEA nº 112/DGCEA, de 22 de maio de 2020. Aprova a reedição da ICA 100-40, Instrução sobre “Aeronaves não tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro”. 2020

DIAMANTOPOULOU, M. J.; MILIOS, E. Modelling total volume of dominant pine trees in reforestations via multivariate analysis and artificial neural network models. **Biosystems engineering**, v. 105, n. 3, p. 306-315, 2010.

DITTMANN, S.; THIESSEN, E.; HARTUNG, E. Applicability of different non-invasive methods for tree mass estimation: A review. **Forest Ecology and Management**, v. 398, p. 208-215, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.05.013>

DJI disponível em : <https://www.dji.com/br/phantom-4-pro> acessado em 22 de fevereiro de 2021.

DORADO, F. C. et al. A stochastic height-diameter model for maritime pine ecoregions in Galicia (northwestern Spain). **Annals of Forest Science**, v. 62, n. 5, p. 455-465, 2005.

ESTORNELL, J. et al., Analysis of the factors affecting LiDAR DTM accuracy in a steep shrub area. **International Journal of Digital Earth**, v. 4, n. 6, p. 521-538, 2011.

FANG, Z.; CAO, C. Estimation of forest canopy height over mountainous areas using satellite LiDAR. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 7, n. 7, p. 3157-3166, 2014.

FAVARIN, José Augusto Spiazzi et al., Obtenção de fotografias aéreas de um povoamento de *Pinus taeda* L. com o VANT Microdrone MD4-1000. **Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto-SBSR**, v. 16, p. 9340-9346, 2013.

FAYE, Emile et al., A toolbox for studying thermal heterogeneity across spatial scales: from unmanned aerial vehicle imagery to landscape metrics. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 7, n. 4, p. 437-446, 2016.

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó et al., Estimativa do volume de madeira em pátios de estocagem de toras por meio de câmeras RGB instaladas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP). **Rio Branco, AC: Embrapa**, 2016.

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó; FIGUEIREDO, SM de M. Planos de voo semiautônomos para fotogrametria com aeronaves remotamente pilotadas de classe 3. **Rio Branco: Embrapa**, 2018.

FLORES-DE-SANTIAGO, Francisco et al., Assessing the effect of flight altitude and overlap on orthoimage generation for UAV estimates of coastal wetlands. **Journal of Coastal Conservation**, v. 24, p. 1-11, 2020.

FORNACE, K. M. et al., Mapping infectious disease landscapes: unmanned aerial vehicles and epidemiology. **Trends in parasitology**, v. 30, n. 11, p. 514-519, 2014.

FREITAS, C. H. et al. Adaptation, calibration and evaluation of a simple agrometeorological model for wood *Eucalyptus* productivity estimation. **European Journal of Forest Research**, v. 139, n. 5, p. 759-776, 2020.

FREY, Julian et al., UAV photogrammetry of forests as a vulnerable process. A sensitivity analysis for a structure from motion RGB-image pipeline. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 912, 2018.

FRITZ, Andreas; KATTENBORN, Teja; KOCH, B. UAV-based photogrammetric point clouds—Tree stem mapping in open stands in comparison to terrestrial laser scanner point cloudin. **Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci**, v. 40, p. 141-146, 2013.

GAMARRA, R. M. Drones: guia básico para mapeamento aéreo. MS: Ed. UFMS, Campo Grande, 2020. 60 p.

GETZIN, S.; NUSKE, R. S.; WIEGAND, Ke. Using unmanned aerial vehicles (UAV) to quantify spatial gap patterns in forests. **Remote Sensing**, v. 6, n. 8, p. 6988-7004, 2014.

GETZIN, S.; WIEGAND, K.; SCHÖNING, I. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. **Methods in ecology and evolution**, v. 3, n. 2, p. 397-404, 2012.

GORGENS, E. B. et al. Estimação do volume de árvores utilizando redes neurais artificiais. **Revista Árvore**, v. 33, p. 1141-1147, 2009.

GRAÇA, N. L. S. S.; MITISHITA, E. A.; GONÇALVES, J. E. Detecção de alterações ambientais a partir de imagens digitais obtidas com plataforma VANT: Estudo de caso do desastre ambiental na região da comunidade Floresta–Morretes-PR. Artigo apresentado em Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2017.

GRAÇA, N. L. S. S.; MITISHITA, E. A.; GONÇALVES, J. E. Detecção de alterações ambientais a partir de imagens digitais obtidas com plataforma VANT: Estudo de caso do desastre ambiental na região da comunidade Floresta Morretes -PR.. Artigo apresentado in Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2017.

GRENZDÖRFFER, G. J. et al., The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 31, n. B3, p. 1207-1214, 2008.

GUERRA-HERNÁNDEZ, J. et al. Predicting growing stock volume of eucalyptus plantations using 3-D point clouds derived from UAV imagery and ALS data. **Forests**, v. 10, n. 10, p. 905, 2019.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. *Econometria Básica*. 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

HAALA, N. et al, Quality of 3D point clouds from highly overlapping UAV imagery. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci**, p. 183-188, 2013.

HE, J.; LI, Y.; ZHANG, K. Research of UAV flight planning parameters. **Positioning**, v. 3, p. 43-45, 2012. <http://dx.doi.org/10.4236/pos.2012.34006> P

HILL, A. et al. Accuracy assessment of timber volume maps using forest inventory data and LiDAR canopy height models. **Forests**, v. 5, n. 9, p. 2253-2275, 2014. doi:10.3390/f5092253

HIRSCHMUGL, M. et al. Single tree detection in very high-resolution remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 110, n. 4, p. 533-544, 2007.

HUNT, E. R. et al. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. **Remote Sensing**, v. 2, n. 1, p. 290-305, 2010.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR, J. A. **Forest mensuration**. John Wiley & Sons, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Produção da extração vegetal e da silvicultura - PEVS . 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados>. Acesso: outubro 2021

JAAKKOLA, A. et al. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. **ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 6, p. 514-522, 2010.

JAYATHUNGA, S. et al., The use of fixed-wing UAV photogrammetry with LiDAR DTM to estimate merchantable volume and carbon stock in living biomass over a mixed conifer-broadleaf forest. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 73, p. 767-777, 2018.

JENSEN, J. L.R.; MATHEWS, A. J. Assessment of image-based point cloud products to generate a bare earth surface and estimate canopy heights in a woodland ecosystem. **Remote sensing**, v. 8, n. 1, p. 50, 2016.

JU, C.; SON, H. I. Multiple UAV systems for agricultural applications: control, implementation, and evaluation. **Electronics**, v. 7, n. 9, p. 162, 2018.

JURJEVIĆ, L. et al. Is field-measured tree height as reliable as believed—Part II, A comparison study of tree height estimates from conventional field measurement and low-cost close-range remote sensing in a deciduous forest. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 169, p. 227-241, 2020.

KÜNG, O.; STRECHA, C.; BEYELER, A.; ZUFFEREY, J. C.; FLOREANO, D.; FUA, P.; GERVAIX, F. The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNMANNED AERIAL VEHICLE IN GEOMATICS (UAV-g), 2011, Zurich. Proceedings... Zurich: ETH Zurich; IGP; geomETH; UAV Research Group, 2011. (N. EPFL-CONF-168806).

LARANJA, D. C. F. et al. Redução do erro amostral na estimativa do volume de povoamentos de Eucalyptus ssp. por meio de escaneamento laser aerotransportado. **Sci. For.**, v. 43, p. 845-852, 2015.

LE MAIRE, G. et al. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 10, p. 2613-2625, 2011.

LEE, D. et al. Semiautonomous haptic teleoperation control architecture of multiple unmanned aerial vehicles. **IEEE/ASME transactions on mechatronics**, v. 18, n. 4, p. 1334-1345, 2013. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2013.2263963>.

LEITÃO, J. P. et al. Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 4, p. 1637-1653, 2016.

LEITOLD, V. et al. Airborne lidar-based estimates of tropical forest structure in complex terrain: opportunities and trade-offs for REDD+. **Carbon balance and management**, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2015.

LI, M. et al. Comparison of Coniferous Plantation Heights Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Laser Scanning and Stereo Photogrammetry. **Remote Sensing**, v. 13, n. 15, p. 2885, 2021.

LINDER, W. **Digital photogrammetry**. Berlin: Springer, 2009.

LISEIN, J. et al. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. **Forests**, v. 4, n. 4, p. 922-944, 2013.

LIU, X. et al. Optimizing trajectory of unmanned aerial vehicles for efficient data acquisition: A matrix completion approach. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 6, n. 2, p. 1829-1840, 2019.

- LO, C. F. et al., **The direct georeferencing application and performance analysis of uav helicopter in gcp-free area**. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, Toronto, Canada, v. 40, 2015.
- LONG, N. Q. et al. Influence of Flight Height on The Accuracy of UAV Derived Digital Elevation Model of Complex Terrain. **Inzynieria Mineralna**, v. 1, p. 45, 2020.
- MATOS, A. C. O. C. et al. MAPGEO2015: O NOVO MODELO DE ONDULAÇÃO GEOIDAL DO BRASIL. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 10, 2016.
- MEDEIROS, R. A. et al. Growth and Structural Development of *Tectona grandis* in Different Cultivation Systems in Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 8, p. 138, 2019.
- MESAS-CARRASCOSA, F. et al. An analysis of the influence of flight parameters in the generation of unmanned aerial vehicle (UAV) orthomosaicks to survey archaeological areas. **Sensors**, v. 16, n. 11, p. 1838, 2016
- MESSINGER, M. et al. Rapid assessments of Amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems. **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, p. 615, 2016.
- MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. Introduction to modern photogrammetry. **New York**, v. 19, 2001.
- MILLER, E. et al. Drones as a tool for monoculture plantation assessment in the steepland tropics. **Forests**, v. 8, n. 5, p. 168, 2017.
- MIRIK, M. et al. Evaluating Biomass of Juniper Trees (*Juniperus pinchotii*) from Imagery-Derived Canopy Area Using the Support Vector Machine Classifier. **Advances in Remote Sensing**, v.2, n.2, p. 181-192, 2013.
- MORA, B. et al. Forest inventory stand height estimates from very high spatial resolution satellite imagery calibrated with lidar plots. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 12, p. 4406-4424, 2013.
- MORAES NETO, S. P. de et al. Modelos hipsométricos para *Eucalyptus cloeziana* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em sistema agrosilvipastoril. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 286, 2010, 33p.

NÆSSET, E. Effects of different sensors, flying altitudes, and pulse repetition frequencies on forest canopy metrics and biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 1, p. 148-159, 2009.

NASCIMENTO, J. S. et al. Otimização da segurança em canteiros de obras utilizando veículos aéreos não tripulados (vants) com controle de voo via arduino yun. **Acta Tecnológica**, v. 12, n. 1, p. 63-72, 2018.

NÄSI, R. et al. Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level. **Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 15467-15493, 2015.

NAVARRO, A. et al. The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to estimate above-ground biomass of mangrove ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 242, p. 111747, 2020.

NELSON, R. et al. Estimating Siberian timber volume using MODIS and ICESat/GLAS. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 3, p. 691-701, 2009.

NEVALAINEN, O. et al. Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging. **Remote Sensing**, v. 9, n. 3, p. 185, 2017.

NI, W. et al. Features of point clouds synthesized from multi-view ALOS/PRISM data and comparisons with LiDAR data in forested areas. **Remote sensing of environment**, v. 149, p. 47-57, 2014.

NURMINEN, K. et al. Performance of dense digital surface models based on image matching in the estimation of plot-level forest variables. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 83, p. 104-115, 2013.

OFNER, M. et al. 3D stereo mapping by means of UltracamD data. In: **Proceedings of the Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, Vienna, Austria**. 2006. p. 14-15.

OSTROWSKI, W. Accuracy of measurements in oblique aerial images for urban environment. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 42, 2016

ÖZÇELİK, R. et al. Estimating Crimean juniper tree height using nonlinear regression and artificial neural network models. **Forest ecology and management**, v. 306, p. 52-60, 2013.

- ÖZÇELİK, R. et al. Estimating tree bole volume using artificial neural network models for four species in Turkey. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 3, p. 742-753, 2010.
- PANAGIOTIDIS, D. et al. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. **International journal of remote sensing**, v. 38, n. 8-10, p. 2392-2410, 2017.
- PECKHAM, R. J; GYOZO, J. **Digital terrain modelling**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- PESSI, D. D. et al. Aeronaves remotamente pilotadas e suas aplicações no manejo agrícola e ambiental. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 37, n. 2, p. 26605, 2020.
- PIERZCHAŁA, M. et al. Estimating soil displacement from timber extraction trails in steep terrain: application of an unmanned aircraft for 3D modelling. **Forests**, v. 5, n. 6, p. 1212-1223, 2014.
- PONTI, M. et al. Precision agriculture: Using low-cost systems to acquire low-altitude images. **IEEE computer graphics and applications**, v. 36, n. 4, p. 14-20, 2016.
- POPESCU, S. C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. **Biomass and Bioenergy**, v. 31, n. 9, p. 646-655, 2007.
- POPESCU, S. C. et al. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. **Computers and electronics in agriculture**, v. 37, n. 1-3, p. 71-95, 2002.
- PULITI, S. et al. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. **Remote Sensing**, v. 7, n. 8, p. 9632-9654, 2015.
- REDWEIK, P. Fotogrametria aérea. **Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa**. v. 3, 2007. 36 p.
- REIPS, L.; GUBERT, L. C. Drones como ferramenta de apoio para agricultores do Rio Grande do Sul. **Revista UFG**, v. 19, 2019.
- ROTH, L. et al. PhenoFly Planning Tool: flight planning for high-resolution optical remote sensing with unmanned aerial systems. **Plant Methods**, v. 14, n. 1, p. 1-21, 2018.

RUZA, M. S. et al. Inventário de Sobrevivência de povoamento de Eucalyptus com uso de Redes Neurais Artificiais em Fotografias obtidas por VANTs. **Advances in Forestry Science**, v. 4, n. 1, p. 83-88, 2017.

RUZGIENĖ, B. et al. The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. **Measurement**, v. 73, p. 619-627, 2015.

SANZ-ABLANEDO, E. et al. Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1606, 2018.

SCHOTT, J.R. **Remote sensing: the image chain approach**. Oxford University Press on Demand, 2ª Edição, Rochester Institute of Technology, 2007. 665p.

SenseFly . disponível em : <https://www.sensefly.com/> acessado em 22 de fevereiro de 2021

SHAO, G. et al. Forest dynamics modeling: preliminary explanations of optimizing management of Korean pine forests. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 1995.

SHIN, P. et al. Evaluating unmanned aerial vehicle images for estimating forest canopy fuels in a ponderosa pine stand. **Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 1266, 2018.

SIEBERT, S.; TEIZER, J., Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. **Automation in construction**, v. 41, p. 1-14, 2014.

SILVA, G. C. C. et al. Site index curves in thinned and non-thinned eucalyptus stands. **Forest Ecology and Management**, v. 408, p. 36-44, 2018.

SILVA, M. L. M. S. et al, Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 33, n. 6, p. 1133-1139, 2009.

SOARES, C. P. B. et al. Dendrometria e Inventário florestal. 2ª Edição, Editora UFV, 2011. 272p

SOBRINHO, M. et al. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) para mensuração de processos florestais. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, n. 27, 2018.

SOUZA, C. H. W. et al., Mapping skips in sugarcane fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 143, p. 49-56, 2017.

STELLINGWERF, D. A.; HUSSIN, Y. A. **Measurements and estimations of forest stand parameters using remote sensing**. VSP, Utrech, The Netherless, Tokyo, Japan, 1997. 272 p.

SUÁREZ, J. C. et al. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. **Computers & Geosciences**, v. 31, n. 2, p. 253-262, 2005.

TAGLE, Ximena; ZABALA, Stephania. Workflow Agisoft Photoscan for Micasense Rededge images. **Lund University, Lund Sweden**, 2017.

THAPA, S. et al. Assessing Forest Phenology: A Multi-Scale Comparison of Near-Surface (UAV, Spectral Reflectance Sensor, PhenoCam) and Satellite (MODIS, Sentinel-2) Remote Sensing. **Remote Sensing**, v. 13, n. 8, p. 1597, 2021.

TONOLLI, S. et al. Fusion of airborne LiDAR and satellite multispectral data for the estimation of timber volume in the Southern Alps. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 10, p. 2486-2498, 2011.

TRAJKOVSKI, K. K. et al. Optimization of UAV flight missions in steep terrain. **Remote Sensing**, v. 12, n. 8, p. 1293, 2020.

TSOUROS, D. et al., A review on UAV-based applications for precision agriculture. **Information**, v. 10, n. 11, p. 349, 2019.

VAN LAAR, A.; AKÇA, A. (2007) *Forest Mensuration*. Springer Science & Business Media.

VASTARANTA, M. et al. Airborne laser scanning and digital stereo imagery measures of forest structure: Comparative results and implications to forest mapping and inventory update. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 5, p. 382-395, 2013.

VENDRUSCOLO, D. G. S. et al., Estimativa da altura de árvores de *Tectona grandis* Lf utilizando regressão e redes neurais artificiais. **Nativa**, v. 5, n. 1, p. 52-58, 2017.

VIBRANS, A. C. et al., Generic and specific stem volume models for three subtropical forest types in southern Brazil. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 6, p. 865-874, 2015.

VIEIRA, G. C. et al., Prognoses of diameter and height of trees of eucalyptus using artificial intelligence. **Science of the Total Environment**, v. 619, p. 1473-1481, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.138>.

WALLACE, L. et al. Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. **Forests**, v. 7, n. 3, p. 62, 2016.

WALLACE, L. et al. Detecting pruning of individual stems using airborne laser scanning data captured from an unmanned aerial vehicle. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 30, p. 76-85, 2014.

WANG, J. et al. Effect of the sampling design of ground control points on the geometric correction of remotely sensed imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 18, p. 91-100, 2012.

WANG, X. et al. Canopy Extraction and Height Estimation of Trees in a Shelter Forest Based on Fusion of an Airborne Multispectral Image and Photogrammetric Point Cloud. **Journal of Sensors**, v. 2021, 2021.

WANG, Y. et al. International benchmarking of the individual tree detection methods for modeling 3-D canopy structure for silviculture and forest ecology using airborne laser scanning. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 54, n. 9, p. 5011-5027, 2016.

WARNER, W. S. et al. Small format aerial photography. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 51, n. 6, p. 316-317, 1996.

WEBSTER, C. et al. Three-dimensional thermal characterization of forest canopies using UAV photogrammetry. **Remote Sensing of Environment**, v. 209, p. 835-847, 2018.

WESTOBY, M. J. et al. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012.

WHITE, J. C. et al. The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with airborne laser scanning. **Forests**, v. 4, n. 3, p. 518-536, 2013.

WHITEHEAD, K.; HUGENHOLTZ, C. H. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: A review of progress and challenges. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v. 2, n. 3, p. 69-85, 2014.

WOLF, P.R.; DEWITT, B.A. *Elements of Photogrammetry (with Applications in GIS)*, 4rd ed.; McGraw-Hill Higher Education: New York, NY, USA, 2014.659 p.

YANO, I. H. et al. Identification of weeds in sugarcane fields through images taken by UAV and random forest classifier. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 16, p. 415-420, 2016.

YU, X. et al. Effects of flight altitude on tree height estimation using airborne laser scanning. **Proceedings of the Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment–Instruments, Processing Methods and Applications**, p. 02-06, 2004.

ZARCO-TEJADA, P. J. et al. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. **European journal of agronomy**, v. 55, p. 89-99, 2014.

ZHANG, H. et al. Estimation of grassland canopy height and aboveground biomass at the quadrat scale using unmanned aerial vehicle. **Remote sensing**, v. 10, n. 6, p. 851, 2018.

ZHANG, Y. et al. Photogrammetric processing of low-altitude images acquired by unpiloted aerial vehicles. **The Photogrammetric Record**, v. 26, n. 134, p. 190-211, 2011.

## APÊNDICE

### *Processamento de imagens*

Após a realização do aerolevanteamento fotogramétrico é necessário realizar o processamento das imagens adquiridas no mesmo, para isso, devemos utilizar do auxílio de softwares fotogramétricos para a obtenção dos produtos cartográficos desejados.

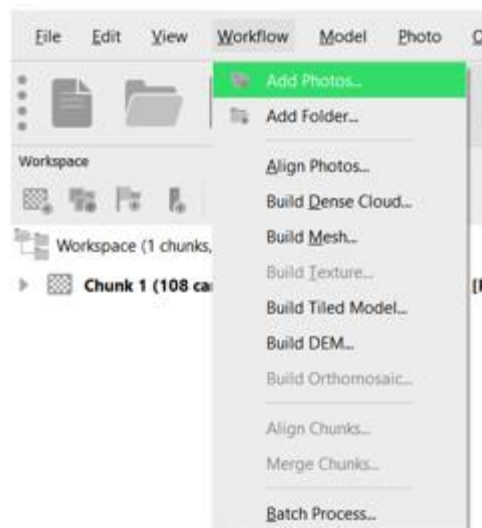
Os softwares de processamento fotogramétricos são conhecidos por realizar a automatização de processos por meio de métodos baseados em visão computacional denominados *Structure from Motion*. Este método utiliza-se dos princípios da estereoscopia para obtenção de um modelo 3D, ou seja, através da sobreposição de uma série de imagens. Todavia, sem a necessidade da localização de muitos pontos de controle, posição, orientação e

calibração da câmera, o que o difere dos métodos fotogramétricos tradicionais (WESTOBY et al., 2012; IGLHAUT et al., 2019).

Alguns softwares de processamento fotogramétrico estão disponíveis no mercado como, IMAGINE photogrammetry, PhotoModeler, Pix4Dmapper, OpenDroneMap e Agisoft Metashape. Em nosso estudo, realizamos o processamento das imagens no software Agisoft Metashape Professional 1.5.3, devido ao seu desempenho, interface simplificada e grande difusão no mercado.

Abaixo segue um pequeno tutorial de uso do Agisoft Metashape apenas para exemplificar a geração do DSM e ortomosaico, uma vez que dentro do software é possível e realizar outras operações como construção de um modelo 3d colorido, cálculos de área e volume entre outros.

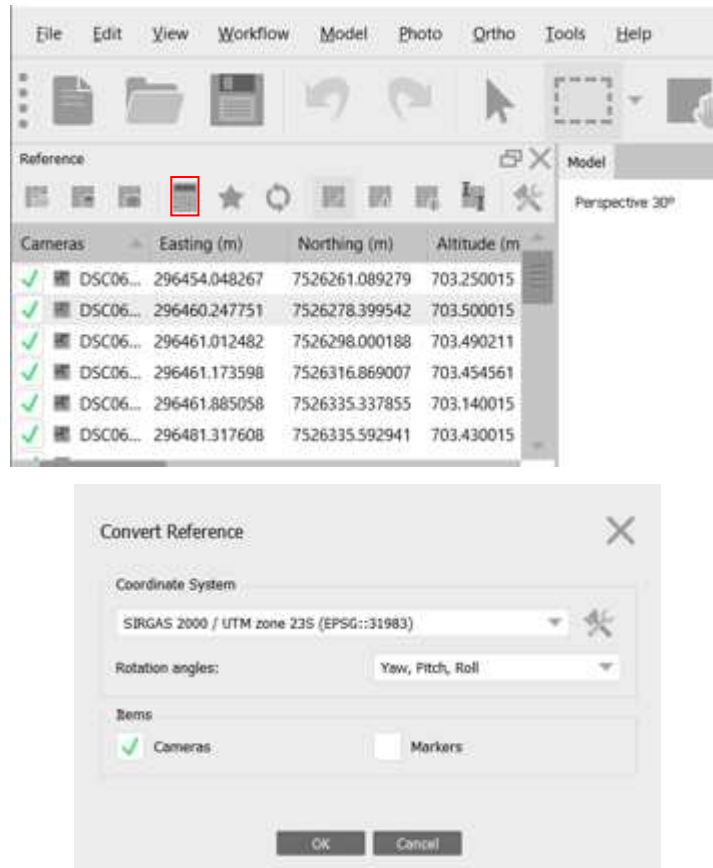
O primeiro passo consiste na importação das imagens obtidas no aerolevanteamento em campo, as quais podem ser adicionadas a partir da opção “Workflow”, situada na barra superior. Ao clicar nesta última opção aparecerá uma caixa onde irá conter todas as principais etapas do processamento. Desse modo, para adicionar imagens basta ir em Workflow – Add Photos, assim, basta selecionar a pasta onde foram salvas as imagens.



#### Passo 1.

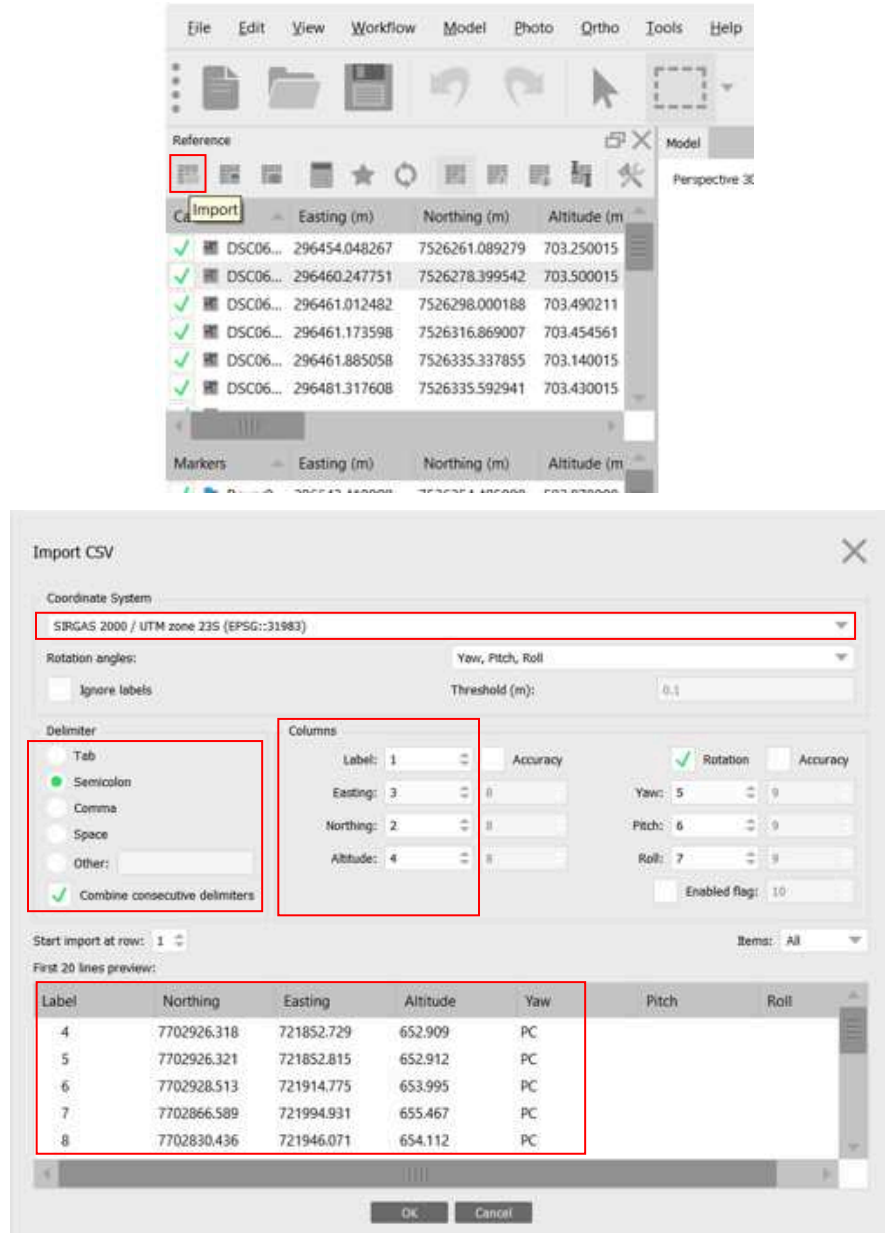
Após importar as imagens devemos fazer a conversão para o sistema de coordenadas da região e /ou local onde foi realizado o aerolevanteamento. Para realizar essa conversão devemos ir na aba “Reference” clicar na opção “Convert”, em seguida irá aparecer um caixa com a opção “Coordinate System” onde possibilita a conversão das coordenadas das fotos, inicialmente as coordenadas das imagens estarão WGS84. Na opção “Items” podemos converter as

coordenadas das imagens e dos pontos de controle se já estiverem sido adicionados anteriormente, nesse caso, primeiramente converteremos as coordenadas das imagens, assim, habilitaremos apenas a opção “cameras”.



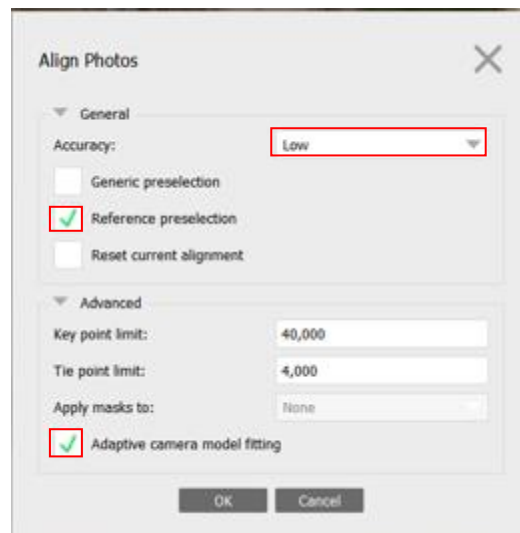
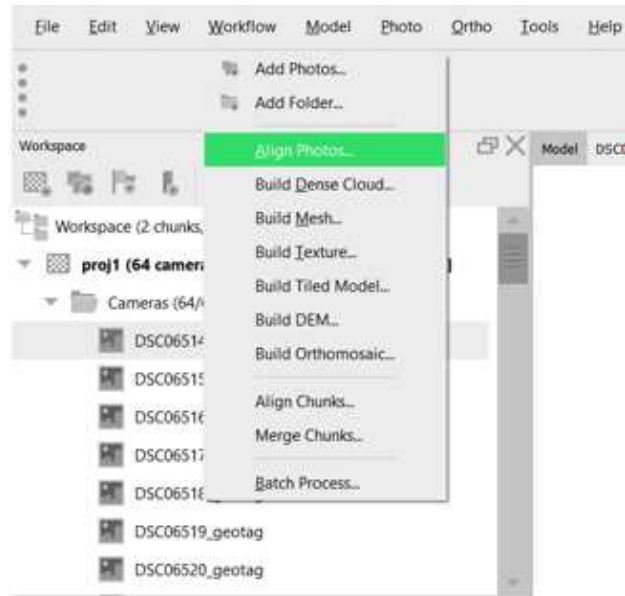
### Passo 2.

O próximo passo trata-se da importação dos pontos de controle, a qual será realizada através da aba “Reference”, opção “Import”, a importação poderá ser feita em arquivos do tipo csv ou txt. Após a importação dos pontos aparecerá uma caixa denominada “import CSV” com alguns parâmetros a serem preenchidos, como o sistema de coordenadas, delimitação do arquivo no caso a opção utilizada será “semicolon”, e por fim, prestar atenção no parâmetro “columns”, no qual a ordem das colunas da tabela de pontos controle importada deverá bater com a numeração de cada item sendo estes: a nomeação de cada ponto (label), leste (easting), norte (northing) e altitude (altitude).



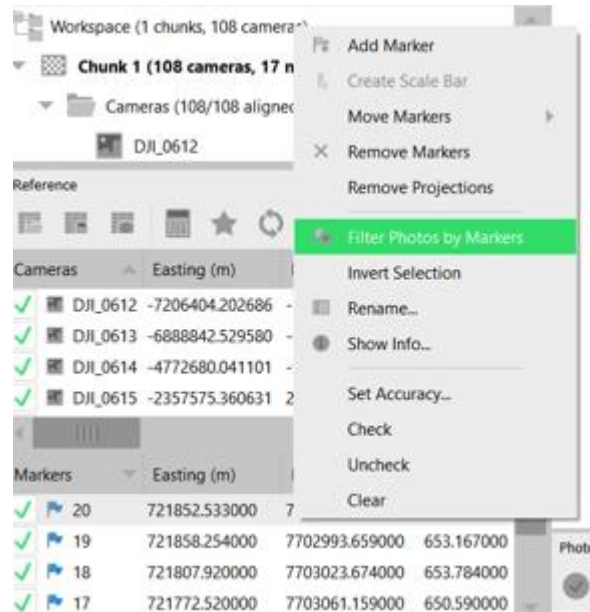
### Passo 3.

A próxima etapa consiste no primeiro alinhamento onde será responsável por gerar uma nuvem de pontos georreferenciada, o alinhamento deverá ser configurado no nível de qualidade baixa (Low) e sem a necessidade do apontamento dos pontos de controle. Assim, iremos na barra superior clicaremos em “workflow”, e em seguida em “Align Photos”. Aparecerá uma caixa onde devemos assinalar os parâmetros: “Low”, “Reference preselection” e “Adaptative Camera Model Fitting” deixando os demais parâmetros, a princípio, no default do software.



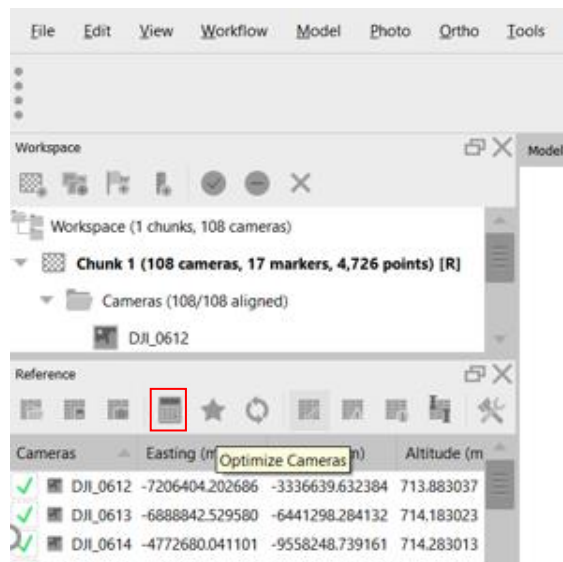
#### Passo 4.

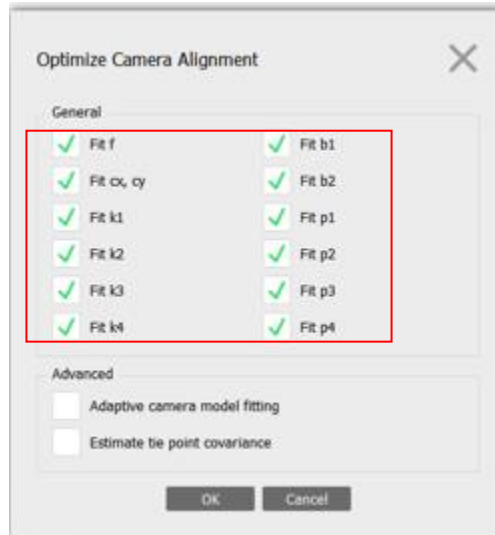
Nesta etapa iremos iniciar o apontamento dos pontos de controle para georreferenciar nossa nuvem de pontos. Desse modo, iremos clicar com o botão esquerdo do mouse em cima do primeiro ponto de controle, já inserido previamente na aba “markers”, em seguida clicar na opção “Filter Photos by markers”, onde iremos filtrar todas as imagens onde o ponto de controle selecionado se encontra. Logo em seguida e possível apontar de forma manual cada ponto em seu respectivo alvo.



### Passo 5.

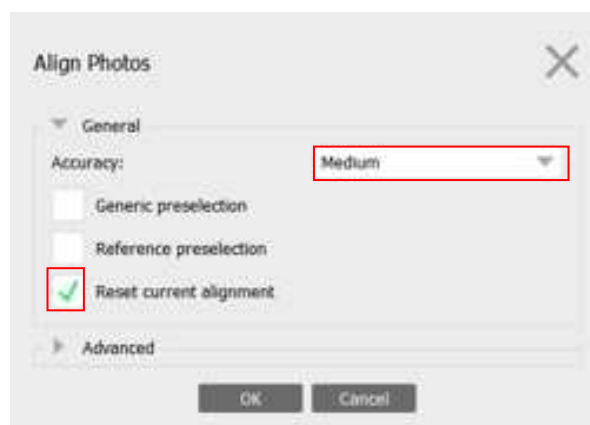
Após o apontamento de todos os pontos de controle iremos melhorar o posicionamento da nuvem de pontos gerada por meio das estimativas dos parâmetros de orientação da câmera e dos pontos de controle. Assim utilizaremos o comando “Optimize Camera”, na sequencia aparecerá uma caixa onde deveremos selecionar todas as opções em “General” apenas.





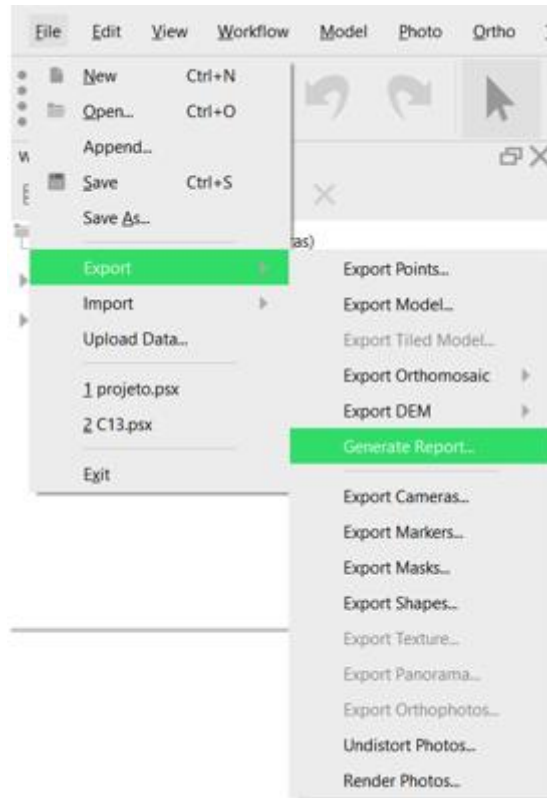
Passo 6.

Na próxima etapa iremos realizar o segundo alinhamento, dessa forma iremos em “Workflow” clicaremos na opção “Align Photos” e na sequência em “General” aumentaremos a qualidade do alinhamento, neste caso usaremos a opção “medium”, contudo, a qualidade pode ser escolhida de acordo com a capacidade da sua máquina, sendo quanto maior a qualidade do alinhamento melhor. Logo em seguida iremos habilitar a opção “Reset current alignment” para recompor o alinhamento que geramos e deixamos as demais opções no default.



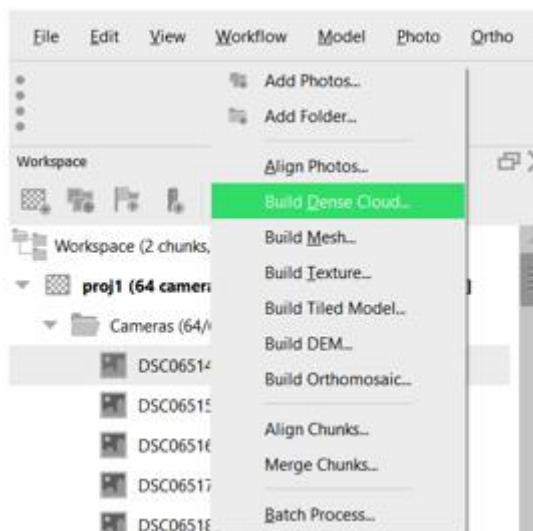
Passo 7.

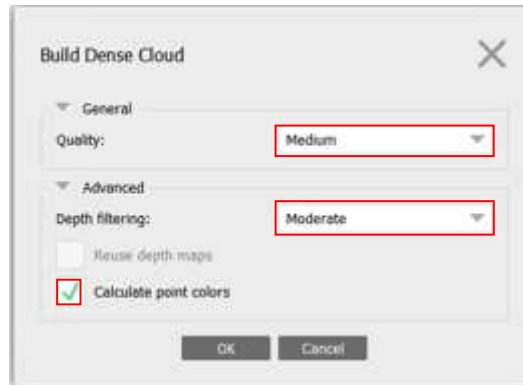
Neste passo deveremos avaliar a qualidade do apontamento dos pontos de controle, por meio de um “report” gerado pelo software onde contém alguns detalhes em relação ao erro de cada ponto de controle e demais informações a respeito do processamento. Se o erro relacionado ao apontamento estiver alto deveremos realizar o apontamento novamente. Para geração do relatório iremos na barra superior em “File” - “Export” - “Generate Report”.



#### Passo 8.

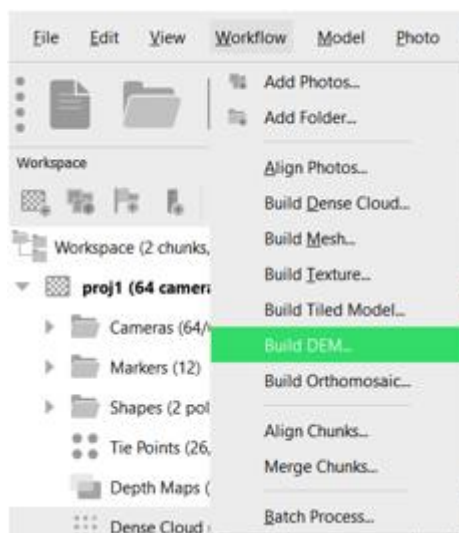
A próxima etapa do fluxo de trabalho do software se refere a geração da nuvem densa ou “Dense Cloud”, desse modo, na barra superior clicaremos em “Workflow” e em seguida na opção “Build Dense Cloud”. Na sequência irá aparecer uma caixa onde deveremos deixar habilitado os seguintes parâmetros em “Quality” como “medium” nesse caso, ou na qualidade que sua máquina suportar, em “Depth filtering” como “Moderate” e “Calculate point colors”. Assim como podemos exportar um relatório também podemos exportar a nuvem de pontos no formato las para trabalhar em outros ambientes/software.

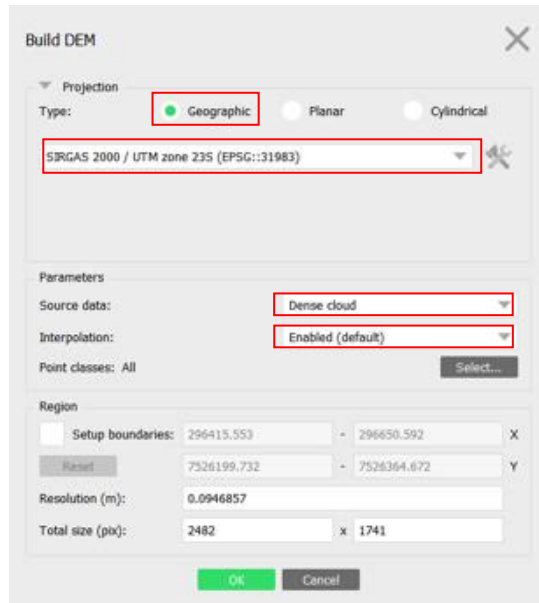




### Passo 9.

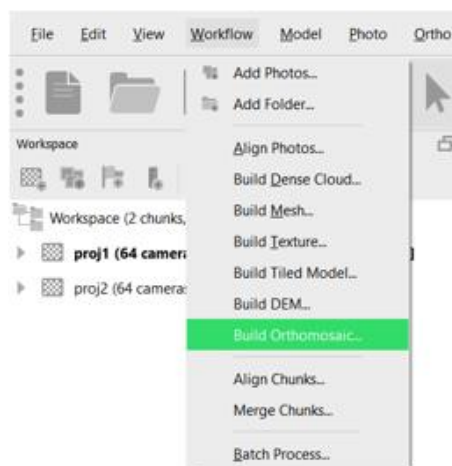
Após a construção da nuvem de pontos densa, iremos gerar o DEM ou DSM que nada mais é que a transformação de ponto para raster, dado o que a construção deste modelo depende da etapa anterior. Dessa forma, iremosate “Workflow” e clicaremos na opção “Build DEM”, em seguida surgirá um caixa onde habilitaremos os parâmetros “Geographic” na opção “Projection” definiremos o sistema de projeção que estamos trabalhando. Em “Source data” utilizaremos a opção “Dense cloud”, pois iremos construir o DEM em função da nuvem densa, e por fim na opção “Interpolation” habilitaremos os “Enabled (default)”.

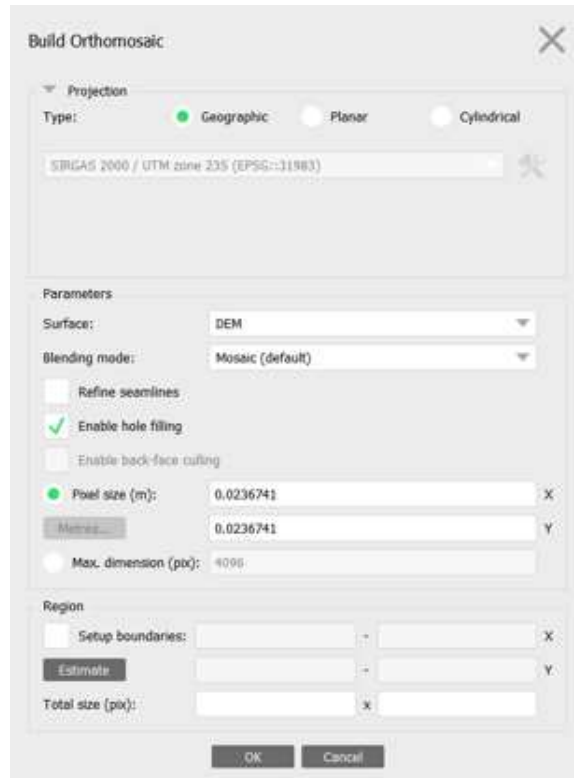




### Passo 10.

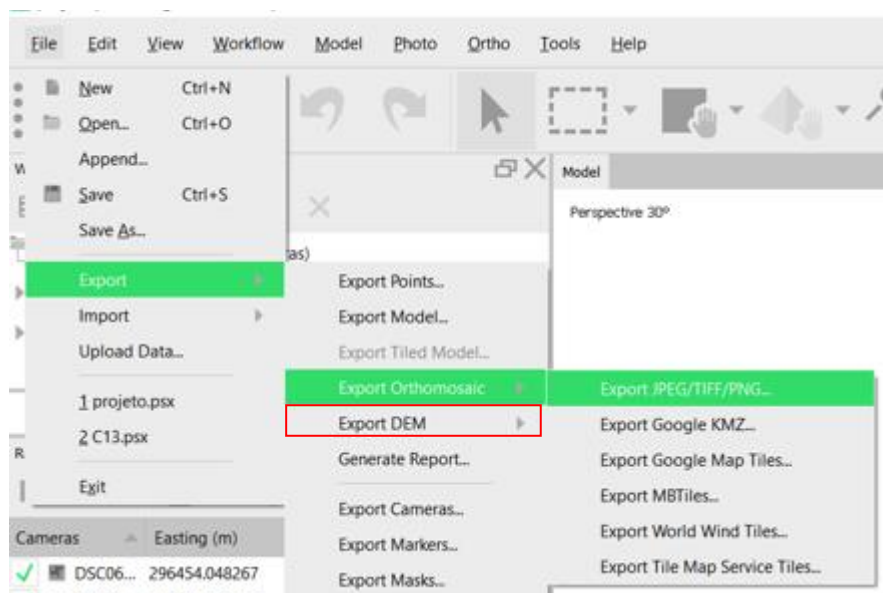
Por fim, a última etapa é a construção do ortomosaico que será gerado em função do DEM. Para isso, iremos voltar novamente em “Workflow” e clicar na opção “Build Orthomosaic”, quando para definição de parâmetros abrir iremos habilitar as seguintes opções: “Geographic” em “Type”, “DEM” em “Surfac” e “Enable hole filling” em “Blending mode”.





### Passo 11.

Quando todos os produtos estiverem processados é possível exportar os mesmos para utilizar em outros softwares, por exemplo. Assim, clicaremos em “File” - “Export” - “Export DEM” ou “Export Orthomosaic” e em seguida na opção “Export JPEG/TIFF/PNG”. Por fim irá aparecer um caixa onde selecionaremos o sistema de coordenadas desejado, em “TIFF Compression” utilizaremos a opção “LZW” e em “JPEG Quality” habilitaremos todas as opções. Para exportar o DEM seguiremos o mesmo procedimento, contudo não haverá as opções “TIFF Compression” nem “Write alpha channel”.



### Export Orthomosaic

Coordinate System: SIRGAS 2000 / UTM zone 23S (EPSG::31983)

Raster

Pixel size (m): 0.0236741 X  
Metres...: 0.0236741 Y

Max. dimension (pix): 4096

Split in blocks (pix): 1024 x 1024

Raster transform: None

Background color: White

Region

Setup boundaries: 296415.048 - 296650.471 X  
Reset: 7526199.732 - 7526364.575 Y

Total size (pix): 9919 x 6963

Write A36 file  Write World file

Write tile scheme

Compression

Image description:

TIFF compression: LZW

JPEG quality: 90

Write BigTIFF file  Write tiled TIFF

Write alpha channel

Generate TIFF overviews

Export... Cancel

### Export DEM

Coordinate System: SIRGAS 2000 / UTM zone 23S (EPSG::31983)

Raster

Pixel size (m): 0.0946963 X  
Metres...: 0.0946963 Y

Max. dimension (pix): 4096

Split in blocks (pix): 1024 x 1024

Raster transform: None

No-data value: -32767

Region

Setup boundaries: 296415.553 - 296650.589 X  
Reset: 7526199.732 - 7526364.599 Y

Total size (pix): 2481 x 1740

Write KML file  Write World file

Write tile scheme

Compression

Image description:

Write BigTIFF file  Write tiled TIFF

Generate TIFF overviews

Export... Cancel