UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
INSTITUTO DE ESTUDOS SOCIOAMBIENTAIS (IESA)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA (PPGEO)

LEOMAR RUFINO ALVES JÚNIOR

Comparação de sistemas imageadores aerotransportados ópticos e LiDAR para quantificação da biomassa em áreas de Cerrado nativo

GOIÂNIA
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIOAMBIENTAIS

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

[ ] Dissertação [X] Tese

2. Nome completo do autor

Leomar Rufino Alves Júnior

3. Título do trabalho

COMPARAÇÃO DE SISTEMAS IMAGEADORES AEROTRANSPORTADOS ÓPTICOS E LIDAR PARA QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA EM ÁREAS DE CERRADO NATIVO

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [ ] NÃO[1]

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:
a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.

Documento assinado eletronicamente por **Manuel Eduardo Ferreira**, **Professor do Magistério Superior**, em 23/03/2022, às 12:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **LEOMAR RUFINO ALVES JÚNIOR**, **Discente**, em 13/04/2022, às 09:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2779702** e o código CRC **E3C7EAAB**.

Referência: Processo nº 23070.061222/2021-11 SEI nº 2779702

LEOMAR RUFINO ALVES JÚNIOR

Comparação de sistemas imageadores aerotransportados ópticos e LiDAR para quantificação da biomassa em áreas de Cerrado nativo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás, como requisito para a obtenção do Título de Doutor em Geografia.

Área de concentração: Natureza e Produção do Espaço
Linha de Pesquisa: Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica

Orientador: Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira
Coorientador: Prof. Dr. João Batista Ramos Côrtes

GOIÂNIA
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Alves Júnior, Leomar Rufino
Comparação de sistemas imageadores aerotransportados ópticos e LiDAR para quantificação da biomassa em áreas de Cerrado nativo [manuscrito] / Leomar Rufino Alves Júnior. - 2021.
0 280 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira; co-orientador Dr. João Batista Ramos Côrtes.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Socioambientais (IESA), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Goiânia, 2021.
Bibliografia. Anexos. Apêndice.
Inclui siglas, mapas, abreviaturas, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. LiDAR. 2. RPAS. 3. Ortomosaico. 4. Nuvem de pontos. 5. Métricasestruturais da vegetação. I. Ferreira, Manuel Eduardo, orient. II. Côtes, João Batista Ramos, co-orient. III. Título.

CDU 911

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIOAMBIENTAIS

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº **147** da sessão de Defesa de Tese de **Leomar Rufino Alves Júnior** que confere o título de Doutor em **Geografia**, na área de concentração em **Natureza e Produção do Espaço.**

Aos **quatorze dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e um**, a partir das **15 horas**, **por meio de videoconferência**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada **"Análise e Tratamento de Dados Obtidos com Sistemas Imageadores Aerotransportados para a Quantificação da Biomassa Florestal em Áreas de Cerrado Nativo**". Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Manuel Eduardo Ferreira (IESA/UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Pedro Alves Vieira (UEG, Campus Cora Coralina, Cidade de Goiás)**, membro titular externo; Professora Doutora **Vania Silvia Rosolen (UNESP)**, membro titular externo; Professora Doutora **Sabrina do Couto de Miranda (UEG)**, membro titular externo; Professor Doutor **Ivanilton José de Oliveira (IESA/UFG)**, membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Manuel Eduardo Ferreira**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata, que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora aos **quatorze dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e um**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

COMPARAÇÃO DE SISTEMAS IMAGEADORES AEROTRANSPORTADOS ÓPTICOS E LIDAR PARA QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA EM ÁREAS DE CERRADO NATIVO

Documento assinado eletronicamente por **Manuel Eduardo Ferreira**, **Professor do Magistério Superior**, em 14/12/2021, às 17:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **SABRINA DO COUTO DE MIRANDA**, **Usuário Externo**, em 14/12/2021, às 17:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Ivanilton José De Oliveira**, **Professor do Magistério Superior**, em 14/12/2021, às 17:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Vania Silvia Rosolen**, **Usuário Externo**, em 14/12/2021, às 17:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Pedro Alves Vieira**, **Usuário Externo**, **Usuário Externo**, em 14/12/2021, às 18:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autencidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2571229** e o código CRC **5E1F1ED5**.

Referência: Processo nº 23070.061222/2021-11 SEI nº 2571229

DEDICATÓRIA

Àqueles que me incentivaram, me ajudaram, acreditaram em mim e estiveram sempre ao meu lado, dedico este trabalho...

À minha esposa Tâmara

À minha filha Carolina

Aos meus pais Rosa Maria e Leomar

Aos meus avós maternos Carolina (*in memorian*) e Geraldo (*in memorian*)

Aos meus avós paternos Geralda e Antônio (*in memorian*)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me guiar nesta jornada, diante dos desafios ao longo do processo de doutoramento. Sem Ele eu não teria chegado até aqui!

Ao professor Dr. Manuel Eduardo Ferreira, pela orientação, suporte, ensinamentos e estimados conselhos acadêmicos, profissionais e de vida dados durante toda a trajetória, sempre presente e empenhado a atender as demandas da orientação com prontidão e maestria.

Ao professor Dr. João Batista Ramos Côrtes, pela coorientação, pelo exemplo de pessoa, paciência e bondade, sempre à disposição para ajudar e ensinar, essencial ao longo de todo o período do doutorado, e principalmente nas etapas finais da redação deste trabalho.

Aos professores avaliadores da tese, professor Dr. Nilson Clementino Ferreira, professor Dr. Ivanilton José de Oliveira, professora Drª Sabrina do Couto de Miranda e professora Drª Vânia Silvia Rosolen, por aceitarem o convite de participação nesta banca de doutorado, contribuindo com o aperfeiçoamento do trabalho.

À professora Drª. Sabrina do Couto de Miranda pelo aprendizado e auxílio com informações primordiais, principalmente nas etapas do trabalho voltadas à compreensão dos resultados das análises do bioma Cerrado.

Ao Dr. Cassio Henrique Giusti Cezare, pela ajuda e acompanhamento nos passos iniciais com os programas Fusion e RStudio, além dos *insights* na compreensão das métricas LiDAR.

Ao colega de sala do PRO-VANT/LAPIG João Vitor Silva Costa, pelo companheirismo e apoio nos trabalhos de campo e, também, nos processamentos dos dados obtidos com o RPAS.

Aos Doutores Eben North Broadbent e Angelica Maria Almeyda Zambrano, pela parceria com o LAPIG na realização das expedições à campo nas áreas de estudo deste trabalho, visando a coleta dos dados obtidos com LiDAR aerotransportado em voo não tripulado.

Ao Dr. Danilo Almeida, pelo apoio nos processamentos dos dados e discussões.

À Universidade Federal de Goiás, no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO), o meu agradecimento ao corpo docente, discente e administrativo, em especial ao secretário da pós-graduação José Alfredo Cespi de Oliveira, que por diversas vezes se prontificou, sem medir esforços, a atender todos os meus anseios junto ao PPGEO.

À Santigo & Cintra, Amaztop, Sensefly e Pix4D, pela parceria com o LAPIG, especialmente na manutenção das plataformas aéreas não tripuladas e renovação de softwares.

Enfim, a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização desta tese de doutorado, os meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

Na atualidade, plataformas aéreas remotamente tripuladas (RPAS) embarcadas com sensores imageadores formam um dos conjuntos tecnológicos mais desejados e eficientes da ciência do sensoriamento remoto. Dentre todas as aplicações possíveis, o mapeamento do uso do solo é o carro-chefe, com destaque para a análise da cobertura vegetal nativa e suas relações com o ambiente. Esta pesquisa teve como objetivo analisar a biomassa aérea lenhosa contida em parcelas de vegetação nativa do bioma Cerrado, localizadas na bacia hidrográfica do Rio Vermelho, estado de Goiás, com base em instrumentos avançados (sensores LiDAR e ópticos) a bordo de veículos aéreos tripulados (avião) e não tripulados (RPAS asa-fixa, modelo eBee Plus RTK/PPK). A pesquisa também incluiu estimativas da cobertura vegetal nativa obtidas em campo, tais como altura do dossel, número de indivíduos, porcentagem de cobertura e biomassa aérea lenhosa, visando avaliar a eficiência dos sistemas de imageamento e sensores. Os modelos digitais de superfície (MDS) e ortomosaicos resultantes foram analisados em função da acurácia e precisão, combinando pontos de apoio e sistema PPK (*Post Processed Kinematic*). Comparando-se os ortomosaicos gerados com pontos de apoio e sem sistema PPK, com os ortomosaicos gerados apenas com sistema PPK, ambos apresentaram a mesma precisão planimétrica, porém com precisão altimétrica melhorada quando empregados os pontos de apoio. Para o Cerradão, o modelo que melhor estimou a biomassa foi aquele gerado com dados LiDAR aerotransportado com voo tripulado, estatisticamente significativo com [($F(9,50) = 33,17$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,856$; EP da estimativa = 0,17 Mg/ha]. Para o Cerrado Denso e de Cerradão/Mata Densa, os modelos foram estatisticamente significativos com [($F(12,27) = 121,264$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,982$; EP da estimativa = 0,049 Mg/ha] e [($F(7,42) = 23,360$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,796$; EP da estimativa = 0,329 Mg/ha], respectivamente, ambos utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado. Conclui-se que a utilização de dados obtidos com LiDAR e por aerofotogrametria, oriundos de aeronave tripulada e remotamente tripulada, não podem substituir e sim complementar o método convencional de levantamento de campo, em se tratando de vegetação nativa de Cerrado Denso e Cerradão. Sendo a eficiência na predição da biomassa, indo do melhor para o pior conjunto, a nuvem de pontos obtida com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado, LiDAR aerotransportado com voo tripulado, e com levantamento aerofotogramétrico em voo não tripulado. Para o Cerrado Denso e Cerradão pode-se concluir que todas as tecnologias utilizadas nesta pesquisa apresentaram resultados eficazes, podendo, portanto, serem aplicadas de acordo com a disponibilidade de equipamentos e recursos financeiros.

Palavras-chave: LiDAR. RPAS. Ortomosaico. Nuvem de pontos. Métricas estruturais da vegetação.

ABSTRACT

Currently, remotely manned aerial platforms (RPAS) embedded with imaging sensors form one of the most desirable and efficient technological sets in the science of remote sensing. Among all possible applications, land use mapping is the flagship, with emphasis on the analysis of native vegetation cover and its relationship with the environment. This research aimed to analyze the woody aerial biomass contained in parcels of native vegetation of the Cerrado biome, located in the Red River basin, state of Goiás, based on advanced instruments (LiDAR and optical sensors) aboard manned aerial vehicles (airplane) and unmanned (RPAS fixed-wing, eBee Plus RTK/PPK model). The research also included estimates of native vegetation cover obtained in the field, such as canopy height, number of individuals, percentage of cover and woody aerial biomass, in order to evaluate the efficiency of imaging systems and sensors. The resulting digital surface (MDS) and orthomosaic models were analyzed as a function of accuracy and precision, combining support points and the PPK (Post Processed Kinematic) system. Comparing the orthorosaics generated with support points and without the PPK system, with the orthorosaics generated only with the PPK system, both presented the same planimetric precision, but with improved altimetric precision when the support points were used. For the Cerradão, the model that best estimated the biomass was the one generated with airborne LiDAR data with manned flight, statistically significant with [($F(9.50) = 33.17$; $p < 0.001$; $R^2 = 0.856$; SE of the estimate = 0.17 Mg/ha]. For the Dense Cerrado and Cerradão/Dense Forest, the models were statistically significant with [($F(12.27) = 121.264$; $p < 0.001$; $R^2 = 0.982$; SE estimate = 0.049 Mg/ha] and [($F(7.42) = 23.360$; $p < 0.001$; $R^2 = 0.796$; SE estimate = 0.329 Mg/ha], respectively, both using data obtained with LiDAR Airborne with unmanned flight It is concluded that the use of data obtained with LiDAR and by aerophotogrammetry, from manned and remotely manned aircraft, cannot replace but complement the conventional method of field survey, in the case of native vegetation of Cerrado Denso and Cerradão. As the efficiency in predicting biomass, going from the best to the worst nt, the point cloud obtained with airborne LiDAR with unmanned flight, airborne LiDAR with manned flight, and with aerophotogrammetric survey in unmanned flight. For Cerrado Denso and Cerradão, it can be concluded that all technologies used in this research showed effective results and can therefore be applied according to the availability of equipment and financial resources.

Key Words: LiDAR. RPAS. Orthomosaic. Point Cloud. Structural metrics of vegetation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Charles Townes e seu aluno James Gordon (à direita) em 1954, exibindo um dos primeiros MASERS que construíram na Universidade de Colúmbia 32
Figura 2 – Fotografia de Theodore H. Maiman atrás de um laser de rubi, na entrevista coletiva da anunciação do laser pela empresa Hughes 32
Figura 3 – Ondas eletromagnéticas coerentes (em fase) 34
Figura 4 – Padrão de intensidade do feixe transversal e diâmetro do feixe de um laser 36
Figura 5 – Diferentes divergências e diâmetros do feixe de um laser 36
Figura 6 – Fator de correção para o alcance máximo do laser com base na refletividade alvo (normalizada para 80% de refletividade) 41
Figura 7 – Divergência do feixe do laser (a) e retornos do sinal do pulso laser emitido (b) 42
Figura 8 – Varredura e componentes básicos de um sistema laser aerotransportado (ALS) 44
Figura 9 – *Laser Scanner* Móvel Terrestre (MTLS) 45
Figura 10 – *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) no *Ice, Cloud, and land Elevation Satellite* (ICESat) 46
Figura 11 – Mecanismo de varredura por espelhos oscilantes (a) e seus padrões de medição no solo: tipo serrilhado (b), e tipo sinusoidal (c) 47
Figura 12 – Mecanismo de varredura por polígono giratório (a) e seu padrão de medição no solo (b) 48
Figura 13 – Mecanismo de varredura por espelhos de nutação (a) e seu padrão de medição no solo (b) 48
Figura 14 – Mecanismo de varredura por fibras ópticas (a) e seus padrões de medição no solo: convencional (b), e com espelho giratório adicional (c) 49
Figura 15 – Exemplo de um arquivo de pontos no formato XYZ 50
Figura 16 – Modelo digital de superfície (MDS) 52
Figura 17 – Modelo digital de terreno (MDT) 53
Figura 18 – Canopy height model (CHM) 53
Figura 19 – Quantidade de RPAS cadastrados na ANAC nos últimos cinco anos 55
Figura 20 – Altitude e eixos X, Y e Z de um RPA 57
Figura 21 – Principais fitofisionomias do bioma Cerrado 59
Figura 22 – Localização das áreas de estudo 1 e 2 na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho, Estado de Goiás 76

Figura 23 – Localização do transecto LiDAR em relação às áreas de estudo e à BHRV 77
Figura 24 – Vista superior do eBee Plus RTK 78
Figura 25 – Vista inferior do eBee Plus RTK 78
Figura 26 – Câmera digital não métrica acoplada ao RPAS eBee Plus RTK 81
Figura 27 – Confecção das estacas (a); locação dos vértices das parcelas (b); materialização dos vértices das parcelas (c).....85
Figura 28 – Etapas do processamento para a geração do ortomosaico e nuvem de pontos 87
Figura 29 – Linhas planejadas do voo da área de estudo 1 desta pesquisa 88
Figura 30 – Linhas planejadas do voo da área de estudo 2 desta pesquisa 89
Figura 31 – Representação genérica dos alvos pré-sinalizados implantados no terreno.....89
Figura 32 – Alvos pré-sinalizados confeccionados nesta pesquisa 90
Figura 33 – Par de receptores GNSS RTK utilizado nesta pesquisa, modelo HIPer Lite +.....91
Figura 34 – Implantação de um alvo pré-sinalizado as áreas de estudo desta pesquisa.....92
Figura 35 – Localização dos alvos pré-sinalizados na área de estudo 1 imageada 93
Figura 36 – Localização dos alvos pré-sinalizados na área de estudo 2 imageada 93
Figura 37 – Ilustração o conceito de estimativa da cobertura do dossel usando os primeiros retornos laser acima de uma altura pré-estabelecida 102
Figura 38 – Histograma das classes de altura da vegetação lenhosa obtida com base em levantamento realizado em campo na área de estudo 1.....112
Figura 39 – Histograma das classes de altura da vegetação lenhosa obtida com base em levantamento realizado em campo na área de estudo 2.....113
Figura 40 – Localização do ponto base na área de estudo 1.....116
Figura 41 – Valor do desvio padrão das coordenadas do centro das fotografias da área de estudo 1, antes geotags in flight e após geotags post-processed e do georreferenciemento das fotografias no Postflight 117
Figura 42 – Representação das discrepâncias planimétricas calculadas nos pontos de verificação ou pontos de checagem nos ortomosaicos da área de estudo 1 118
Figura 43 – Vetor das discrepâncias planimétricas calculadas para cada ortomosaico da área de estudo 1.....121
Figura 44 – Representação das discrepâncias altimétricas calculadas nos pontos de verificação nos MDS da área de estudo 1 124

Figura 45 – Valor do desvio padrão das coordenadas do centro das fotografias da área de estudo 2, antes geotags in flight e após geotags post-processed, com o georreferenciemento das fotografias no Postflight 128
Figura 46 – Representação das discrepâncias planimétricas calculadas nos pontos de verificação ou pontos de checagem nos ortomosaicos da área de estudo 2 130
Figura 47 – Vetor das discrepâncias planimétricas calculadas para cada ortomosaico da área de estudo 2 132
Figura 48 – Representação das discrepâncias altimétricas calculadas nos pontos de verificação nos MDS da área de estudo 2 135
Figura 49 – Localização da área de teste em relação às áreas de estudo 1 e 2 e à BHRV 139
Figura 50 - Valor do desvio padrão das coordenadas do centro das fotografias da área de teste, antes geotags in flight e após geotags post-processed, com o georreferenciemento das fotografias no Postflight 140
Figura 51 – Localização dos alvos pré-sinalizados na área de teste imageada 140
Figura 52 – Representação das discrepâncias planimétricas calculadas nos pontos de verificação ou pontos de checagem nos ortomosaicos da área de teste 142
Figura 53 – Vetor das discrepâncias planimétricas calculadas para cada ortomosaico da área de teste 144
Figura 54 – Representação das discrepâncias altimétricas calculadas nos pontos de verificação nos MDS da área de teste 147
Figura 55 – Nuvem de pontos da área de estudo 1, gerada com sistema LiDAR (aerotransportado tripulado) antes da normalização (a) e após a normalização (b) 151
Figura 56 – Classificação por altura dos retornos da nuvem de pontos da área de estudo 1 obtida com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 151
Figura 57 – Classificação por altura dos retornos da nuvem de pontos da área de estudo 1 obtida com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 152
Figura 58 – Classificação por altura dos retornos da nuvem de pontos da área de estudo 1 obtida com levantamento aerofotogramétrico (RPAS) 153
Figura 59 – Perfil longitudinal da nuvem de pontos em uma das parcelas da área de estudo 1 obtida com: LiDAR aerotransportado com voo tripulado (a); LiDAR aerotransportado com voo não tripulado (b); e levantamento aerofotogramétrico (c), com a identificação da supressão de parte da vegetação (círculos 1 e 2) 154

Figura 60 – Representação hipsométrica das nuvens de pontos em uma das parcelas da área de estudo 1, obtidas com LiDAR aerotransportado com voo tripulado (a), LiDAR aerotransportado com voo não tripulado (b) e levantamento aerofotogramétrico (c), com identificação de alteração da vegetação representada pelos círculos 1, 2, 3 e 4 155
Figura 61 – Vista superior da vegetação da parcela 6 da área de estudo 1 (com as aglomerações de árvores representadas em polígonos pretos) e suas imediações 156
Figura 62 – Classificação por altura dos retornos da nuvem de pontos da área de estudo 2 obtida com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 156
Figura 63 – Classificação por altura dos retornos da nuvem de pontos da área de estudo 2 obtida com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 157
Figura 64 – Perfil longitudinal da parcela 2 da área de estudo 2, com intervalo de maior quantidade de pontos (retângulo azul), e moda das alturas calculada no inventário florestal (linha vermelha tracejada) 158
Figura 65 – Classificação por altura dos retornos da nuvem de pontos da área de estudo 2 obtida com levantamento aerofotogramétrico 159
Figura 66 – Fotografia aérea da parcela 5 da área de estudo 2, no meio (a) e no final (b) da estação seca..... 160
Figura 67 – Porcentagem de cobertura vegetal da área de estudo 1 acima de 1.03 m de altura do solo, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo tripulado 161
Figura 68 – Estimativa de cobertura vegetal da área de estudo 1 acima de 1,03 m do solo, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 162
Figura 69 – Perfil longitudinal de parte das nuvens de pontos do LiDAR aerotransportado com voo tripulado (a) e não tripulado (b)..... 162
Figura 70 – Estimativa de cobertura vegetal da área de estudo 1 acima de 1,03 m do solo, obtida com dados oriundos do levantamento aerofotogramétrico..... 163
Figura 71 – Diagrama de perfil e cobertura arbórea de um Cerrado Denso..... 164
Figura 72 – Perfil longitudinal de parte da nuvem de pontos obtida com LiDAR aerotranspotado com voo não tripulado da parcela 3, área de estudo 1 165
Figura 73 – Estimativa de cobertura vegetal da área de estudo 2 acima de 2,35 m do solo, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo tripulado..... 165
Figura 74 – Estimativa de cobertura vegetal da área de estudo 2 acima de 2,35 m do solo, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 166

Figura 75 – Estimativa de cobertura vegetal da área de estudo 2 acima de 2,35 m do solo, obtida com dados oriundos do levantamento aerofotogramétrico 167
Figura 76 – Nuvem de pontos texturizada da parcela 5 da área de estudo 2, indicando descontinuidade na nuvem de pontos 168
Figura 77 – Objetos homólogos no estereopar 168
Figura 78 – Efeitos da variação da atitude da câmera (ω, φ e κ) 169
Figura 79 – Efeitos da variação da atitude da câmera (ω e φ) nas dimensões de uma fotografia 169
Figura 80 – Diagrama de perfil e cobertura arbórea do Cerradão 170
Figura 81 – Contagem de indivíduos acima de 1,03 m de altura do solo para a área de estudo 1, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo tripulado 171
Figura 82 – Contagem de indivíduos acima de 1,03 m de altura do solo para a área de estudo 1, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 172
Figura 83 – Contagem de indivíduos acima de 1,03 m de altura do solo para a área de estudo 1, obtida com dados oriundos do levantamento aerofotogramétrico 172
Figura 84 – Contagem de indivíduos acima de 2,35 m de altura do solo na área de estudo 2, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo tripulado 174
Figura 85 – Contagem de indivíduos acima de 2,35 m de altura do solo na área de estudo 2, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 175
Figura 86 – Contagem de indivíduos acima de 2,35 m de altura do solo na área de estudo 2, obtida com dados oriundos do levantamento aerofotogramétrico 175
Figura 87 – Perfil longitudinal e planta baixa de parte da nuvem de pontos obtida com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado, indicando a fusão de duas copas e presença de vegetação dominante e dominada 177
Figura 88 – CHM filtrado em vista superior (a), CHM filtrado em perspectiva 3D (b), CHM filtrado em perspectiva 3D com os indivíduos identificados automaticamente (círculos na cor verde) da parcela 2 178
Figura 89 – CHM sem filtro em vista superior (a), CHM sem filtro em perspectiva 3D (b), CHM sem filtro em perspectiva 3D com os indivíduos identificados automaticamente (círculos na cor verde) da parcela 2 179
Figura 90 – Parcela de 50 m x 20 m dividida em subparcelas de 10 m x 10 m 181
Figura 91 – Histograma com a distribuição dos valores da biomassa calculados em cada subparcela da área de estudo 1 184

Figura 92 – Histograma com a distribuição dos valores da biomassa calculados em cada subparcela da área de estudo 2 185
Figura 93 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 13, utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1A, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 202
Figura 94 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 6 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1A, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 203
Figura 95 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 3 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1A, utilizando os dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico 204
Figura 96 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 4 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1B, utilizando os dados obtidos LiDAR aerotransportado com voo tripulado 205
Figura 97 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 12 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1B, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 206
Figura 98 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 3 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1B, utilizando os dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico 207
Figura 99 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 7 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 2, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 208
Figura 100 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 7 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 2, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 209
Figura 101 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 4 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 2, utilizando os dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico 210

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de refletividade para vários materiais e superfícies refletores difusos, naturais e sintéticos, para um comprimento de onda a laser de 900 nm.....40
Tabela 2 – Especificações Técnicas do eBee Plus RTK 79
Tabela 3 – Parâmetros da varredura realizada com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 83
Tabela 4 – Padrão de exatidão cartográfico para produtos cartográficos digitais 94
Tabela 5 – Teste de hipótese para verificar a precisão do ortomosaico 95
Tabela 6 – Teste de hipótese para verificar a tendenciosidade do ortomosaico.....97
Tabela 7 – Teste de hipótese para verificar a distribuição normal ou gaussiana da amostra ...98
Tabela 8 – Teste de hipótese para verificar a autocorrelação dos resíduos da regressão 107
Tabela 9 – Teste de hipótese para verificar a heterocedasticidade do modelo.....108
Tabela 10 – Média, desvio padrão, valores máximos e valores mínimos do DAP e altura total dos indivíduos obtidos no inventário realizado na área de estudo 1 111
Tabela 11 – Média, desvio padrão, valores máximos e valores mínimos do DAP e altura total dos indivíduos obtidos no inventário realizado na área de estudo 2 113
Tabela 12 – Discrepâncias entre as coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados obtidas por receptor de sinais GNSS com as suas homólogas lidas nos ortomosaicos e MDS, com e sem pontos de apoio e PPK, a média, o desvio padrão, a maior e menor discrepância 115
Tabela 13 – Qui-amostrais calculados para os eixos E e N e qui-quadrado tabelado $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 3$ da área de estudo 1.....125
Tabela 14 – Qui-amostrais calculados para o eixo h e qui-quadrado tabelado $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 3$ da área de estudo 1.....126
Tabela 15 – Cálculo dos valores da distribuição do teste t de Student para cada ortomosaico e MDS ($\alpha = 90\%$, $\upsilon = 3$) da área de estudo 1.....127
Tabela 16 – Discrepâncias entre as coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados obtidas por receptor de sinais GNSS com as suas homólogas lidas nos ortomosaicos e MDS, com e sem pontos de apoio e PPK, e média, o desvio padrão, a maior e menor discrepância 129
Tabela 17 – Qui-amostrais calculados para os eixos E e N e qui-quadrado tabelado $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 12$ da área de estudo 2 136

Tabela 18 – Qui-amostrais calculados para o eixo h e qui-quadrado tabelado $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 12$ da área de estudo 2 137
Tabela 19 – Cálculo dos valores da distribuição do teste t de Student para cada ortomosaico $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 12$ da área de estudo 2 138
Tabela 20 – Discrepâncias entre as coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados obtidas por receptor de sinais GNSS com as suas homólogas lidas nos ortomosaicos e MDS, com e sem pontos de apoio e PPK, média, desvio padrão, maior e menor discrepância 141
Tabela 21 - Qui-amostrais calculados para os eixos E e N e qui-quadrado tabelado $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 3$, da área de teste 148
Tabela 22 – Qui-amostrais calculados para o eixo h e qui-quadrado tabelado $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 3$ da área de teste 149
Tabela 23 – Cálculo dos valores da distribuição do teste t de Student para cada ortomosaico $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 3$ da área de teste 150
Tabela 24 – Número de indivíduos acima de 1,03 m de altura do solo, obtido com dados do inventário, LiDAR aerotransportado com voo tripulado, LiDAR aerotransportado com voo não tripulado e levantamento aerofotogramétrico 173
Tabela 25 – Número de indivíduos acima de 2,35 m de altura do solo na área de estudo 2, obtida com dados do inventário, LiDAR aerotransportado com voo tripulado, LiDAR aerotransportado com voo não tripulado e levantamento aerofotogramétrico 176
Tabela 26 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estuo 1A, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 186
Tabela 27 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estuo 1A, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 187
Tabela 28 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estuo 1A, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico 187
Tabela 29 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estuo 1B, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 188

Tabela 30 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estuo 1B, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 188
Tabela 31 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estuo 1B, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico 189
Tabela 32 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estudo 2, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 189
Tabela 33 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estudo 2, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 190
Tabela 34 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estudo 2, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico 190
Tabela 35 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 192
Tabela 36 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 193
Tabela 37 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico 194
Tabela 38 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 195
Tabela 39 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 196
Tabela 40 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico 197

Tabela 41 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 198
Tabela 42 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 199
Tabela 43 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico 200
Tabela 44 – Pressupostos de regressão linear do modelo 13 de predição da biomassa da área de estudo 1A utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 202
Tabela 45 – Pressupostos de regressão linear do modelo 6 de predição da biomassa da área de estudo 1A utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado .. 203
Tabela 46 – Pressupostos de regressão linear do modelo 3 de predição da biomassa da área de estudo 1A utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico 204
Tabela 47 – Pressupostos de regressão linear do modelo 4 de predição da biomassa da área de estudo 1B, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 205
Tabela 48 – Pressupostos de regressão linear do modelo 12 de predição da biomassa da área de estudo 1B utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado .. 206
Tabela 49 – Pressupostos de regressão linear do modelo 3 de predição da biomassa da área de estudo 1B utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico 207
Tabela 50 – Pressupostos de regressão linear do modelo 7 de predição da biomassa da área de estudo 2, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado 208
Tabela 51 – Pressupostos de regressão linear do modelo 7 de predição da biomassa da área de estudo 2, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado 209
Tabela 52 – Pressupostos de regressão linear do modelo 4 de predição da biomassa da área de estudo 2 utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico 210
Tabela 53 – Pressupostos de regressão linear dos modelos de predição da biomassa gerados para as áreas de estudo 1A, 1B e 2, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado e não tripulado e com levantamento aerofotogramétrico 214

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIC	Akaike *Information* Criterion
ALS	*Airborne Laser Scanner*
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANOVA	*Analysis of Variance*
ASCII	*American Standard Code for Information Interchange*
BHRV	Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho
CHM	*Canopy Height Model*
CSV	*Comma-separated Values*
CW	*Continuous Wave*
DAP	Diâmetro à altura do peito
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EP	Erro padrão
EQ	Equidistância entre curvas de nível
ESC	*Eletronic Speed Controller*
ET	Erro no terreno
ET-ADGV	Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais
GCP	*Ground Control Point*
GLAS	*Geoscience Laser Altimeter System*
GLONASS	*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*
GNSS	*Global Navigation Satellite System*
GPS	*Global Positioning System*
GSD	*Ground Sample Distance*
GSM	*Groupe Special Mobile*
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICESat	*Ice, Cloud,and land Elevation Satellite*
IGS	*International GNSS Service*
IMU	*Inertial Measurement Unit*
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
ITRF	*International Terrestrial Reference Frame*
LADAR	*Laser Detection and Ranging*
LAS	*LASer*
LAZ	*LASZip*

LiDAR	*Light Detection and Ranging*
LITE	*Lidar In-space Technology Experiment*
MASER	*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MTLS	*Mobile Terrestrial Laser Scanner*
PAE	Precisão altimétrica esperada
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais
PPK	*Post Processed Kinematic*
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
RINEX	*Receiver Independent Exchange Format*
RMSE	*Root Mean Square Error*
RPA	*Remotely Piloted Aircraft*
RPAS	*Remotely Piloted Aircraft System*
RTK	*Real Time Kinematic*
SHP	*Shapefile*
SIG	Sistema de Informações Geográfica
SIGEF	Sistema de Gestão Fundiária
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SODA	*Sensor Optimised for Drone Applications*
SPSS	*Statistical Package for the Social Sciences*
TIF	*Tagged Image File Format*
TOF	*Time-of-flight*
VTOL	*Vertical Take-Off and Landing*

SUMÁRIO

ESTRUTURA DA TESE 26
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 28
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 28
1.1 Problematização 29
1.2 Objetivos 29
1.2.1 Objetivo geral 30
1.2.2 Objetivos específicos 30
1.3 Justificativa 30
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 31
2.1 Tecnologia LiDAR 31
2.1.1 Características do *laser* 33
2.1.1.1 Coerência do *laser* 34
2.1.1.2 Divergência do feixe *laser* 35
2.1.1.3 Alcance do *laser* 38
2.1.1.4 Equilíbrio de energia de alcance a *laser* 39
2.1.2 Tipos de sensores LiDAR 41
2.1.3 Tipos de plataforma 43
2.1.4 Mecanismos de varredura e padrões de medição no solo 46
2.1.4.1 Espelhos oscilantes 47
2.1.4.2 Polígono giratório 47
2.1.4.3 Espelhos de nutação 48
2.1.4.4 Fibras ópticas 49
2.1.5 Principais formatos do dado *laser* 50
2.1.6 Aplicações da tecnologia LiDAR 51
2.2 Modelos Digitais 52
2.3 Sistema de aeronave remotamente pilotada (RPAS) 53
2.3.1 Componentes dos RPAS 54
2.3.2 Carga útil: sensores embarcados nos RPA 58
2.4 Fitofisionomias do bioma Cerrado 58
2.4.1 Formações florestais 59
2.4.2 Formações savânicas 60

2.4.3 Formações campestres 60
2.5 Biomassa 61
CAPÍTULO 3 – APLICAÇÕES FLORESTAIS UTILIZANDO DADOS LIDAR E RPAS EM ÁREAS DE FLORESTA NATIVA NO BRASIL 64
3.1 Aplicações no bioma Cerrado 64
3.2 Aplicações no bioma Mata Atlântica 66
3.3 Aplicações no bioma Amazônia 67
3.4 Aplicações no bioma Caatinga 73
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA 75
4.1 Áreas de estudo 75
4.2 Materiais 77
4.2.1 eBee plus RTK 77
4.2.1.1 Receptor GNSS abordo do eBee plus RTK 79
4.2.1.2 Câmera acoplada ao eBee plus RTK 81
4.2.2 Dados obtidos com LiDAR 82
4.3 Métodos 84
4.3.1 Locação das parcelas e levantamento de dados em campo 84
4.3.2 Geração dos ortomosaicos, MDS e nuvem de pontos obtidos com aerofotogrametria ... 86
4.3.3 Verificação da acurácia e precisão dos ortomosaicos e MDS 89
4.3.3.1 Teste de qui-quadrado: verificação da precisão dos ortomosaicos e MDS 95
4.3.3.2 Teste de t de Student: verificação da acurácia dos ortomosaicos e MDS 97
4.3.3.3 Teste de Shapiro-Wilk: verificação da normalidade da amostra 98
4.3.4 Precisão esperada para a determinação altimétrica nos MDS 99
4.3.5 Geração das métricas das nuvens de pontos 99
4.3.6 Estimativa da cobertura do dossel nas parcelas 101
4.3.7 Estimativa do número de indivíduos nas parcelas 102
4.3.8 Cálculo e predição da biomassa aérea da vegetação lenhosa 103
4.3.8.1 Método *Stepwise* de seleção de variáveis para regressão linear múltipla 104
4.3.8.2 Determinação do melhor modelo 105
4.3.8.3 Pressupostos de regressão linear 106
4.3.8.3.1 Teste de Shapiro-Wilk: normalidade dos resíduos 106
4.3.8.3.2 Teste de Durbin-Watson: autocorrelação dos resíduos 106
4.3.8.3.3 Teste de Breusch-Pagan: heterocedasticidade dos resíduos 107

4.3.8.3.4 Ausência de multicolinearidade entre as variáveis independentes 108
4.3.8.3.5 Ausência de *outliers* nos resíduos 109
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO 111
5.1 Análise dos dados da vegetação 111
5.2 Acurácia e precisão dos ortomosaicos e MDS 114
5.2.1 Área de estudo 1 114
5.2.2 Área de estudo 2 127
5.2.3 Área de teste 138
5.3 Preparo e análise das nuvens de pontos 150
5.3.1 Área de estudo 1 151
5.3.2 Área de estudo 2 156
5.4 Cobertura do dossel nas parcelas 160
5.4.1 Área de estudo 1 160
5.4.2 Área de estudo 2 165
5.5 Número de indivíduos nas parcelas 170
5.5.1 Área de estudo 1 171
5.5.2 Área de estudo 2 174
5.6 Métricas das nuvens de pontos e intensificação do número de parcelas 180
5.7 Biomassa calculada 183
5.8 Predição da biomassa 185
5.8.1 Resumo (*Summary*) dos modelos gerados 186
5.8.1.1 Área de estudo 1A (Cerradão) 186
5.8.1.2 Área de estudo 1B (Cerrado Denso) 187
5.8.1.3 Área de estudo 2 (Cerradão/Mata Seca) 189
5.8.2 Determinação do melhor modelo e análise dos coeficientes 191
5.8.2.1 Área de estudo 1A (Cerradão) 191
5.8.2.2 Área de estudo 1B (Cerrado Denso) 194
5.8.2.3 Área de estudo 2 (Cerradão/Mata Seca) 198
5.8.3 Testes dos pressupostos de regressão 201
5.8.3.1 Área de estudo 1A (Cerradão) 202
5.8.3.2 Área de estudo 1B (Cerrado Denso) 205
5.8.3.3 Área de estudo 2 (Cerradão/Mata Seca) 208
CONSIDERAÇÕES FINAIS 213

REFERÊNCIAS 217
APÊNDICE A – PASSO A PASSO PARA A OPERAÇÃO DO RPAS MODELO EBEE PLUS RTK 235
APÊNDICE B – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DA BASE DA ÁREA DE ESTUDO 1 UTILIZANDO O MÉTODO PPP DISPONIBILIZADO PELO IBGE 248
APÊNDICE C – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DA BASE DA ÁREA DE ESTUDO 2 UTILIZANDO O MÉTODO PPP DISPONIBILIZADO PELO IBGE 250
APÊNDICE D – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DA BASE DA ÁREA DE TESTE UTILIZANDO O MÉTODO PPP DISPONIBILIZADO PELO IBGE 252
APÊNDICE E – ERROS INDIVIDUAIS DAS PRIMEIRAS 80 FOTOGRAFIAS DA ÁREA 1 ANTES A COREÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO PPK 254
APÊNDICE F – ERROS INDIVIDUAIS DAS PRIMEIRAS 80 FOTOGRAFIAS DA ÁREA 1 APÓS A COREÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO PPK 255
APÊNDICE G – ERROS INDIVIDUAIS DAS PRIMEIRAS 80 FOTOGRAFIAS DA ÁREA 2 ANTES A COREÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO PPK 256
APÊNDICE H – ERROS INDIVIDUAIS DAS PRIMEIRAS 80 FOTOGRAFIAS DA ÁREA 2 APÓS A COREÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO PPK 257
APÊNDICE I – ERROS INDIVIDUAIS DAS PRIMEIRAS 80 FOTOGRAFIAS DA ÁREA DE TESTE ANTES A COREÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO PPK 258
APÊNDICE J – ERROS INDIVIDUAIS DAS PRIMEIRAS 80 FOTOGRAFIAS DA ÁREA DE TESTE APÓS A COREÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO PPK 259
APÊNDICE K – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DO VOO AEROFOTOGRAMÉTRICO DA ÁREA 1 COM GCP CLASSIFICADO COMO PEC CLASSE A NA ESCALA 1/250 260
APÊNDICE L – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DO VOO AEROFOTOGRAMÉTRICO DA ÁREA 2 COM PPK CLASSIFICADO COMO PEC CLASSE A NA ESCALA 1/300 267
APÊNDICE M – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DO VOO AEROFOTOGRAMÉTRICO DA ÁREA DE TESTE COM GCP CLASSIFICADO COMO PEC CLASSE A NA ESCALA 1/200 273

ESTRUTURA DA TESE

A presente tese, realizada no âmbito do Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade Federal de Goiás (UFG), segue o estilo monográfico, organizada em cinco capítulos principais:

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O primeiro capítulo traz as considerações iniciais, a problematização, o objetivo geral e específicos, bem como a justificativa deste trabalho.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O segundo capítulo traz uma revisão de literatura sobre a evolução da tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR) e *know-how* relativo aos *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS), tais como a arquitetura e sensores embarcados.

Este capítulo também apresenta os principais conceitos de modelos digitais utilizados nesta pesquisa, tais como o Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT) e Modelo Digital de Elevação (MDE), ou *Canopy Height Model* (CHM), bem como um maior entendimento sobre as fitofisionomias do bioma Cerrado e a biomassa.

CAPÍTULO 3 – APLICAÇÕES FLORESTAIS UTILIZANDO LIDAR E RPAS

O terceiro capítulo contempla os principais trabalhos, métodos e análises científicas utilizados em aplicações florestais com o uso de LiDAR e RPAS, e suas contribuições para a área ambiental.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA

O quarto capítulo traz a descrição da área de estudo, materiais e métodos utilizados para se alcançar os objetivos propostos, com foco nos questionamentos científicos levantados nesta pesquisa.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSÃO

O quinto capítulo apresenta os resultados alcançados nesta pesquisa, com utilização das tecnologias LiDAR e RPAS (incluindo o uso de sensor óptico RGB), na avaliação da biomassa em áreas de Cerrado nativo, nos municípios de Itapirapuã e Goiás.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais trazem as principais conclusões da pesquisa, após a realização das análises dos produtos cartográficos obtidos com câmera digital não métrica (RGB) e sensor LiDAR, acoplados em veículos aéreos não tripulados, e também com LiDAR tripulado, com referência à biomassa em áreas de Cerrado nativo.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as considerações iniciais, a problematização, o objetivo geral e os específicos, bem como a justificativa deste trabalho.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O contínuo desenvolvimento das tecnologias em eletrônica e informática vem provendo um grande avanço na obtenção de informações geográficas acerca da superfície terrestre. A integração do sistema inercial e de posicionamento por satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS) com sistemas de medição eletrônica de distância (*laser*) e/ou câmera digital propiciou o surgimento de dois importantes instrumentos, o *Light Detection and Ranging* (LiDAR) e o *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS, ou Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada), revolucionando as etapas de mapeamento e análises espaciais (DALMOLIN e SANTOS, 2002; ALVES JÚNIOR *et al.* 2018).

As câmeras digitais fotogramétricas ainda possuem preço bastante elevado, fato que fez com que as câmeras digitais de uso doméstico, também denominadas de câmeras não métricas ou de baixo custo, fossem utilizadas na tomada de fotografias para a geração de produtos cartográficos em pequenas áreas. De forma similar à substituição de câmeras fotogramétricas por câmeras não métricas, na aerofotogrametria as aeronaves tripuladas vêm sendo substituídas pelos pequenos veículos aéreos não tripulados (também conhecidos como *drones*).

A respeito do LiDAR, sua utilização na aquisição de dados geográficos é relativamente recente, sobretudo por seu elevado custo de aquisição, operação e complexidade do instrumento. No entanto, esta tecnologia vem demonstrando grande potencial em diversas aplicações, tais como: planejamento costeiro e urbano, avaliação de risco de inundações, mapeamento de redes de transmissão de energia e telecomunicações, levantamento florestal, agricultura e mineração (GIONGO *et al.* 2010). O sistema LiDAR pode ser orbital, aerotransportado (*Airborne Laser Scanner* - ALS) ou terrestre.

Segundo Zandoná (2008), o sistema LiDAR armazena as informações de posição e o valor de reflectância de cada ponto mapeado. Esses atributos podem ser utilizados para a geração de imagens e mapas temáticos, contribuindo para a identificação e restituição de feições no terreno. É possível, com essas informações, gerar ortoimagens de intensidade e de hipsometria (intensidade combinada com informação altimétrica).

Devido a essas características, o LiDAR apresenta-se como uma ferramenta proeminente para aquisição de dados topográficos tridimensionais com alta precisão (aproximadamente 1 milhão pulsos de *laser* por segundo), permitindo modelar a estrutura da vegetação (principalmente altura), ou derivar informações importantes a respeito do uso da terra e de seu estado de conservação (ex. exploração florestal, processos erosivos e estado de conservação da cobertura do solo) (LEFSKY *et al.* 2005; LEVICK *et al.* 2009; WESSELS *et al.* 2011). Ferreira *et al.* (2011), por exemplo, julgaram promissoras as imagens do satélite *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS), equipado com sensor LiDAR, para o estudo das fitofisionomias do Cerrado (neste caso, com menor resolução espacial), no que se refere às propriedades biofísicas desse bioma em escalas regionais.

Desta forma, a presente pesquisa busca avaliar a aplicação dessas duas tecnologias na avaliação da biomassa em áreas de Cerrado nativo na bacia hidrográfica do rio Vermelho, entre os municípios de Itapirapuã e Goiás.

1.1 Problematização

Os questionamentos suscitados nesta pesquisa são os seguintes:

1 – Dentre as tecnologias LiDAR aerotransportado por aeronave convencional, LiDAR acoplado em um RPA e Aerofotogrametria (obtida com RPAS e câmera digital), qual pode fornecer dados mais próximos da realidade de campo?

2 – Dados LiDAR, oriundos de aeronave tripulada, ou combinados com dados obtidos com aerofotogrametria, são suficientes para substituir o método convencional de levantamento florestal?

3 – Considerando-se as tecnologias LiDAR aerotransportado por aeronave convencional (tripulada), LiDAR acoplado em um RPAS, e aquela praticada com câmeras digitais acopladas em RPAS (aerofotogrametria convencional), quais as vantagens e desvantagens no mapeamento de fitofisionomias de Cerrado?

1.2 Objetivos

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é analisar a biomassa aérea lenhosa associada a vegetação nativa do bioma Cerrado, na região da bacia hidrográfica do Rio Vermelho, Estado de Goiás, com base em instrumentos avançados (sensores LiDAR e ópticos) a bordo de veículos aéreos tripulados e não tripulados (RPAS).

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos têm-se a obtenção das estimativas da cobertura vegetal nativa pela geração e análise do Modelo Digital de Terreno (MDT), Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Elevação (MDE, equivalente ao *Canopy Height Model* – CHM), tais como altura do dossel, número de indivíduos, porcentagem de cobertura e biomassa. Busca-se também a validação dos dados obtidos com LiDAR e RPAS com informações de campo (ex. levantamento da biomassa em áreas de Cerrado a partir de métodos tradicionais e por sensoriamento remoto), além da comparação do custo-benefício destas tecnologias.

1.3 Justificativa

Com base nas informações contextualizadas até aqui, percebe-se que a tecnologia LiDAR oferece grande potencial para realizar medidas diretas e/ou estimativas de variáveis dendrométricas, muito utilizadas em levantamentos florestais, em áreas nativas ou plantadas. Já o uso do LiDAR em levantamentos sobre vegetação nativa de Cerrado é algo bem mais recente, e ainda pouco estudado, haja vista este bioma ter fitofisionomias heterogêneas (diferente do ambiente florestal). Seja transportado por aeronaves tripuladas ou por RPA, tal instrumento ainda apresenta alto custo aquisitivo e operação mais complexa, impedindo sua aplicação em larga escala. Por esse motivo, vem se buscando comparar os dados LiDAR com dados obtidos com RPAS equipados com câmeras digitais não métricas (DANDOIS e ELLIS, 2013), em especial no bioma Cerrado.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão de literatura sobre a evolução da tecnologia LiDAR, e da própria aerofotogrametria, utilizando os RPAS, além de apresentar os principais conceitos utilizados nesta pesquisa, tais como o MDS, MDT, MDE e CHM, bem como um maior entendimento sobre as fitofisionomias do bioma Cerrado e a sua biomassa aérea.

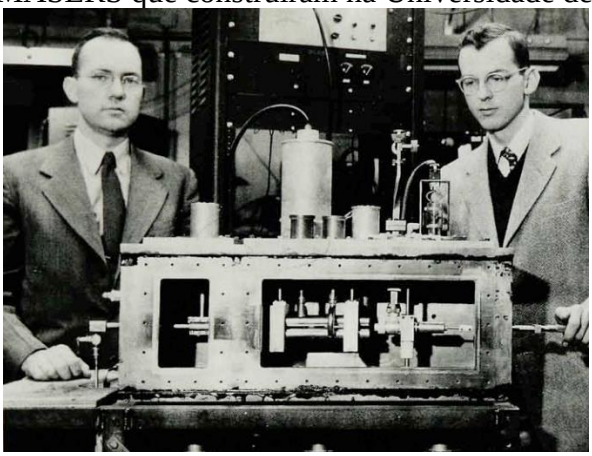
2.1 Tecnologia LiDAR

Os sistemas de alcance por *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER) são comumente referidos como sistema LiDAR (*Light Detection and Ranging*). LiDAR é uma sigla que descreve os sistemas de detecção e alcance de luz, também chamados de *Laser Detection and Ranging* (LADAR), seja por detecção e alcance a *laser* ou por radar a *laser*. Não existe uma terminologia universal, mas geralmente esses sistemas são referidos como "sistemas lidar", embora a ortografia do "lidar" possa diferir - lidar, LiDAR ou LIDAR. Por convenção, nesta pesquisa o termo será utilizado com a grafia mais popular, LiDAR.

LiDAR é um sistema de sensoriamento remoto ativo que determina as coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície pela geração, emissão e captura de pulsos *laser*, integrados com dados do sistema global de navegação por satélite (GNSS) e do sistema de navegação inercial (INS ou IMU) (WEHR e LOHR, 1999; LILLESAND e KIEFER, 2000; DALMOLIN e SANTOS, 2004; SHAN e TOTH, 2008). Apesar do início do seu desenvolvimento ter ocorrido nas décadas de 1970 e 1980 (ACKERMANN, 1999), o pontapé inicial foi dado no ano de 1916, quando Albert Einstein introduziu o conceito de transições quânticas - absorção, emissão espontânea e estimulada de luz dando início à teoria quântica da luz (KLEPPNER, 2005).

O precursor do *laser* foi o *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (MASER), conceito desenvolvido pelos soviéticos Nikolai Basov e Alexander Prokhorov, e pelos americanos Charles Townes e James Gordon, na década de 1950. O primeiro MASER operacional foi criado no ano de 1954 na Universidade de Colúmbia, por James P. Gordon, Herbert J. Zeiger e Charles H. Townes (Figura 1).

Figura 1 – Charles Townes e seu aluno James Gordon (à direita) em 1954, exibindo um dos primeiros MASERS que construíram na Universidade de Colúmbia



Fonte: Bloembergen (1993)

No entanto, a invenção do *laser* é dada a Theodore H. Maiman, que desenvolveu o primeiro *laser* em 16 de maio 1960, um *laser* de rubi no laboratório de pesquisa da *Hughes Aircraft Corporation* em Malibu na Califórnia (MAIMAN, 1960). A Hughes decidiu anunciar o *laser* em 7 de julho do mesmo ano em uma entrevista coletiva em Nova York (Figura 2), depois que a revista científica *Physical Review Letters* rejeitou o relatório de Maiman sobre sua descoberta (HECHT, 2010).

Figura 2 – Fotografia de Theodore H. Maiman atrás de um laser de rubi, na entrevista coletiva da anunciação do laser pela empresa Hughes

Fonte: Hecht (2010)

O comprimento de onda do *laser* de rubi está próximo ao final da região vermelha do espectro eletromagnético, a 694 nm, e emite ondas coerentes em pulsos curtos em um feixe de luz concentrado (POPESCU, 2011).

O grande salto para a empregabilidade do LiDAR foi o desenvolvimento do Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS) a partir da década de 1960, que resolveu o problema do posicionamento do sensor (ACKERMANN, 1999). Os sistemas LiDAR são classificados como sensores ativos, sendo similares ópticos ao RADAR (*Radio Detection and Ranging*).

O princípio de funcionamento de um sistema LiDAR consiste em uma unidade de alcance a *laser*, que emite de feixes *lasers* em direção à uma superfície, através de um instrumento de varredura como um espelho oscilante ou prisma giratório, onde estes são refletidos pelos obstáculos (construções, vegetação ou o próprio terreno) e captados pelo sensor. Para cada feixe emitido, é registrado o tempo de percurso LiDAR – obstáculo – LiDAR, permitindo ao sistema realizar o cálculo da distância. Utilizando unidades de medições auxiliares, como receptores da categoria *Global Natigation Satelite System* (GNSS), com uma ou mais estações terrestres para melhorar a precisão das coordenadas da pegada do *laser* após o pós-processamento, e o *Inertial Measurement Unit* (IMU), que registram a posição e a atitude do instrumento (direção de deslocamento – *kappa/yaw*, movimentos laterais – *ômega/roll*, e movimentos frontais – *phi/pitch*) do instrumento durante o deslocamento (se houver), é possível definir a posição tridimensional de pontos (nuvem 3D) na superfície depois do processamento (ZANDONÁ *et al.*, 2008; MAAS *et al.*, 2008; CÔTÉ *et al.*, 2011).

O sistema LiDAR apresenta sua própria fonte de energia, neste caso, o *laser*, o qual emite radiação eletromagnética em ondas curtas (1-10 μm), sensível às perturbações atmosféricas e, assim, considerado um método direto na captura de dados. Uma vantagem dos sensores de varredura a *laser* em relação aos clássicos sensores passivos (fotografias aéreas e imagens de satélite) é que os scanners a *laser* não dependem do Sol como uma fonte de iluminação. Sendo assim, a tomada dos dados não é prejudicada por sombras causadas por nuvens ou objetos vizinhos. Outra característica importante deste sensor é que os pulsos de *laser* podem penetrar por pequenas aberturas no dossel da floresta e fornecer informações sobre a estrutura florestal e sobre o relevo destas áreas.

2.1.1 Características do *laser*

Um *laser* é um tipo especial de fonte de luz com certas características relacionadas ao comprimento de onda, potência de saída, duração da emissão, divergência do feixe, coerência e aos sistemas e materiais que o geram.

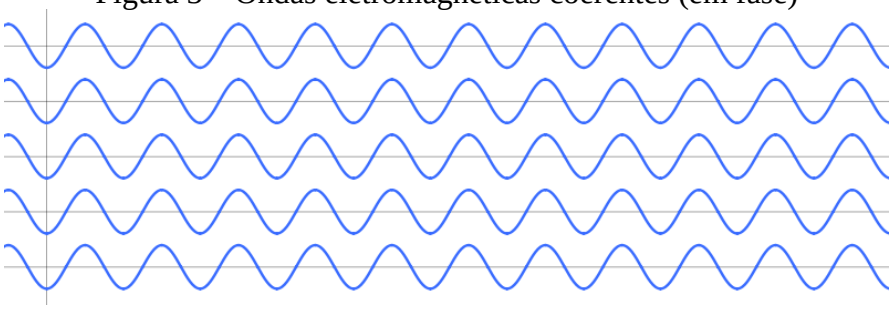
De acordo com o modo de operação, a fonte laser pode emitir a luz em pulso ou em modo contínuo (ou onda contínua, *Continuous wave* - CW). O pulso laser pode ser caraterizado pela taxa de repetição e duração do pulso que normalmente variam de 10^{-3} s (milissegundo) a 10^{-15} s (fentossegundo). Para um observador a olho nu, o laser pulso pode parecer contínuo devido a frequência do raio ser superior a do olho humano. O comprimento de onda do laser está em função do material que emite o laser, podendo ser um comprimento fixo ou variável. Além disso, a energia pode variar de 10^{-3} watt (miliwatts) a 10^{3} watts (quilowatts) (HECHT 1992).

2.1.1.1 Coerência do *laser*

A luz do *laser* possui propriedades importantes que a diferenciam da luz branca ou comum, principalmente a coerência, comprimento de onda, pureza espectral, direcionalidade, divergência do feixe, modulação de potência e polarização (POPESCU, 2011). Uma das propriedades mais conhecida da luz *laser* é a coerência.

A Figura 3 ilustra o conceito de coerência, quando as ondas de luz estão em fase uma com a outra, o que significa que seus picos são alinhados no mesmo ponto no tempo. Para ter ondas coerentes, as ondas de luz devem começar com a mesma fase na mesma posição e precisam ter o mesmo comprimento de onda, ou seja, serem espectralmente puras.

Figura 3 – Ondas eletromagnéticas coerentes (em fase)



Fonte: O autor

A coerência pode ser caracterizada como espacial ou temporal. As ondas de luz do *laser* podem encontrar diferentes condições do caminho óptico, o que as leva a sair da fase. Como tal, a coerência temporal é definida por quanto tempo as ondas de luz do *laser* permanecem em fase à medida que viajam. A coerência espacial mede a área sobre a qual as ondas de luz são coerentes, o que confere direcionalidade aos raios *laser*. A diferença entre a luz do *laser* e a

radiação de outras fontes de luz, como a luz comum, é que a luz do *laser* tem o potencial de gerar feixes com alta coerência temporal e espacial.

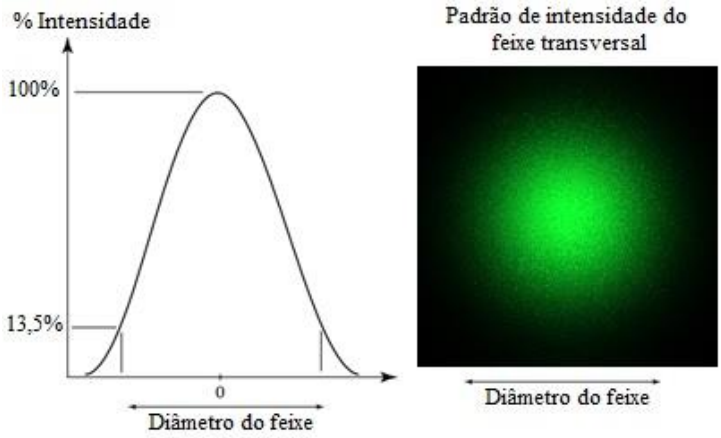
A luz do *laser* é geralmente considerada monocromática, o que significa que todos os fótons têm quase o mesmo comprimento de onda. Embora os *lasers* normalmente emitam uma variedade de comprimentos de onda, a largura de banda do *laser* de banda mais larga é muito mais estreita que a da luz comum.

2.1.1.2 Divergência do feixe *laser*

A luz do *laser* pode formar feixes bem focados que viajam longas distâncias sem se espalhar como a luz comum. A definição mais comum de divergência de feixe é baseada no ângulo de espalhamento medido em miliradianos (mrad). A divergência da maioria dos *lasers* de onda contínua é de cerca de 1 mrad, enquanto para *lasers* pulsados pode ser um pouco maior. Para fins de referência, um círculo completo ou 360° é igual a 2π radianos, 1 radiano é igual a aproximadamente 57,30° e 1 mrad corresponde a 0,057°. A divergência do feixe de *laser* geralmente ocorre em situações de grandes distâncias entre o *laser* e o solo, e o ângulo de divergência é normalmente medido do centro do feixe até a borda (HECHT, 1992). No entanto, determinar o local da borda do *laser* pode ser algo não tão preciso, pois a propagação do feixe de *laser* pode ser aproximada, assumindo que o feixe seja do tipo Gaussiano, o que significa que o perfil de intensidade segue uma função Gaussiana.

Na Figura 4 são apresentados o perfil de irradiância transversal de um *laser* e sua intensidade. Nota-se que o perfil mostra que a intensidade do feixe diminui gradualmente em direção aos lados do feixe, e a borda do feixe é considerada onde a intensidade caiu 13,5% de seu pico ou valor axial máximo (HECHT, 1992).

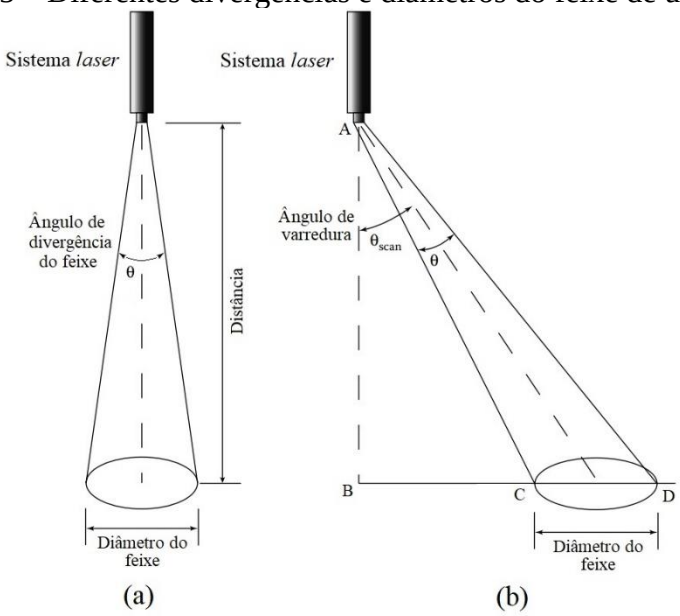
Figura 4 – Padrão de intensidade do feixe transversal e diâmetro do feixe de um laser



Fonte: Adaptado de Popescu (2011)

Na Figura 5 são apresentadas duas situações de divergência de um feixe de *laser*. A situação (a) apresenta a divergência e o diâmetro da pegada dos feixes de *laser* no nadir; a situação (b) apresenta a divergência e o diâmetro da pegada dos feixes de *laser* com um determinado ângulo (θ_{scan}) de varredura (ambas em terreno plano).

Figura 5 – Diferentes divergências e diâmetros do feixe de um laser



Fonte: Adaptado de Popescu (2011)

Para realizar o cálculo da divergência do feixe, o ângulo formado entre das bordas do feixe é considerado (BALTSAVIAS, 1999). Independentemente da medida da divergência,

calcular o tamanho do feixe ou o diâmetro da pegada a *laser* (*footprint*) é um problema trigonométrico, conforme apresentado na Equação 1.

$$D=2\cdot H\cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{1}$$

Onde:

D = Diâmetro do feixe (diâmetro da área iluminada, pegada ou *footprint*);

H = Distância do *laser* até o ponto iluminado (altura de voo para varredura a *laser* aerotransportado), e;

θ = Ângulo de divergência do feixe.

Para um ângulo de divergência pequeno e grandes distâncias, que costumam ocorrer em aplicações de *laser* aerotransportado, o ângulo em radianos oferece uma aproximação de sua função tangente; portanto, uma fórmula comumente usada é apresentada na Equação 2.

$$D=H\cdot\theta \tag{2}$$

Por exemplo, para um feixe com uma divergência de 1 mrad e uma distância de 1000 m, o diâmetro da pegada se torna 1 m. Com uma varredura a *laser* aerotransportado, o tamanho e a forma da pegada iluminada também são afetados pelo ângulo de varredura e pela inclinação do terreno. Neste caso, a Equação 2 pode ser usada para calcular o diâmetro da pegada dos feixes de *laser* no nadir. Mas para feixes de *laser* com um determinado ângulo (θ_{scan}) de varredura em um terreno plano, a Equação 3 fornece um cálculo mais apropriado, usando trigonometria com os triângulos ABC e ABD apresentados na Figura 3b.

$$D = H\left[\tan\left(\theta_{scan}+\frac{\theta}{2}\right)-\tan\left(\theta_{scan}-\frac{\theta}{2}\right)\right] \tag{3}$$

Uma fórmula simplificada pode ser derivada da Equação 3, considerando a distância do caminho do *laser* igual a $\frac{H}{\cos\left(\theta_{scan}\right)}$. A projeção da pegada no terreno plano é fornecida pela Equação 4.

$$D = \frac{H}{\cos^2 \theta_{scan}} \cdot \theta \tag{4}$$

Considerando o exemplo dado anteriormente, para um feixe com uma divergência de 1 mrad e uma altura de voo de 1000 m, o diâmetro da pegada em um ângulo de varredura de 20° em relação ao nadir se torna 1,13 m. O cálculo do tamanho da pegada para terrenos inclinados é fornecido por Baltsavias (1999).

2.1.1.3 Alcance do *laser*

A detecção de alcance do *laser* usa os mesmos princípios de medições de distância por radar, com a principal diferença no uso de comprimentos de onda mais curtos do espectro eletromagnético. O princípio básico do alcance do *laser* é a medição do tempo necessário para um sinal de *laser* viajar do transmissor para a superfície refletora de um alvo e retornar ao receptor, embora sejam utilizados dois efeitos físicos principais: para *lasers* pulsados, o tempo de deslocamento do pulso de luz é medido e convertido em uma estimativa de distância, enquanto para os *lasers* de ondas contínuas (*continuous wave* - CW), o alcance é obtido medindo-se a diferença de fase entre os sinais transmitidos e os recebidos. Essas técnicas de detecção de alcance pertencem aos métodos de tempo de voo (*time of flight* - TOF).

Para medições de alcance com *laser*s pulsados, o sistema *laser* mede o tempo de viagem entre o pulso emitido e o eco recebido, e a distância entre a unidade de alcance e a superfície alvo é fornecida pela Equação 5:

$$D = c \cdot \frac{t}{2} \tag{5}$$

Onde:

c = Velocidade da luz;

t = Tempo de viagem do pulso (t é dividido por dois, uma vez que o pulso viaja duas vezes a distância do alvo, ou seja, do transmissor ao alvo e do alvo ao receptor).

Para medições precisas, o pulso do *laser* deve ser curto. A Equação 6 relaciona a resolução do alcance (ΔD) e a resolução do tempo (Δt):

$$\Delta D = c \cdot \frac{\Delta t}{2} \tag{6}$$

A Equação 6 mostra que a resolução do alcance é determinada pela resolução da medição do intervalo de tempo. Assim, para um pulso de 10 nanossegundos, a resolução do alcance é obtida por 3 x 105 km/s x 10^{-8} s / 2 = 1,5 m. As equações 5 e 6 mostram que a precisão da medição do alcance não depende da distância. O termo "resolução" não deve ser confundido com a precisão da medição do alcance. A resolução do alcance refere-se à menor alteração na distância que pode ser resolvida com o *laser* TOF. A precisão do alcance refere-se ao maior erro total na medição de distâncias e geralmente é da ordem de centímetros para os telêmetros/distanciômetros a *laser* aerotransportados, embora seja diferente nos eixos vertical e horizontal.

Para *lasers* do tipo CW, o alcance é obtido modulando a intensidade do *laser* com um sinal senoidal. O tempo de viagem é proporcional à diferença de fase entre os sinais transmitidos e recebidos, e a informação da distância é extraída do sinal recebido comparando sua fase de modulação com a do sinal emitido (POPESCU, 2011).

2.1.1.4 Equilíbrio de energia de alcance a *laser*

As medições de alcance do *laser* aerotransportado e por satélite são influenciadas por condições atmosféricas, potência do *laser* e refletividade do alvo. A potência do eco do *laser* recebido no sensor é diretamente proporcional à refletividade do alvo. O alcance e a refletividade estão diretamente relacionados; mais especificamente, o alcance é proporcional à raiz quadrada da refletividade. Para determinar um fator de correção para o alcance máximo do *laser*, dependendo da refletividade do alvo, pode-se utilizar a Equação 7.

$$R \propto \sqrt{\rho} \tag{7}$$

Onde:

R = alcance do *laser;*

ρ = refletividade do alvo.

A refletividade de um alvo, para um determinado comprimento de onda, influencia o alcance máximo. Assim, nas especificações dos fabricantes de sistemas LiDAR, para a faixa máxima devem sempre especificar para que tipo de reflexão do alvo (difusa ou especular) e a porcentagem de refletividade (WEHR e LOHR, 1999).

Na Tabela 1 são apresentadas a refletividade típica de vários materiais para um comprimento de onda do *laser* de 900 nanômetros (nm).

Tabela 1 – Valores de refletividade para vários materiais e superfícies refletores difusos, naturais e sintéticos, para um comprimento de onda a laser de 900 nm

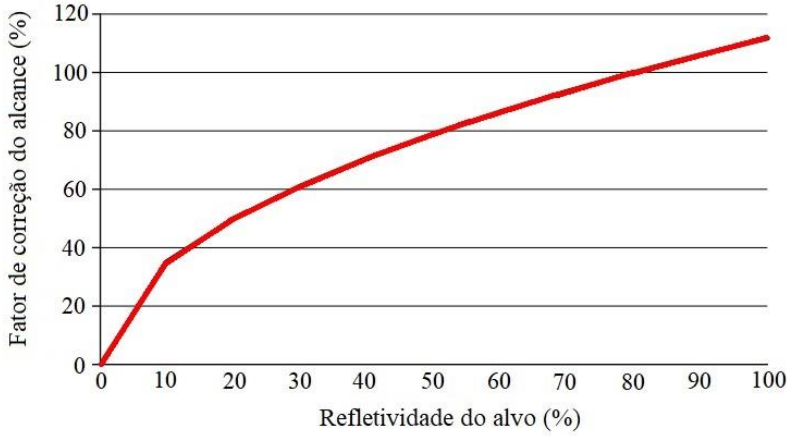
Material	**Refletividade (%)**
Papel branco	Até 100
Madeira serrada	94
Neve	80-90
Alvenaria (branca)	85
Calcário, argila	Até 75
Árvores decíduas	≃ 60
Árvores coníferas	≃ 30
Areia carbonatada (seca)	57
Areia carbonatada (molhada)	41
Areia de praias e desertos	≃ 50
Madeira rústica (palete)	25
Concreto	24
Asfalto	17
Lava	8
Borracha	5

Fonte: Adaptado Wehr e Lohr (1999)

Na Figura 6 é apresentado o fator de correção para o alcance máximo do *laser* com base na refletividade do alvo (normalizada para 80% de refletividade). Nota-se nesta figura que os alvos com refletividade de 40% restringem o alcance máximo a cerca de 70% (para um alvo com 80% de refletividade). Os alvos com 20% e 10% de refletividade têm um alcance máximo de apenas 50% e 35%, respectivamente (WEHR e LOHR, 1999).

Ao utilizar um sistema de varredura a *laser* aerotransportado sobre florestas com espécies mistas, coníferas e decíduas, é importante estar ciente das limitações máximas de alcance para os dois tipos de espécies. Para árvores coníferas com uma refletividade típica de cerca de 30% (Tabela 1), o alcance máximo é de aproximadamente 60% (Figura 6) do que para as árvores decíduas, que têm uma refletividade típica de cerca de 60% (POPESCU, 2011).

Figura 6 – Fator de correção para o alcance máximo do laser com base na refletividade alvo (normalizada para 80% de refletividade)



Fonte: Adaptado Wehr e Lohr (1999)

A refletividade de um alvo também afeta o tamanho mínimo de um objeto detectável. Por exemplo, se ignorarmos a influência de outros fatores, como condições atmosféricas, forma do alvo ou declive do terreno, um sistema *laser* capaz de medir a distância a um alvo com uma refletividade de 30% deve ser capaz de detectar um alvo com uma refletividade de 60%, que é metade do tamanho do alvo menos refletivo.

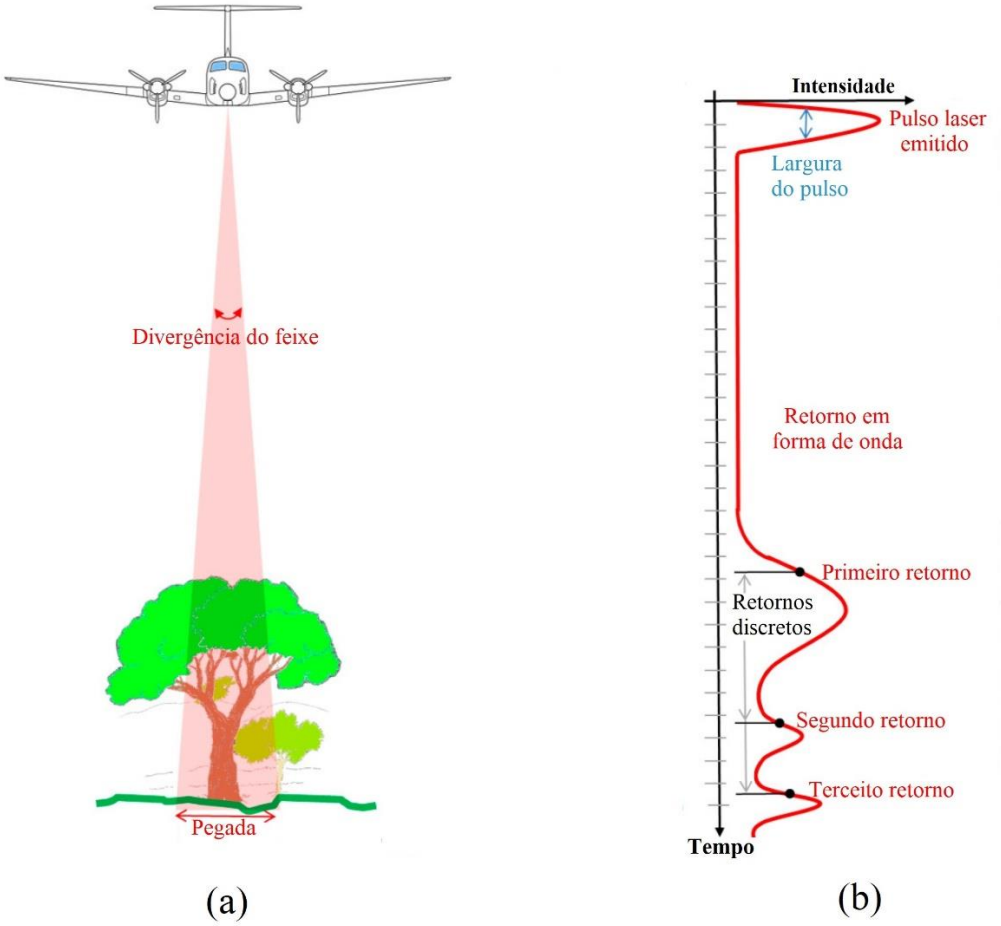
2.1.2 Tipos de sensores LiDAR

Os sensores LiDAR podem ser categorizados com base em sua capacidade de registrar retornos discretos ou dados na forma de ondas contínuas (CW). O tipo do receptor da unidade de alcance do *laser* determina o tipo de dados gravados - medições de retornos discretos ou onda contínua. No primeiro caso, um pulso de *laser* pode fornecer retornos múltiplos dependendo do tipo de superfície que ele intercepta. Quando o feixe do *laser* atinge objetos porosos, como o dossel da floresta, ele pode interceptar folhagens ou galhos de árvores na pegada do *laser*, o que pode retroespelhar energia suficiente para acionar o registro do tempo de viagem pelo receptor do *laser* (Figura 6). Depois de atingir o topo do dossel, parte do feixe de *laser* pode continuar seu percurso através das aberturas no dossel, até que novamente atinja outra camada de folhagem ou galhos, ou possivelmente o solo, o que pode gerar retornos secundários do mesmo pulso. Dependendo da complexidade do dossel da floresta e das configurações do receptor do *laser*, um pulso de *laser* pode gerar até quatro ou cinco retornos discretos. Conforme a luz interage com os objetos, como árvores ou o solo, parte da energia é

refletida de volta para o sensor, modificando a forma da onda de acordo com as propriedades geométricas do alvo (Figura 7).

A Figura 7a ilustra a maneira como a energia de um pulso *laser*, disparado direto no nadir, se espalha de forma cônica conforme se propaga pela atmosfera. Esta é propagação determinada pela divergência do feixe de *laser*, que em conjunto com a altura de voo, define o tamanho da pegada do *laser* projetada no solo (ou qualquer alvo que a pegada cruze). A Figura 7b ilustra de forma esquemática a interação do feixe de *laser* com os alvos (vegetação e o solo), e as diferentes intensidades de energia do sinal retroespalhados por estes alvos no decorrer do tempo.

Figura 7 – Divergência do feixe do laser (a) e retornos do sinal do pulso laser emitido (b)



Fonte: Adaptado de Fernandez-Diaz (2014)

Quando o pulso sai do sensor, geralmente tem um perfil quase gaussiano; ao atingir o dossel da floresta, este fornece um retorno do topo do dossel (o primeiro retorno), incide no sub-bosque (o segundo retorno) e atinge o solo da floresta (o terceiro retorno). Essas medições permitem caracterizar com precisão a altura da vegetação e a elevação do terreno sob o dossel.

Alguns dos pulsos de *laser* que interceptam o dossel fornecem apenas um retorno quando folhagem, galhos ou troncos de árvore bloqueiam toda a pegada, ou quando esses pulsos atingem o solo nu sem interceptar altas camadas de vegetação. Da mesma forma, quando a pegada do *laser* cobre objetos completamente não porosos, como telhados, laterais de edifícios ou outras estruturas artificiais, o pulso de *laser* fornece apenas um retorno. Portanto, os dados LiDAR com retornos discretos incluem primeiros retornos, retornos intermediários e últimos retornos.

Os Sistemas de ondas contínuas são capazes de registrar toda a amplitude de retroespalhamento do pulso de *laser*. Esses sensores têm sido usados em plataformas aéreas e de satélite. Enquanto os sistemas LiDAR com retornos discretos registram, para cada pulso de *laser*, o tempo de viagem e a intensidade de cada retorno, os sistemas LiDAR de ondas contínuas registram a variação da intensidade no tempo da energia retornada de cada pulso de *laser* e, portanto, fornecem informações sobre a distribuição de altura da intensidade retornada. A forma da intensidade retornada oferece uma descrição direta da distribuição vertical das superfícies iluminadas pelo pulso de *laser*, sendo fundamental na caracterização de alvos complexos, como o dossel de florestas (HARDING *et al.* 2001; DUBAYAH *et al.* 2000).

2.1.3 Tipos de plataforma

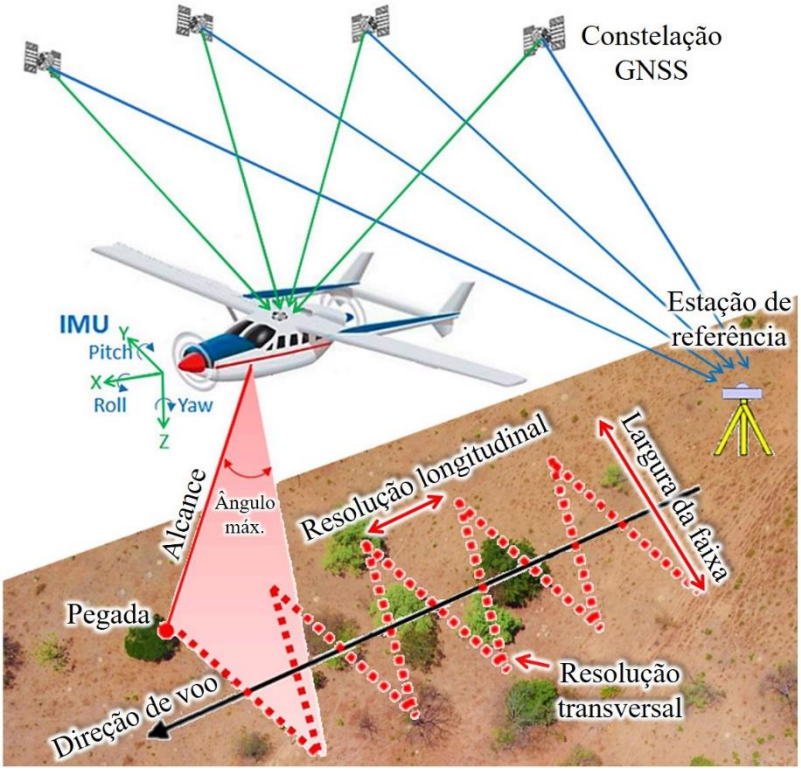
Os sistemas LIDAR são divididos em três categorias principais, segundo sua plataforma de instalação ou montagem: terrestre, aéreo e espacial. Os primeiros LiDAR foram os sistemas terrestres. Os *scanner*s a *laser* terrestres são aplicados principalmente para mapeamento de ambientes internos. Após a implementação bem-sucedida de sistemas terrestres na década de 1960, *scanners* a *laser* foram montados em plataformas aéreas. *Scanners* a *laser* aerotransportados (*Airborne Laser Scanner* - ALS) com configuração nadiral podem adquirir nuvem de pontos 3D usada principalmente para preparar modelos digitais de superfície (MDS). Este sistema apresenta alguns limitadores, como custos inerentes à operação da aeronave, restrições de voo e aquisição de dados em escala local (MCCORMICK, 2005). A necessidade de estudar a estrutura vertical da atmosfera em alta resolução temporal e em escala global levou ao surgimento dos primeiros LiDAR espaciais nos anos 1990 (WINKER *et al.*, 2006).

Os primeiros *lasers* aerotransportados sugiram inicialmente em 1969, instalados em aeronaves de pequeno porte, e seguidos no final dos anos 1970 por LiDAR instalados em aeronaves maiores, capazes de medições de longo alcance. A partir de 1979, foram realizados

voos a bordo de aeronaves capazes de atingir grandes altitudes, onde os dados foram obtidos a aproximadamente 20 km de altitude (MCCORMICK, 2005).

Os componentes básicos de um sistema LiDAR aerotransportado são apresentados na Figura 8. Para sistemas aerotransportados, os três componentes principais incluem: uma unidade de alcance do *laser*; uma unidade de orientação (IMU); e uma unidade de localização (GNSS) com receptor base (no solo) e um receptor integrado ao sistema *laser* (na plataforma).

Figura 8 – Varredura e componentes básicos de um sistema laser aerotransportado (ALS)



Fonte: Adaptado de Fernandez-Diaz (2014)

Computadores e programas integram fluxos de dados provenientes de todos os componentes e fornecem armazenamento de dados e uma variedade de funções de registro, processamento e exportação pós-aquisição.

Os sistemas LiDAR terrestres variam em complexidade e podem incluir os mesmos componentes de um sistema aerotransportado, especialmente para unidades móveis montadas em veículos ou barcos, ou podem ter uma construção mais simples para unidades fixas montadas em um tripé, por exemplo. Na Figura 9 é apresentado um *Laser Scanner* Móvel Terrestre (*Mobile Terrestrial Laser Scanner* - MTLS) modelo ILRIS 3 6 D (círculo na cor vermelha) da Optech, utilizado na modelagem de combustível florestal, comportamento e

efeitos do fogo em savanas de pinheiro de folha longa (*Pinus palustris*) do sudeste dos Estados Unidos.

Figura 9 – *Laser Scanner* Móvel Terrestre (MTLS)

Fonte: Loudermilk *et al*. (2007)

O primeiro LiDAR transportado por uma nave espacial foi o *Lidar In-space Technology Experiment* (LITE), lançado no ano de 1994, com duração do voo de 11 dias. O primeiro *laser* a bordo de um voo espacial de longa duração, em órbita terrestre baixa, foi o *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS), acoplado ao *Ice, Cloud, and land Elevation Satellite* (ICESat) em janeiro de 2003. O sistema LiDAR espacial GLAS é apresentado na Figura 10 por uma fotografia tomada em 18 de junho de 2002.

Figura 10 – *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) no *Ice, Cloud, and land Elevation Satellite* (ICESat)

Fonte: NASA (2017)

A escolha da plataforma depende principalmente do tipo de aplicação dos dados oriundos do sistema. De uma forma geral, os sistemas espaciais mapeiam o globo terrestre para pesquisas e propósitos experimentais. Os sistemas aerotransportados coletam dados para investigações nacionais, regionais e locais. As plataformas terrestres são frequentemente utilizadas para produzir modelos tridimensionais de estruturas feitas pelo homem ou recursos naturais, como árvores. Assim, o princípio básico e a especificação técnica para um sensor instalado em uma plataforma, como satélite, avião, helicóptero, tripé (coleta estática, terrestre) ou veículos (coleta dinâmica), mudam devido à variedade de aplicações (SHAN e TOTH, 2008).

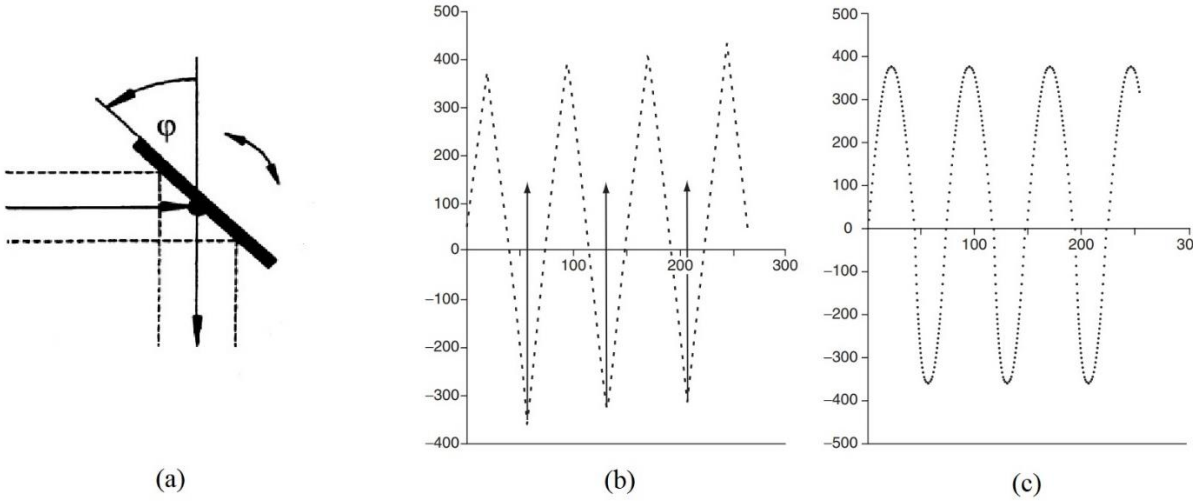
2.1.4 Mecanismos de varredura e padrões de medição no solo

As varreduras podem ser uni ou bidirecionais. Os mecanismos de varredura típicos, utilizados para levantamentos aerotransportados, possuem seu próprio padrão de medição no solo, e podem ser distintos em espelhos oscilantes, polígono giratório, espelhos de nutação e fibras ópticas.

2.1.4.1 Espelhos oscilantes

Nos espelhos oscilantes, um único espelho ou um par de espelhos planos oscilantes (Figura 11a) são usados nos sistemas construídos pelos dois maiores fornecedores comerciais de sistemas aerotransportados de varredura a *laser* (Optech e Leica Geosystems). O ângulo preciso que o espelho faz com a direção da vertical é medido continuamente, usando um codificador angular. O uso desse tipo de mecanismo de varredura bidirecional resulta em um padrão em forma de "Z" (dente de serra) (Figura 11b) ou em um padrão muito semelhante, porém sinusoidal (Figura 11c) de pontos medidos no solo.

Figura 11 – Mecanismo de varredura por espelhos oscilantes (a) e seus padrões de medição no solo: tipo serrilhado (b), e tipo sinusoidal (c)

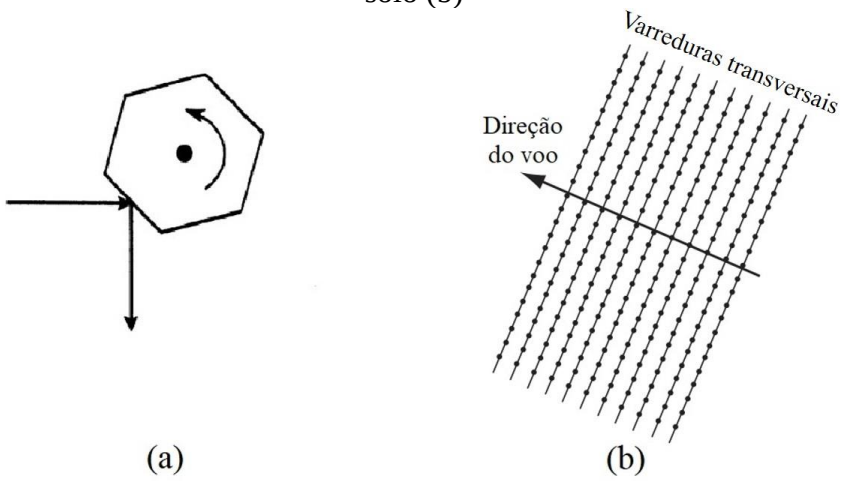


Fonte: Adaptado de Wehr e Lohr (1999); Shan e Toth (2008)

2.1.4.2 Polígono giratório

Trata-se de um polígono óptico que gira continuamente em uma direção, fornecendo um movimento de varredura unidirecional (Figura 12a). O uso desse tipo de dispositivo de varredura resulta em uma série de linhas paralelas de pontos medidos gerados sobre o solo (Figura 12b). A velocidade de rotação constante do polígono óptico significa que não há aceleração ou desaceleração repetitiva do espelho. Isso fornece altas frequências, como 160 Hz. Por sua vez, oferece melhor controle sobre o espaçamento dos pontos LiDAR.

Figura 12 – Mecanismo de varredura por polígono giratório (a) e seu padrão de medição no solo (b)

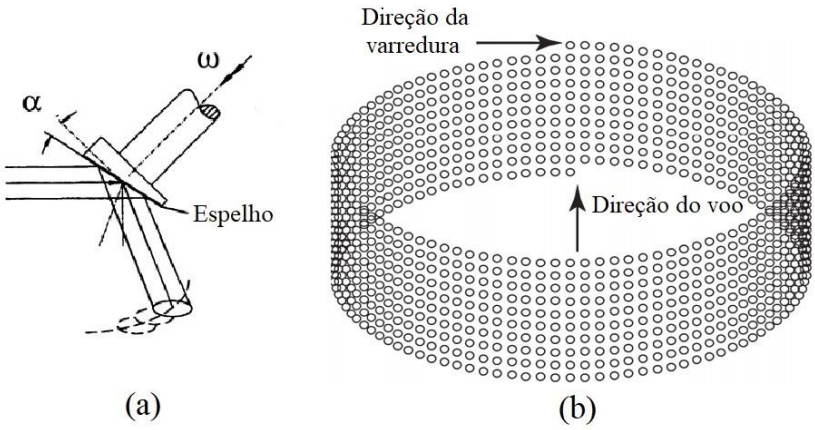


Fonte: Adaptado de Wehr e Lohr (1999); Shan e Toth (2008)

2.1.4.3 Espelhos de nutação

Um espelho de nutação produz um padrão de varredura elíptico - chamado varredura Palmer (Figura 13a) - sobre o solo. Isso produz uma série de varreduras elípticas sobrepostas no solo (Figura 13b).

Figura 13 – Mecanismo de varredura por espelhos de nutação (a) e seu padrão de medição no solo (b)

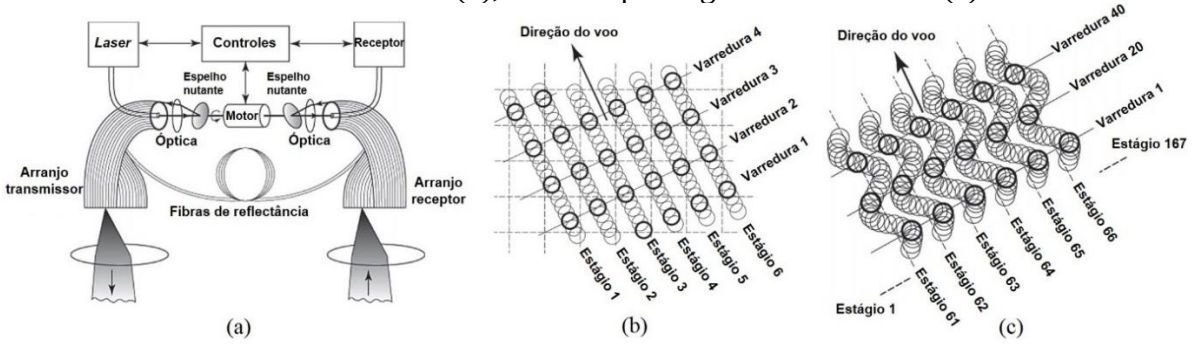


Fonte: Adaptado de Wehr e Lohr (1999); Shan e Toth (2008)

2.1.4.4 Fibras ópticas

Este modelo de espelho é utilizado no sistema da empresa alemã TopoSys, em seus *scanners* da série Falcon, onde um par de espelhos inclinados, acionados por um motor, distribui e coleta os pulsos enviados “por” e “para” um par de arranjos lineares de fibra ótica (Figura 14a). Este arranjo resulta em uma série de linhas de varredura que correm paralelas à linha de voo como padrão de medição – Falcon I (Figura 14b). No entanto, esse padrão básico foi um pouco modificado por meio do uso de um espelho giratório adicional – Falcon II (Figura 14c).

Figura 14 – Mecanismo de varredura por fibras ópticas (a) e seus padrões de medição no solo: convencional (b), e com espelho giratório adicional (c)



Fonte: Adaptado de Wehr e Lohr (1999); Shan e Toth (2008)

A vantagem do *scanner* de fibra óptica, é que as ópticas de transmissão e recepção são idênticas. A série de *scanners* Falcon apresenta uma tecnologia única, baseada no uso de dois arranjos de fibras ópticas lineares. O primeiro desses arranjos é usado para transportar e distribuir o fluxo de pulsos de *laser* através de um sistema óptico em direção ao solo na direção transversal, enquanto o segundo arranjo realiza uma ação semelhante no sentido inverso após os sinais refletidos do solo terem sido captados pela óptica de recepção. Depois disso, eles são então passados por um filtro óptico para o diodo receptor. Essencialmente, os sistemas ópticos de transmissão e recepção são idênticos, mas funcionam de forma contrária um do outro (WEHR e LOHR, 1999). O telêmetro (distanciômetro) a *laser* usa um *laser* baseado em érbio (elemento químico de símbolo Er, e número atômico 68), que emite seus pulsos com uma taxa de repetição de pulso de 83 kHz e taxa de varredura muito alta, de 630 Hz, no comprimento de onda (λ) de 1.540 nm (SHAN e TOTH, 2008).

Contudo, é importante salientar que o padrão do tipo de varredura no solo não depende somente do padrão da varredura do *laser*, mas também da direção e velocidade de voo, além do relevo.

2.1.5 Principais formatos do dado *laser*

Diferentes tipos de sensores LiDAR são constituídos por componentes semelhantes; no entanto, os dados gravados/armazenados podem ser de formatos distintos.

Os dados provenientes da tecnologia de perfilhamento a *laser* (LiDAR) são compostos por milhares de pontos; estes pontos, por sua vez, constituem uma nuvem de pontos e podem ser armazenadas em diferentes formatos de arquivos. Os principais arquivos de nuvens de pontos possuem os formatos com as extensões do tipo: XYZ, txt, LDA, LAS e LAZ. Estes arquivos são divididos em duas categorias: binários e não binários.

Os arquivos de dados *laser* com as extensões do tipo XYZ e txt são arquivos de texto do tipo *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII). Os arquivos de extensão do tipo XYZ contêm uma linha para cada ponto, com os valores de coordenadas tridimensionais X, Y e Z separados por espaço, vírgula ou caracteres de tabulação. Os comentários podem ser incluídos nos arquivos usando "ponto e vírgula (;)" no primeiro caractere de uma linha, conforme apresentado na Figura 15 (McGaughey, 2021).

Figura 15 – Exemplo de um arquivo de pontos no formato XYZ

```
; forest inventory plot locations UTM, zone 10, NAD83
486930.94,5189046.01,338.45
487398.87,5189534.49,357.9
488543.71,5189792.5,315.16
488460.45,5189794.49,333.54
488368.48,5189794.5,338.36
488461.84,5189884.5,317.66
488524.72,5189953.01,307.03
487018.71,5189235.51,370.15
486838.6,5189235.5,349.91
486822.21,5189190.99,348.29
486951.84,5189138,344.36
```

Fonte: McGaughey (2021)

O formato com a extensão LDA foi desenvolvido como uma alternativa aos arquivos ASCII, normalmente entregues por fornecedores LiDAR. Os arquivos LDA são binários e

fornecem um formato de armazenamento compacto. A vantagem do formato com extensão LDA, quando comparado aos arquivos de texto ASCII, é que os dados de retorno podem ser lidos aleatoriamente, ao invés de sequencialmente.

O LAS (*LASer*) é a extensão de um formato de arquivo público, que permite a troca de arquivos que contêm informações de uma nuvem de pontos tridimensional. O formato com extensão LAS é um arquivo binário que mantém todas as informações provenientes do sistema LiDAR, de acordo com a natureza dos dados e do sistema de captura. Os principais desenvolvedores de soluções fotogramétricas e LiDAR adotaram o formato LAS. Em 2003, a Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS), por meio de seu Comitê de LiDAR, aprovou o formato LAS para intercâmbio de dados de LiDAR, dando origem à sua versão 1.0. Desde então, já foram desenvolvidas outras versões do formato LAS, principalmente para acomodar a evolução dos sensores LiDAR em suas características construtivas e operacionais. A versão atual do formato LAS é a 1.4, aprovada pelo Comitê da ASPRS em novembro de 2011 (ASPRS, 2013).

O Arquivo LAZ (LASZip) é a variante compactada, sem perda de dados do arquivo de extensão LAS.

2.1.6 Aplicações da tecnologia LiDAR

Os dados LiDAR têm sido empregados nas mais variadas aplicações, como o monitoramento de linhas de transmissão de energia elétrica (GUIERA *et al.*, 2005), planejamento urbano (CENTENO e MITISHITA, 2007), mapeamento de dutos (SALLEM FILHO, 2007), na área florestal (ARAUJO *et al.*, 2013; PINAGÉ *et al.*, 2015; SATO *et al.*, 2015), inspeção de pavimentos de rodovias e aeroportos (RAVI, BULLOCK e HABIB, 2020), monitoramento de deformações de túneis (HAN, GUO e JIANG, 2013), batimetria e aplicações topográficas (KINZEL, LEGLEITER e NELSON, 2013; YAMAMOTO *et al.*, 2012), mapeamento rápido e avaliação de danos após desastres naturais, como inundações (WEDAJO, 2017; MCDOUGALL e TEMPLE-WATTS, 2012), detecção de obstruções em redes de transportes (KWAN e RANSBERGER, 2010), medição de áreas costeiras e determinação de mudanças costeiras e erosão (REVELL, KOMAR e SALLENGER JR., 2002), geração de MDT e MDS (CHEN, GAO e DEVEREUX, 2017), cálculo de volume em minas a céu aberto (PARK, TURNER, YUN e LEE, 2016; TIRUNEH *et al*., 2013), mapeamento de cavernas (MOYES e MONTGOMERY, 2019), geração de modelos de cidades 3D para fins de planejamento urbano

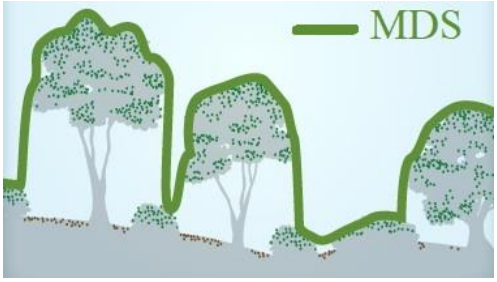
(RODRÍGUEZ *et al*., 2017; RUBINOWICZ e CZYŃSKA, 2015), monitoramento de geleiras (TELLING *et al.*, 2017), medição de áreas cobertas de neve e gelo (DEEMS, PAINTER e FINNEGAN, 2013), mapeamento de sítios arqueológicos (VANVALKENBURGH, *et al*., 2020; JOHNSON e OUIMET, 2014), projetos arquitetônicos (TOOKE *et al.*, 2011), modelagem de cenários para produção de filmes, vídeos e jogos, controle de recalque (MIRZAEI *et al.*, 2012), acompanhamento de obras na engenharia civil (PURI e TURKAN, 2020), monitoramento de crescimento de plantas em agricultura de precisão (KOENIG *et al*., 2015; SUN e*t al.*, 2017), prevenção de avalanches (BOCCARDO *et al.*, 2020), dente outras.

Devido à alta precisão dos produtos obtidos com a tecnologia LiDAR, além da sua rápida aplicação e versatilidade, essa tecnologia vem sendo utilizada para complementar, ou substituir parcialmente, outras tecnologias existentes de aquisição de dados tridimensionais, trazendo novas aplicações.

2.2 Modelos Digitais

O dado bruto obtido com a aplicação da tecnologia LiDAR é uma nuvem constituída por milhares de pontos. Cada ponto possui, dentre outras informações, coordenadas tridimensionais (X, Y e Z), e com a interpolação desses pontos pode ser gerado um modelo digital de superfície (MDS). Cruz *et al.* (2011) definem MDS como sendo a representação da superfície do terreno acrescida de quaisquer objetos existentes sobre ela. Na Figura 16 é apresentada uma ilustração do MDS (linha verde).

Figura 16 – Modelo digital de superfície (MDS)

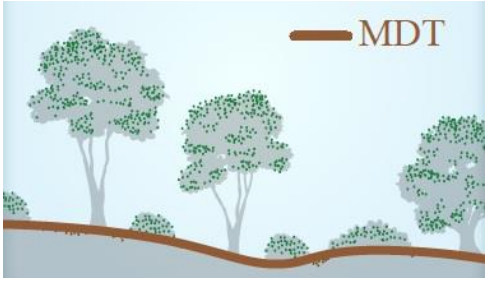


Fonte: adaptado de Willians (2020)

O MDT, por sua vez, é a representação somente da superfície do terreno. Miller (1958) define MDT como sendo uma representação estatística da superfície contínua do solo, constituída por um grande número de pontos discretos selecionados, com coordenadas X, Y e

Z conhecidas em um campo de coordenadas de dados arbitrários. Felgueiras (1999), por sua vez, define MDT como a representação do comportamento de um fenômeno que ocorre em uma região da superfície terrestre. Na Figura 17 é apresentada uma ilustração do MDT (linha marrom).

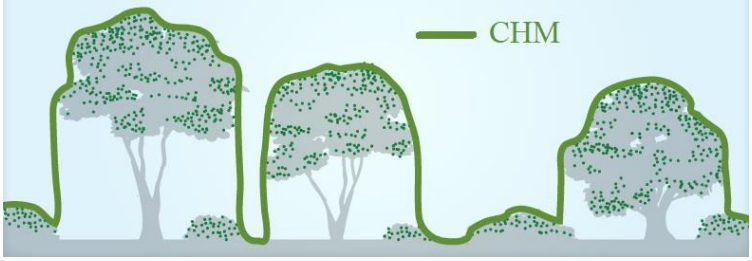
Figura 17 – Modelo digital de terreno (MDT)



Fonte: adaptado de Willians (2020)

Em áreas cobertas por vegetação, quando se faz a subtração do MDS pelo MDT, obtém-se o modelo de altura do dossel, conhecido na língua inglesa como *Canopy Height Model* (CHM). Na Figura 18 é apresentada uma ilustração do CHM.

Figura 18 – Canopy height model (CHM)



Fonte: adaptado de Willians (2020)

O que difere o CHM do MDS é que o primeiro tem aspecto plano (normalizado), ou seja, não incorpora as informações do relevo, considerando todos os pontos na mesma superfície de origem (plano).

2.3 Sistema de aeronave remotamente pilotada (RPAS)

O Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada, também conhecido na língua inglesa como *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS), é o conjunto de elementos abrangendo uma

aeronave remotamente pilotada (RPA), a estação de pilotagem remota correspondente, os enlaces de comando e controle requeridos e quaisquer outros elementos que podem ser necessários a qualquer momento durante a operação (ANAC, 2021a).

Atualmente, os RPAS vêm sendo empregados nas mais variadas aplicações, desde o monitoramento de doenças e infestações de insetos/pragas (GARCIA-RUIZ *et al.*, 2013), pulverização e outras aplicações na agricultura (SIMPSON, 2003; DE GARMO, 2004), monitoramento de impactos ambientais, recuperação florestal (ALBUQUERQUE *et al.*, 2020), aerofotogrametria e filmagem aérea (AGUIAR, 2013), até na gestão pública (PEGORARO *et al.*, 2013).

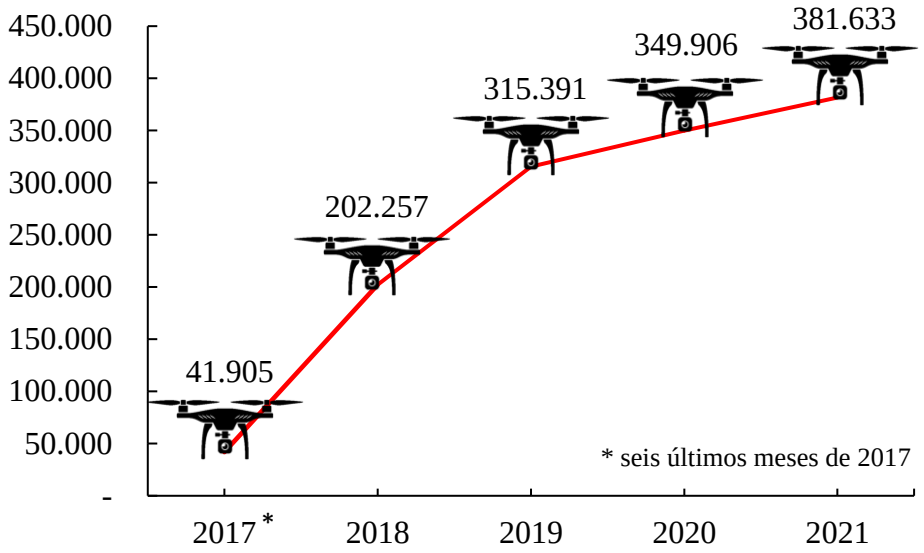
Em geral, um RPAS é uma excelente ferramenta de obtenção de imagens de alta resolução espacial, de baixo custo e alta resolução temporal. Essas características têm popularizado o seu uso no Brasil, principalmente em áreas longínquas ou pequenas, onde o uso da fotogrametria convencional torna a execução do trabalho economicamente inviável. Por isso, os RPAS oferecem grande flexibilidade operacional, baixo custo de aquisição e manutenção, quando comparados a um avião tripulado, fato este refletido no grande destaque desta tecnologia para o sensoriamento remoto em geral.

Os instrumentos a bordo de um RPAS podem variar de acordo com as aplicações, indo desde câmeras digitais não métricas, padrão RGB, até imageadores multi e hiperespectrais, passando pelos sensores radares, termais e LiDAR. Apesar de ter se tornando um equipamento de grande destaque na obtenção de informações por sensoriamento remoto, nota-se ainda uma carência de estudos que apontem com clareza os aspectos limitantes/potenciais desta nova tecnologia no uso florestal.

2.3.1 Componentes dos RPAS

A utilização dos RPAS pode ser representada por uma curva ascendente (Figura 19) (ANAC, 2021b), onde a cada ano um novo modelo e uma nova aplicação surgem no mercado; saber pilotar um RPAS e conhecer os componentes que os constituem vem se tornando cada vez mais indispensável nas áreas de geotecnologias e sensoriamento remoto.

Figura 19 – Quantidade de RPAS cadastrados na ANAC nos últimos cinco anos



Fonte: ANAC, 2021b

O processo de imageamento/mapeamento necessita, além do RPAS, de um robusto sistema de monitoramento e controle de voo, composto por uma série de protocolos de redundância que garantem a execução da missão de forma precisa e segura.

Os RPA podem ser classificados com base em diversos critérios, tais como: o material empregado na construção, tamanho, peso, modelo/aspecto da fuselagem/plataforma, autonomia de voo, altura do voo, dentre outros (ALVES JÚNIOR, 2015a). No entanto, os componentes necessários para garantir o funcionamento e operação dos RPA geralmente possuem a mesma estrutura, mudando apenas alguns detalhes relativos à sua fabricação (marcas diferentes). São muitos os componentes e dispositivos eletrônicos embarcados em um *Remotely Piloted Aircraft* (RPA), que atuam de forma conjunta antes, durante e após o voo. Não há necessariamente um componente mais ou menos essencial para que um RPA voe e consiga completar uma missão, e sim uma série de componentes que, quando trabalham de forma sincronizada e colaborativa, são indispensáveis e constituem o *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS).

O cérebro do RPAS é a placa controladora, na qual são ligados o sistema de posicionamento GNSS, os sensores de estabilização e de orientação (acelerômetro, giroscópio, barômetro e bússola). A placa controladora interpreta os sinais enviados por estes dispositivos e decide o que deve ser realizado para manter o voo.

Os motores são os responsáveis por movimentar as hélices, podendo aumentar ou reduzir a rotação em função da quantidade de energia que é liberada pelo *Eletronic Speed*

Controller (ESC); este dispositivo, gerenciado pela placa controladora, é a ponte de energia entre a bateria e os motores; cada motor necessita de um ESC.

Em relação ao tipo de asas, os RPA são conhecidos como asa fixa ou asa rotativa. Os de asa rotativa possuem a capacidade de decolar e pousar na vertical, onde as hélices são responsáveis pela sustentação do RPA durante todo o voo; as hélices possuem pelo menos duas pás com o tamanho e inclinação ajustados ao peso e tamanho da aeronave. Caso o RPA seja do tipo asa fixa, a hélice continua presente, podendo ser única ou não. Algumas aeronaves do tipo híbrido ou *Vertical Take-Off and Landing* (VTOL) utilizam mais de uma hélice (trio ou pares) para a decolagem e pouso na vertical, porém, durante o voo, a sustentação é feita pelas asas fixas. As vantagens dos RPA de asa rotativa estão na capacidade de decolagem e pouso na vertical, pois o espaço necessário (livre de obstáculos) durante esta etapa do voo é menor em relação aos modelos de asa fixa – que possuem decolagem e pouso na horizontal –, e na possibilidade de utilização de plataforma giroestabilizadora (*gimbal*). Por outro lado, a principal desvantagem dos modelos de asa rotativa está na autonomia de voo, pois não possuem boa aerodinâmica e, consequentemente, não podem planar como os RPA de asa fixa; estes, por sua vez, aproveitam as correntes de ar para utilizar menos motores e poupar a energia das baterias (quando elétricos) ou combustível (quando à combustão). A modalidade híbrida VTOL reúne as vantagens dos dois tipos de RPA (asa fixa e asa rotativa), ao decolar e pousar na vertical, e executar o voo na horizontal, aproveitando a aerodinâmica para otimizar a autonomia do voo.

Durante o voo, a movimentação dos RPA do tipo asa fixa é realizada por superfícies de controle de voo denominadas *ailerons*, localizados nas asas, profundor, localizado no estabilizador horizontal, e leme localizado no estabilizador vertical, acionados por servomotores. Não é comum encontrar um RPA que possua fuselagem com estabilizadores horizontal e vertical, sendo geralmente construídos no formato de uma asa sem a fuselagem definida, neste caso trazendo apenas os *ailerons* como superfície de controle de voo.

As superfícies de controle de voo são responsáveis por controlar a atitude (ângulos de Euler) da aeronave. A atitude é composta por três movimentos, sendo um em cada eixo da aeronave. O movimento em torno do eixo X ou longitudinal (giro das asas da aeronave) é denominado rolagem, conhecido na língua inglesa com *roll* e representado pela letra grega *ômega* (ω). O movimento em torno do eixo Y ou transversal (inclinação do bico da aeronave) é denominado arfagem, conhecido na língua inglesa como *pitch* e representado pela letra grega *phi* (φ). O movimento em torno do eixo Z ou vertical (direção de voo) é denominado guinada,

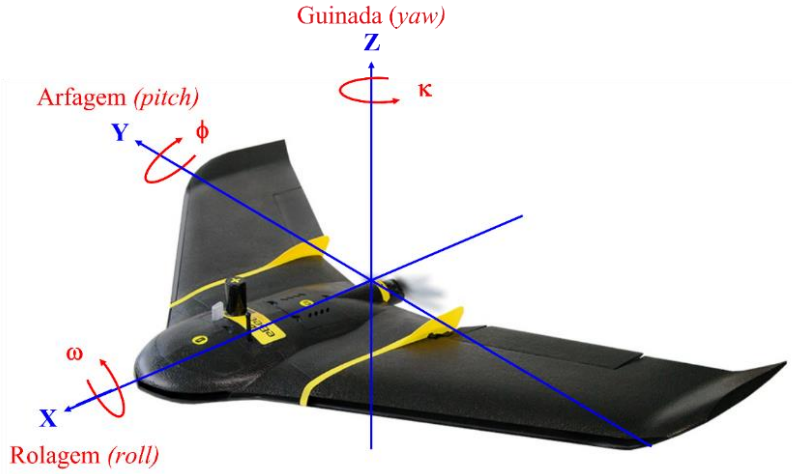
conhecido na língua inglesa como *yaw* e representado pela letra grega *kappa* (κ). Na Figrura 20 são apresentados os eixos X, Y e Z de um RPA com os seus respectivos movimentos.

Os RPA do tipo asa rotativa não possuem superfícies de controle de voo e sua atitude é realizada por meio da diferença de rotação entre as hélices.

A comunicação entre o piloto e o RPA é realizada por um transmissor localizado na estação de controle e um receptor abordo do RPA que envia os comandos do piloto para a placa controladora.

Pare evitar acidentes e aumentar a visibilidade e segurança do RPA durante o voo, luzes de navegação e sensores anticolisão, baseados em ondas sonares, pulsos *laser* e imagens, são instalados em pontos estratégicos do corpo dos RPA; estes sensores detectam a presença de obstáculos ao longo da linha de voo, e enviam informações para a placa controladora, que pode de forma automática determinar o desvio do obstáculo ou a interrupção do voo, sendo necessária a intervenção manual do piloto (via controle remoto).

Figura 20 – Altitude e eixos X, Y e Z de um RPA



Fonte: O autor

Para determinar a direção e velocidade do vento alguns RPA do tipo asa fixa possuem um dispositivo instalado em seu corpo denominado tubo de *Pitot*.

Nem todos os sensores presentes em um RPA são essenciais ao voo, sendo alguns dispositivos utilizados somente para o cumprimento de uma missão. Estes sensores são conhecidos como *playload* ou carga útil de um RPA.

2.3.2 Carga útil: sensores embarcados nos RPA

Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), basicamente o que diferencia um RPA de um aeromodelo é que o primeiro deve possuir uma estação de pilotagem remota e ter uma finalidade diversa daquela de recreação (ANAC, 2021a). Para que a finalidade do RPA não seja a recreação, ele deve obrigatoriamente ter ao menos um sensor a bordo que seja usado na realização de uma missão; este sensor é a carga útil do RPA, na língua inglesa o termo é conhecido com *payload*.

Diversos são os sensores que podem ir a bordo de um RPA, tais como: câmera fotográfica (sensível na faixa visível do espectro eletromagnético, ou em outras faixas da luz); sensor de temperatura; sensor umidade; sensor de partículas sólidas na atmosfera; sensor ultrassônico; sensor *laser* (LiDAR); sensor de movimento, dentre outros. Em função do tipo de sua carga útil, as aplicações dos RPAS são diversificadas: monitoramento de tráfego (ELLOUMI *et al.*, 2018); levantamento topográfico (GONÇALVES e HENRIQUES, 2015); estimativa de crescimento florestal (PULITI *et al.*, 2018); contagem de indivíduos e mensuração do tamanho de copas em florestas plantadas (ARAÚJO *et al*. 2006; NUNES *et al.*, 2014; HENTZ *et al.*, 2018); agricultura de precisão (ZHENG *et al.*, 2020); mapeamento de sítio arqueológico (KOUCKÁ e*t al.*, 2018); medição de temperatura e qualidade da água em corpos hídricos (KOPARAN *et al.*, 2020; KOPARAN *et al.*, 2018); detecção de poluição (FU *et al.* 2019), dentre outros.

O *paylod* pode não ser um sensor e sim uma carga ou objeto, sendo utilizado em: aplicação de tratos culturais com pulverização (MARTINEZ-GUANTER *et al.*, 2020); dispersão de sementes (MOHAN *et al.*, 2021); transporte de equipamentos de primeiros socorros (RUSSKIN *et al*., 2021; FAKHRULDDIN *et al.*, 2019); entrega de mercadorias diversas (*delivery*) (FRENG *et al.*, 2020; GRZYBOWSKI *et al.*, 2020), dentre outros.

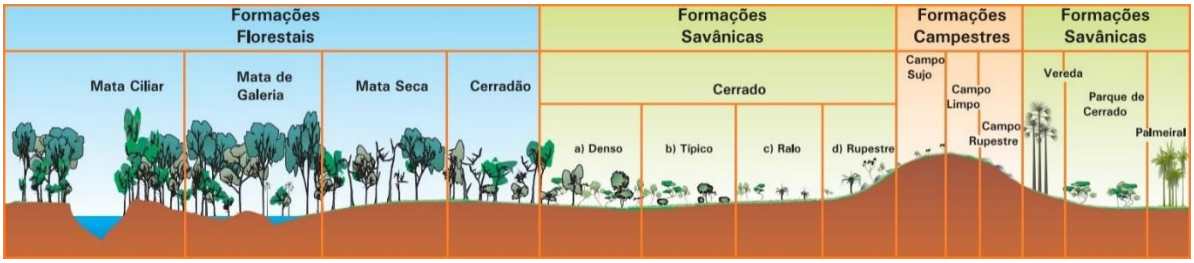
2.4 Fitofisionomias do bioma Cerrado

A classificação fisionômica do Cerrado adotada neste trabalho segue a proposta por Ribeiro e Walter (2008). Considerado como o segundo maior bioma brasileiro, o Cerrado está localizado predominantemente no Planalto Central do Brasil, caracterizado pela presença de duas estações climáticas bem definidas, sendo uma seca entre os meses de abril a agosto, e uma

chuvosa, entre meses de outubro a março, com temperatura média de 20,1 °C e pluviosidade média de 1.300 a 1.600 mm (RIBEIRO e WALTER, 2008).

Uma característica marcante do Cerrado é a paisagem em mosaicos e a alta heterogeneidade de formações vegetacionais. A vegetação de Cerrado pode ser agrupada em três tipos de formações: campestres, com predomínio de plantas herbáceas; savânicas, com a presença de dois estratos distintos, rasteiro (subarbustivo-herbáceo) e lenhoso (arbustivo-arbóreo); e florestais, com vegetação predominantemente arbórea e formação de dossel fechado. De modo geral, os subtipos variam de acordo com os fatores fisiográficos, ou ainda em função da altura do lençol freático, do tipo de drenagem ou da profundidade da camada de solo disponível ao estabelecimento das plantas (RIBEIRO e WALTER, 2008). Na Figura 21 são apresentadas as principais fitofisionomias do bioma Cerrado.

Figura 21 – Principais fitofisionomias do bioma Cerrado



Fonte: Adaptado de Ribeiro e Walter (2008)

2.4.1 Formações florestais

A Mata Ciliar é representada pela vegetação localizada nas margens de rios de médio e grande porte; devido à largura desses rios, não há a formação de galeria. Com altura média variando de 20 m a 25 m, com possibilidade de poucos indivíduos com até 30 m, a cobertura do solo obtida pela projeção das copas das árvores varia de 50 % (na estação seca) a 90 % (na estação chuvosa). A Mata de Galeria ocorre associada às nascentes ou às margens de córregos e ribeirões em áreas inundáveis ou não, com altura média variando de 20 m a 30 m, e cobertura do solo entre 70 % e 95 %.

A Mata Seca não ocorre associada à cursos d’água. Em função do tipo e profundidade do solo, pode ser dividida em Sempre-Verde, Semidecídua e Decídua, com altura média variando de 15 m a 25 m. A cobertura do solo proveniente da projeção das copas das árvores é de 70 % a 95 %, podendo chegar a porcentagens inferiores a 35 % na Mata Decídua.

Por fim, o Cerradão promove a cobertura de 50 % a 90 % do solo, possui altura média variando de 8 m a 15 m e apresenta indivíduos com características esclerófilas.

2.4.2 Formações savânicas

O Cerrado sentido restrito pode ser subdividido em Cerrado Denso que possui vegetação predominantemente arbórea, com altura média entre 5 m e 8 m, e porcentagem de cobertura do solo em torno de 50 % a 70 %. Cerrado Típico que possui vegetação predominantemente arbórea-arbustiva, com altura média entre 3 m e 6 m, e porcentagem de cobertura do solo em torno de 20 % a 50 %. É uma forma intermediária entre o Cerrado Denso e o Cerrado Ralo. O Cerrado Ralo possui vegetação arbórea-arbustiva com altura média entre 2 m e 3 m, e porcentagem de cobertura do solo em torno de 5 % a 20 %.

Diferentemente dos demais subtipos, o Cerrado Rupestre possui vegetação arbórea-arbustiva associada a ambientes com afloramentos rochosos, onde os indivíduos lenhosos podem ser encontrados crescendo nas fendas entre as rochas; possui altura média entre 2 m e 4 m, e porcentagem de cobertura do solo em torno de 5 % a 20 %.

O Parque de Cerrado é caracterizado pela presença de micro relevos mais elevados, conhecidos como murundus; possui indivíduos com altura média entre 3 m e 6 m, e cobertura do solo entre 5 % a 20%.

O Palmeiral é marcado pela presença de uma única espécie de palmeira arbórea, podendo ser guariroba, babaçu ou buriti. Possui altura média variando de 8 m a 15 m, com cobertura do solo entre 30 % e 60 %.

A Vereda possui predominância de buritis, estando sua ocorrência condicionada ao afloramento do lençol freático, sem a presença de dossel; a altura dos indivíduos varia entre 12 m e 15 m, com cobertura arbórea entre 5 % e 10 %.

2.4.3 Formações campestres

O Campo Sujo é caracterizado pela presença de vegetação herbácea e arbustiva, com altura média dos indivíduos em torno de 2 m, e cobertura arbórea inferior a 5 %. O Campo Limpo possui predominância de vegetação herbácea, com raros arbustos, podendo ocorrer em áreas úmidas, secas e com murundus. O Campo Rupestre, assim como o Campo Sujo, também é caracterizado pela presença de vegetação herbácea e arbustiva, no entanto com trechos com

afloramentos rochosos; a altura dos indivíduos varia até 2 m, sendo a cobertura arbórea inferior a 5%.

2.5 Biomassa

Segundo Begon *et al.* (2007) entende-se por biomassa a massa de organismos por unidade de área de solo (ou por unidade de área ou volume unitário de água) e isto é normalmente expresso em unidades de energia (por exemplo J m^{-2}) ou matéria orgânica seca (por exemplo t ha^{-1}) ou carbono (por exemplo C m-2). A maior parte da biomassa nas comunidades é quase sempre formada por plantas, que são os principais produtores de biomassa nos ambientes terrestres. A biomassa inclui o corpo inteiro dos organismos, mesmo que partes deles possam estar mortas. Isto deve ser levado em conta, particularmente quando se considera as comunidades florestais nas quais a maior parte da biomassa é madeira e casca de árvores mortas. A fração viva da biomassa representa o capital ativo capaz de gerar interesse na forma de novo crescimento, enquanto a fração morta é incapaz de novo crescimento. Na prática, incluímos na biomassa todas aquelas partes, vivas ou mortas, que estão ligadas ao organismo vivo. Elas deixam de ser biomassa quando caem e se transformam em liteira, húmus ou turfa.

Segundo Batista *et al*. (2014), a massa dos seres vivos é composta em sua maior parte por água, sendo o termo biomassa a parte seca da massa da vegetação. A biomassa seca total de uma árvore é constituída pela biomassa aérea, composta pela biomassa da folhagem (folhas e galhos finos) e biomassa lenhosa (galhos e tronco), além da biomassa radicular (raízes).

Segundo Roquette (2008), Miranda *et al.* (2014) e Zimbres *et al.* (2021), no Cerradão a biomassa aérea representa cerca de 80% da biomassa total, e deste quantitativo, a maior parte é constituída pela biomassa lenhosa (aproximadamente 75%); já no Cerrado sentido restrito (*stricto sensu*), a biomassa aérea decresce para 60% da biomassa total, sendo 40% constituída por biomassa lenhosa.

Devido as diferentes formações florestais com suas características específicas, não há uma forma geral para se quantificar a biomassa da floresta. A floresta, enquanto ecossistema, é constituída por estratos, de tal forma que a biomassa geralmente está materializada na vegetação viva, na serrapilheira ou liteira e no solo. A vegetação da floresta é em si um sistema, formada pelas árvores e outras formas de vida, como cipós, epífitas, palmeiras e herbáceas.

Na prática, a maioria dos estudos considera a biomassa das formações florestais como sendo a biomassa das árvores. São poucos os estudos dedicados à biomassa do solo e liteira. A

biomassa das árvores normalmente é representada pela biomassa aérea, uma vez que mensurar a biomassa do sistema radicular é uma etapa mais trabalhosa e destrutiva. Assim, a biomassa aérea, na maioria dos estudos, acaba sendo a biomassa lenhosa, em parte porque é o componente mais permanente da biomassa aérea, em outra porque algumas espécies de árvores trocam de folhas e ramos finos (caducifólias), principalmente em regiões que possuem a estação seca bem definida, variando consideravelmente entre os períodos chuvosos e secos. Já a biomassa lenhosa é permanente, crescendo até atingir o seu clímax (BATISTA *et al*., 2014).

A maneira mais acurada e precisa de se quantificar a biomassa lenhosa é a medição por métodos diretos; no entanto, o problema em se fazer essa medição é que os métodos utilizados são destrutivos, dispendiosos e necessitam de mão de obra especializada (GIBBS *et al.*, 2007). O primeiro método destrutivo é conhecido como gravimétrico. O primeiro passo deste método é o corte da árvore, seguido da separação e pesagem da massa fresca dos componentes (folhas, galhos e troncos); entende-se como massa fresca ou verde a massa vegetal, mais a massa de água contida nos tecidos. O segundo passo é a realização da medida do teor de umidade de uma amostra de cada componente (comparação da pesagem em campo com a pesagem após secagem das amostras em estufa). O terceiro passo consiste na obtenção da biomassa dos componentes em função da massa verde e do teor de umidade obtidos com as amostras coletadas em campo. O segundo método destrutivo é conhecido como volumétrico, que se aplica somente ao componente lenhoso da árvore, sendo indicado para árvores de grande porte, onde a aplicação em campo do método gravimétrico é inviável. No entanto, possui mais as etapas de laboratório que o primeiro método (BATISTA *et al*., 2014).

Além dos métodos destrutivos há aqueles denominados não destrutivos ou indiretos. O primeiro é a predição, no qual é estabelecida uma relação preditiva entre a medida destrutiva da biomassa e a medida não destrutiva. As medidas não destrutivas são aquelas que podem ser tomadas sem que haja a necessidade de abater a árvore; em geral são medidos o diâmetro do tronco à altura do peito (DAP), a 1,30 metros acima do solo, e altura total, geralmente um dado de difícil medição quando se tem árvores de grande porte.

Predição é quando se obtém um resultado não observado (porém observável) a partir de um dado observado. Assim, a relação preditiva é uma relação estatística da qual, a partir de uma medida observada, se obtém uma medida observável (mas não medida). Por exemplo, uma relação entre o diâmetro, a altura e a biomassa da árvore. A relação estatística de predição se fundamenta em uma amostra destrutiva, na qual se constrói a relação que pode ser aplicada a

uma população (floresta), e sua validade só é alcançada se a amostra for coletada na mesma área na qual se esteja fazendo a predição ou em uma área com características semelhantes.

A predição da biomassa pode ser realizada com a aplicação de equações alométricas obtidas por meio de amostras oriundas de métodos destrutivos. A palavra alometria vem do grego, *allos* (outro) e *metron* (medida) (NIKLAS, 1994). De acordo com Higuchi *et al.* (2005), alometria é o estudo das variações das formas e dos processos dos organismos e tem três significados. O primeiro é o crescimento de uma parte do organismo em relação ao crescimento de todo o organismo ou de uma parte dele; o segundo significado é o estudo das consequências de tamanho sobre as formas e os processos orgânicos; e o terceiro significado é o de singularidade geométrica, isto é, a manutenção da geometria e forma ao longo de uma série e de objetos que diferem em tamanho. O primeiro significado é utilizado no método empírico, enquanto o segundo e o terceiro são utilizados pela alometria analítica (NIKLAS, 1994). Em aplicações florestais, a técnica de alometria é usada no cálculo da biomassa (todo) em função de partes do todo (i.e., DAP, altura total e altura comercial) (FERNANDES, 2007).

CAPÍTULO 3 – APLICAÇÕES FLORESTAIS UTILIZANDO DADOS LIDAR E RPAS EM ÁREAS DE FLORESTA NATIVA NO BRASIL

Este capítulo reúne as principais pesquisas científicas publicadas nos últimos dez anos no Brasil com aplicações florestais de dados obtidos com LiDAR e RPAS. As aplicações florestais foram divididas em quatro seções, sendo cada uma representando um bioma na seguinte sequência: Cerrado, Mata Atlântica, Amazônia e Caatinga. Até a finalização desta tese, não foram encontrados artigos científicos publicados que utilizassem aplicações florestais de dados obtidos com LiDAR e RPAS nos biomas Pantanal e Pampa. As bases de dados consultadas foram o Google Acadêmico e *Scientific Electronic Library Online* (SciELO).

3.1 Aplicações no bioma Cerrado

Costa *et al*. (2021) avaliaram a capacidade de aplicação do LiDAR aerotransportado com voo não tripulado (sistema GatorEye, pertencente a grupo de pesquisa da Universidade da Flórida, EUA), para estimar e mapear a densidade total de biomassa acima do solo (árvores, arbustos e camadas superficiais) (AGBt) no Cerrado. Cinco modelos de regressão de mínimos quadrados ordinários estimando AGBt foram ajustados, usando 50 parcelas de amostras de campo (30 m x 30 m). O melhor modelo foi selecionado de acordo com o Critério de Informação de Akaike, coeficiente de determinação ajustado (adj.R^2), erro quadrático médio absoluto e relativo (RMSE), usado para mapear AGBt a partir de dados LiDAR coletados em 1.854 ha, abrangendo os três principais tipos de vegetação (floresta, savana e pastagem) no Cerrado. O modelo mais eficaz encontrado foi o que utiliza os parâmetros de altura e cobertura da vegetação, com R^2 de 0,79 e Erro Quadrático Médio ou *Root Mean Square Error* (RMSE) de 19,11 Mg/ha (33,40%). As incertezas e os erros foram avaliados separadamente para cada tipo de vegetação, sendo o RMSE de 27,09 Mg/h (25,99%) para florestas, 17,76 Mg/ha (43,96%) para savanas e 7,72 Mg/ha (44,92%) para pastagens. Segundo os autores, os resultados comprovaram a viabilidade e o potencial do uso de LiDAR aerotransportado com voo não tripulado no Cerrado e enfatizaram a necessidade de um maior desenvolvimento da estimativa de biomassa em pastagens.

Zimbres *et al*. (2021) construíram um modelo de biomassa lenhosa acima do solo para o bioma Cerrado, usando imagens ópticas de satélite com resolução de 30 m (Landsat-5 e Landsat-8) e imagens SAR com resolução de 25 m (ALOS e ALOS-2), e um conjunto de estimativas de biomassa baseadas em *plot* e derivadas de LiDAR de uma rede de pesquisadores

no Brasil. Os autores implementaram um algoritmo de Árvore de Classificação e Regressão (CART) e Floresta Aleatória (RF) para modelar a biomassa do Cerrado no ano de 2019, conforme a classificação do MapBiomas. Os algoritmos do modelo RF forneceram um resultado melhor (R^2 de 0,53 e RMSE de 57%) do que o modelo CART (R^2 45% e RMSE de 63%) com subestimação de biomassa acima de 200 Mg/ha e superestimação no modelo RF de 1,19 Mg/há, contra 0,86 Mg/ha do modelo CART. Os autores consideraram que apesar das limitações para representar com precisão a biomassa, os mapas gerados contribuíram para o melhoramento do conhecimento existente e a compreensão do estado atual dos estoques de biomassa no bioma Cerrado.

Zimbres *et al*. (2020) utilizaram um *laser* terrestre em parcelas de Cerradão, Mata de Galeria e Mata Seca para prever a biomassa acima do solo calculada com base em dados de inventários de campo. Os modelos gerados para a Mata Seca tiveram valores de R^2 de 0,92 e RMSE de 2,67 Mg/ha (12%) para a estação chuvosa e R^2 de 0,88 e RMSE de 3,32 Mg/ha (15%) para a estação chuvosa. Para o Cerradão, os valores foram R^2 de 0,58 com RMSE de 6,85 Mg/ha (21%). Na Mata de Galeria, a estrutura do dossel não pôde ser caracterizada devido à oclusão dos retornos do *laser* por obstrução dos estratos densos do sub dossel. Os autores concluíram que o *laser* terrestre possui um grande potencial para a estimativa de biomassa em parcelas de diferentes fitofisionomias do bioma Cerrado, e que as áreas com estrutura da vegetação mais esparsa permitem uma melhor varredura do *laser*, propiciando a geração de perfis de altura com maior precisão.

Ferreira *et al*. (2011) avaliaram o potencial de uso e a disponibilidade de dados do *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) lançado a bordo do *Ice, Cloud, and land Elevation Satellite* (ICESat) referente a um período de sete anos (2003-2009) para o bioma Cerrado. Os autores obtiveram 206.026 pontos de dados sobre remanescentes de vegetação e 176.035 pontos de dados em áreas de pastagens cultivadas. Os dados obtidos foram avaliados em relação a 15.612 bacias hidrográficas, das quais 4.467 tiveram observação LiDAR sobre um alvo de vegetação natural e 3.213 tiveram observação LiDAR sobre a pastagem. A disponibilidade do LiDAR também foi avaliada em relação às 130 unidades de conservação de proteção integral, 109.260 km² de cicatrizes de queimadas formadas em 2007, além de 3.510 km² de áreas desmatadas durante o período 2005-2006. Os autores concluíram que, apesar das lacunas de dados, os pulsos *laser* foram bem distribuídos para a recuperação de estimativas biofísicas regionais. No entanto, uma abordagem sinérgica com outros produtos de sensoriamento remoto é necessária.

3.2 Aplicações no bioma Mata Atlântica

Amorim (2020) utilizou dados LiDAR para obter o volume da biomassa e mensurar a altura média das árvores dominantes em uma floresta remanescente de Mata Atlântica em Belo Horizonte – MG. Os resultados obtidos com LiDAR foram comparados com dados de inventário florestal e o cruzamento desses fornecem valores próximos com diferenças de 4% a 11% na cubagem da biomassa e 2% para a quantidade de indivíduos. Para o autor, os resultados obtidos com LiDAR apresentaram poucas variações em relação ao inventário florestal e sua principal vantagem foi a economia de tempo (75%) gasto em relação ao levantamento do inventário florestal.

Almeida *et al*. (2019) monitoraram um experimento de restauração florestal com plantio de espécies nativas com dois níveis de espaçamento entre as árvores (3 m x 1 m e 3 m x 2 m) e dois níveis de manejo (tradicional e intensivo) a partir da caracterização da estrutura do dossel (altura do dossel, rugosidade e índice de área foliar) utilizando LiDAR aerotransportado com voo não tripulado (sistema GatorEye) e dados de inventário florestal (biomassa seca acima do solo), na cidade de Anhembi – SP. Os resultados encontrados apontaram que os plantios com maior adensamento apresentaram maiores valores de biomassa e altura do dossel do que os plantios com menor adensamento; esse resultado foi explicado pela forte correlação de Pearson entre essas duas variáveis. A rugosidade não apresentou diferença entre as áreas, indicando a presença de um dossel homogêneo. O índice de área foliar teve uma maior variação nas áreas de plantio mais adensados, apresentando maior densidade de vegetação acima dos 10 metros de altura e entre 5 m e 2 m nos plantios menos adensados. Os autores concluíram que os plantios mais adensados (espaçamento 3 m x 1 m) foram mais adequados no caso de áreas com alto nível de mato (competição).

Rex *et al*. (2018a) utilizaram de dados de *laser scanner* aerotransportado (ALS) para a extração de copas de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em um fragmento de floresta Ombrófila Mista nativa pertencente à Universidade Federal do Paraná (UFPR), localizada na área urbana da cidade de Curitiba-PR. Os autores realizaram a densificação da nuvem de pontos, seguida da classificação dos pontos para obtenção e suavização do CHM, detecção de picos e geração de máscara de lacunas e finalizaram com a geração da segmentação das copas. Segundo os autores, a tecnologia LiDAR mostrou-se eficiente com a extração de 297 copas automaticamente, representado 88,4% da identificação.

Giongo *et al*. (2012) estimaram a altura da base das copas de árvores (*Canopy Base Height* - CBH) utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado em uma área de floresta nativa localizada na cidade de Curitiba – PR. A área foi dividida em blocos de 50 m x 50 m, totalizando 80 blocos, sendo um bloco escolhido de forma aleatória para levantamento do inventário florestal. Para a estimativa da altura da base das copas das árvores a partir dos dados LiDAR, foram utilizadas duas metodologias distintas. A metodologia 1 foi baseada na estimativa da altura da base da copa de árvores individuais e a metodologia 2 baseou-se na altura média da base das copas das árvores. Segundo os autores a estimativa das alturas das bases das árvores com parcelas de diferentes tamanhos (10, 15 e 20 metros) apresentou um erro padrão de 1,42, 0,95 e 0,82 m, que correspondem a 23,62, 15,70 e 13,84%, respectivamente. Os autores concluíram que a metodologia 1 não apresentou resultados satisfatórios e os maiores erros foram atribuídos para as estimativas das árvores de araucária em relação às demais espécies, devido às características particulares da forma de copa dessa espécie. Por outro lado, a metodologia 2 mostrou-se bastante eficiente e de grande potencial de uso, principalmente na aplicação em extensas áreas florestais e de difícil acesso, onde os métodos tradicionais apresentam elevados custos e longo período para a coleta de dados.

Silva *et al*. (2011) utilizaram um *laser* terrestre para a determinação de variáveis dendrométricas de uma árvore da espécie *Araucária Angustifolia*. Para validar os resultados obtidos com *laser*, foram coletadas medidas em campo. As variáveis determinadas foram a altura, o diâmetro e o volume. Segundo os autores, os resultados encontrados foram promissores, com diferença de 23 cm na altura entre o dado *laser* e a medida realizada em campo; o diâmetro teve um erro médio de -0,83 e 1,44 cm em relação aos dados de campo com volume seguindo a mesma tendência.

3.3 Aplicações no bioma Amazônia

d'Oliveira *et al*. (2020) compararam produtos e estimativas de biomassa acima do solo (AGB) a partir de dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado no ano de 2015 e com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado (sistema GatorEye) no ano de 2017, em dez parcelas de inventário florestal localizadas na Reserva Extrativista Chico Mendes, no estado do Acre, sudoeste da Amazônia. Os dados utilizados na pesquisa eram semelhantes e comparáveis entre as duas plataformas e sensores. As principais diferenças entre os produtos derivados resultaram do sistema GatorEye voando mais baixo e mais lento, e tendo maiores

retornos por segundo do que a aeronave tripulada, o que resultou em uma densidade de pontos muito maior no geral (11,3 ± 1,8 pts / m^2 vs. 381,2 ± 58 pts / m^2). As diferenças na densidade dos pontos no solo, no entanto, foram muito menores entre os sistemas, devido à maior área de pulso e aumento do número de retornos por pulso do sistema embarcado na aeronave tripulada, em relação ao sistema a bordo do GatorEye, apresentando uma densidade de pontos no solo aproximadamente 50% maior (0,27 ± 0,09 vs. 0,42 ± 0,09). Os modelos LiDAR produzidos por ambos os sensores apresentaram resultados semelhantes para modelos digitais de elevação e biomassa acima do solo estimados.

Gomes *et al*. (2020) testaram o uso de dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voos tripulados para estimar as alterações na cobertura do dossel e biomassa acima do solo, associadas à exploração florestal em uma área localizada na Floresta Nacional (FLONA) do Jamari, no estado de Rondônia, entre os municípios de Itapuã do Oeste, Cujubim e Candeias do Jamari. Os voos foram realizados nos anos de 2013, 2014 e 2015, antes e após a exploração florestal. Os resultados obtidos foram comparados com dados de inventário florestal, no qual todos os indivíduos com DAP ≥ 10 cm a 1,30 m de altura do solo foram mensurados. Os autores desenvolveram um modelo de regressão linear para estimar as alterações na AGB partir dos dados LiDAR e dados de campo. Os resultados apresentaram uma pequena diferenciação das coberturas do dossel, antes e após a exploração, possibilitando a identificação de áreas onde o dossel com mais de 10 m de altura foi removido. A redução média de AGB foi de 21,36 Mg/ha (8,9%). Já a redução na cobertura do dossel foi estimada em 0,08 ha (8,2%). Os autores concluíram que o modelo foi satisfatório, visto que apresentou bons resultados estatísticos como R_{aj}^2 de 0,74, RMSE de 21,10 Mg/ha e teste de significância F de 27,19.

Locks e Matricard (2019) utilizaram dados obtidos por LiDAR aerotransportado com voo tripulado na avaliação dos impactos causados pela extração seletiva de madeira em 21 Unidades de Produção Anual na Amazônia (UPA). As áreas de estudo foram localizadas nos estados de Rondônia e do Pará, dentro de Florestas Nacionais sob regime de concessão florestal federal. Foram utilizadas duas métricas derivadas da nuvem de pontos LiDAR para o mapeamento dos impactos nas florestas: o *Canopy Height Model* (CHM) como métrica do dossel e a *Relative Density Model* (RDM) como métrica do sub-bosque. Os resultados foram compatíveis com levantamento realizado em campo. Os autores estimaram que as atividades de extração seletiva de madeiras impactaram em média 6,8% (± 1,3% desvio padrão) da área total de sub-bosque das UPA avaliadas e causaram incremento de 4,9% ± 0,9% em área de clareiras. Os autores

concluíram que a tecnologia LiDAR foi efetiva para o monitoramento dos impactos da extração seletiva de madeiras em áreas sob concessão florestal federal na Amazônia.

Rex *et al*. (2018b) utilizaram dados obtidos com *laser scanner* aerotransportado com voo tripulado e de inventário florestal realizado na Floresta Nacional do Jamari, localizado em Rondônia para avaliar a influência de diferentes tamanhos de *pixel* (10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 75 m e 100 m) na estimativa de biomassa e carbono acima do solo. Os autores observaram que não houve diferença significativas, a nível de significância de 95% entre as estimativas de biomassa e carbono acima do solo. Notaram, ainda, que o tamanho do *pixel* de 75 m apresentou o valor médio de 245,41 Mg/ha para a biomassa e de 117,80 Mg C/ha para o carbono, mais próximos das médias estimadas a partir de dados mensurados nas parcelas do inventário florestal. Com base nesses resultados, os autores escolheram esse tamanho de *pixel* (75 m) para representar a distribuição da biomassa e carbono da amostra LiDAR de floresta. Segundo os autores, os resultados do estudo permitiram uma maior confiança no uso de dados LiDAR para aplicações e estudos futuros.

Qu *et al*. (2018) utilizaram dados de inventário florestal e dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado para mapear o índice de área foliar (IAF) em uma área de floresta densa localizada no município de Paragominas no estado do Pará. Os autores propuseram um modelo de regressão de mínimos quadrados parciais utilizando as métricas de percentil de altura derivadas dos dados LiDAR para estimar o índice de área foliar. O modelo de regressão mostrou que o IAF estimado foi significativamente correlacionado com o IAF calculado com os dados do inventário, com um R^2 de 0,58 e um erro quadrático médio (RMSE) de 1,13. Segundo os autores, a pesquisa foi a primeira em mover esforços para computar estimativas de LAI a partir de dados de inventário em uma floresta tropical explorada seletivamente, destacando a relevância da pesquisa no desenvolvimento de um método para estimar LAI a partir de dados de sensoriamento remoto ativo.

Pantoja *et al*. (2017) analisaram a detecção da infraestrutura de perfilagem usando imagens Landsat e dados LiDAR e verificaram por quanto tempo as cicatrizes de perfilagem poderiam ser identificadas por sensoriamento remoto. O estudo foi realizado em uma unidade de produção anual da Florestal Estadual do Antimary, no estado do Acre. Os autores utilizaram imagens de vegetação não fotossintética (NPV) para identificar os desembarques de toras e comparar sua localização com modelos de densidade de vegetação relativa gerados a partir de dados LiDAR. Os autores alcançaram um resultado de 30% na detecção dos pousos de toras em imagens NPV e auxiliou na interpretação visual do dossel aberto produzido pela extração

seletiva. O modelo de densidade de vegetação relativa testado identificou com sucesso alterações na área de operações florestais dois anos após a exploração, enquanto que, usando imagens Landsat, essas áreas puderam ser detectadas apenas no ano de exploração.

Sato *et al*. (2016) avaliaram quatro áreas experimentais localizadas no estado do Acre, nos municípios de Rio Branco, Humaitá, Bonal e Talismã, para quantificar mudanças pós-fogo na altura e biomassa do dossel florestal usando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado. As áreas amostrais em Rio Branco e Humaitá foram queimadas em 2005, enquanto em Bonal e Talismã foram queimadas em 2010. Nessas áreas, foram inventariadas um total de 25 parcelas (0,25 ha cada) em 2014. Humaitá e Talismã estavam localizados em uma floresta aberta com bambu, e Bonal e Rio Branco estavam localizados em uma floresta densa. Os resultados mostraram que mesmo dez anos após o evento do incêndio, não houvera recuperação completa da altura e biomassa das áreas queimadas ($p < 0,05$). A diferença percentual de altura entre os locais de controle e queimado foi de 2,23% para Rio Branco, 9,26% para Humaitá, 10,03% para Talismã e 20,25% para Bonal. Todos os locais queimados tiveram valores de biomassa significativamente mais baixos do que os locais de controle. Em Rio Branco (dez anos após o incêndio), Humaitá (nove anos após o incêndio), Bonal (quatro anos após o incêndio) e Talismã (cinco anos após o incêndio) a biomassa foi 6,71%, 13,66%, 17,89% e 22,69% menor do que os locais de controle, respectivamente. A quantidade total de biomassa perdida para os locais estudados foram 16.706,3 Mg, com uma perda média de 4176,6 Mg para os locais queimados em 2005 e 2890 Mg para os locais queimados em 2010, com uma perda média de 3615 Mg. Os autores concluíram que o impacto do fogo associado à mortalidade das árvores foi detectado claramente usando dados LiDAR até dez anos após o evento de incêndio e o estudo indicou que a perturbação do fogo na região amazônica pode causar perda persistente de biomassa acima do solo e subsequente redução dos estoques de carbono florestal. Os autores ressaltaram, ainda, que o monitoramento contínuo das florestas queimadas é necessário para descrever a trajetória de recuperação de longo prazo das florestas amazônicas afetadas pelo fogo.

Sato *et al*. (2015) realizaram uma análise preliminar da relação entre dados LiDAR e medidas de campo da estrutura florestal com objetivo de identificar as mudanças na biomassa acima do solo (AGB) e nos estoques de carbono em áreas de Humaitá, Bonal e Talismã, localizadas na região leste doestado do Acre, próximas à capital Rio Branco. Os resultados obtidos indicaram que a altura obtida a partir dos dados LiDAR e a biomassa medida em campo foram linearmente relacionadas, resultando em um R^2 igual a 0,4425. Os autores concluíram

que a altura média dos dados LiDAR pode não ser a medição mais adequada para estimar o AGB se usado como uma única variável. Os autores sugeriram que outras métricas, como densidade da madeira, 70º, 80º, 90º, 95º, 99º percentis de altura LiDAR, pudessem melhorar ainda mais a estimativa de AGB a partir de dados LiDAR. Além disso, os autores também previram que é necessário introduzir formas alternativas para estimar a biomassa no terreno ao nível da parcela, uma vez que o desenho experimental não permitiu uma comparação direta.

Gorgens *et al*. (2015a) utilizaram dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado para descrever a dependência espacial dos perfis de dossel de diferentes tipologias florestais no Brasil. Os autores utilizaram a distribuição Weibull com dois parâmetros para descrever o perfil de alturas verticais para três diferentes tipos de floresta nativa: campos rupestres (Cerrado), semideciduais (Mata Atlântica) e ombrófilos abertos (Amazônia). Foram gerados quatro arquivos do tipo raster formados por células regulares variando de 10 a 70 metros em intervalos regulares de 20 metros para cada uma das três tipologias, resultando num total de 12 arquivos. As três tipologias apresentaram semivariogramas típicos com patamar. A floresta ombrófila aberta e a floresta semidecidual apresentaram um decréscimo da variância aleatória à medida que o tamanho das unidades aumentou, tanto para o parâmetro de escala quanto para o parâmetro de forma. A formação de campo rupestre apresentou a menor variância aleatória para unidades amostrais de 50 metros. Os autores concluíram que as avaliações de inventário para grandes áreas de floresta podem se beneficiar dos resultados observados no estudo, pois podem auxiliar no desenvolvimento de recomendações para o tamanho das células da grade e intensidade de amostragem.

Almeida *et al*. (2015) utilizaram *laser* terrestre para analisar a fração da abertura do dossel, altura e densidade do sub-bosque, com intuito de determinar a susceptibilidade e os impactos dos incêndios em florestas localizadas no município de Careiro Castanho, estado do Amazonas. As varreduras a *laser* foram com dez caminhadas de 250 m, a uma velocidade constante, realizadas em cada tipo de floresta, sendo (1) floresta inundada não queimada, (2) floresta inundada queimada, (3) floresta de terra firme não queimada e (4) floresta de terra firme queimada. Os resultados encontrados pelos autores indicaram que a floresta inundada apresentou um grande dano após o incêndio e foi considerada mais suscetível à ocorrência de fogo, devido à maior fração de lacuna (que aumenta a entrada de luz solar), menor altura do dossel (o que torna as florestas inundadas mais vulneráveis ao ambiente externo) e menor sub-bosque/densidade (vegetação menos viva e úmida para conter a propagação do fogo). Os autores concluíram que é preocupante a suscetibilidade observada na floresta inundada e os

danos causados pelos incêndios são muito mais graves nesse tipo de vegetação. Na floresta de terra firme, os danos não foram tão drásticos, uma vez que a umidade dentro da floresta fez com que o fogo fosse menos destrutivo que na floresta inundada.

Pinagé *et al*. (2015) avaliaram as diferenças na estrutura florestal de áreas exploradas em diferentes anos (2007 a 2010) e florestas não exploradas em uma propriedade privada do Estado do Pará, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado. Os autores também estimaram o número total e a área de clareiras de dossel por hectare, extraídos do CHM, além dos impactos no sub-bosque da floresta, que também foram avaliados por meio de uma métrica que calcula a proporção de retornos abaixo de 0,5 metros em relação aos retornos totais. Os resultados obtidos com o estudo indicaram diferenças significativas no número de lacunas do dossel entre florestas não exploradas e florestas exploradas, mas não entre os anos de extração. Em contraste, os autores observaram mudanças no nível do sub-bosque entre as áreas exploradas em 2007, 2008 e 2010. Segundo os autores, os resultados sugeriram que a taxa de recuperação da estrutura da vegetação depende da altura, com o dossel superior levando mais tempo para se recuperar do que o sub-bosque. Os autores concluíram que a abordagem aplicada com a utilização de dados obtidos com LiDAR aerotransportado mostrou útil na compreensão dos impactos da extração seletiva na estrutura da floresta.

Andersen *et al*. (2014) utilizaram dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado nos anos de 2010 e 2011 na Florestal Estadual do Antimary no estado do Acre, para investigar a mudança na área impactada pela extração seletiva, mudança na área do dossel alto (30 m +), mudança nas métricas da estrutura do dossel e mudança na biomassa acima do solo (AGB) usando uma estrutura estatística baseada em modelo de regressão linear. Os resultados apontaram áreas onde o dossel com mais de 30 m de altura foi removido. A área do dossel alto caiu de 22,8% em 2010 para 18,7% em 2011, uma redução de 4,1%. Usando uma técnica de modelo de densidade relativa (RDM), o aumento na área de estradas, trilhas deslizantes, pousos e clareiras de árvores derrubadas foi estimado em 17,1%. Um modelo de regressão baseado em LiDAR para estimar AGB foi desenvolvido, usando métricas de aquisição com LiDAR no ano de 2010 e as medições de terreno AGB correspondentes. O estimador foi então usado para calcular as estimativas AGB para o local em 2010 e 2011, usando os dados de aquisição LiDAR de 2010 e 2011, respectivamente. Uma abordagem estatística baseada em modelo foi então usada para estimar a incerteza das mudanças no AGB entre as aquisições. A mudança nos RDMs entre as aquisições LiDAR foi usada para classificar cada célula de 50 m na área de estudo como impactada ou não impactada pela exploração madeireira. A mudança na média de

AGB para toda a área de estudo foi de -9,1 Mg/ha ± 1,9 (média ± DP) (P-valor b 0,0001). A mudança na média de AGB para áreas recentemente impactadas em 2011 foi de -17,9 ± 3,1 Mg/ha (P-valor b 0,0001), enquanto a mudança na média de AGB para áreas não impactadas foi significativamente menor em -2,6 ± 1,1 Mg/ha (Valor P = 0,009). Os autores concluíram que os resultados forneceram evidências que corroboram a extensão espacial e a magnitude da mudança, devido à exploração madeireira de baixa intensidade em florestas tropicais com cobertura de dossel residual pesada.

Araujo *et al*. (2013) realizaram a aplicação de uma análise orientada a objetos utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportados como uma ferramenta para monitorar o manejo florestal na Floresta Estadual Antimary no Acre. O produto resultante destacou áreas com solo descoberto ou vegetação de solo mínima, permitindo a visualização da rede de estradas e trilhas de arraste sob a copa da floresta. O produto foi segmentado e classificado em duas categorias: (1) estradas e trilhas de arraste, e (2) todas as outras. A classificação resultante foi comparada a um conjunto de dados de referência desenvolvido por interpretação visual e validado por pontos de controle de solo com GPS. Os autores verificaram que 67% das áreas foram classificadas corretamente pela técnica, demonstrando o potencial desta ferramenta.

3.4 Aplicações no bioma Caatinga

Oliveira *et al.* (2021) obtiveram estimativas de biomassa e carbono a partir de dados de inventário florestal e tecnologia LiDAR em uma área de Caatinga no município de Floresta, interior do estado de Pernambuco. Os autores abordaram três tipos de modelos para análise de dados: regressão linear múltipla com componentes principais, regressão linear múltipla convencional e regressão linear múltipla *stepwise*. De acordo com os resultados, os autores concluíram que os dados LiDAR podem ser usados para estimar biomassa e carbono total em floresta tropical seca. O método *stepwise* de regressão das métricas mostrou-se mais eficaz para melhor ajuste dos modelos. As métricas LiDAR mais presentes nos modelos foram: *Elev.minimum*, *Elev.maximum*, *Elev.mean* e *Elev.P01*, sendo as duas últimas encontradas em todos os modelos.

Silveira *et al*. (2018) utilizaram dados oriundos do sensor MSI / Sentinel-2 e oriundos de LiDAR aerotransportado para mapear a vegetação e analisar as relações com os atributos do solo numa área de Caatinga no nordeste do Brasil. Neste estudo, as métricas mais importantes para classificação foram os índices de vegetação, especialmente o índice de vegetação

otimizado (EVI), índice infravermelho da diferença normalizada (NDII-1), Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI); a inserção dos dados LiDAR nas análises proporcionou ganhos na classificação da Caatinga arbórea, principalmente no porcentual de cobertura vegetal com altura superior a 5 m.

Com intuito de contribuir para o monitoramento de recursos florestais e madeireiros, manejo madeireiro e proteção ambiental na Caatinga, Barmpoutis *et al*. (2018) utilizaram um *laser* terrestre para classificar árvores tropicais por meio de nuvens de pontos de árvores isoladas típicas do bioma Caatinga. Os autores extraíram a estrutura (esqueleto) das árvores com modelagens, utilizando sistemas dinâmicos lineares partindo do pressuposto que cada uma das espécies de árvores estudada cresce de uma maneira específica e exibe propriedades específicas na direção do crescimento (desenvolve sob um padrão de crescimento). Para realizar o estudo, os autores dividiram as estruturas das árvores em segmentos. Para cada segmento, foram extraídos dois descritores diferentes, que levaram em consideração os parâmetros de dinâmica, aparência e ruído. Os resultados experimentais apresentados no estudo mostraram a grande aplicação da metodologia. Os autores pretendem estender o banco de dados utilizando mais espécies de árvores de outras regiões, além de utilizar a metodologia com o objetivo de auxiliar os silvicultores na determinação da seleção de árvores que devem ser cortadas, dependendo de quando atingirem seus estágios economicamente “maduros”.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados de forma detalhada a área de estudo, os materiais e os métodos utilizados nesta pesquisa.

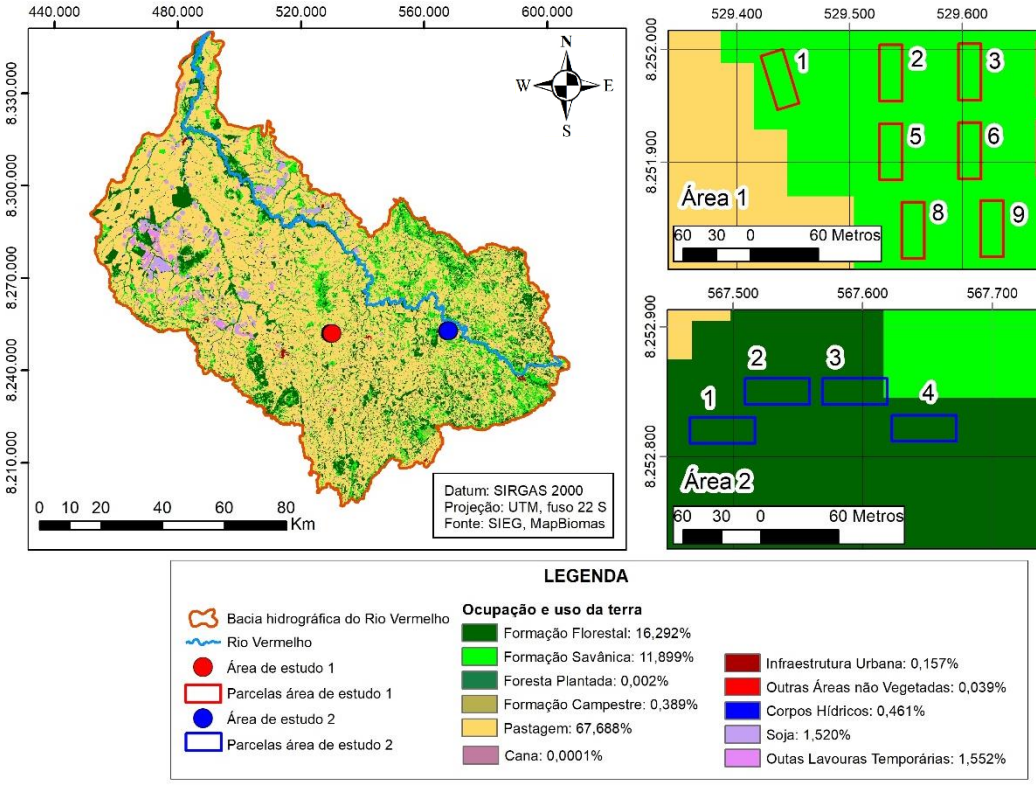
4.1 Áreas de estudo

Foram selecionados para estudo dois fragmentos com remanescente de vegetação nativa de Cerradão, fitofisionomia florestal do Cerrado, inseridos na área mapeada pelo LiDAR aerotransportado (transecto de 50 km x 200 m – Figura 23). Foram amostradas, no total, 15 parcelas de 20 m x 50 m (1.000 m^2) cada, distribuídas nos dois fragmentos/áreas (Figura 22). Na área 1 localizada no município de Itapirapuã, imóvel rural de propriedade do Sr. Clementino Gomes de Almeida, foram amostradas dez parcelas, desse total seis foram caracterizadas como Cerradão (típico) e quatro caracterizadas como Cerradão/Cerrado Denso, fato relacionado à heterogeneidade natural do Cerrado. Na área 2 localizada no município de Goiás, imóvel rural de propriedade de Sr. Alcion Martins dos Santos, foram amostradas 5 parcelas, sendo quatro delas caracterizadas como Cerradão/Mata Seca e uma como Cerradão Típico. As parcelas foram amostradas de acordo com o Manual para o Monitoramento de Parcelas Permanentes nos Biomas Cerrado e Pantanal (FELFILI *et al.*, 2005), para posterior extração de métricas.

Os remanescentes de amostrados encontram-se em bom estado de conservação, evidenciado por uma boa cobertura de dossel, ainda que estejam inseridos em ma matriz de agricultura e pastagem. Contudo, observou-se em campo ocorrência de fogo, extração seletiva de madeira e pisoteio pelo gado.

As áreas de estudo estão inseridas em um transecto de 50 km de comprimento e 200 m de largura na direção Leste-Oeste, inscrito nos municípios de Itapirapuã e de Goiás, mapeado com sistema LiDAR aerotransporatado (ALS) em 20 de junho e 07 de julho de 2015 (parte do projeto PAISAGENS SUSTENTÁVEIS BRASIL, 2018), localizado na alta e média bacia hidrográfica do rio Vermelho (BHRV). O transecto contempla áreas com vegetação nativa do bioma Cerrado, com presença de espécies arbóreo e arbustivas; áreas de pastagens (representadas principalmente pela espécie exótica *Brachiaria brizantha*) e por áreas de agricultura (em menor extensão).

Figura 22 – Localização das áreas de estudo 1 e 2 na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho, Estado de Goiás



Fonte: O autor

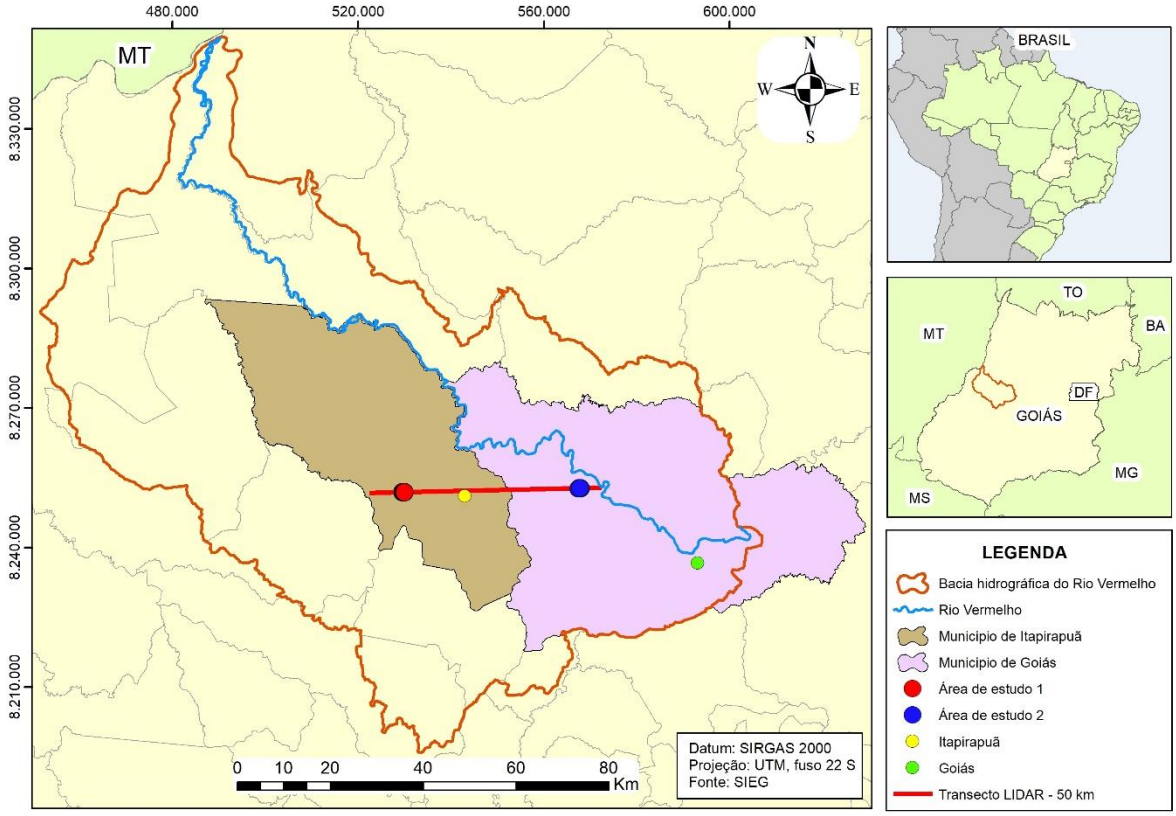
Pode-se observar na Figura 22 que da área total da BHRV (10.832,62 km²), mais de 67% da cobertura e uso da terra é na forma de pastagens, consequentemente, tendo na pecuária a principal atividade econômica. As formações florestais representam 16,3%, as formações savânicas 11,9% e as campestres 0,4% (MAPBIOMAS, 2021).

Ambas as áreas de estudo e o transecto LiDAR estão inseridos na BHRV, situada na região Centro-Oeste do estado de Goiás, sendo que seus limites fazem interseção com os municípios de Aruanã, Britânia, Matrinchã, Santa Fé de Goiás, Jussara, Itapirapuã, Novo Brasil, Fazenda Nova, Buriti de Goiás, Faina e Goiás (SANTOS, 2014). A BHVR encontra-se inserida no domínio do bioma Cerrado, com o processo de ocupação iniciado no século XVIII a partir da mineração/garimpo do ouro (VIEIRA, 2013). A região do rio Vermelho é caracterizada por intensa ocupação e uso do solo com a pecuária como principal atividade antrópica, cuja consolidação ocorreu na década de 1970.

O clima sofre influência da Depressão Interplanáltica do rio Araguaia, que ocasiona altas temperaturas ao longo do ano. As médias mensais variam de 23 °C a 28 °C. As mínimas e

máximas variam entre 20 °C e 32 °C, respectivamente (VIEIRA *et al*., 2014). A localização do transecto e das áreas de estudo em relação à BHRV são apresentados na Figura 23.

Figura 23 – Localização do transecto LiDAR em relação às áreas de estudo e à BHRV



Fonte: O autor

4.2 Materiais

Nesta seção serão apresentados todos os materiais que foram utilizados na realização desta pesquisa.

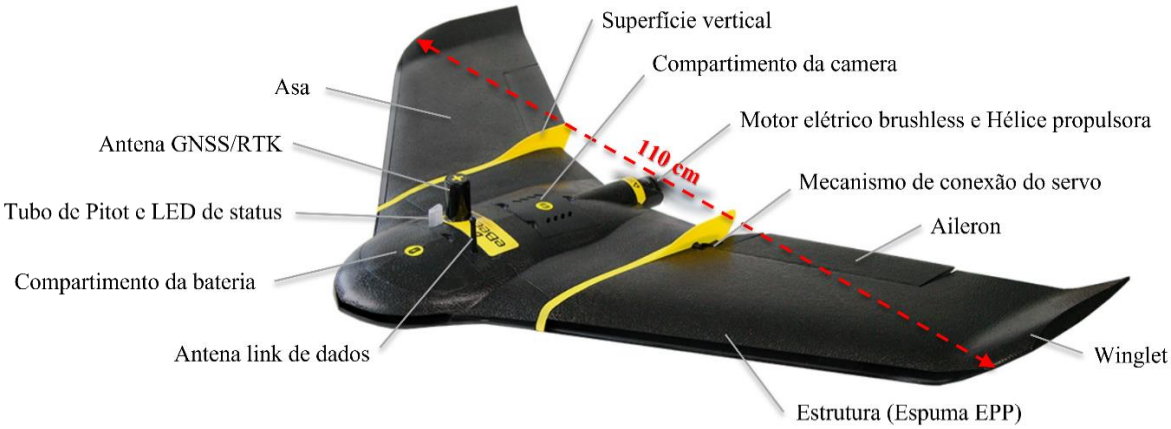
4.2.1 eBee plus RTK

O RPAS utilizado nessa pesquisa foi o eBee Plus com *Real Time Kinematic* (RTK), de propriedade do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) do Instituto de Estudos Socioambientais (IESA) da UFG, fabricado pela empresa suíça SenseFly, comercializado no Brasil pela empresa Santiago & Cintra Geotecnologias. O motivo que determinou a escolha deste equipamento foi o fato de ser um dos mais modernos e tecnológicos,

embarcado com tecnologia RTK (objeto de análise nesta pesquisa em relação à presença ou não de pontos de apoio no solo).

O eBee Plus RTK é uma asa fixa de pequeno porte, fabricada com espuma de polipropileno expandido, conhecido como *Expanded Polypropylene* (EPP). Não é projetado para voar em condições de chuva, nem vento com velocidade superior a 45 km/h (12 m/s). Seus componentes estão representados nas Figuras 24 e 25. Nota-se que a câmera digital é fixada no corpo da aeronave e, portanto, sujeita a todas as alterações de atitude (direção de voo - *kappa*, movimentos de asa - *ômega*, e de bico - *phi*).

Figura 24 – Vista superior do eBee Plus RTK



Fonte: Adaptado de senseFly (2018a)

Figura 25 – Vista inferior do eBee Plus RTK

Fonte: Adaptado de senseFly (2018a)

As principais especificações técnicas do RPA eBee Plus RTK são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações Técnicas do eBee Plus RTK

HARDWARE	
Envergadura	110 cm
Peso	1,1 kg5
Alcance da ligação de rádio	3 km nominal (até 18 km, em condições ideais)
Sensor fornecido	senseFly S.O.D.A.
SOFTWARE	
Planejamento e controle de voo	eMotion 3
Processamento de imagem	Pix4Dmapper Pro
OPERAÇÃO	
Velocidade de cruzeiro	40 a 110 km/h (11 a 30 m/s)
Resistência ao vento	Até 45 km/h (12 m/s)
Tempo máximo de voo	59 minutos
RESULTADOS	
Cobertura nominal[1] a 120 m (400 ft)	220 ha
Cobertura máxima[2]	40 km^2
Distância de amostragem do solo	Até 1 cm/ pixel
Precisão absoluta X, Y, Z (RTK/PPK ativado ou com pontos de apoio)	Até 3 cm / 5 cm
Precisão absoluta X, Y, Z (sem RTK/PPK, sem pontos de apoio)	1 a 5 m

Fonte: Adaptado de senseFly (2018)

Nota: [1] altura de voo acima do nível do solo; resultados excluindo área reconstituível em torno da área planejada; [2] com base em 2.000 m (6.562 ft.) de altitude de voo acima do nível do solo; resultados incluindo área reconstituível em torno da área planejada.

4.2.1.1 Receptor GNSS abordo do eBee plus RTK

As fotografias digitais obtidas pelo eBee Plus RTK são georreferenciadas com a posição exata do RPA quando estas são registradas. Os *geotags*, ou “etiquetas de localização geográfica”, são coordenadas tridimensionais do centro das fotografias, obtidas dos sinais do *Global Positioning System* (GPS) e do sistema de navegação global por satélite russo, o *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS), registrados no sistema de referência geodésico global WGS 84. Após a realização do voo, os *geotags* são vinculados às fotografias obtidas pela câmera (a bordo do RPAS, pelo programa eMotion 3 (*Electronic Monitoring Station*) no módulo *Postflight*. Esta etapa de processamento no eMotion é bastante automatizada.

O eBee possui um receptor GNSS / RTK geodésico de dupla frequência, integrado à carenagem, dotado de 226 canais, que recebem sinais da constelação de satélites artificiais GPS

(sistema de posicionamento global americano) e GLONASS (sistema de posicionamento global russo), com correção RTK *On-Board* de 20 Hz e correção *Upstream* de 1 Hz com protocolos de transmissão de dados RTK RTCM-3.x, RTCM-2.x, e tempo de aquisição *Hot start*: < 10 s; *Warm start*: <35 s; *Cold start*: < 60 s e reaquisição: < 1 s.

Durante a execução do voo, é possível escolher o tipo do posicionamento que o receptor GNSS irá realizar, tendo-se as seguintes opções: Modo autônomo, com baixa precisão (3 - 5 m); Modo de correções de coordenadas em tempo real – RTK, com alta precisão (1 - 3 cm); Modo de registro de dados brutos no formato *RAW* (que significa "cru" na língua inglesa) de coordenadas - *Post Processed Kinematic* (PPK), também com alta precisão (na casa centimétrica).

O Sistema RTK faz correções nos dados coletados pelo receptor GNSS da aeronave em tempo real com precisão de centímetros. Isso porque ele usa uma base de solo especial, que contém um receptor geodésico de alta precisão (dupla frequência L1 e L2). Esta base registra o ponto onde ela está posicionada, servindo como uma referência geográfica estática para o RPAS que está em movimento. Durante o voo, o receptor RTK móvel (*Rover*) (que vai na aeronave) recebe informações dos satélites e da base para corrigir o posicionamento geográfico do RPAS, levando em conta o ponto fixo que a base coletou.

Uma desvantagem do RTK convencional é a perda de dados devido a oscilações das telemetrias das aeronaves. Durante um voo com o RPA, o sinal pode sofrer alguma interferência; quando isso acontece, compromete-se os dados gerados pelo RTK durante esse pequeno período de tempo.

O modo PPK é um sistema bastante similar ao RTK, porém não depende do link de telemetria do avião com a base; neste caso, os dados coletados são pós processados (após o voo), garantindo que todos os dados geográficos fiquem armazenados no computador de bordo da aeronave. Deste modo, pode-se dizer que este é um sistema redundante (*backup*), que garante a precisão dos dados mesmo em longas distâncias entre a base e o avião, pois não há o risco de perda de dados por falta de comunicação entre *rover* e base.

Tanto o RTK quanto o PPK são sistemas de correção: o primeiro corrige o posicionamento em tempo real, enquanto o segundo corrige após o voo (HORUS AERONAVES, 2017). Nesta pesquisa foi utilizado o modo PPK de posicionamento durante a execução dos voos.

4.2.1.2 Câmera acoplada ao eBee plus RTK

A câmera digital acoplada ao RPAS foi uma câmera não métrica da mesma fabricante do eBee Plus, modelo *Sensor Optimised for Drone Applications* (SODA), ultracompacta, com resolução de 20 *megapixel*, equipada com sensor tipo CCD 1” (5472 x 3648 *pixels*), *pixel pitch* de 2,33 μm, com proteção contra poeira e impacto. De acordo com a empresa, esta é a primeira câmera a ser projetada para o trabalho profissional de fotogrametria por *drone* (SENSEFLY, 2018b). A câmera acoplada ao eBee Plus RTK, utilizada nesta pesquisa, é apresentada na Figura 26.

Figura 26 – Câmera digital não métrica acoplada ao RPAS eBee Plus RTK

Fonte: O autor

Quando utilizadas em Fotogrametria, as câmeras podem ser classificadas como câmeras métricas e não métricas. As primeiras são normalmente conhecidas como câmeras fotogramétricas, e as segundas como câmeras de pequeno formato, domésticas ou câmeras de baixo custo, ou ainda câmeras não fotogramétricas.

As câmeras métricas são construídas para terem alta estabilidade geométrica do sistema de lentes, apresentando baixa distorção da imagem gerada e com distância focal fixa. Por outro lado, os fabricantes das câmeras conhecidas como não métricas não se preocupam com a estabilidade geométrica das lentes e sim com a qualidade visual das fotografias, independentemente do grau de distorções existentes na imagem. Além disso, geralmente as câmeras digitais não métricas possuem distância focal variável, permitindo ao operador alterar facilmente a região imageada, ampliando ou reduzindo a área a ser fotografada. Essa operação é comumente conhecida por “*zoom*”. As facilidades operacionais e o baixo custo, associado às novas tecnologias empregadas na construção das câmeras digitais não métricas, contribuem para a crescente popularização destas câmeras frente às fotogramétricas, normalmente mais pesadas (CÔRTES, 2010).

4.2.2 Dados obtidos com LiDAR

Nesta pesquisa foram utilizados dados LiDAR oriundos de voos tripulados e voos não tripulados (RPAS). O dado LiDAR é basicamente constituído por milhões de pontos tridimensionais que representam as superfícies incididas pelo *laser* durante o levantamento. O aspecto visual desses pontos lembra uma nuvem, daí o termo nuvem de pontos LiDAR.

Empregamos três nuvens de pontos para cada área de estudo, sendo a primeira e a segunda provenientes do LiDAR (obtidas com os voos tripulados e voos não tripulados, respectivamente), e a terceira nuvem, por sua vez, proveniente do levantamento aerofotogramétrico não tripulado, utilizando câmera digital não métrica.

Os dados do LiDAR oriundos dos voos tripulados foram coletados no âmbito do projeto Paisagens Sustentáveis, coordenado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), com apoio da Agência dos EUA para o Desenvolvimento Internacional - *U.S. Agency for International Development* (USAID) e Serviço Florestal dos Estados Unidos - *United States Forest Service* (USFS), tornando possível o fornecimento de dados LiDAR de alta precisão, com o objetivo de desenvolver novos métodos de mapeamento da vegetação e gerar conhecimento de campo. Diversos pesquisadores em todo o mundo têm trabalhado com dados fornecidos pelo Projeto Paisagens Sustentáveis (EMBRAPA, 2021).

Os dados foram adquiridos a partir de dois sobrevoos realizados nos dias 19 de junho e 06 de julho de 2015, ao longo de um transecto localizado nos municípios das cidades de Itapiratupã e Goiás. Os voos foram realizados pela empresa Geoid Serviços Aéreos Especializados Ltda (*Geoid Laser Mapping*).

Os dados LiDAR foram obtidos no Datum SIRGAS 2000, e projeção no sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 22 Sul. Foi recoberto um transecto de aproximadamente 50 quilômetros de comprimento por 200 metros de largura, perfazendo uma área total de 1009,01 hectares. Os dados de todo o transecto possuem 60 *tiles* (ou blocos) com uma sobreposição de 60% entre as linhas de voo (PAISAGENS SUSTENTÁVEIS BRASIL, 2018).

O levantamento com *laser* foi do tipo *small-footprint* (diâmetro pequeno do pulso *laser* no solo, variando entre 20 e 30 cm) e *full-waveform* (sistema de ondas contínuas capaz de registrar integralmente todo o sinal do pulso), com densidade média de retornos de 44,79 ppm² (pontos por metro quadrado) e densidade mínima de retornos de 4 ppm, configurações essas

que atendem as recomendações quando a variável de análise é a estrutura da vegetação (LEITOLD *et al.*, 2015).

Antes da disponibilização dos dados LiDAR para o público, os dados brutos foram processados (filtrados e classificados) nos seguintes programas: LMS 2.3; MMS POSPAC 6.1; TERRA SCAN 14.0; TERRA MODELER 14.0; e TERRA MATCH 14.0 (PAISAGENS SUSTENTÁVEIS BRASIL, 2018). A Tabela 3 apresenta os parâmetros da varredura realizada com LiDAR aerotransportado com voo tripulado.

Tabela 3 – Parâmetros da varredura realizada com LiDAR aerotransportado com voo tripulado

Altitude média de voo	850 m
Campo de Visão	12°
Frequência de Pulso	100 kHz
Densidade mínima de retornos	4 ppm²
Densidade média de retornos	44,79 ppm²
Densidade média de primeiros retornos	35,06 ppm²
Especificação do scanner	OPTECH, ORION M300, 09SEN243
Frequência de varredura	83 Hz
Especificação do instrumento GNSS	APPLANIX, 09SEN243
Frequência GNSS	5 Hz
Especificação do instrumento IMU	LITTON, 413996
Frequência IMU	100 kHz

Fonte: Adaptado de Paisagens Sustentáveis Brasil (2018)
Nota**:** ppm² = pontos por metro quadrado

Os dados LiDAR fornecidos por este projeto podem ser baixados de um servidor do tipo *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) mantido pela EMBRAPA. Para obter acesso aos dados LiDAR (nuvem de pontos e MDT), o usuário deve enviar um e-mail para "sustainablelandscapes.lidar@gmail.com" com uma breve declaração de intenção sobre o uso dos dados (esta informação é usada apenas para registros internos). Após o envio do e-mail, um *login* e senha são então enviados para o usuário. Os arquivos são baixados pelo usuário com a extensão LAS compactado *.LAZ (LasZip).

Já quanto aos dados LiDAR oriundos dos voos não tripulados (RPAS), estes foram coletados com voos cruzados (i.e., planos de voos duplos, para se aumentar a densidade de pontos) no dia 13 de julho de 2017, graças a uma colaboração com o *GatorEye Unmanned Flying Laboratory*, programa *McIntire-Stennis* do *Spatial Ecology & Conservation* (SPEC) *Lab* (Laboratório de Ecologia Espacial e Conservação), da Escola de Recursos Florestais e Conservação da Universidade da Flórida, EUA (UF, 2021).

O *GatorEye* é um sistema de *hardware* embarcado em um RPAS (asa rotativa) com fluxo de trabalho de algoritmo personalizado, que coleta e, em pós-processamento, gera produtos de fusão de dados que incorporam sensores LiDAR, hiperespectrais, térmicos e visuais. O sistema teve início em 2016 e é co-dirigido pelos Drs. Eben North Broadbent e Angelica Maria Almeyda Zambrano, que gerenciam as operações de voo, processamento de dados, desenvolvimento e calibração / validação de algoritmos e aplicativos (SPEC, 2021). Os dados LiDAR processados são disponibilizados no endereço eletrônico http://www.speclab.org/gatoreye-data-access.html, e sua utilização deve ser autorizada pelos co-diretores.

4.3 Métodos

Nesta seção são apresentados os métodos utilizados nas seguintes etapas: locação das parcelas e levantamento do inventário florestal; geração dos ortomosaicos, MDS e nuvem de pontos obtidos com aerofotogrametria; verificação da acurácia e precisão dos ortomosaicos e MDS; precisão esperada para a determinação altimétrica nos MDS; geração das métricas com as nuvens de pontos; estimativa da cobertura do dossel nas parcelas; estimativa do número de indivíduos nas parcelas; cálculo da biomassa e predição da biomassa.

4.3.1 Locação das parcelas e levantamento de dados em campo

Os dados de campo nas áreas de estudo 1 e 2 foram coletados em parceria com o projeto de pesquisa (n°. 44542020146 Edital Universal CNPq/2014) intitulado “Estimativa da biomassa aérea lenhosa em formações savânica e florestal do Bioma Cerrado através de dados de campo e LiDAR aerotransportado” coordenado pela Profª. Dra. Sabrina do Couto de Miranda, da Universidade Estadual de Goiás (UEG) - Unidade Acadêmica de Palmeiras de Goiás, e parte dos dados foi publicada na tese de doutorado intitulada “Modelagem da biomassa lenhosa aérea e relação com a biodiversidade no cerrado goiano”, de autoria de Cassio Henrique Giusti Cezare, sob orientação do Prof. Dr. Paulo de Marco Júnior/ICB/UFG e co-orientação da Profª. Dra. Sabrina do Couto de Miranda/UEG, realizada no âmbito do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (PPGCIAMB) da Universidade Federal de Goiás (UFG).

Foram implantadas nas áreas de estudo 15 parcelas de 20 m x 50 m cada (1.000 m^2) entre abril/2016 e março/2017. Para a locação das parcelas, foi utilizado um par de receptores GNSS

geodésico com precisão centimétrica, disponibilizado pelo LAPIG (HIPer Lite +). O termo locação ou demarcação topográfica pode ser interpretado de forma equivocada por profissionais que não são da área de geomensura, sendo confundido com a palavra alocação. Embora tenham significados semelhantes, a forma escrita adotada na literatura é locação. A locação topográfica nada mais é do que a materialização física diretamente no campo de pontos definidos no projeto (ESPARTEL *et al.*, 1983; TULER e SARAIVA, 2002).

Para a materialização dos vértices das parcelas, foram confeccionadas estacas de madeira com dimensões de 60 x 7 x 2 cm (comprimento x largura x espessura) que foram pintadas com tinta PVA na cor branca com aplicação de impermeabilizante asfáltico em cerca de 20 cm na extremidade da ponta das estacas (parte que seria enterrada), visando repelir a ação dos cupins e da umidade, e prolongar a vida útil das mesmas (Figura 27).

Figura 27 – Confecção das estacas (a); locação dos vértices das parcelas (b); materialização dos vértices das parcelas (c)

(a) (b) (c)

Fonte: O autor

A coleta dos dados em campo seguiu metodologia padronizada e iniciou-se logo após a locação das unidades amostrais, e contou com o apoio de estagiários das unidades acadêmicas de Palmeiras de Goiás e Cora Coralina (Cidade de Goiás) da UEG. Em cada parcela foram incluídos na amostragem indivíduos lenhosos com Db30 cm ≥ 5 cm (diâmetro da base maior que 5 cm a 30 cm acima do solo), exceto lianas, palmeiras e velosiáceas (MIRANDA, 2014). Os dados fitossociológicos medidos em campo foram: diâmetro de base (Db); diâmetro à altura do peito (DAP) medido a 1,30 m acima do solo; altura total; altura e largura da copa.

O diâmetro foi medido com suta de alumínio e a altura com vara graduada em metros ou hipsômetro florestal. A altura total foi considerada como a projeção vertical da base do tronco até o ramo mais alto ou folhagem. Nas parcelas onde a vegetação lenhosa foi amostrada também

foi estimada a cobertura lenhosa com densiômetro esférico convexo (modelo *Forestry Supplies Inc.*). Para os dados de copas, no interior de cada parcela, foram selecionados aleatoriamente indivíduos lenhosos em diferentes classes diamétricas, tomando por referência o diâmetro mínimo de inclusão. A altura da copa foi considerada da base da copa até o ramo mais alto ou folhagem. O comprimento e largura da copa foram medidos com trena de 10 metros.

4.3.2 Geração dos ortomosaicos, MDS e nuvem de pontos obtidos com aerofotogrametria

Os mosaicos ortoretificados e os MDS gerados nesta pesquisa, a partir das fotografias obtidas com o eBee Plus RTK, foram confeccionados no programa Pix4Dmapper Pro (versão 2.0.104, licença acadêmica pertencente à UFG / LAPIG).

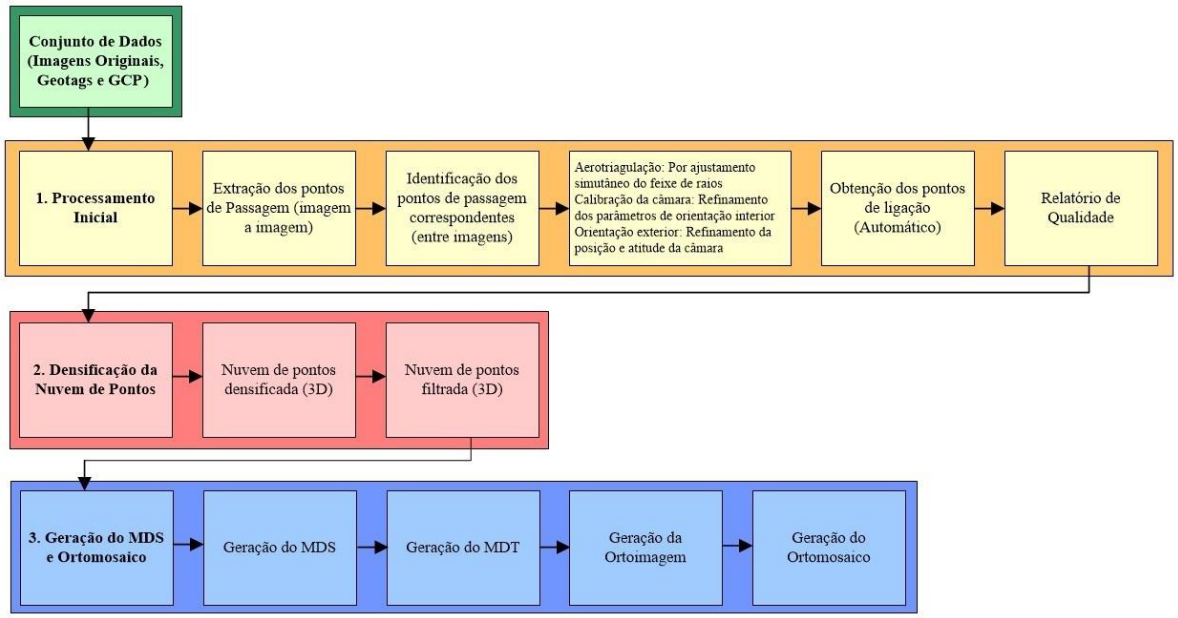
Todo o processamento para a geração dos ortomosaicos é automático, cabendo ao operador importar as fotografias e as coordenadas tridimensionais dos pontos de apoio, se houver, indicando sua posição em cada fotografia (i.e., buscando-se o alvo rastreado no terreno com o GNSS geodésico).

Na Figura 28 é representado o fluxograma para a obtenção do ortomosaico e da nuvem de pontos, em quatro cores distintas. Cada cor representa uma etapa no processo de obtenção do ortomosaico. A cor verde representa a entrada de dados. A primeira etapa do processamento, representada na cor laranja, inicia com a determinação de possíveis feições na fotografia, que possam ser representadas por um ponto. Percorre-se a fotografia verificando se cada ponto escolhido possui homólogo, ou seja, se ele aparece em duas ou mais fotografias. Caso o ponto em estudo possua homólogo, ele é selecionado para compor a aerotriangulação; caso contrário, o ponto é descartado. Processa-se a aerotriangulação em conjunto com a calibração, de forma que os valores iniciais dos parâmetros de orientação exterior (obtidos pelo GNSS em voo) e interior (obtidos pelo IMU em voo) sejam ajustados. Ao final da aerotriangulação, é gerado um relatório contendo uma série de informações sobre o ajustamento realizado.

A segunda etapa do processamento, representada na cor rosa (Figura 28), envolve a densificação e filtragem na nuvem de pontos, visando a geração do MDS (Modelo Digital de Superfície). Com a determinação da orientação exterior e as coordenadas tridimensionais oriundas da aerotriangulação, o programa gera o MDS, que dará origem ao MDT depois de filtrado os pontos acima do solo e interpolando as regiões de vazios. O manual não indica o algoritmo ou os parâmetros utilizados na filtragem do MDS para a obtenção do MDT, ou como o mesmo é interpolado nas regiões sem informações.

Na terceira e última etapa são geradas as ortofotos em função do MDT, e a sua junção origina o ortomosaico (i.e., uma imagem plana, ajustada ao solo, composta pela junção de todas as fotos consideradas no processo).

Figura 28 – Etapas do processamento para a geração do ortomosaico e nuvem de pontos



Fonte: Adaptado do suporte *on-line* Pix4Dmapper (2013)

O manual de operação e utilização do programa não esclarece adequadamente como cada uma das etapas do processamento é realizada, pois seu código fonte é fechado. Cabe ao usuário intuir sobre a solução lógica e matemática aplicada no programa Pix4Dmapper ao comparar suas etapas com as pesquisas acadêmicas desenvolvidas na automação dos processos fotogramétricos.

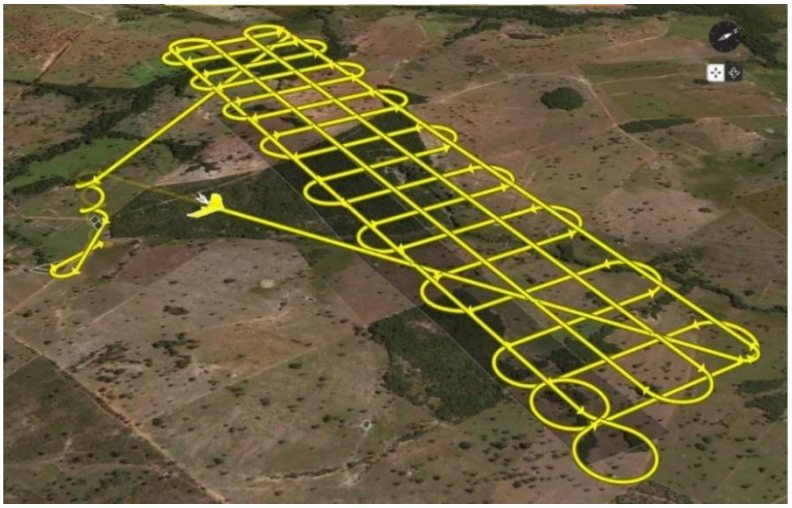
Ao inserir as fotografias no projeto, o programa identifica automaticamente o fabricante e o modelo da câmera, e nesse momento os parâmetros de orientação interior aproximados são carregados. Os parâmetros de orientação exterior são gravados em um *geotag* com extensão *.bb3. Cada fotografia é associada ao seu respectivo parâmetro de orientação exterior oriundo do sistema de navegação (GNSS) e do sistema inercial interno (IMU), ambos instalados a bordo do RPAS, pelo programa eMotion 3 no módulo *Postflight*.

Segundo o manual do Pix4Dmapper, a aerotriangulação e a calibração são realizadas pelo ajuste simultâneo dos raios. Ao término da aerotriangulação e calibração, é gerado um relatório para o usuário, contendo algumas informações básicas sobre o processamento.

As nuvens de pontos das áreas de estudo 1 e 2 geradas pelo Pix4Dmapper foram objeto de análise comparativa com as nuvens de pontos oriundas dos dados *laser* (LiDAR).

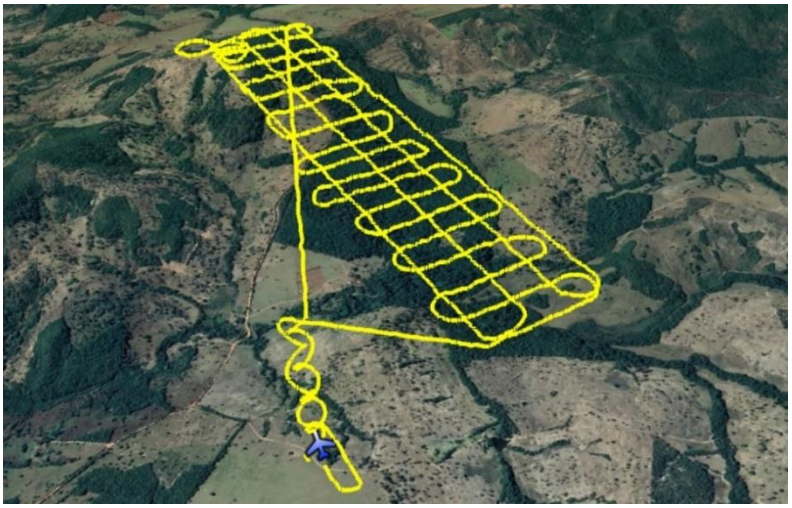
Os dois aerolevantamentos foram planejados para terem início às 12 horas, visando minimizar sombras de árvores, e projetados para recobrir uma área com dimensão de 2.000 x 200 m com voos cruzados (ou duplos), com linhas de voo perpendiculares entre si, sendo 4 linhas (áreas 1 e 2) no sentido longitudinal (paralelas ao maior lado), e 17 linhas (área 1) e 18 linhas (área 2) no sentido transversal, ou seja, paralelas ao menor lado da área. Os voos foram planejados para terem recobrimento lateral de 50% e longitudinal de 70% (cada fotografia possuindo um recobrimento de 274 x 182 metros ou 49.868 m²) com 137 metros de espaçamento entre as linhas de voo e 55 metros de distância entre as fotografias, *Ground Sampling Distance* (GSD) ou tamanho do *pixel* no terreno de 0,05 metros (ou 5 cm), com o RPAS a 212,5 metros acima do solo, baseado nos dados de elevação obtidos pelo conjunto de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*); mais detalhes no Apêndice A. Nas Figuras 29 e 30 são apresentadas as linhas planejadas dos voos aerofotogramétrico das áreas de estudo 1 e 2.

Figura 29 – Linhas planejadas do voo da área de estudo 1 desta pesquisa



Fonte: O autor

Figura 30 – Linhas planejadas do voo da área de estudo 2 desta pesquisa



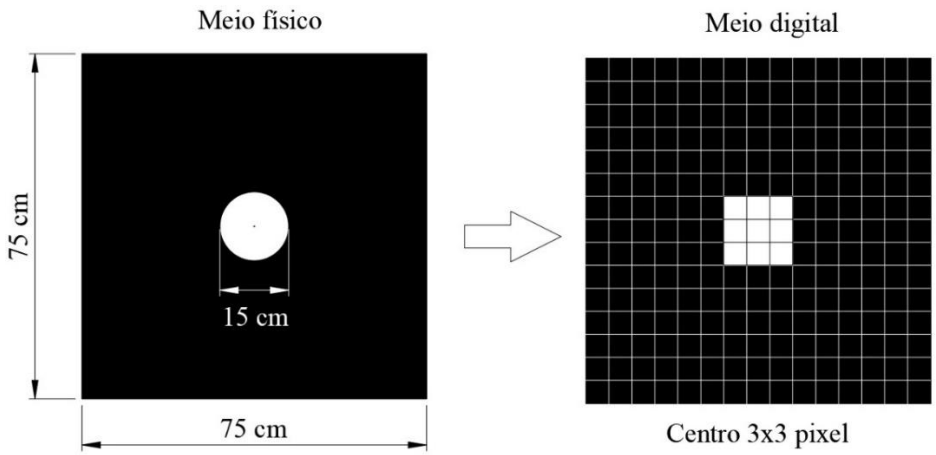
Fonte: O autor

4.3.3 Verificação da acurácia e precisão dos ortomosaicos e MDS

Para a verificação da acurácia e precisão dos ortomosaicos e MDS produzidos, foram implantados 10 alvos pré-sinalizados (área 1) e 20 alvos pré-sinalizados (área 2). Esses alvos foram distribuídos de forma uniforme nas duas áreas de estudo.

O modelo de alvo pré-sinalizado utilizado foi adaptado dos modelos sugeridos por Wolf (2004) e Ministério do Exército (1984). O modelo usado foi um círculo, sem as faixas laterais. No terreno, o centro do alvo foi representado por uma circunferência com 15 centímetros de diâmetro. Na imagem, o centro do alvo foi representado por uma matriz de 3x3 *pixel*. A Figura 31 demonstra a representação genérica de um alvo implantado no terreno.

Figura 31 – Representação genérica dos alvos pré-sinalizados implantados no terreno



Fonte: O autor

Os alvos pré-sinalizados foram pintados com tinta PVA na cor branca em moldes de papelão pintados na cor preta, recortados em um formato retangular com dimensões de 75 x 75 cm. Os alvos foram fixados no solo com grampos confeccionados a partir de parafusos, vedados com arruela e luva de neoprene, normalmente utilizados em fixação de telhas de fibrocimento amianto em estruturas de madeira, possuindo dimensões de 5/16” x 200 mm. Foi adicionado ao conjunto completo do parafuso de fixação um pequeno pedaço de *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA), para que durante o processo de fixação e retirada dos alvos em campo, o papelão não fosse danificado, permitindo, assim, a sua reutilização em outros voos.

Na Figura 32 são apresentados os grampos e alvos utilizados nesta pesquisa, em fase de confecção.

Figura 32 – Alvos pré-sinalizados confeccionados nesta pesquisa

Fonte: O autor

As coordenadas tridimensionais de todos os alvos pré-sinalizados foram obtidas por posicionamento geodésico pelo método de posicionamento RTK, usando um par de receptores de sinais GNSS que trabalham com o sinal das constelações GPS e GLONASS, e que se comunicam via rádio, da marca Topcon modelo HIPer Lite +. Essa configuração permite obter um posicionamento em tempo real e com precisão centimétrica. O método de posicionamento RTK é baseado na solução da ambiguidade da onda portadora dos sinais transmitidos pelos sistemas globais de navegação por satélite. Nesse método, a estação base envia para a estação móvel, ou *rover*, os dados da fase da onda portadora e a pseudodistância ou as correções destas. Isso permite a solução da ambiguidade em tempo real. Essas correções podem ser enviadas via rádio, rede (internet), satélite de comunicação ou sinal do Sistema Global para Comunicações Móveis *Groupe Special Mobile* (GSM) (MONICO, 2008).

Ambos os receptores, base e móvel, foram configurados com taxa de gravação de um segundo, e máscara de elevação de 15º. Aceitou-se somente solução fixa da ambiguidade e *Root*

Mean Square (RMS) menor ou igual a 3 centímetros. Na Figura 33 é apresentado o modelo do par de receptores GNSS utilizado nesta pesquisa.

Figura 33 – Par de receptores GNSS RTK utilizado nesta pesquisa, modelo HIPer Lite +

Fonte: Topcon Solutions Store (2018)

As coordenadas das bases das duas áreas foram determinadas por Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), a partir do serviço oferecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

O serviço de Posicionamento por Ponto Preciso - IBGE-PPP é online e gratuito para pós-processamento de dados dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS), que faz uso do programa CSRS-PPP (GPS *Precise Point Positioning*), desenvolvido pelo *Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada* (NRCan). Ele permite aos usuários com receptores GPS e/ou GLONASS (mono ou dupla frequência) obterem coordenadas de precisão no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000) e no *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF), baseadas somente nas órbitas precisas e nas correções de relógios dos satélites (não havendo a necessidade de uma estação de referência coletando dados simultaneamente em campo). Os dados coletados devem ser enviados ao IBGE no formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX) ou HATANAKA.

O segundo receptor (móvel ou remoto) empregado no levantamento ocupou o centro dos alvos pré-sinalizados. Este aparelho é controlado via *Bluetooth* por um coletor de dados modelo FC-250, que armazena as coordenadas dos pontos rastreados. Na Figura 34 é demonstrada a implantação e o rastreamento de um alvo pré-sinalizado. Após o término da execução dos voos aerofotogramétricos, todos os alvos pré-sinalizados implantados nas áreas de estudo foram retirados.

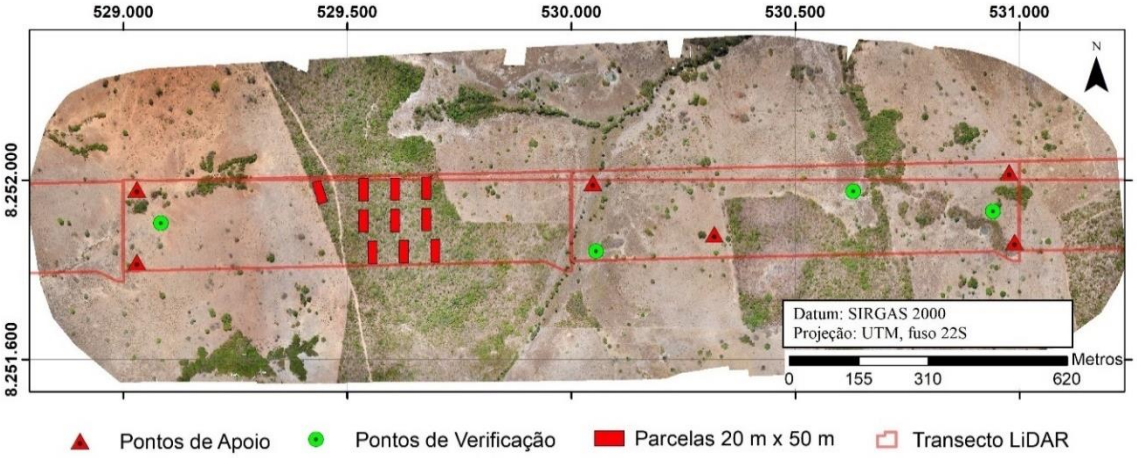
Figura 34 – Implantação de um alvo pré-sinalizado as áreas de estudo desta pesquisa

Fonte: O autor

Nesse trabalho, foram gerados quatro ortomosaicos distintos para cada área de estudo. O primeiro não utilizou nenhum ponto de apoio no solo ou *Ground Control Point* (GCP), ou seja, o mosaico foi gerado utilizando somente os parâmetros de orientação exterior oriundos do sistema de navegação e do sistema inercial instalados a bordo do RPAS. O segundo ortomosaico também foi gerado sem a utilização de pontos de apoio; no entanto, utilizou-se a correção das coordenadas das fotografias pelo método de posicionamento PPK. O terceiro ortomosaico foi gerado utilizando seis pontos de apoio (área 1) e sete pontos de apoio ou controle (área 2) e sem método PPK. Nesse caso, foram escolhidos como pontos de apoio os quatro alvos pré-sinalizados situados mais próximos dos vértices da área imageada e os demais pontos de apoio foram regularmente distribuídos na área, conforme apresentado na Figura 35 (área 1) e na Figura 36 (área 2). O quarto ortomosaico foi gerado utilizando os mesmos pontos de apoio dos ortomosaicos anteriores, porém agora empregando o método PPK. Quatro alvos pré-sinalizados (área 1) e treze alvos pré-sinalizados (área 2), não utilizados como apoio ou controle, foram usados como pontos de verificação ou checagem.

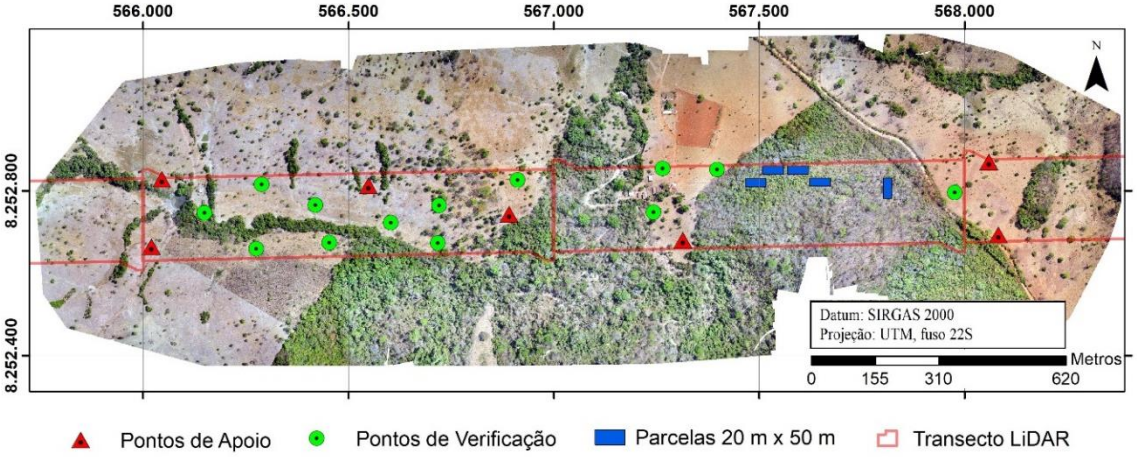
Na Figura 35 é apresentada a localização e distribuição dos 10 alvos pré-sinalizados na área de estudo 1, e na Figura 36 é apresentada a localização e distribuição dos 20 alvos pré-sinalizados na área de estudo 2, entre os limites do voo LiDAR. Os triângulos vermelhos indicam os pontos de apoio, os círculos verdes os pontos de verificação e as linhas vermelhas representam a faixa do voo LiDAR aerotransportado.

Figura 35 – Localização dos alvos pré-sinalizados na área de estudo 1 imageada



Fonte: O autor

Figura 36 – Localização dos alvos pré-sinalizados na área de estudo 2 imageada



Fonte: O autor

A precisão e a acurácia dos ortomosaicos foram avaliadas pelas discrepâncias calculadas entre as coordenadas planimétricas dos pontos de verificação, obtidas com um par de receptores de sinais GNSS, com as coordenadas dos mesmos pontos lidas nos ortomosaicos. As coordenadas planimétricas obtidas com um par de receptores de sinais GNSS no método de posicionamento RTK foram consideradas como verdadeiras, isto é, isentas de erro.

A formulação empregada para avaliar a precisão e a tendenciosidade dos ortomosaicos e MDS é consagrada na literatura, tendo sido utilizada por Merchant (1982), Galo e Camargo (1994), Leal (1998), Nazareno *et al.* (2009), Côrtes (2010) e Alves Júnior *et al.* (2015a, 2015b, 2018), na qual utiliza-se o teste t de Student para verificar a tendenciosidade e o qui-quadrado para avaliar a precisão. Nos ortomosaicos e MDS gerados, sem pontos de apoio, os parâmetros de atitude e a posição da câmera foram obtidos de forma direta pelo sistema inercial e GPS instalados a bordo do RPAS. Nos ortomosaicos e MDS gerados com pontos de apoio, os

parâmetros de orientação exterior foram obtidos por georreferenciamento direto, refinados pela utilização das coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados usados como pontos de apoios.

Os ortomosaicos e MDS foram planejados e avaliados para terem uma escala compatível com uma carta com Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) Classe A, conforme a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), a qual estabelece um novo Padrão de Exatidão Cartográfica destinado a atender os Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (DSG, 2011). O surgimento de novas geotecnologias contribuiu para que fosse realizada uma revisão dos padrões estabelecidos no Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 (BRASIL, 1984).

O enquadramento das classes no PEC-PCD baseia-se nas estatísticas de 90% dos pontos coletados no produto cartográfico em relação às coordenadas dos pontos homólogos coletados na fonte de maior precisão. Para que sejam enquadrados nas classes do PEC-PCD, as discrepâncias entre as coordenadas dos pontos homólogos devem resultar em valores iguais ou inferiores de erro máximo (EM) e de erro padrão (EP) previstos para cada produto.

Convém salientar que esta norma utiliza o mesmo procedimento de cálculo previsto no Decreto nº 89.817, mas atualiza os valores de Erro Médio (EM) e Erro Padrão (EP) para alguns tipos de produtos (DSG, 2016).

Na Tabela 4 é possível observar os valores dos erros admitidos em uma carta com PEC Classe A, B e C.

Tabela 4 – Padrão de exatidão cartográfico para produtos cartográficos digitais

Classe [1]	Classe PCD	1:1.000			
		Planimetria		Altimetria [3]	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A[2]	0,28	0,17	0,27	0,17
A	B[1]	0,50	0,30	0,50	0,33
B	C[1]	0,80	0,50	0,60	0,40
C	D[1]	1,00	0,60	0,75	0,50

Fonte: Adaptado de DSG (2016)

Nota: 1 Valores determinados, ou adaptados com base nos valores do PEC Planimétrico, previstos no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984.

2 Produtos Cartográficos Digitais, baseado nos valores utilizados pelo "*Ordinance Survey*" e "*National Joint Utilities Group*" do Reino Unido, extraídos de ARIZA (2002, pág. 87, no qual Exatidão Cartográfica = 0,28 mm na escala do produto cartográfico e EP = 0,17 mm na escala do produto cartográfico).

3 Valor calculado levando-se em consideração os erros existentes nos processos de medição de pontos de apoio e de fototriangulação.

4.3.3.1 Teste de qui-quadrado: verificação da precisão dos ortomosaicos e MDS

Um teste de hipótese foi realizado para verificar se o desvio padrão das discrepâncias medidas, quer para o eixo *E*, eixo *N* ou eixo *h*, foi igual ou inferior ao desvio padrão esperado. O desvio padrão da amostra foi determinado pelas Equações 1, 2 e 3, enquanto o desvio padrão esperado foi determinado pela equação 4 para os eixos E e N, e pela Equação 5 para o eixo Z. O teste indicado para confrontar se o desvio padrão esperado é estatisticamente igual ao calculado é o qui-quadrado. Para tanto, formulam-se duas hipóteses: a H_0 que presume que o valor do desvio padrão da amostra é menor ou igual ao valor do desvio padrão esperado, e a H_1 que presume que o valor do desvio padrão da amostra é maior que o valor do desvio padrão esperado; as duas hipóteses formuladas estão na Tabela 5. Nesse caso, calcula-se o χ^2 da amostra e compara-se com o valor teórico obtido de uma distribuição de probabilidade χ^2, com determinado grau de liberdade (variável de acordo com o tamanho da amostra) e nível de confiança de 90%.

Tabela 5 – Teste de hipótese para verificar a precisão do ortomosaico

H_0		H_1
$\hat{\sigma}_{\Delta E} \leq \sigma_E$	Versus	$\hat{\sigma}_{\Delta E} > \sigma_E$
$\hat{\sigma}_{\Delta N} \leq \sigma_N$		$\hat{\sigma}_{\Delta N} > \sigma_N$
$\hat{\sigma}_{\Delta h} \leq \sigma_h$		$\hat{\sigma}_{\Delta h} > \sigma_h$

Onde:

$$\hat{\sigma}_{\Delta E} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta E_i - \overline{\Delta E})}{(n-1)}} \tag{8}$$

$$\hat{\sigma}_{\Delta N} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta N_i - \overline{\Delta N})}{(n-1)}} \tag{9}$$

$$\hat{\sigma}_{\Delta h} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta h_i - \overline{\Delta h})}{(n-1)}} \tag{10}$$

$$\sigma_E = \sigma_N = \frac{EP_{NE}}{\sqrt{2}} \tag{11}$$

$$\sigma_h = EP_h \tag{12}$$

EP = Erro Padrão

Os valores de ΔE, ΔN, Δh, $\overline{\Delta E}$, $\overline{\Delta N}$ e $\overline{\Delta h}$ foram obtidos pelas Equações 13 a 18.

$$\Delta E = \sum_{i=1}^{n} E_{Ortomosaico} - E_{GNSS} \tag{13}$$

$$\Delta N = \sum_{i=1}^{n} N_{Ortomosaico} - N_{GNSS} \tag{14}$$

$$\Delta h = \sum_{i=1}^{n} h_{Ortomosaico} - h_{GNSS} \tag{15}$$

$$\overline{\Delta E} = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_{Ortomosaico} - E_{GNSS}}{n} \tag{16}$$

$$\overline{\Delta N} = \frac{\sum_{i=1}^{n} N_{Ortomosaico} - N_{GNSS}}{n} \tag{17}$$

$$\overline{\Delta h} = \frac{\sum_{i=1}^{n} h_{Ortomosaico} - h_{GNSS}}{n} \tag{18}$$

Se os valores calculados para o χ^2 amostral de E, N e Z forem simultaneamente inferiores ao χ^2 tabelado, aceita-se a hipótese H_0 e rejeita-se a hipótese H_1. Caso contrário, aceita-se a hipótese H_1 e rejeita-se a hipótese H_0.

Os valores do χ^2 podem ser calculados pelas Equações 19 e 20.

$$\chi^2 = \frac{\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} * (n-1) \tag{19}$$

$$\chi^2_{tab_{1-\alpha}^{v=n-1}} \tag{20}$$

Onde:

$\hat{\sigma}^2$ = Desvio padrão da amostra;

n = Número de elementos da amostra; e

α = Nível de confiança.

4.3.3.2 Teste de t de Student: verificação da acurácia dos ortomosaicos e MDS

A tendenciosidade dos ortomasaicos foi verificada pelo teste t de Student. Com este teste verificou-se se a média das discrepâncias da amostra, quer para o eixo E, eixo N ou eixo Z, seria estatisticamente igual a zero. Desse modo, formulou-se duas hipóteses: a hipótese H_0, que presume que as médias das discrepâncias no eixo E, N e Z são iguais a zero, e a hipótese H_1, que admite que as médias das discrepâncias no eixo E, N e Z são diferentes de zero. As hipóteses H_0 e H_1 formuladas são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Teste de hipótese para verificar a tendenciosidade do ortomosaico

H_0		H_1
$\overline{\Delta E} = 0$	Versus	$\overline{\Delta E} \neq 0$
$\overline{\Delta N} = 0$		$\overline{\Delta N} \neq 0$
$\overline{\Delta h} = 0$		$\overline{\Delta h} \neq 0$

Os valores da distribuição do teste t de Student podem ser calculados pelas Equações 21 a 24.

$$\hat{t} = \frac{\overline{\Delta E}}{\hat{\sigma}} * \sqrt{n} \tag{21}$$

$$\hat{t} = \frac{\overline{\Delta N}}{\hat{\sigma}} * \sqrt{n} \tag{22}$$

$$\hat{t} = \frac{\overline{\Delta h}}{\hat{\sigma}} * \sqrt{n} \tag{23}$$

$$t_{tab} = t_{\alpha}^{v=n-1} \tag{24}$$

Onde:

$\hat{\sigma}^2$ = Desvio padrão da amostra;

n = Número de elementos da amostra; e

α = Nível de confiança.

Se os valores calculados para o $\hat{t}$ amostral nos eixos E, N e Z forem simultaneamente inferiores ao t_{tab} tabelado, aceita-se a hipótese H_0 e rejeita-se a hipótese H_1. Caso contrário, aceita-se a hipótese H_1 e rejeita-se a hipótese H_0.

4.3.3.3 Teste de Shapiro-Wilk: verificação da normalidade da amostra

Destaca-se que antes de aplicar os testes t de Student e qui-quadrado, foi verificada a normalidade da amostra pelo teste de Shapiro-Wilk. Este teste retorna o valor de *W* onde o valor de significância valor-p define se a amostra possui uma distribuição normal ou não (SHAPIRO e WILK, 1965); desta maneira, formulou-se duas hipóteses: a hipótese H_0, onde o valor-p é maior que 0,05 e a amostra possui uma distribuição normal, e a hipótese H_1, onde o valor-p é maior que 0,05 e a amostra não possui uma distribuição normal. As hipóteses H_0 e H_1 formuladas são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Teste de hipótese para verificar a distribuição normal ou gaussiana da amostra

H_0	Versus	H_1
$valor - p > 0,05$		$valor - p < 0,05$

O valor da estatística *W* pode ser calculada pela Equação 25

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{25}$$

Onde:

n = tamanho da amostra

Se *n* é ímpar → $b = \sum_{i=1}^{(n-1)/2} a_{n-i+1}(x_{(n-i+1)} - x_i)$

Se *n* é par → $b = \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1}(x_{(n-i+1)} - x_i)$

a = valor tabelado (SHAPIRO e WILK, 1965).

4.3.4 Precisão esperada para a determinação altimétrica nos MDS

Os MDS foram avaliados por quatro pontos situados no solo na área de estudo 1 e treze pontos na área de estudo 2. Ressalta-se que, teoricamente, em pontos situados sobre o solo, o MDT é igual ao MDS. Segundo Albertz e Kreiling (1989), a precisão esperada para a determinação altimétrica em processos de aerotriangulação pode ser determinada pela Equação 26. O valor da precisão (d_z) é determinado em função da altura de voo (H), da base fotogramétrica (B), da distância focal (F) e da precisão de medida da paralaxe (dp_x).

$$d_z = \frac{H^2}{B*F} dp_x \,, \tag{26}$$

4.3.5 Geração das métricas das nuvens de pontos

Para o processamento das nuvens de pontos, utilizou-se o programa FUSION, desenvolvido pelo *Silviculture and Forest Models Team, Research Branch of the US Forest Service*, o qual permite analisar e visualizar os dados LiDAR (MCGAUGHEY, 2021). O FUSION é um programa executado em ambiente *Microsoft Disk Operating System* (MS-DOS), gratuito, podendo ser baixado no endereço eletrônico <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html>.

Para executar os comandos do FUSION, foram gerados *scripts* (textos contendo instruções para serem seguidas pelo programa) no bloco de notas do *Microsoft Windows* e salvos no formato .BAT (*batch* ou lotes) contendo as linhas de comandos do FUSION executadas no MS-DOS.

Das nuvens de pontos obtidas por perfilhamento a *laser* e aerofotogrametria, foram extraídas métricas de cobertura de copa, intensidade e altura das árvores e de estratos para a descrição dos padrões espaciais de estrutura vegetacional das áreas de estudo.

No preparo das nuvens de pontos para a geração das métricas, foram necessários três passos. O primeiro passo foi a normalização da nuvem de pontos; a normalização é a subtração da altitude do objeto com a altitude do terreno de cada ponto. Este passo foi realizado no FUSION, com o comando *ClipData*. Para executar este comando, são necessários dois arquivos: a nuvem de pontos em formato .LAS e o arquivo contendo o MDT da área em formato .DTM. O resultado deste processamento é a nuvem de pontos em formato .LAS com a informação da altura dos objetos em relação ao solo, considerando o nível do solo como plano

de referência, cujo valor é igual a zero. O *script* utilizado para executar o comando *ClipData* foi:

ClipData /shape:# /height /dtm:
C:\ diretório onde o arquivo .DTM está armazenado
C:\ diretório onde o arquivo .LAS está armazenado
C:\diretório onde a nuvem normalizada será salva X mínimo Y mínimo X máximo Y máximo

Onde:

/shape:# define a forma da área: sendo 0 para formato retangular e 1 para formato circular;

/height /dtm: converte as elevações de pontos em alturas acima do solo usando o arquivo .DTM especificado como base;

X mínimo Y mínimo são as coordenadas do canto inferior esquerdo da caixa delimitadora da área de amostra;

X máximo Y máximo são as coordenadas do canto superior direito da caixa delimitadora da área de amostra.

O segundo passo realizado foi o recorte da nuvem de pontos normalizada com os mesmos limites das parcelas, das quais foi obtido o inventário florestal. Este passo foi realizado no FUSION, com o comando *PolyClipData*. Para executar este comando, são necessários dois arquivos: a nuvem de pontos normalizada obtida no primeiro passo em formato .LAS e um arquivo em formato *shapefile* (.SHP), que é um arquivo contendo dados vetoriais que delimitam as parcelas. Como resultado deste processamento, cada parcela do inventário florestal contida no arquivo vetorial deu origem a uma nova nuvem de pontos no formato .LAS. O *script* utilizado para executar o comando *PolyClipData* foi:

PolyClipData /shape:coluna#, valor contido na coluna#
C:\diretório onde o arquivo .SHP está armazenado
C:\diretório onde o arquivo .LAS recortado será armazenado
C:\diretório onde o arquivo .LAS normalizado que será recortado está armazenado

Onde:

shape:coluna#, valor contido na coluna# indica o número da coluna e que contém o identificador do polígono da parcela, no arquivo vetorial, e identifica o valor deste indicador.

O terceiro passo foi a extração das métricas das nuvens de pontos referente a cada parcela. Este passo foi realizado no FUSION, com o comando *CloudMetrics*. Para executar este comando, são necessários os arquivos em formato .LAS de cada um das parcela gerados no segundo passo. Como resultado deste processamento, foi gerado uma planilha eletrônica em formato .CSV (*Comma-separated Values* ou Valores Separados por Vírgula), contendo as métricas das nuvens de pontos das parcelas. O *script* utilizado para executar o comando *CloudMetrics* foi:

CloudMetrics /above:# /minht:# /outlier: limite inferior, limite superior /strata:#,#,#,...
C:\diretório onde o arquivo .LAS está armazenado
C:\diretório onde o arquivo .CSV será armazenado

Onde:

/above:# estipula um valor de altura a partir do qual as métricas serão calculadas (linha da quebra de altura);

/minht:# estipula um valor de altura a partir da qual os retornos do *laser* serão utilizados para calcular as métricas;

/outlier: limite inferior, limite superior delimita os limites inferior e superior no qual os pontos fora desse limite serão omitidos

/strata:#,#,#,... estipula o valor da altura do limite superior de estratos

Nesta pesquisa, o valor da linha da quebra de altura utilizado foi de um metro, pois este foi o valor do menor indivíduo medido no inventário florestal, e a nuvem de pontos foi estratificada de um em um metro, até o limite superior da vegetação medido em campo.

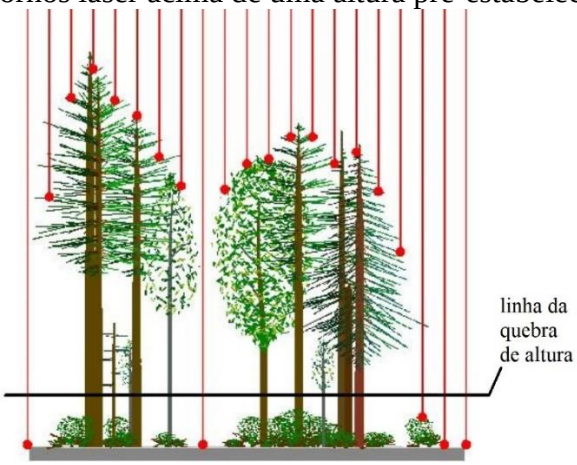
4.3.6 Estimativa da cobertura do dossel nas parcelas

Uma das colunas da planilha contendo as métricas obtidas com a nuvem de pontos possui o valor da porcentagem de cobertura do dossel de cada parcela. Este valor é calculado pelo FUSION, considerando o número de primeiros retornos obtidos a partir do valor da linha da quebra de altura, especificado no *script* do comando *CloudMetrics* pela opção /*above*: #, dividido pelo número total de primeiros retornos da nuvem de pontos. O cálculo do valor da estimativa de cobertura do dossel foi realizado utilizando a Equação 27.

$$\text{cobertura} = \frac{\text{n° de primeiros retornos} > \text{linha da quebra de altura}}{\text{n° total de primeiros retornos}} \tag{27}$$

O dossel de uma vegetação é definido como qualquer vegetação que esteja acima da linha de quebra de altura. Na Figura 36 é apresentado um exemplo de McGaughey (2021), onde, dos 21 pulsos *laser* que entram no dossel, 16 primeiros retornos foram registrados acima do limite da linha da quebra de altura. A estimativa de cobertura baseada nos primeiros retornos para este exemplo é calculada como 16/21 ou 76%. A Figura 37 ilustra o conceito de estimativa da cobertura do dossel usando os primeiros retornos *laser*.

Figura 37 – Ilustração o conceito de estimativa da cobertura do dossel usando os primeiros retornos laser acima de uma altura pré-estabelecida



Fonte: adaptado de McGaughey (2021)

Para a nuvem de pontos oriunda do voo aerofotogramétrico (i.e., usando câmera digital), a cobertura do dossel foi calculada utilizando os valores da porcentagem de todos os retornos acima da linha da quebra de altura, pois nesta nuvem de pontos não há a informação referente à ordem de retornos dos pontos, pois os pontos não foram obtidos com *laser*, e sim durante o processamento das fotografias aéreas.

4.3.7 Estimativa do número de indivíduos nas parcelas

Para a obtenção da estimativa do número de indivíduos nas parcelas foi utilizado o método proposto por Albuquerque *et al.* (2020); Silva *et al.* (2016) e Wulder *et al.* (2000), no qual aplicam-se os algoritmos filtro gaussiano e máxima local. O programa utilizado para executar esses algoritmos foi o QGIS, um Sistema de Informação Geográfica (SIG) livre e de

código-fonte aberto, obtido no endereço eletrônico https://www.qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html.

No QGIS, o dado de entrada foi o arquivo de imagem do CHM em formato *Tagged Image File Format* (.TIF), obtido a partir da nuvem de pontos. O primeiro passo foi a suavização da superfície das copas das árvores com o filtro gaussiano; o segundo passo foi a realização da segmentação de cada copa identificada no CHM; a última etapa foi a obtenção dos pontos (indivíduos) para cada segmento gerado com o algoritmo máxima local. A contagem do número de indivíduos foi realizada manualmente.

4.3.8 Cálculo e predição da biomassa aérea da vegetação lenhosa

A partir dos dados coletados em campo (variáveis independentes), o peso seco ou biomassa florestal aérea lenhosa foi estimado, utilizando-se a equação alométrica proposta por Scolforo *et al.* (2008) (Equação 28), oriunda do modelo logarítmico de Schumacher e Hall (1933), desenvolvida especificamente para a fitofisionomia de Cerradão.

$$\ln(PS) = -11,3710317049 + 2,433521971 * \ln(DAP) + 0,8433902218 * \ln(H) \quad (28)$$

Onde:

PS = Peso de matéria seca (biomassa seca);

DAP = Diâmetro à altura do peito;

H = Altura do indivíduo.

Também foram produzidas estimativas de biomassa por meio do cruzamento de dados LiDAR e RPAS com dados de campo. Os estoques de biomassa foram estimados pelo estabelecimento de uma regressão linear múltipla utilizada para prever o valor de uma variável dependente em função de outras variáveis independentes, estima-se o valor dos coeficientes da equação que melhor preveem o valor da variável dependente. A regressão linear múltipla é dada pela Equação 29.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + ... + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (29)$$

Onde:

Y = Variável explicada ou dependente;

β_0 = Constante de regressão;

β_1, β_2, β_k = Coeficientes de regressão;

X_1, X_2, X_k = Variáveis explicativas ou independentes;

ε = Erro não explicado pelo modelo.

Para a determinação do melhor modelo de predição da biomassa, a análise de regressão linear foi realizada utilizando-se os programas *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) e *RStudio Desktop*.

4.3.8.1 Método *Stepwise* de seleção de variáveis para regressão linear múltipla

O método de regressão *stepwise* é uma ferramenta utilizada para calcular a estrutura do modelo de regressão linear. A regressão *stepwise* inicia o modelo sem variáveis independentes e realiza a seleção das variáveis adicionando ou excluindo uma nova variável, utilizando como critério para sua escolha a estatística F parcial. Dois níveis de distribuição F, $F_{entrada}$ e $F_{saída}$, são formados para determinar se um parâmetro deve ser removido do modelo ($F_{saída}$) ou adicionado no modo ($F_{entrada}$). Esses níveis F são baseados em uma distribuição F com $N - p$ graus de liberdade para um nível predeterminado de significância. As estatísticas $F_{entrada}$ e $F_{saída}$ são estimadas a partir das somas dos quadrados dos resíduos para um modelo com p parâmetros. A estatística $F_{entrada}$ é calculada com a Equação 30.

$$F_{entrada} = \frac{\left(\dfrac{SQR_j - SQR_{(j+X_a)}}{GL_{X_a}} \right)}{EQM_{(j+X_a)}} \tag{30}$$

Onde:

X_a = Variável a ser adicionada no modelo;

SQR_j = Soma dos quadrados dos resíduos antes de X_a ser adicionada ao modelo;

$SQR_{(j+X_a)}$ = Soma dos quadrados dos resíduos após X_a ser adicionada ao modelo;

GL_{X_a} = Graus de liberdade para a variável X_a;

$EQM_{(j+X_a)}$ = Erro quadrático médio após X_a ser adicionada ao modelo.

Se o valor-p correspondente à estatística $F_{entrada}$ para qualquer variável for menor ou igual a 0,05, o SPSS adiciona a variável com o menor valor-p no modelo, calcula a equação de regressão, exibe os resultados e inicia a próxima etapa.

A estatística $F_{saída}$ é calculada com a Equação 31.

$$F_{saída} = \frac{\left(\frac{SQR_{(j-X_r)} - SQR_j}{GL_{X_r}} \right)}{EQM_j} \tag{31}$$

Onde:

Xr = Variável a ser removida no modelo;

SQR_j = Soma dos quadrados dos resíduos para o modelo que contenha X_r;

$SQR_{(j-X_a)}$ = Soma dos quadrados dos resíduos para o modelo que não contenha X_r;

GL_{X_r} = Graus de liberdade para a variável X_r;

EQM_j = Erro quadrático médio para o modelo que contenha Xr.

Se o valor-p correspondente à estatística $F_{saída}$ para cada variável for maior ou igual a 1,00, remove-se a variável com o maior valor-p do modelo, calcula-se a equação de regressão e exibe-se os resultados para uma nova etapa. Quando mais nenhuma variável puder ser inserida ou removida do modelo, o método *Stepwise* é encerrado.

4.3.8.2 Determinação do melhor modelo

A escolha do melhor modelo de predição da biomassa se deu pela aplicação do Akaike *Information* Criterion (AIC) ou Critério de Informação de Akaike (AKAIKE, 1973). AIC é uma pontuação de número único, que pode ser usada para determinar qual dos vários modelos tem maior probabilidade de ser o melhor modelo para um determinado conjunto de dados. Uma pontuação AIC mais baixa indica um modelo melhor dentre outros modelos para o mesmo conjunto de dados. O AIC pode ser aplicado utilizando-se a Equação 32.

$$AIC = -2\ln(L) + 2k \qquad 32$$

Onde:

k = Número de parâmetros do modelo

L = Valor máximo da função de verossimilhança

Após a obtenção do melhor modelo pelo Critério de Informação de Akaike (AIC), foram verificados: os pressupostos de regressão linear múltipla; normalidade dos resíduos; autocorrelação dos resíduos; ausência de heterocedasticidade dos resíduos; ausência de multicolinearidade dos resíduos; e presença de *outliers* nos resíduos.

4.3.8.3 Pressupostos de regressão linear

Após a obtenção do melhor modelo pelo Critério de Informação de Akaike (AIC), foram verificados os pressupostos de regressão linear múltipla, como: normalidade dos resíduos; autocorrelação dos resíduos; ausência de heterocedasticidade dos resíduos; ausência de multicolinearidade entre as variáveis; e presença de *outliers*.

O diagnóstico dos pressupostos de regressão linear pode ser realizado pela observação gráfica ou pela aplicação de testes estatísticos específicos. A interpretação gráfica pode gerar dúvidas e pontos de subjetividade, sendo assim, nesta pesquisa foi adotada a verificação dos pressupostos de regressão pela aplicação de testes estatísticos específicos, embora os gráficos dos modelos de regressão sejam apresentados juntamente com os testes estatísticos.

4.3.8.3.1 Teste de Shapiro-Wilk: normalidade dos resíduos

A normalidade dos resíduos foi verificada pela aplicação do mesmo teste de Shapiro-Wilk, utilizado para verificar a normalidade das amostras nos ortomosaicos e MDS, descrito na seção 4.3.3.3 Teste de Shapiro-Wilk: verificação da normalidade da amostra.

4.3.8.3.2 Teste de Durbin-Watson: autocorrelação dos resíduos

A autocorrelação dos resíduos foi atestada pelo teste de Durbin-Watson, que é um procedimento para provar se os $\hat{e}_t$ (erro estocástico ou perturbação da regressão) estão

correlacionados em série. Quando os $\hat{e}_t$ não independentes apresentam uma correlação em série, o método dos mínimos quadrados pode não dar as melhores estimativas. Neste caso, também não se pode utilizar as distribuições t e F para testar hipóteses ou determinar intervalos de confiança.

O procedimento para determinar se os $\hat{e}_t$ estão correlacionados em série, consiste em calcular o valor de *d* estatístico e comparar com os valores críticos tabelares preparados por Durbin e Watson (1951). O valor de *d* estatístico é dado pela Equação 33.

$$d = \frac{\sum_{t=s}^{n} (\hat{e}_t - \hat{e}_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^{n} \hat{e}_t^2} \tag{33}$$

Foram formuladas duas hipóteses: a hipótese nula H_0 presume que não existe correlação em série quando o valor de *d* é próximo de 2, e a hipótese alternativa H_1 presume que existe correlação positiva em série quando o valor de *d* se aproxima de 0 e existe correlação negativa em série quando o valor de *d* se aproxima de 4. As hipóteses H_0 e H_1 formuladas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Teste de hipótese para verificar a autocorrelação dos resíduos da regressão

H_0		H_1
$d \simeq 2$	Versus	$d \simeq 4$ $d \simeq 0$

Para que os resíduos sejam independentes, recomenda-se que o valor do teste de Durbin-Watson seja próximo de 2,0 e considera-se aceitável um valor entre 1,5 e 2,5 (FIELD, 2009).

4.3.8.3.3 Teste de Breusch-Pagan: heterocedasticidade dos resíduos

A heterocedasticidade significa a relação entre a variabilidade dos erros e as variáveis independentes do modelo (MAIA, 2017). O teste desenvolvido para verificar a heterocedasticidade do modelo de regressão linear foi desenvolvido por Breusch e Pagan (1979), no qual é testado se a variância dos erros de uma regressão é dependente dos valores das variáveis independentes; caso exista essa dependência, a heterocedasticidade é confirmada.

Suponha o modelo de regressão linear múltipla com duas variáveis independentes, dado pela Equação 34.

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + e_i \tag{34}$$

Após ajustar o modelo pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), o teste de Breush-Pagan verifica se seus resíduos quadráticos $\hat{e}_i^2$ possuem relação linear com as variáveis independentes do modelo. Essa relação é definida pelo modelo auxiliar dado pela Equação 35.

$$\hat{e}_i^2 = \delta_0 + \delta_1 X_{1i} + \delta_2 X_{2i} + u_i \tag{35}$$

No teste de Breush-Pagan são formuladas duas hipóteses: a hipótese nula H_0, onde o modelo não possui heterocedasticidade, ou seja, possui homocedasticidade, e a hipótese alternativa H_1, onde o modelo possui heterocedasticidade. As hipóteses H_0 e H_1 formuladas são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Teste de hipótese para verificar a heterocedasticidade do modelo

H_0		H_1
$\delta_1 = \delta_2 = 0$	Versus	$\delta_j \neq 0$

4.3.8.3.4 Ausência de multicolinearidade entre as variáveis independentes

Quando se está trabalhando com uma regressão na qual há mais de uma variável independente, ou seja, uma regressão múltipla, é importante testar se existe multicolinearidade ou alta correlação entre duas variáveis independentes; em outras palavras, a multicolinearidade demonstra uma relação linear entre as variáveis.

Um dos pressupostos para regressão linear múltipla é a ausência de multicolinearidade entre as variáveis, e essa verificação pode ser realizada aplicando-se o *Variance Inflation Factor* (VIF). O VIF mede o quanto a variância (ou erro padrão) do coeficiente de regressão estimado

é inflada devido à colinearidade (SNEE, 1981; VELLEMAN e WELSCH, 1981). O VIF pode ser calculado utilizando-se a Equação 36.

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R^2_i} = \frac{1}{Tolerância} \tag{36}$$

Onde:

R^2_i = Representa o coeficiente de determinação não ajustado para a regressão da $i^{ésima}$ variável dependente.

Tanto o VIF quanto a Tolerância podem ser utilizados para detectar a multicolinearidade.

Se R^2_i for igual a 0, a variância das variáveis independentes restantes não pode ser prevista a partir da $i^{ésima}$ variável dependente. Portanto, quando VIF ou Tolerância é igual a 1, a $i^{ésima}$ variável independente não se correlaciona com as demais, o que significa que não existe multicolinearidade no modelo de regressão. Nesse caso, a variância do $i^{ésimo}$ coeficiente não é inflada.

Um VIF acima de 4 ou tolerância abaixo de 0,25 indica que pode existir multicolinearidade; quando o VIF é maior que 10 ou a tolerância é menor que 0,1, há uma multicolinearidade significativa.

4.3.8.3.5 Ausência de *outliers* nos resíduos

Os *outliers* ou valores discrepantes podem ser identificados utilizando-se a os limites superior e inferior da Faixa Interquartil (FIQ) ou *Interquartile Range* (IQR). FIQ é a distância entre o primeiro quartil (Q_1) e o terceiro quartil (Q_3). Os quartis são as separatrizes que dividem o conjunto em quatro partes iguais, sendo o primeiro quartil o valor do conjunto que delimita os 25% menores valores e o terceiro quartil o valor que delimita os 25% maiores valores.

Um *outlier* é um valor que está acima do limite superior (terceiro quartil mais 1,5 vezes a FIQ) ou abaixo do limite inferior (primeiro quartil mais 1,5 vezes a FIQ). A FIQ e os limites superior e inferior podem ser calculados com as Equações 37, 38 e 39.

$$FIQ = Q_3 - Q_1 \tag{37}$$

$$L_{\sup} = Q_3 + 1{,}5 \times FIQ \tag{38}$$

$$L_{\inf} = Q_1 - 1,5 \times FIQ \tag{39}$$

Espera-se que 68% dos resíduos padronizados estejam no intervalo -1 e +1, e 95% estejam no intervalo -2 e +2. Valores fora do intervalo -3 e +3 são suspeitos. Os resíduos padronizados podem ser calculados pela Equação 40.

$$z_i = \frac{e_i}{\sqrt{QMR}} \tag{40}$$

Onde:

e_i = Resíduo;

QMR = Quadrado médio do resíduo

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados encontrados.

5.1 Análise dos dados da vegetação

A estatística descritiva dos dados da vegetação lenhosa amostrada nas áreas 1 e 2 é apresentada nas tabelas 10 e 11, respectivamente. Estas variáveis foram utilizadas na determinação da biomassa aérea da vegetação lenhosa, conforme Equação 28 proposta por Scolforo *et al.* (2008).

Tabela 10 – Média, desvio padrão, valores máximos e valores mínimos do DAP e altura total dos indivíduos obtidos no inventário realizado na área de estudo 1

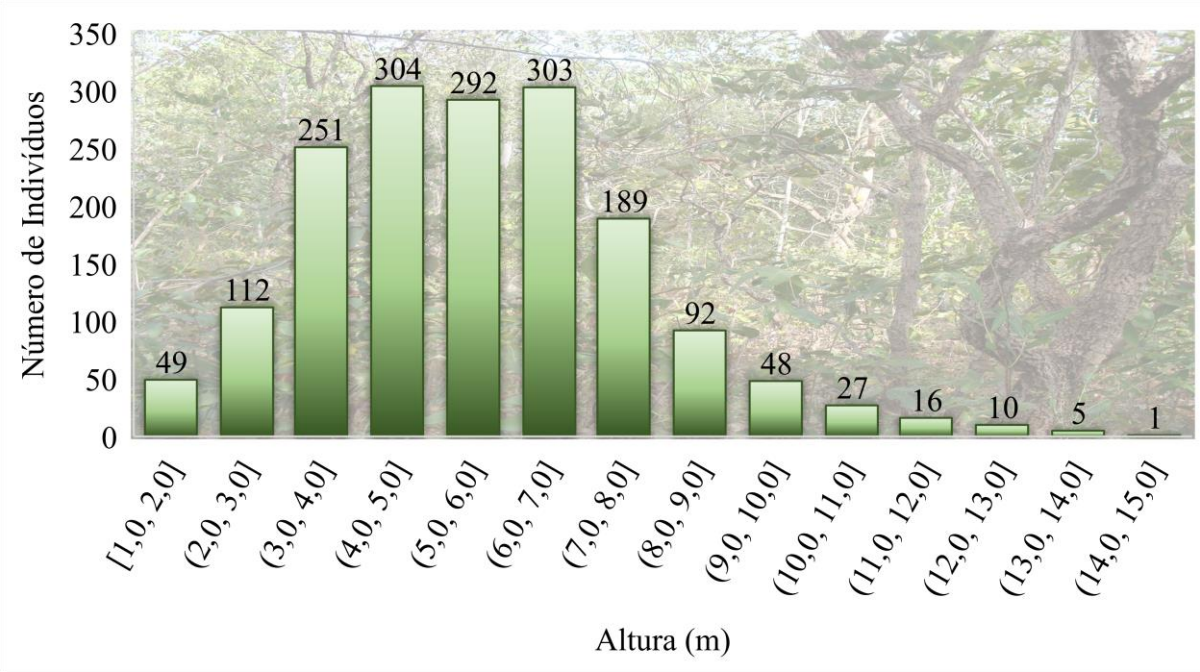
Parcela	Nº. de indiv.	DAP (cm)				Altura total (m)			
		$\bar{X}$	δ	Máx.	Min.	$\bar{X}$	δ	Máx.	Min.
1	260	8,07	4,75	43,70	3,00	6,14	2,27	13,20	1,67
2	182	9,14	6,27	48,00	1,40	5,73	2,07	13,20	1,42
3	140	8,44	5,61	52,00	2,51	5,11	1,85	12,60	1,30
4	157	9,91	7,25	42,30	2,40	5,96	2,32	14,90	1,46
5	185	9,52	5,13	34,67	2,55	6,12	2,18	12,90	1,50
6	153	8,38	5,60	29,41	1,80	5,32	2,08	14,00	1,42
7	157	7,12	4,99	36,74	1,30	5,00	1,82	11,20	1,30
8	140	7,71	4,97	45,50	1,90	4,92	2,02	13,40	1,03
9	165	8,49	6,12	53,30	2,00	5,88	2,22	13,10	1,66
10	160	8,60	5,99	41,40	2,40	5,45	2,03	12,80	1,32
Todas	1.699	8,55	5,71	53,30	1,30	5,62	2,15	14,90	1,03

Fonte: O autor

O valor da média das alturas dos indivíduos nas dez parcelas foi de 5,62 m, com desvio padrão de 2,15 m (Tabela 10). Observa-se, ainda, que houve baixa variação no valor médio das alturas no interior de cada parcela, indicando maior homogeneidade na amostra, confirmada pela variação do valor do desvio padrão da altura de cada parcela. Na Figura 38 é apresentado o histograma com a distribuição dos indivíduos em classes de altura na área de estudo 1, é possível

notar que a maioria dos indivíduos possui altura entre 4 m e 7 m, correspondendo a 52,9% do total. A altura da vegetação apresentou-se mais homogênea enquanto o DAP apresentou um desvio padrão mais próximo do valor da média, indicando sua menor homogeneidade.

Figura 38 – Histograma das classes de altura da vegetação lenhosa obtida com base em levantamento realizado em campo na área de estudo 1



Fonte: O autor

Na área de estudo 2, o valor do DAP variou de 1,90 cm a 49,30 cm, com média de 10,75 cm e desvio padrão de 7,83 cm (Tabela 11), comprovando maior heterogeneidade da amostra. A altura, por sua vez, variou de 2,35 m a 38,00 m, com média de 9,35 m e desvio padrão de 4,52 m, indicando, também, uma amostra heterogênea. Nota-se que na parcela 2 há um indivíduo com 38 m de altura, sendo este muito discrepante dos demais indivíduos, pois em toda a amostra o segundo indivíduo mais alto possui 26 m. Provavelmente houve um equívoco de anotação ou mensuração, porque este indivíduo é cerca de 50% mais alto que o segundo maior indivíduo da amostra.

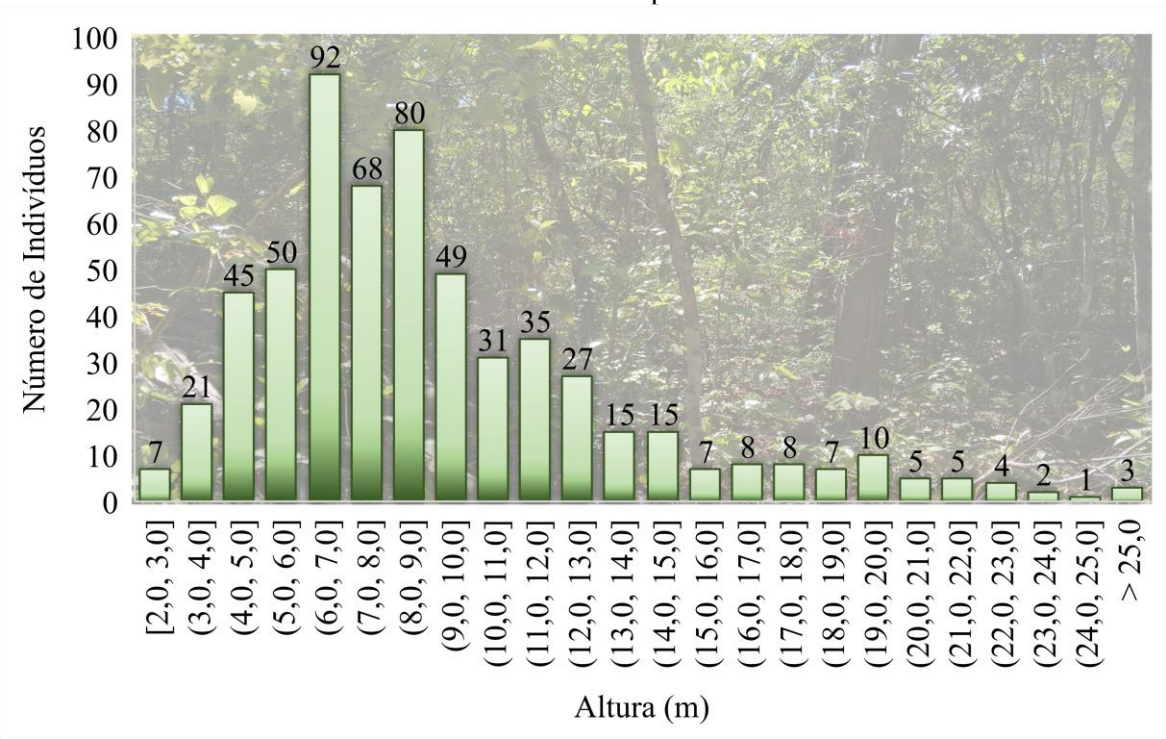
Tabela 11 – Média, desvio padrão, valores máximos e valores mínimos do DAP e altura total dos indivíduos obtidos no inventário realizado na área de estudo 2

Parcela	Nº. de indiv.	DAP (cm)				Altura (m)			
		$\bar{x}$	δ	Máx.	Min.	$\bar{x}$	δ	Máx.	Min.
1	92	10,80	9,16	48,96	3,10	9,10	4,38	22,00	2,35
2	102	11,51	8,37	44,20	3,00	11,30	6,04	38,00	3,00
3	156	9,67	6,22	35,30	1,90	8,18	3,29	19,60	3,00
4	149	10,49	6,92	49,30	3,70	8,94	3,18	19,30	2,50
5	96	12,05	9,29	41,70	3,90	10,05	5,46	26,00	2,50
Todas	595	10,75	7,83	49,30	1,90	9,35	4,52	38,00	2,35

Fonte: O autor

Na Figura 39 é apresentado um histograma da altura da vegetação obtida com o levantamento do inventário florestal na área de estudo 2. É possível notar na Figura 39 que a maioria dos indivíduos possui altura entre 6 m e 9 m, o que corresponde 40,3%. Nota-se nas Figuras 38 e 39 que, pelo comportamento do histograma das alturas da vegetação, elas não possuem distribuição normal.

Figura 39 – Histograma das classes de altura da vegetação lenhosa obtida com base em levantamento realizado em campo na área de estudo 2



Fonte: O autor

Os dados apresentados corroboram a caracterização da vegetação das parcelas realizada em campo (Área 1 = Cerradão Típico e Cerrado Denso; Área 2 = Mata Seca e Cerradão Típico) que refletem, por sua vez, a heterogeneidade espacial típica do Cerrado, portanto são representativas. A área 1 apresentou altura total e diâmetros médios menores em comparação a área 2, onde predomina-se vegetação florestal mais alta.

5.2 Acurácia e precisão dos ortomosaicos e MDS

5.2.1 Área de estudo 1

A área total recoberta pelo aerolevantamento da área de estudo 1 foi de aproximadamente 168 ha (ou 1,68 km^2), e desnível aproximado de 34 metros, sendo o relevo classificado, segundo EMBRAPA (1979), como suave ondulado.

O voo cruzado foi realizado no dia 17 de setembro de 2017, com início às 12 horas, visando minimizar sombras de árvores, com duração aproximada de 28 minutos, e distância total percorrida pelo RPA em 20,113 quilômetros. O bloco fotogramétrico foi composto por 281 fotografias, sendo 155 nas linhas de voo paralelas ao maior comprimento da área (voo longitudinal) e 126 fotografias nas linhas perpendiculares a estas (voo transversal).

Na área 1, o receptor da base foi instalado em um dos marcos de concreto localizado em um vértice, utilizados no georreferenciamento do imóvel rural de propriedade do Sr. Clementino Gomes de Almeida, denominado (MLMO-M-0633), cujos dados foram obtidos no site do Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF) mantido pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), no endereço eletrônico https://sigef.incra.gov.br/. Embora conhecidas, as coordenadas do ponto base foram recalculadas, para garantir a qualidade e confiabilidade dos dados utilizados no processamento dos voos. Este ponto ficou localizado na divisa entre uma área de pastagem e uma área de vegetação savânica, o que ocasionou obstruções do sinal GNSS e possivelmente erro de multicaminhamento. A maior linha de base (distância entre o receptor móvel e o receptor base) foi de 1.541,279 m.

As coordenadas das bases de ambas as áreas de estudo foram determinadas por Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no dia 27 de fevereiro de 2021, com a utilização de efemérides precisas do tipo final disponibilizadas pelo IGS (*International GNSS Service*), de 12 a 18 dias após a data do levantamento. O tempo de ocupação da base foi de 4 horas. O relatório do processamento

pelo método PPP, disponibilizados pelo IBGE, da base da área de estudo 1, encontram-se no Apêndice B.

A posição e a acurácia das 80 primeiras fotografias antes e após a correção de suas posições pelo método PPK encontram-se nos apêndices E e F respectivamente.

Para a verificação do PEC dos ortomosaicos e MDS de ambas as áreas, foram calculadas as discrepâncias entre coordenadas tridimensionais lidas nos ortomosaicos e MDS dos alvos pré-sinalizados utilizados como pontos de verificação com as coordenadas obtidas com receptor de sinais GNSS. As coordenadas obtidas com GNSS foram consideradas como o valor real e, portanto, isentas de erros. Na Tabela 12 são apresentadas as discrepâncias das coordenadas tridimensionais lidas nos ortomosaicos e MDS com aquelas obtidas com GNSS, bem como a média, o desvio padrão, a maior e menor discrepância e a amplitude.

Tabela 12 – Discrepâncias entre as coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados obtidas por receptor de sinais GNSS com as suas homólogas lidas nos ortomosaicos e MDS, com e sem pontos de apoio e PPK, a média, o desvio padrão, a maior e menor discrepância

Alvo	Ortomosaico e MDS sem apoio e sem PPK			Ortomosaico e MDS sem apoio e com PPK			Ortomosaico e MDS com apoio e sem PPK			Ortomosaico e MDS com apoio e com PPK		
	ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh
01	-0,040	0,331	0,803	0,456	-0,699	2,018	-0,019	-0,057	-0,015	-0,036	-0,005	0,041
02	-0,162	0,031	0,403	0,861	-1,294	0,575	-0,030	0,001	-0,039	-0,094	0,065	-0,014
03	-0,047	-0,059	0,262	1,244	-1,723	0,440	-0,021	-0,054	0,092	-0,024	-0,130	-0,110
04	0,088	-0,007	0,135	1,297	-1,654	0,614	-0,012	0,012	0,020	0,010	0,000	-0,043
$\overline{X}$	-0,040	0,074	0,401	0,965	-1,343	0,912	-0,020	-0,025	0,015	-0,036	-0,018	-0,032
δ	0,102	0,175	0,290	0,391	0,468	0,741	0,007	0,036	0,057	0,043	0,082	0,063
Máx.	0,088	0,331	0,803	1,297	-0,699	2,018	-0,012	0,012	0,092	0,010	0,065	0,041
Mín.	-0,162	-0,059	0,135	0,456	-1,723	0,440	-0,030	-0,057	-0,039	-0,094	-0,130	-0,110
Amp.	0,250	0,391	0,668	0,841	1,024	1,578	0,018	0,070	0,131	0,104	0,195	0,151

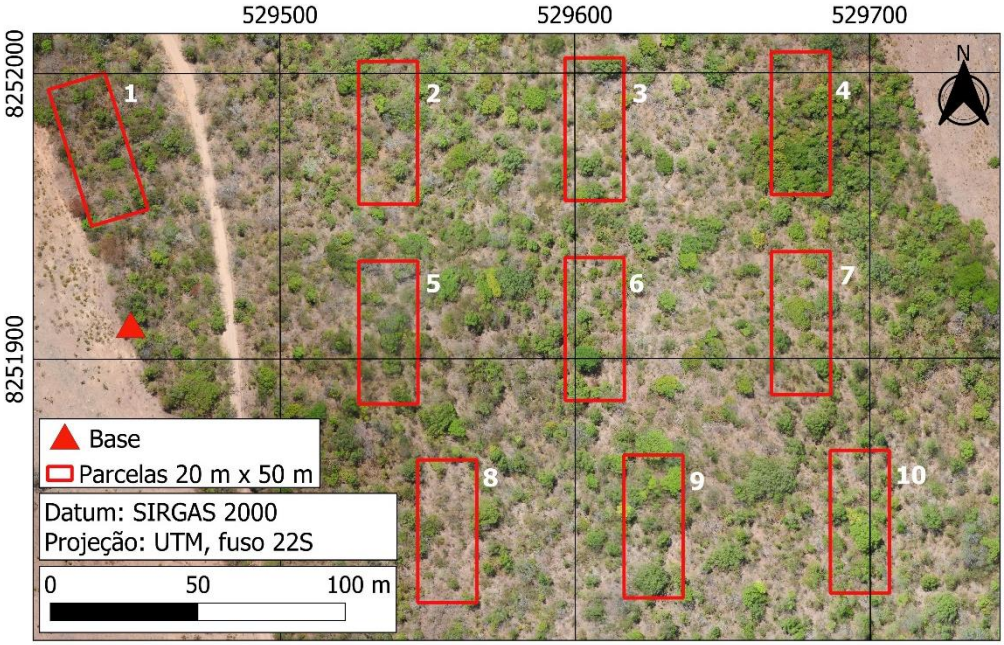
Fonte: O autor

Nota-se na Tabela 12 que os maiores valores da média, desvio padrão e amplitude das discrepâncias das coordenadas N, E e h foram observadas no ortomosaico e MDS sem pontos de apoio e com PPK; já os menores valores da média, desvio padrão e amplitude das coordenadas planialtimétricas foram observados no ortomosaico e MDS com pontos de apoio e sem PPK.

Esperava-se que o pior resultado fosse obtido no ortomosaico e MDS sem pontos de apoio e sem PPK, pois a posição da câmera foi obtida pelo método de posicionamento absoluto (GNSS a bordo do RPAS), cuja precisão é randômica, variando de 1 a 5 m; porém, não foi o

que aconteceu. Este fato pode ser explicado devido a posição ruim do receptor instalado no ponto da base, que sofreu obstrução dos sinais GNSS e erro de multicaminhamento devido a sua localização muito próxima da vegetação, conforme pode ser observado na Figura 40.

Figura 40 – Localização do ponto base na área de estudo 1



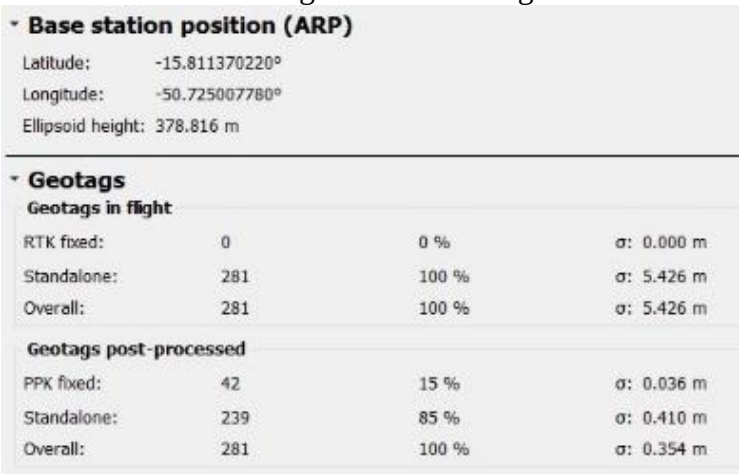
Fonte: O autor

Ao obter as coordenadas do ponto da base por PPP, observa-se que o resultado do processamento foi preciso ($\sigma_N = 0,008$, $\sigma_E = 0,015$ e $\sigma_h = 0,032$, Apêndice B), porém as mesmas não foram acuradas.

Ao realizar a aerotriangulação, as coordenadas da câmera obtidas pelo método de posicionamento PPK são fixadas, podendo sofrer variação igual ou menor que o desvio padrão calculado, conforme apresentado na Figura 41. Na Figura 41 são apresentados o resumo da acurácia antes e após a correção pelo método PPK, além do número total de fotografias do bloco aerofotogramétrico e a porcentagem de fotografias corrigidas.

Nota-se na Figura 40 que apenas 15% das fotografias do bloco aerofotogramétrico ficaram com desvio padrão inferior a 0,04 m e 85% ficaram com desvio padrão superior a 0,4 m.

Figura 41 – Valor do desvio padrão das coordenadas do centro das fotografias da área de estudo 1, antes geotags in flight e após geotags post-processed e do georreferenciemento das fotografias no Postflight



Base station position (ARP)

Latitude:	-15.811370220°
Longitude:	-50.725007780°
Ellipsoid height:	378.816 m

Geotags

Geotags in flight

RTK fixed:	0	0 %	σ: 0.000 m
Standalone:	281	100 %	σ: 5.426 m
Overall:	281	100 %	σ: 5.426 m

Geotags post-processed

PPK fixed:	42	15 %	σ: 0.036 m
Standalone:	239	85 %	σ: 0.410 m
Overall:	281	100 %	σ: 0.354 m

Fonte: O autor

A aerotriangulação tem por objetivo determinar a posição e atitude da câmera, além de transformar as coordenadas dos pontos de passagem (*tie points*) lidos no espaço imagem para o espaço objeto. Neste processo, pode-se também realizar a calibração da câmera; neste caso, a calibração é denominada calibração em trabalho (*on-the-job calibration*). Se a posição da câmera (orientação exterior) for determinada com precisão adequada ao aerolevantamento, não haveria necessidade de aerotriangulação (ANDRADE, 1998).

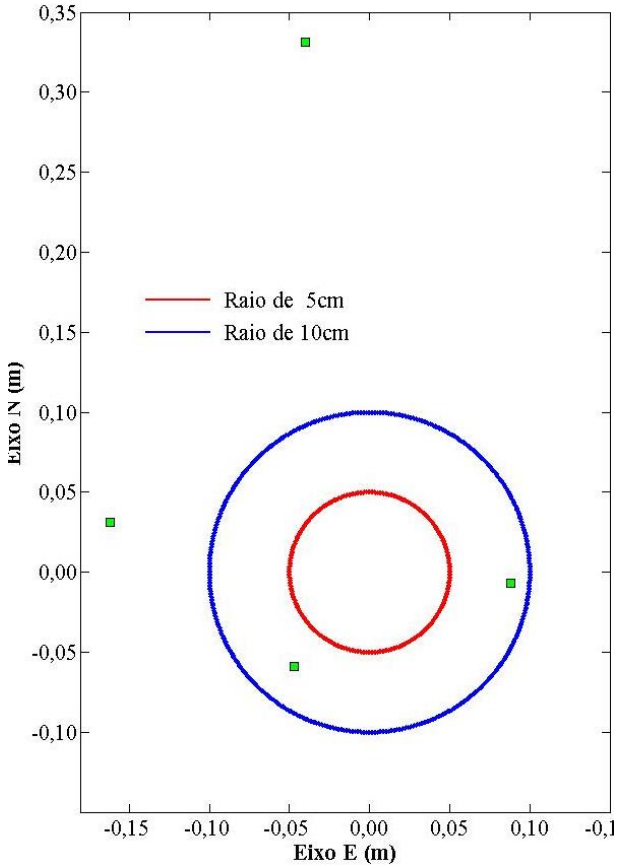
A posição da câmera no espaço objeto possui seis graus de liberdade, sendo três translações e três rotações; assim, um modelo fotogramétrico, ou seja, um estéreo par, possui doze graus de liberdade. A orientação relativa ocorre quando cinco dos graus de liberdade são determinados e os demais sete são usados para determinar a orientação absoluta (LUGNANI, 1987). Ao usar o georreferenciamento direto, ou seja, utilizar os *geotags* no georreferenciamento das fotografias, a posição da câmera é determinada e fixada, permitindo somente o ajuste da atitude (κ , ω , ρ) para realizar o modelo fotogramétrico. Desse modo, se as coordenadas obtidas no georreferenciamento direto não forem compatíveis com o aerolevantamento, ao realizar a aerotriangulação as coordenadas dos pontos de passagem ou homólogos terão sua posição e altitude determinadas erroneamente devido ao ajuste dos feixes de raios. Isto também explica o fato de o melhor resultado esperado (ortomosaico e MDS com apoio e com PPK) não ter sido alcançado. Os valores de discrepância e estatística do ortomosaico e MDS sem apoio e com PPK e do ortomosaico e MDS com apoio e com PPK podem ser observados na Tabela 12.

O ortomosaico com apoio e sem PPK apresentou os melhores resultados com maior uniformidade de dados, ou seja, possui menor variação amostral. Isso pode ser comprovado analisando-se as amplitudes e o desvio padrão das discrepâncias das amostras.

Para avaliar a precisão obtida em cada ortomosaico em relação ao GSD, foram gerados os gráficos representados na Figura 42 com os dados das discrepâncias planimétricas obtidas na Tabela 12. Nessa figura, o círculo maior, representado na cor azul, corresponde ao dobro do valor do GSD executado (10 cm), enquanto o círculo menor, representado na cor vermelha, corresponde ao valor do GSD (5 cm). Ressalta-se que ambos os ortomosaicos e MDS possuem os mesmos 4 pontos de verificação.

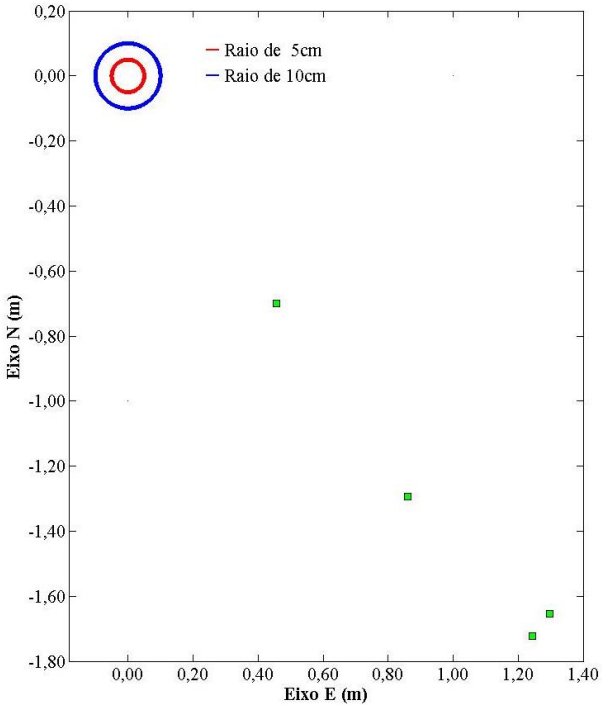
Figura 42 – Representação das discrepâncias planimétricas calculadas nos pontos de verificação ou pontos de checagem nos ortomosaicos da área de estudo 1

Discrepância planimétrica sem pontos de apoio e sem PPK



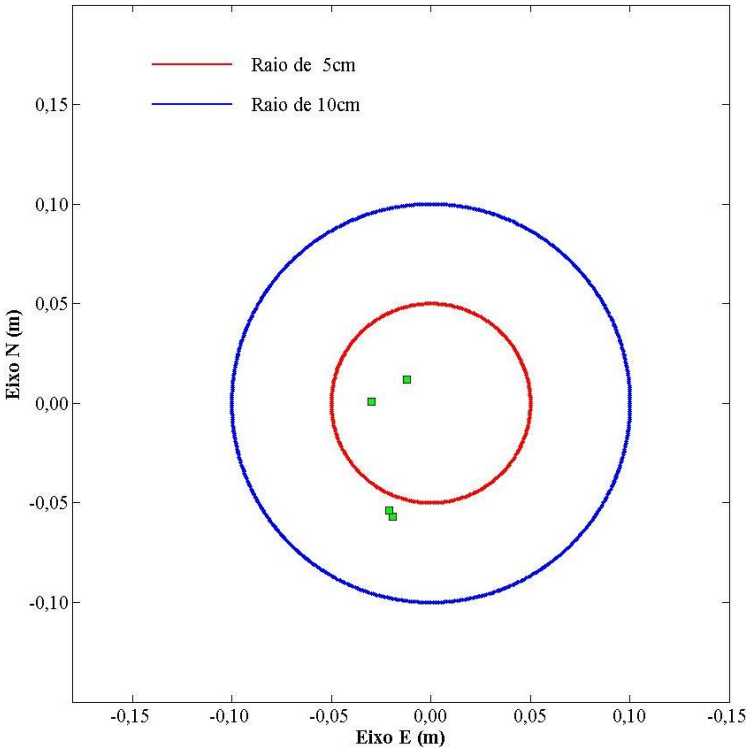
(a)

Discrepância planimétrica sem pontos de apoio e com PPK



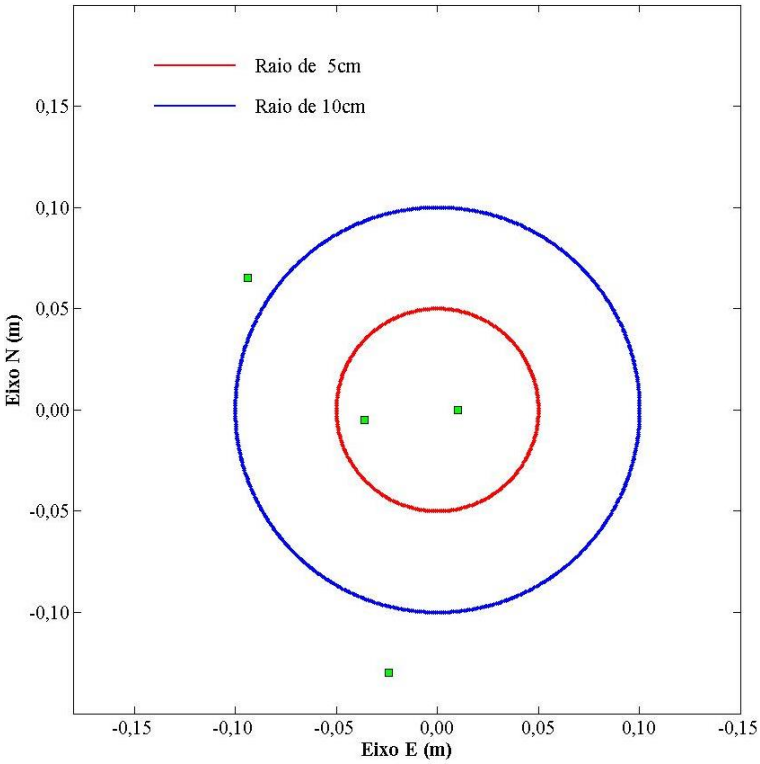
(b)

Discrepância planimétrica com pontos de apoio e sem PPK



(c)

Discrepância planimétrica com pontos de apoio e com PPK



(d)

Fonte: O autor

Ao analisar os gráficos das discrepâncias planimétricas, observa-se que no ortomosaico gerado sem pontos de apoio e sem PPK (Figura 42a), a posição da câmera foi obtida por posicionamento absoluto do sistema GNSS, utilizando a fase da onda portadora L1 e L2 e, portanto, sua precisão é aleatória, variando de 0 a 5 metros. As discrepâncias representadas possuem distribuição aleatória e apresentou dois valores entre uma e duas vezes o tamanho do GSD e os outros dois pontos com discrepância de até sete vezes o tamanho do GSD. Tal precisão pode não se repetir devido a aleatoriedade da posição da câmera obtida por este método de posicionamento.

O ortomosaico sem pontos de apoio e com PPK (Figura 42b,) foi o que apresentou as maiores discrepâncias planimétricas contrariando a literatura (VOLPATO *et al.*, 2021; ZANG *et al.*, 2019; ROSALEN e AMAZONAS, 2019; BRILL *et al.*, 2019; PADRÓ *et al.*, 2019; GRAYSON *et al.*, 2018). As discrepâncias representadas indicam que o ortomosaico apresentou um deslocamento no sentido sudoeste (SW) com azimute de aproximadamente 135°.

No ortomosaico gerado com pontos de apoio e sem PPK (Figura 42c), observa-se que as discrepâncias foram menores, sendo dois pontos com discrepância inferior ao tamanho do GSD

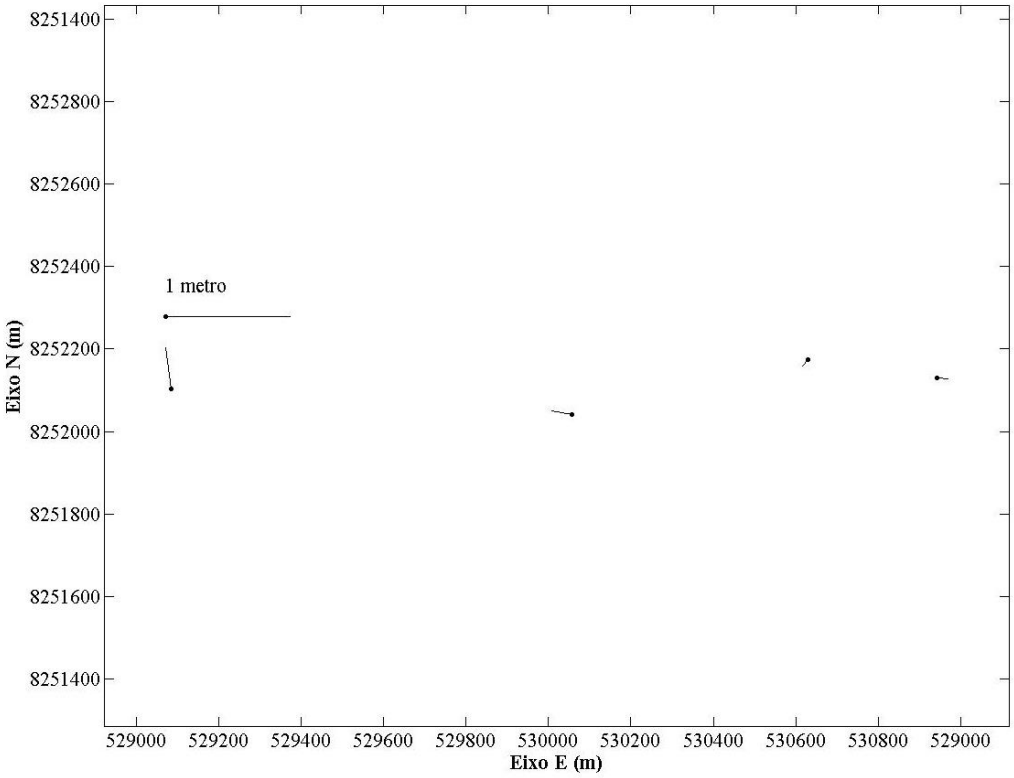
e dois pontos com discrepância próxima de 6 cm, ou seja, inferior a uma vez e meia o tamanho do GSD.

No ortomosaico gerado com pontos de apoio e com PPK (Figura 42d), observa-se que as discrepâncias continuaram menores, sendo dois pontos com discrepância inferior ao tamanho do GSD e dois pontos com discrepância entre duas e três vezes o tamanho do GSD, sendo este resultado influenciado pelas coordenadas obtidas com PPK.

Em função das discrepâncias planimétricas calculadas para cada ortomosaico, foram gerados os vetores representados na Figura 43. Os vetores possuem formato de um alfinete, onde a cabeça representa a posição real e a ponta a posição no ortomosaico, para melhor visualização, as discrepâncias foram ampliadas em 300 vezes. A análise desses vetores possibilita identificar a direção, o sentido e a intensidade das discrepâncias.

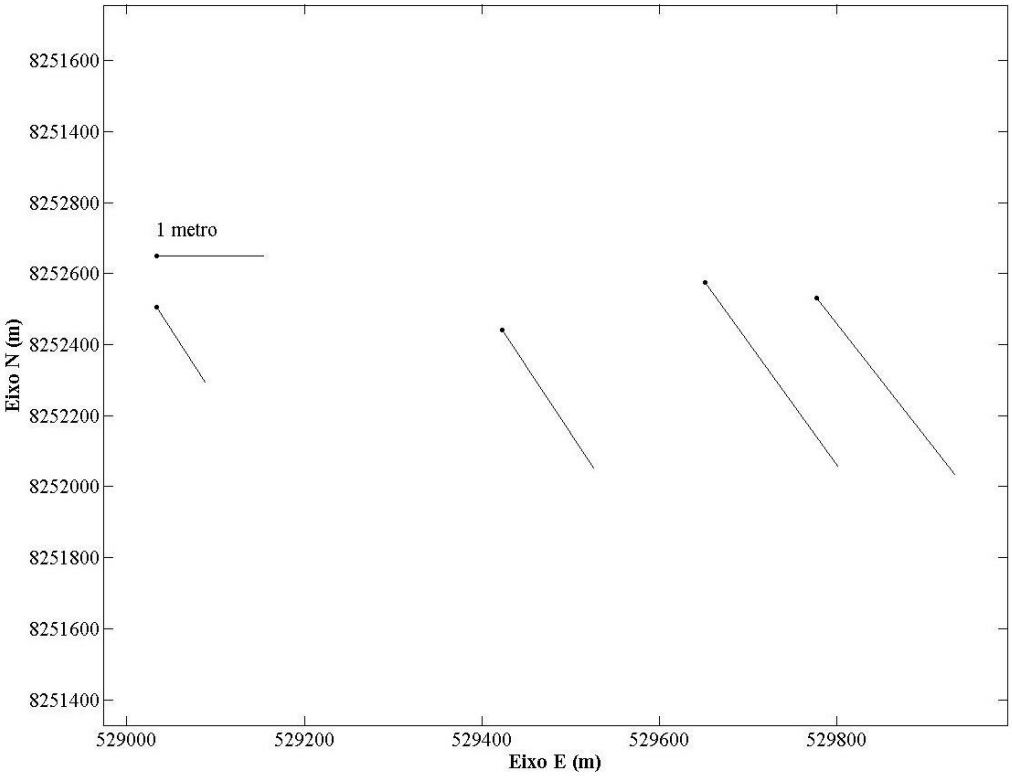
Figura 43 – Vetor das discrepâncias planimétricas calculadas para cada ortomosaico da área de estudo 1

Ortomosaico sem pontos de apoio e sem PPK



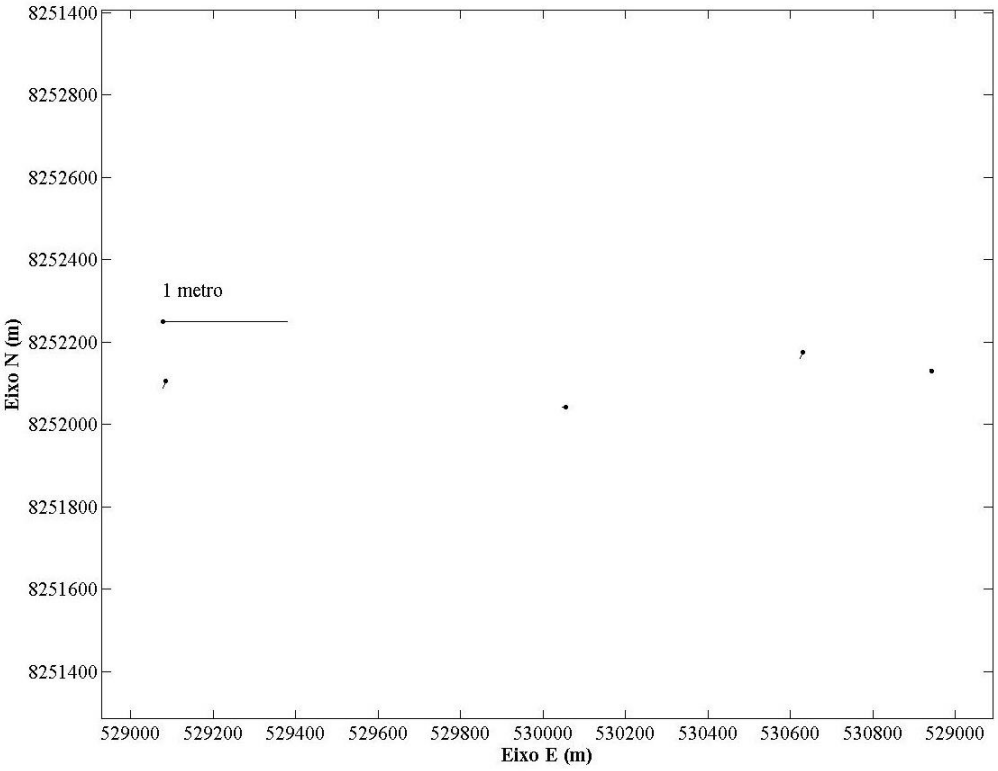
(a)

Ortomosaico sem pontos de apoio e com PPK



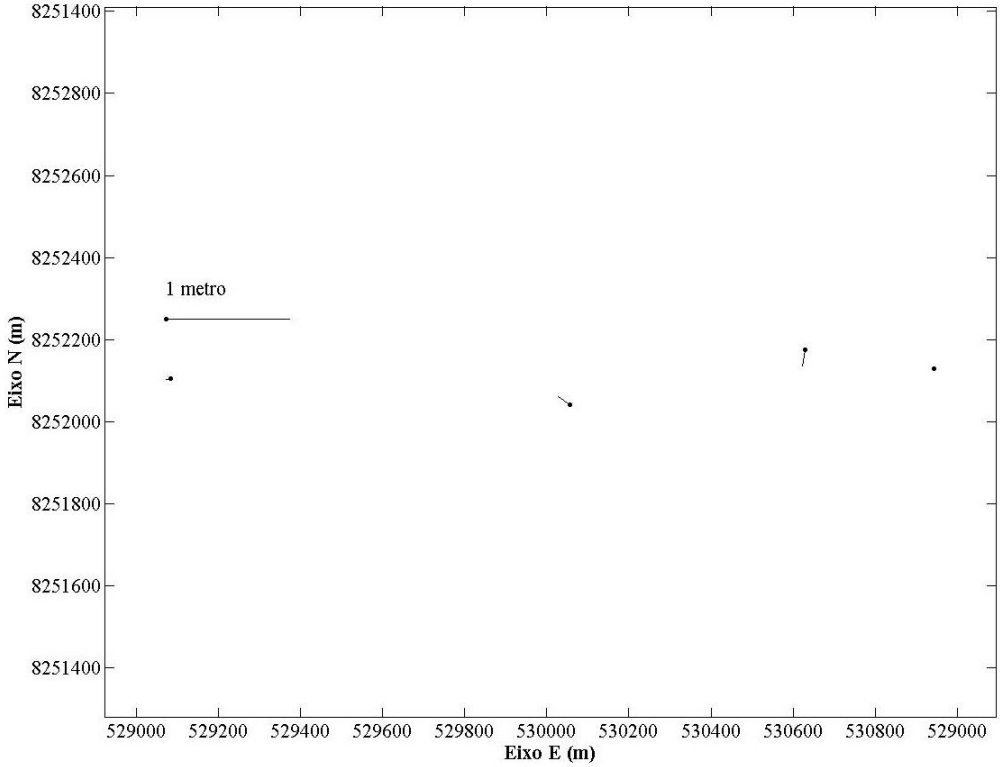
(b)

Ortomosaico com pontos de apoio e sem PPK



(c)

Ortomosaico com pontos de apoio e com PPK

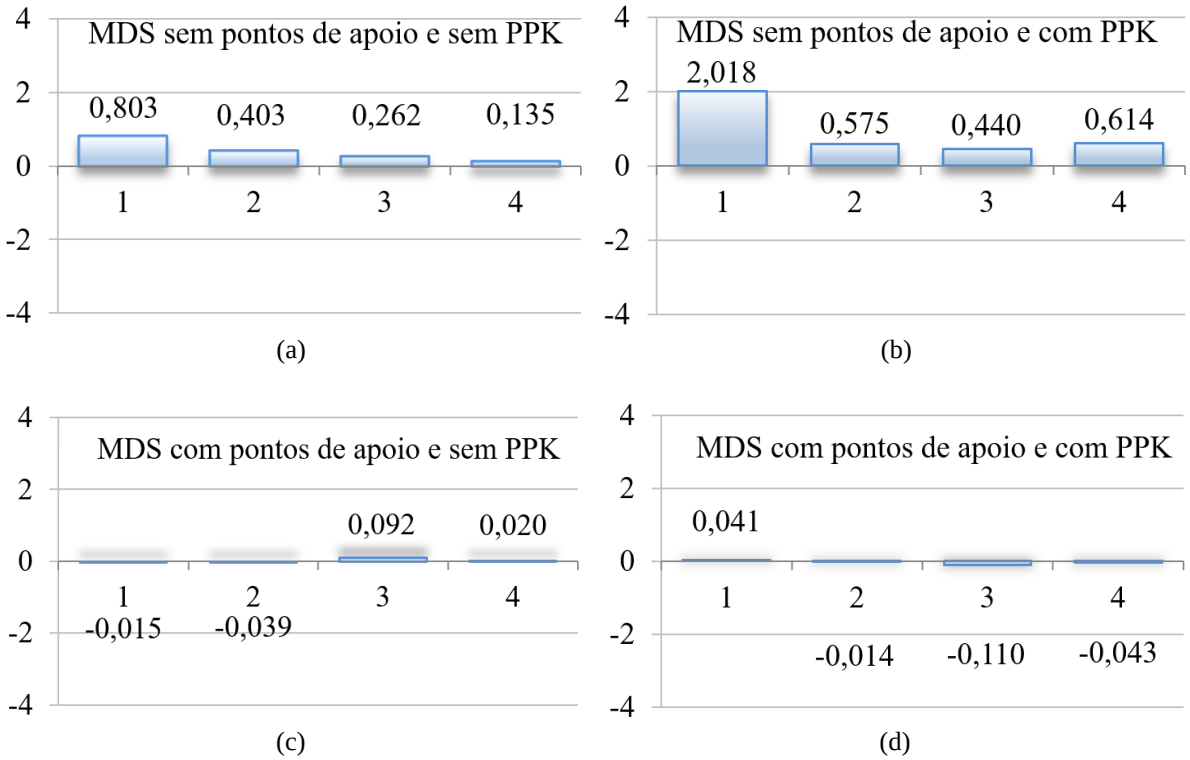


(d)
Fonte: O autor

Ao analisar os vetores dos ortomosaicos da Figura 43, fica evidente que a intensidade das discrepâncias foi maior no ortomosaico gerado sem pontos de apoio e com PPK (Figura 43b). Nota-se que os vetores apresentaram uma direção predominante (sudoeste e azimute de 135°) e intensidade (comprimento) variando de 0,84 a 2,13 metros. Analisando a Figura 43b, ficou notório a presença de tendenciosidade neste ortomsaico. A tendenciosidade é igual a média da intensidade, neste caso com valor de 1,65 metros. Para corrigir a tendenciosidade, deve-se deslocar o ortomosaico +1,34 metros no eixo N e –0,97 metros no eixo E, ou seja, no sentido inverso ao da tendenciosidade (noroeste e azimute de 315°).

Nas demais Figuras (43a, 43c e 43d), os vetores da discrepância apresentaram distribuição aleatória tanto na direção como no sentido. Portanto, não foi possível analisar visualmente a presença ou não de tendenciosidade. Na Figura 44 estão representados os gráficos das discrepâncias altimétricas obtidas entre as altitudes do MDS com e sem pontos de apoio, e com e sem PPK.

Figura 44 – Representação das discrepâncias altimétricas calculadas nos pontos de verificação nos MDS da área de estudo 1



Fonte: O autor

Observa-se nas Figura 44a e 44b que é notória a tendência nas discrepâncias da altitude nos MDS sem pontos de apoio e sem PPK, e sem pontos de apoio e com PPK, com elevação média de 0,40 m e 0,91 m respectivamente.

Ao analisar o gráfico das discrepâncias altimétricas do MDS gerado com pontos de apoio e sem PPK (Figura 44c), nota-se que a superfície de referência altimétrica foi elevada em média 0,015 m. Sendo que na Figura 44d observou-se que o MDS gerado com pontos de apoio e com PPK foi rebaixado em média -0,032 m. Em ambos os MDS, não foi possível identificar visualmente a presença ou não de tendenciosidade, pois os valores das médias das discrepâncias altimétricas ficaram próximas de zero.

A análise da precisão planimétrica foi realizada comparando-se o desvio padrão das discrepâncias, em ambos os eixos (E e N), com o desvio padrão esperado. Com os dados das discrepâncias nos quatro ortomosaicos, realizou-se o cálculo do qui-quadrado, considerando-se uma carta com PEC-PCD Classe A na escala de **1/250** para o ortomosaico com pontos de apoio e sem PPK, **1/500** para o ortomosaico com pontos de apoio e com PPK, **1/1.250** para o ortomosaico sem pontos de apoio e sem PPK, e **1/3.000** para o ortomosaico sem pontos de apoio

e com PPK. Esses valores são apresentados na Tabela 13. O qui-quadrado tabelado foi determinado com nível de confiança de 90% com 3 graus de liberdade.

Tabela 13 – Qui-amostrais calculados para os eixos E e N e qui-quadrado tabelado $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 3$ da área de estudo 1

Ortomosaico	$\hat{\chi}^2 \Delta E$	$\hat{\chi}^2 \Delta N$	υ	$\chi^{2(n-1)}_{\alpha}$	Escala	ET	EP	Classificação Planimétrica
Sem apoio e sem PPK	1,38	4,09	3	6,25	1/1.250	0,35	0,21	Classe A
Sem apoio e com PPK	3,52	5,06	3	6,25	1/3.000	0,84	0,51	Classe A
Com apoio e sem PPK	0,19	4,38	3	6,25	1/250	0,07	0,04	Classe A
Com apoio e com PPK	1,55	5,54	3	6,25	1/500	0,14	0,09	Classe A

Fonte: O autor
Nota: ET = Erro no terreno
EP = Erro padrão

Analisando o qui-quadrado da Tabela 13, verifica-se que o qui-quadrado tabelado é maior que o qui-quadrado calculado para os dois eixos (E e N), nos quatro ortomosaicos gerados. Portanto, pode-se dizer que esses ortomosaicos atendem ao PEC-PCD com nível de confiança de 90%, com Classe A para as escalas testadas. O relatório do processamento do ortomosaico que apresentou a maior escala de restituição PEC-PCD Classe A 1/250 (com pontos de apoio e sem PPK) encontra-se no apêndice K.

A análise da precisão altimétrica foi realizada comparando-se o desvio padrão das discrepâncias, do eixo h com o desvio padrão da melhor equidistância entre as curvas de nível considerando PEC-PCD Classe A.

Utilizando os dados obtidos no relatório de processamento do ortomosaico da área de estudo 1 com a maior escala classe A PEC-PCD (Apêndice K), determinou-se a base aerofotogramétrica e a altura de voo, sendo determinada a precisão altimétrica esperada obtida com a aplicação da Equação 26. Na Tabela 14 são apresentados os valores do qui-quadrado calculado, o grau de liberdade, o qui-quadrado tabelado, a precisão altimétrica esperada, a melhor equidistância entre curvas de nível, o erro tolerável no terreno, o erro padrão e a classificação do MDS.

Tabela 14 – Qui-amostrais calculados para o eixo h e qui-quadrado tabelado $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 3$ da área de estudo 1

MDS	$\hat{\chi}^2 \Delta h$	υ	$\chi^{2(n-1)}_{\alpha}$	PAE	EQ	ET	EP	Classificação Altimétrica
Sem apoio e sem PPK	6,15	3	6,25	0,09	1,19	0,32	0,20	Classe A
Sem apoio e com PPK	6,25	3	6,25	0,09	3,02	0,82	0,51	Classe A
Com apoio e sem PPK	6,05	3	6,25	0,09	0,24	0,06	0,04	Classe A
Com apoio e com PPK	5,85	3	6,25	0,09	0,26	0,07	0,04	Classe A

Fonte: O autor
Nota: PAE = Precisão altimétrica esperada
EQ= Equidistância entre curvas de nível
ET = Erro no terreno
EP = Erro padrão

Nota-se na Tabela 14 que nos MDS gerados com pontos de apoio e sem PPK, e com pontos de apoio e com PPK, o erro padrão foi inferior ou igual ao PAE para uma equidistância entre curvas de nível de 0,24 m e 0,26 m, respectivamente, ou seja, para uma amostra de pontos coletadas nestes MDS, 90% dos pontos terão um erro altimétrico de 0,06 m para o MDS gerado com apoio e sem PPK, e 0,07 m para o MDS gerado sem apoio e com PPK, e desvio padrão de 0,04 m. Já os MDS gerados sem pontos de apoio e sem PPK, e sem apoio o com PPK, o erro padrão foi superior ao PAE para uma equidistância entre curvas de nível de 1,19 m e 3,02 m, respectivamente.

A tendência pode ser verificada analisando se o valor da média pode ser estatisticamente considerado igual a zero. Essa análise foi realizada pela distribuição do teste t de Student, observando-se as hipóteses propostas na Tabela 6. Se o valor tabelado para a distribuição do teste t de Student for maior que o calculado, aceita-se a hipótese que a média das discrepâncias pode ser considerada estatisticamente igual a zero. Na análise planimétrica, caso o ortomosaico apresente tendenciosidade no eixo E ou N, o produto é considerado tendencioso.

Os valores calculados para a distribuição do teste t de Student, com nível de confiança de 90% e 3 graus de liberdade, incluindo as discrepâncias de cada ortomosaico e MDS, são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Cálculo dos valores da distribuição do teste t de Student para cada ortomosaico e MDS ($\alpha = 90\%$, $\upsilon = 3$) da área de estudo 1

Ortomosaico e MDS	$\hat{t}_{\alpha}^{(n-1)}\Delta E$	$\hat{t}_{\alpha}^{(n-1)}\Delta N$	$\hat{t}_{\alpha}^{(n-1)}\Delta h$	υ	$t_{\alpha}^{(n-1)}$	Classificação	
						Planimétrica	Altimétrica
Sem apoio e sem PPK	0,68	0,73	2,40	3	2,35	Sem tendência	Com tendência
Sem apoio e com PPK	4,27	4,97	2,13	3	2,35	Com tendência	Sem tendência
Com apoio e sem PPK	4,74	1,17	0,44	3	2,35	Com tendência	Sem tendência
Com apoio e com PPK	1,46	0,38	0,87	3	2,35	Sem tendência	Sem tendência

Fonte: O autor

Analisando a Tabela 15, percebe-se que, nos ortomosaicos gerados sem ponto de apoio e sem PPK, e no ortomosaico gerado com pontos de apoio e com PPK, os valores do teste t de Student calculados foram inferiores ao tabelado nos eixos E e N; portanto, esses ortomosaicos não apresentaram tendenciosidade planimétrica. Sendo que o ortomosaico sem pontos de apoio e com PPK apresentou tendenciosidade planimétrica de 1,65 m e o ortomosaico com pontos de apoio e sem PPK apresentou tendenciosidade de 0,04 m.

Ainda na Tabela 15, nota-se que somente o MDS gerado sem pontos de apoio e sem PPK apresentou tendenciosidade altimétrica, elevando a superfície de referência altimétrica em 0,4 m. Portanto, o melhor produto cartográfico (ortomosaico e MDS) foi o gerado com pontos de apoio e com PPK, apesar da menor escala de restituição ter sido obtida no ortomosaico com pontos de apoio e sem PPK.

5.2.2 Área de estudo 2

A área total recoberta pelo aerolevantamento da área de estudo 2 foi de aproximadamente 180 ha (ou 1,8 km^2), e desnível aproximado de 77 metros, sendo o relevo classificado segundo EMBRAPA (1979) como suave ondulado.

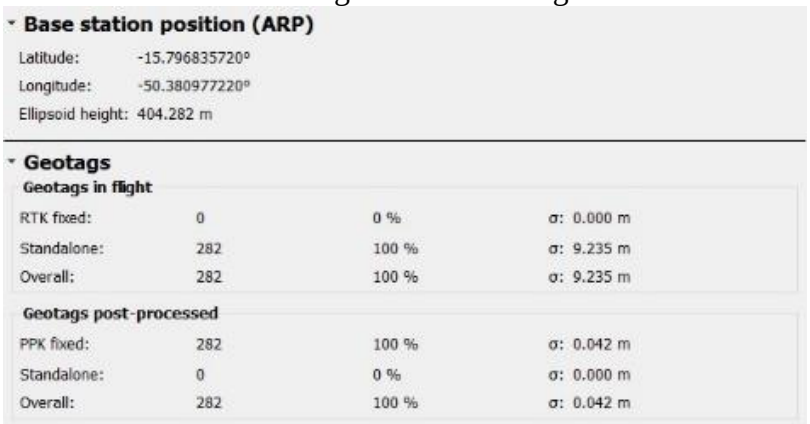
O sobrevoo desta área (com RPAS) foi realizado no dia 13 de setembro de 2018, com início às 12 horas, visando minimizar sombras de árvores, com duração aproximada de 36 minutos e distância total percorrida de 26,7 quilômetros. O bloco fotogramétrico foi composto por 282 fotografias, sendo 163 fotografias nas linhas de voo paralelas ao maior comprimento da área (voo longitudinal) e 119 fotografias nas linhas perpendiculares a estas (voo transversal).

Na área 2, o receptor da base foi instalado em um ponto aleatório escolhido para que não houvesse obstruções do sinal GNSS ou erro de multicaminhamento. A maior linha de base (distância entre o receptor móvel e o receptor base) foi de 1.934,54 m.

Assim como na área 1, as coordenadas da base da área 2 também foram determinadas por Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), no site do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). O relatório do processamento pelo método PPP, disponibilizados pelo IBGE, encontram-se no Apêndice C.

A posição e a acurácia das 80 primeiras fotografias, antes e após a correção de suas posições pelo método PPK, encontram-se nos apêndices G e H, respectivamente. Na Figura 45 são apresentados o resumo da acurácia, antes a após a correção pelo método PPK, além do número total de fotografias do bloco aerofotogramétrico e a porcentagem de fotografias corrigidas.

Figura 45 – Valor do desvio padrão das coordenadas do centro das fotografias da área de estudo 2, antes geotags in flight e após geotags post-processed, com o georreferenciamento das fotografias no Postflight



Base station position (ARP)

Latitude:	-15.796835720°
Longitude:	-50.380977220°
Ellipsoid height:	404.282 m

Geotags

Geotags in flight

RTK fixed:	0	0 %	σ: 0.000 m
Standalone:	282	100 %	σ: 9.235 m
Overall:	282	100 %	σ: 9.235 m

Geotags post-processed

PPK fixed:	282	100 %	σ: 0.042 m
Standalone:	0	0 %	σ: 0.000 m
Overall:	282	100 %	σ: 0.042 m

Fonte: O autor

Nota-se na Figura 45 que 100% das fotografias do bloco aerofotogramétrico apresentaram acurácia inferior ao tamanho do GSD.

Na Tabela 16 são apresentadas as discrepâncias entre as coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados obtidas por receptor de sinais GNSS com as suas coordenadas homólogas lidas nos ortomosaicos e MDS, com e sem pontos de apoio, e com e sem PPK, bem como a média, o desvio padrão, a maior e menor discrepância e a amplitude da área de estudo 2.

Tabela 16 – Discrepâncias entre as coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados obtidas por receptor de sinais GNSS com as suas homólogas lidas nos ortomosaicos e MDS, com e sem pontos de apoio e PPK, e média, o desvio padrão, a maior e menor discrepância

Alvo	Ortomosaico e MDS sem apoio e sem PPK			Ortomosaico e MDS sem apoio e com PPK			Ortomosaico e MDS com apoio e sem PPK			Ortomosaico e MDS com apoio e com PPK		
	ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh
01	-0,627	-0,089	-0,306	-0,010	0,036	0,327	-0,034	0,011	0,167	-0,036	0,026	0,179
02	-0,557	-0,038	-0,373	-0,053	0,030	0,278	-0,056	0,000	0,137	-0,054	-0,004	0,076
03	-0,718	-0,020	-0,068	-0,011	0,037	0,224	-0,022	0,024	0,044	0,000	0,006	0,030
04	-0,626	0,013	-0,010	-0,054	0,034	0,176	-0,027	0,034	0,007	-0,031	0,030	-0,028
05	-0,522	-0,020	-0,185	0,000	0,028	0,215	-0,023	-0,017	0,058	-0,021	0,027	-0,016
06	-0,489	-0,018	-0,396	-0,072	0,016	0,257	-0,068	0,067	0,100	-0,082	0,040	0,044
07	-0,426	-0,038	-0,482	-0,048	-0,003	0,178	-0,032	0,017	-0,062	-0,012	-0,027	-0,082
08	-0,482	-0,031	-0,594	-0,100	-0,003	0,189	-0,088	-0,009	0,023	-0,083	-0,018	-0,079
09	-0,334	-0,032	-0,380	0,007	-0,010	0,144	0,036	-0,004	-0,111	0,036	0,011	-0,031
10	-0,182	0,125	-0,228	0,015	0,041	0,119	0,072	0,077	-0,083	0,043	0,077	-0,009
11	-0,225	0,111	-0,195	-0,003	0,017	0,141	0,030	0,034	-0,284	0,034	0,026	-0,038
12	-0,193	0,076	-0,126	0,031	0,013	0,179	0,041	0,013	-0,292	-0,022	0,059	0,004
13	0,249	0,084	0,560	-0,040	-0,001	0,187	-0,010	0,039	-0,177	-0,016	0,034	-0,037
$\bar{X}$	-0,395	0,009	-0,214	-0,026	0,018	-0,201	-0,014	0,022	-0,036	-0,036	-0,036	0,001
δ	0,259	0,067	0,286	0,038	0,018	0,059	0,047	0,028	0,149	0,149	0,149	0,070
Máx.	0,249	0,125	0,560	0,031	0,041	-0,119	0,072	0,077	0,167	0,167	0,167	0,179
Mín.	-0,718	-0,089	-0,594	-0,100	-0,010	-0,327	-0,088	-0,017	-0,292	-0,292	-0,292	-0,082
Amp.	0,966	0,214	1,154	0,131	0,051	0,208	0,160	0,094	0,458	0,127	0,103	0,260

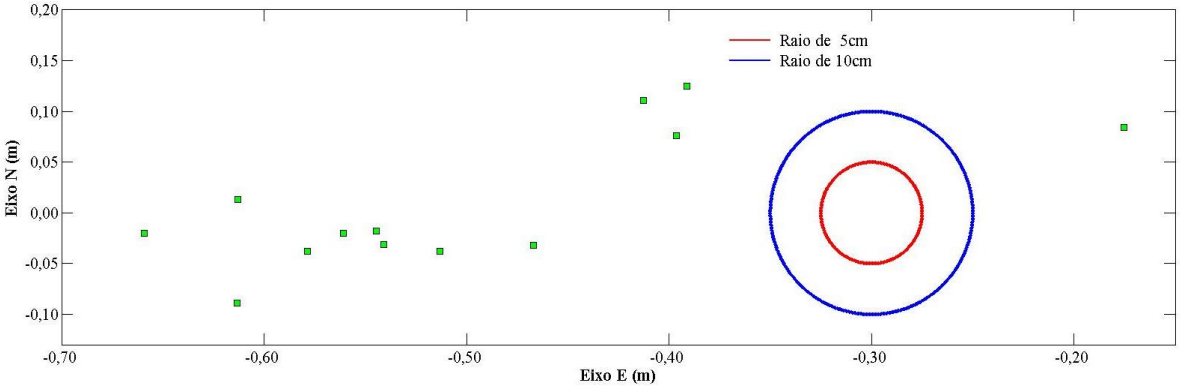
Fonte: O autor

Como esperado, nota-se na Tabela 16 que os maiores valores da média, desvio padrão e amplitude das discrepâncias das coordenadas N, E e h foram observadas no ortomosaico e MDS sem apoio e sem PPK; já os menores valores do desvio padrão e amplitude das coordenadas planialtimétricas foram observados no ortomosaico e MDS sem apoio e com PPK, portanto esta foi a amostra mais homogênea. No entanto, as menores médias das discrepâncias planimétricas foram observadas no ortomosaico com pontos de apoio e sem PPK.

Para avaliar a precisão obtida em cada ortomosaico em relação ao GSD da área 2, foram gerados os gráficos representados na Figura 46 com os dados das discrepâncias planimétricas obtidas na Tabela 16. Nessa figura, o círculo maior, representado na cor azul, corresponde ao dobro do valor do GSD executado (10 cm), enquanto o círculo menor, representado na cor vermelha, corresponde ao valor do GSD (5 cm). Ressalta-se que ambos os ortomosaicos e MDS possuem os mesmos 13 pontos de verificação.

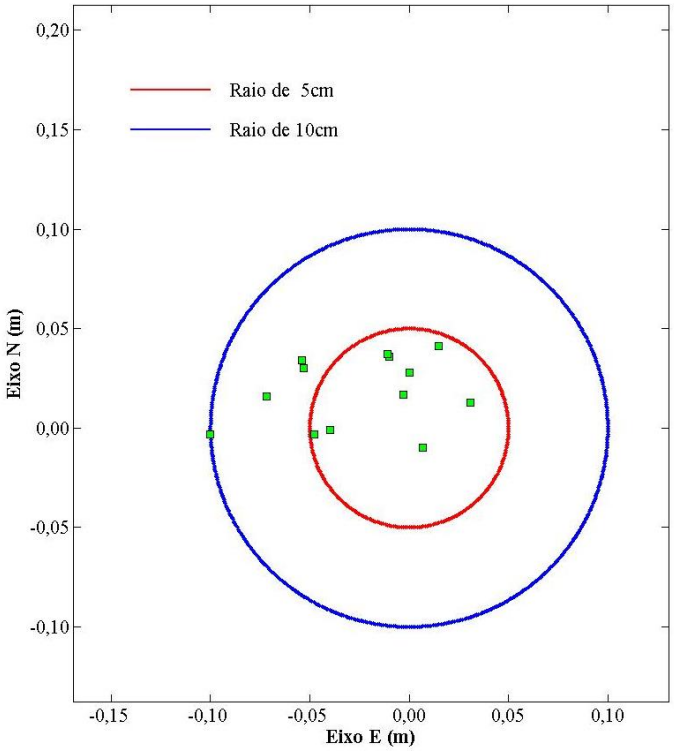
Figura 46 – Representação das discrepâncias planimétricas calculadas nos pontos de verificação ou pontos de checagem nos ortomosaicos da área de estudo 2

Discrepância planimétrica sem pontos de apoio e sem PPK



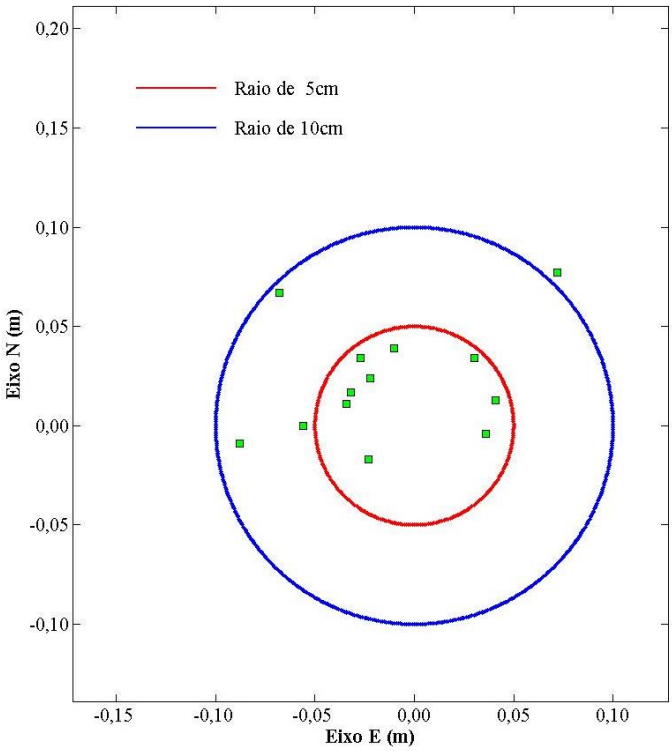
(a)

Discrepância planimétrica sem pontos de apoio e com PPK



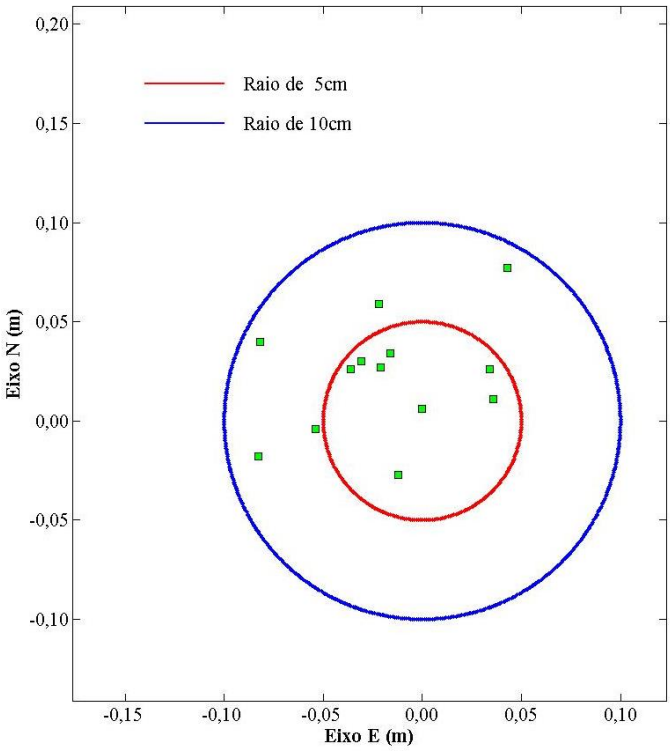
(b)

Discrepância planimétrica com pontos de apoio e sem PPK



(c)

Discrepância planimétrica com pontos de apoio e com PPK



(d)

Fonte: O autor

Ao analisar os gráficos das discrepâncias planimétricas, observa-se que o ortomosaico gerado sem pontos de apoio e sem PPK (Figura 46a) foi o que apresentou as maiores discrepâncias planimétricas. As discrepâncias representadas indicam que o ortomosaico apresentou um deslocamento no sentido oeste (W) com azimute de aproximadamente 270°.

Nota-se na Figura 46b que, no ortomosaico gerado sem pontos de apoio e com PPK a maioria das discrepâncias foi menor que uma vez o GSD, e quatro pontos apresentaram discrepância de até duas vezes o GSD.

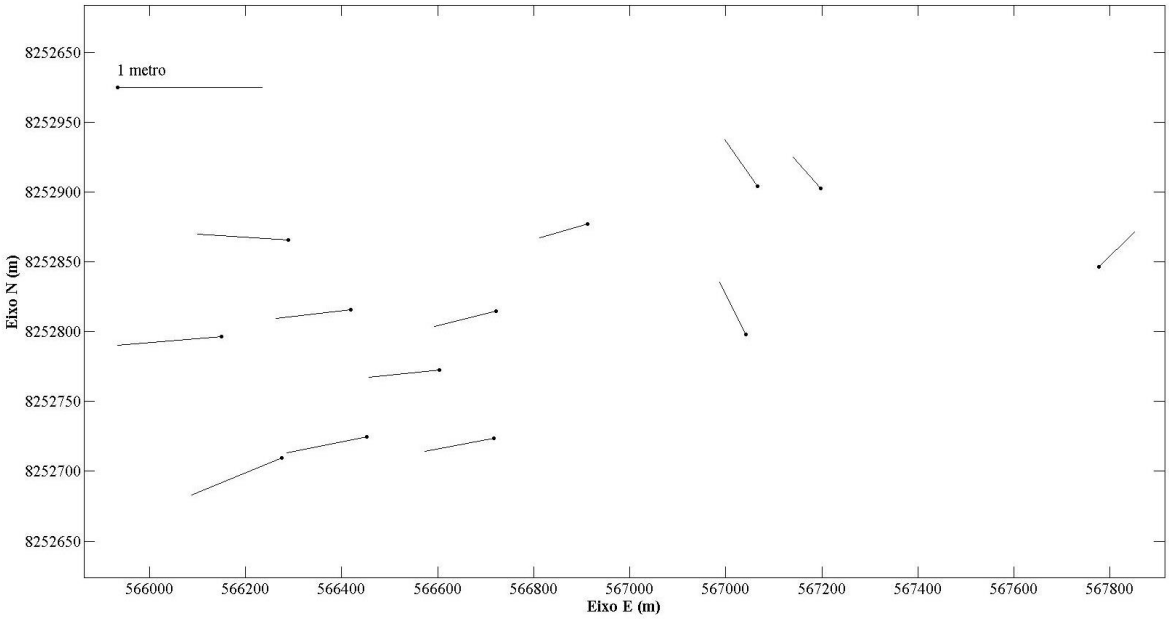
Na Figura 46c, observa-se que no ortomosaico gerado com pontos de apoio e sem PPK a maioria das discrepâncias foi menor que uma vez o GSD; três pontos apresentaram discrepância de até duas vezes o GSD e apenas um ponto apresentou discrepância maior que o GSD.

Na Figura 46d é possível notar que, no ortomosaico gerado com pontos de apoio e com PPK, a maioria das discrepâncias foi menor que uma vez o GSD e cinco pontos apresentaram discrepância de até duas vezes o GSD.

Em função das discrepâncias planimétricas calculadas para cada ortomosaico, foram gerados os vetores representados na Figura 47. A análise desses vetores possibilita identificar a direção, o sentido e a intensidade da tendenciosidade.

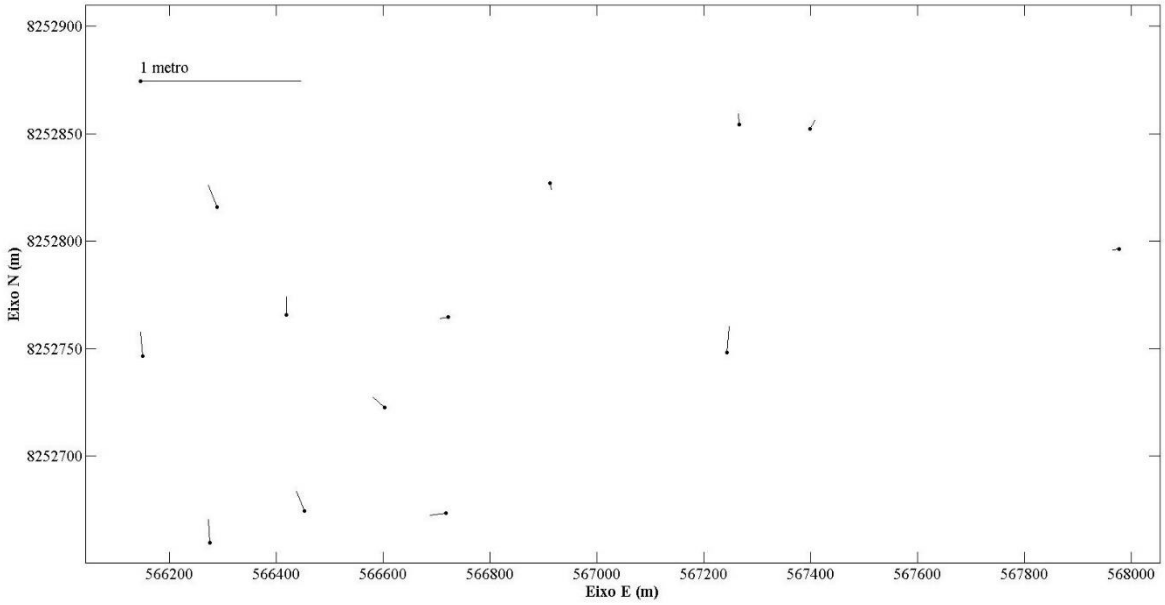
Figura 47 – Vetor das discrepâncias planimétricas calculadas para cada ortomosaico da área de estudo 2

Ortomosaico sem pontos de apoio e sem PPK



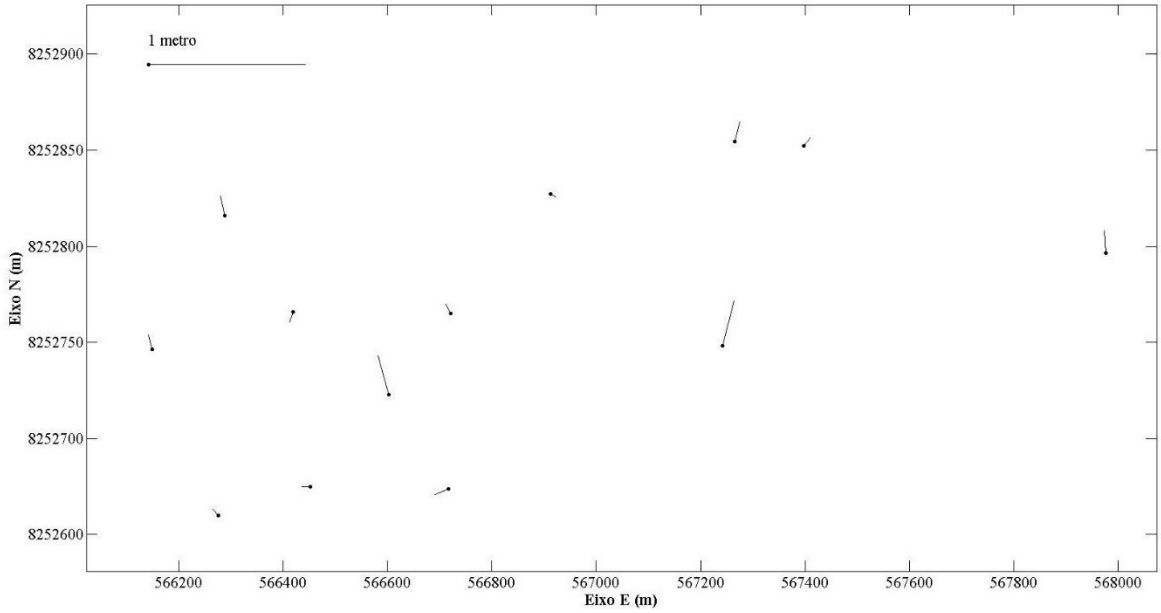
(a)

Ortomosaico sem pontos de apoio e com PPK



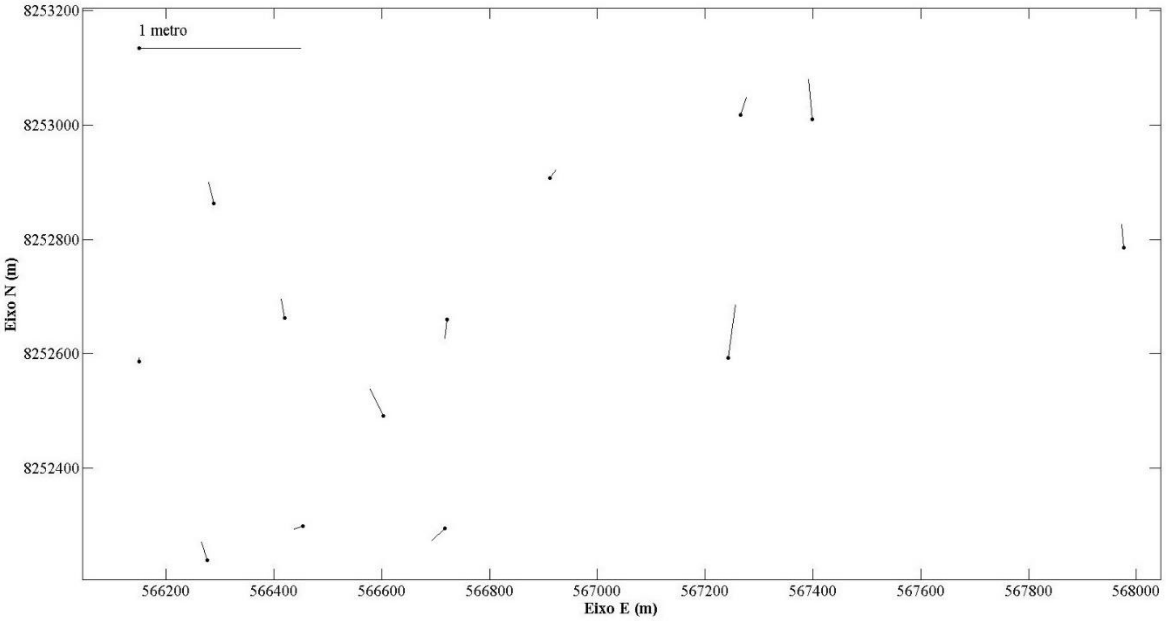
(b)

Ortomosaico com pontos de apoio e sem PPK



(c)

Ortomosaico com pontos de apoio e com PPK



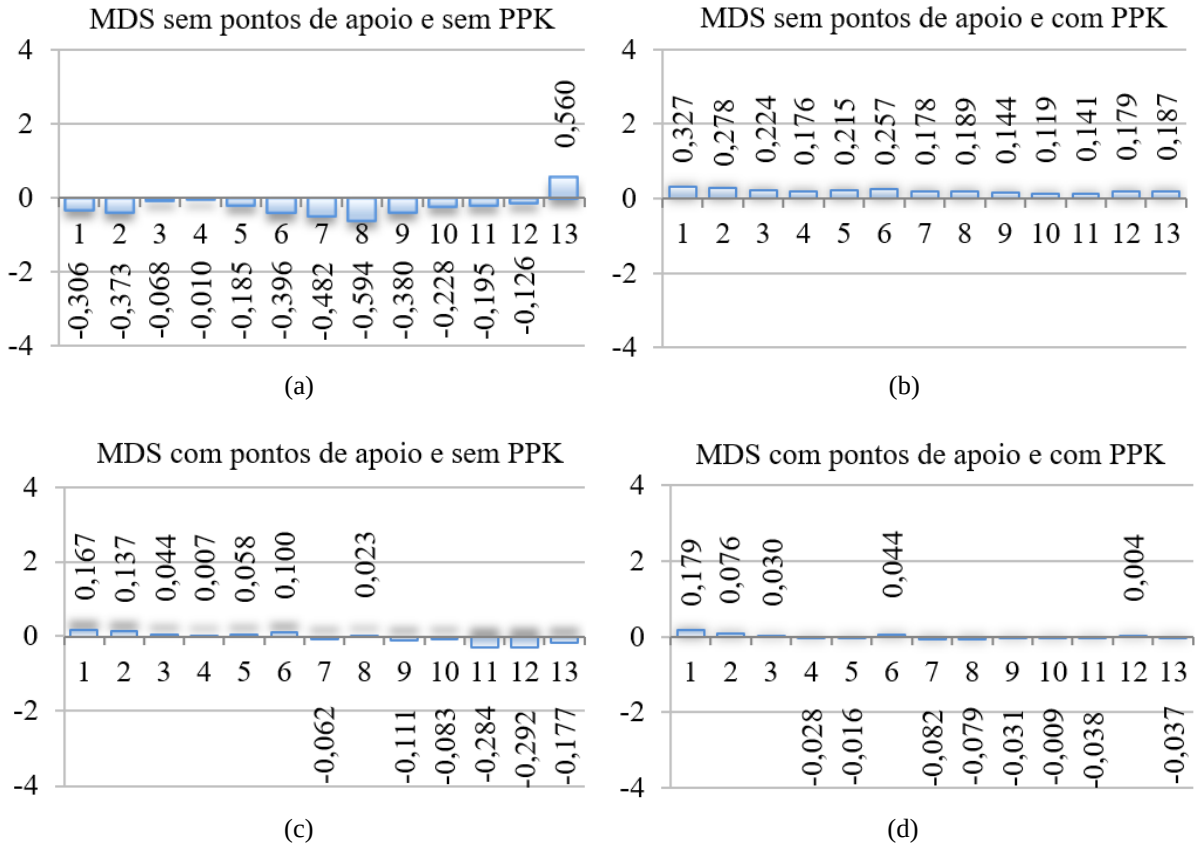
(d)
Fonte: O autor

Ao analisar os vetores dos ortomosaicos da Figura 47, fica evidente que a intensidade das discrepâncias foi maior no ortomosaico gerado sem pontos de apoio e sem PPK (Figura 46a). Nota-se a existência de três regiões de deslocamentos distintas, onde nove vetores apresentaram uma direção predominante (oeste e azimute de 270°) e intensidade (comprimento) variando de 0,21 a 0,72 metros; três vetores apresentaram direção noroeste com azimute de aproximadamente 315° e um vetor apresentou direção nordeste com azimute de aproximadamente 45°.

Nas Figuras 47b, 47c e 47d não foi possível notar visualmente uma direção predominante de deslocamento, indicando que as discrepâncias planimétricas apresentaram distribuição aleatória.

Na Figura 48 estão representados os gráficos das discrepâncias altimétricas obtidas entre as altitudes do MDS, com e sem pontos de apoio, e com e sem PPK.

Figura 48 – Representação das discrepâncias altimétricas calculadas nos pontos de verificação nos MDS da área de estudo 2



Fonte: O autor

Ao analisar o gráfico das discrepâncias altimétricas do MDS gerado sem pontos de apoio e sem PPK (Figura 48a), observa-se que a superfície de referência altimétrica foi rebaixada em média -0,21 m. Já as discrepâncias altimétricas do MDS gerado sem pontos de apoio e com PPK (Figura 48b) apresentaram comportamento oposto, onde a superfície de referência altimétrica foi elevada em média 0,20 m.

Ao analisar o gráfico das discrepâncias altimétricas do MDS gerado com pontos de apoio e sem PPK (Figura 48c) e do MDS gerado com pontos de apoio e com PPK (Figura 48d), nota-se que não foi possível identificar visualmente a presença ou não de tendenciosidade, pois os valores das médias das discrepâncias altimétricas ficaram próximas de zero.

Igualmente à área de estudo 1, na área de estudo 2 a análise da precisão foi realizada comparando-se o desvio padrão das discrepâncias, em ambos os eixos, com o desvio padrão esperado. Com os dados das discrepâncias nos quatro ortomosaicos, realizou-se o cálculo do qui-quadrado, considerando-se uma carta PEC-PCD Classe A na escala de **1/300**, tanto para o ortomosaico sem pontos de apoio e com PPK, como para o ortomosaico com pontos de apoio e com PPK, **1/350** para o ortomosaico com pontos de apoio e sem PPK, e **1/2.000** para o

ortomosaico sem pontos de apoio e sem PPK. Esses valores estão na Tabela 17. O qui-quadrado tabelado foi determinado com nível de confiança de 90% com 12 graus de liberdade.

Tabela 17 – Qui-amostrais calculados para os eixos E e N e qui-quadrado tabelado $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 12$ da área de estudo 2

Ortomosaico	$\hat{\chi}^2 \Delta E$	$\hat{\chi}^2 \Delta N$	υ	$\chi^{2(n-1)}_{\alpha}$	Escala	ET	EP	Classificação Planimétrica
Sem apoio e sem PPK	13,92	0,93	12	18,55	1/2.000	0,56	0,34	Classe A
Sem apoio e com PPK	13,49	2,96	12	18,55	1/300	0,08	0,05	Classe A
Com apoio e sem PPK	14,71	5,36	12	18,55	1/350	0,10	0,06	Classe A
Com apoio e com PPK	15,29	7,67	12	18,55	1/300	0,08	0,05	Classe A

Fonte: O autor
Nota: ET = Erro no terreno
EP = Erro padrão

Analisando o qui-quadrado da Tabela 13, verifica-se que o qui-quadrado tabelado é maior que o qui-quadrado calculado para os dois eixos (E e N), nos quatro ortomosaicos gerados. Portanto, pode-se dizer que esses ortomosaicos atendem ao PEC-PCD com nível de confiança de 90%, com Classe A para as escalas testadas. O relatório do processamento do ortomosaico que apresentou a maior escala de restituição PEC-PCD Classe A 1/300 (sem pontos de apoio e com PPK) encontra-se no apêndice L.

A análise da precisão altimétrica foi realizada comparando-se o desvio padrão das discrepâncias, do eixo h com o desvio padrão da melhor equidistância entre as curvas de nível, considerando PEC-PCD Classe A.

Utilizando os dados obtidos no relatório de processamento do ortomosaico da área de estudo 2, com a maior escala classe A PEC-PCD (Apêndice L), determinou-se a base aerofotogramétrica e a altura de voo, sendo determinada a precisão altimétrica esperada obtida com a aplicação da Equação 26. Na Tabela 18 são apresentados os valores do qui-quadrado calculado, o grau de liberdade, o qui-quadrado tabelado, a precisão altimétrica esperada, a melhor equidistância entre curvas de nível, o erro tolerável no terreno, o erro padrão, e a classificação do MDS.

Tabela 18 – Qui-amostrais calculados para o eixo h e qui-quadrado tabelado $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 12$ da área de estudo 2

MDS	$\hat{\chi}^2 \Delta h$	υ	$\chi^{2(n-1)}_{\alpha}$	PAE	EQ	ET	EP	Classificação Altimétrica
Sem apoio e sem PPK	18,37	12	18,55	0,09	1,36	0,37	0,23	Classe A
Sem apoio e com PPK	18,22	12	18,55	0,09	0,28	0,08	0,05	Classe A
Com apoio e sem PPK	18,21	12	18,55	0,09	0,71	0,19	0,12	Classe A
Com apoio e com PPK	18,51	12	18,55	0,09	0,33	0,09	0,06	Classe A

Fonte: O autor
Nota: PAE = Precisão altimétrica esperada
EQ= Equidistância entre curvas de nível
ET = Erro no terreno
EP = Erro padrão

Nota-se na Tabela 18 que nos MDS gerados sem pontos de apoio e com PPK, e com pontos de apoio e com PPK, o erro padrão foi inferior ou igual ao PAE para uma equidistância entre curvas de nível de 0,28 m e 0,33 m, respectivamente; ou seja, para uma amostra de pontos coletadas nestes MDS, 90% dos pontos terão um erro altimétrico de 0,08 m para o MDS gerado sem apoio e com PPK, e 0,09 m para o MDS gerado com apoio e com PPK, e desvio padrão de 0,05 e 0,06 m, respectivamente. Já os MDS gerados sem pontos de apoio e sem PPK, e com apoio e sem PPK, o erro padrão foi superior ao PAE para uma equidistância entre curvas de nível de 1,36 m e 0,71 m, respectivamente.

A tendência pode ser verificada analisando se o valor da média pode ser estatisticamente considerado igual a zero. Essa análise foi realizada pela distribuição do teste t de Student, observando-se as hipóteses propostas na Tabela 6. Se o valor tabelado para a distribuição do teste t de Student for maior que o calculado, aceita-se a hipótese que a média das discrepâncias pode ser considerada estatisticamente igual a zero. Na análise planimétrica, caso o ortomosaico apresente tendenciosidade no eixo E ou N, o produto é considerado tendencioso.

Os valores calculados para a distribuição do teste t de Student, com nível de confiança de 90% e 12 graus de liberdade, incluindo as discrepâncias de cada ortomosaico e MDS, são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Cálculo dos valores da distribuição do teste t de Student para cada ortomosaico $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 12$ da área de estudo 2

Ortomosaico	$\hat{t}_{\alpha}^{(n-1)}\Delta E$	$\hat{t}_{\alpha}^{(n-1)}\Delta N$	$\hat{t}_{\alpha}^{(n-1)}\Delta h$	υ	$t_{\alpha}^{(n-1)}$	Classificação	
						Planimétrica	Altimétrica
Sem apoio e sem PPK	5,28	0,49	2,59	12	1,78	Com tendência	Com tendência
Sem apoio e com PPK	2,33	3,49	11,88	12	1,78	Com tendência	Com tendência
Com apoio e sem PPK	1,03	2,71	0,85	12	1,78	Com tendência	Sem tendência
Com apoio e com PPK	1,59	2,65	0,05	12	1,78	Com tendência	Sem tendência

Fonte: O autor

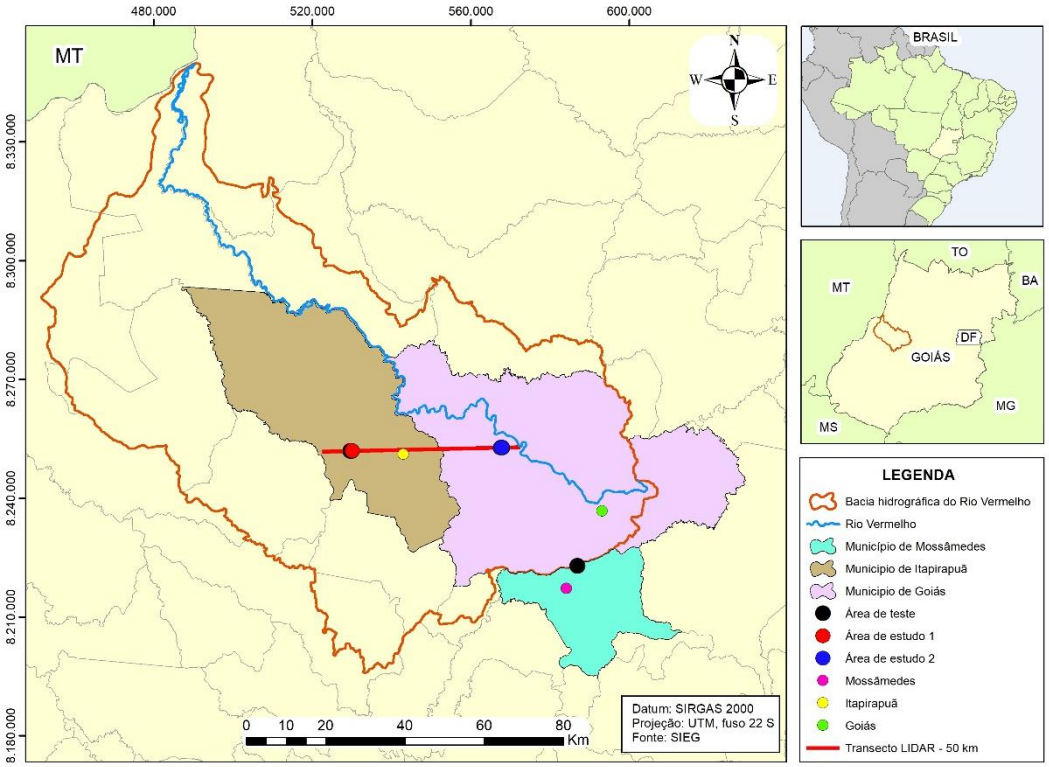
Ao analisar a Tabela 19, percebe-se que todos os ortomosaicos apresentaram tendenciosidade planimétrica. Nota-se, ainda na Tabela 19, que nos MDS gerados com ponto de apoio e sem PPK, e no MDS gerado com pontos de apoio e com PPK, os valores do teste t de Student calculados foram inferiores ao tabelado no eixo h; portanto, esses MDS não apresentaram tendenciosidade altimétrica. Sendo que o MDS sem pontos de apoio e sem PPK apresentou tendenciosidade de -0,21 m, e o MDS sem pontos de apoio e com PPK apresentou tendenciosidade de 0,20 m. Portanto, o melhor produto cartográfico (ortomosaico e MDS) foi o gerado com pontos de apoio e com PPK.

Os resultados obtidos no ortomosaico e MDS gerados sem pontos de apoio e com PPK da área de estudo 2 ficaram próximos aos encontrados na literatura, resultado este totalmente diferente aos obtidos no ortomsaico e MDS sem pontos de apoio e com PPK da área de estudo 1. Presume-se que a baixa eficácia dos resultados obtidos na área es estudo 1, com a utilização do método PPK, se deve ao posicionamento em local inadequado do receptor base. Para confirmar esta hipótese, o mesmo trabalho foi aplicado em uma terceira área denominada “área de teste”; esta área inicialmente não fazia parte desta pesquisa, e por isso não foi descrita na seção metodológica.

5.2.3 Área de teste

A área de teste é representada pela Reserva Biológica Prof. José Ângelo Rizzo da Universidade Federal de Goiás, situada no Parque Estadual da Serra Dourada, no município de Mossâmedes-GO. Na Figura 49 é apresentada a localização da área de teste em relação às áreas de estudo 1 e 2 e à própria BHRV.

Figura 49 – Localização da área de teste em relação às áreas de estudo 1 e 2 e à BHRV



Fonte: O autor

A área total recoberta pelo aerolevantamento da área de teste foi de aproximadamente 384 ha (ou 3,8 km^2), e desnível aproximado de 70 metros, sendo o relevo classificado segundo EMBRAPA (1979) como forte ondulado.

O voo foi realizado no dia 15 de janeiro de 2021, com início às 12 horas, visando minimizar sombras de árvores, com duração aproximada de 33 minutos e distância total percorrida pelo RPA de 26,7 quilômetros. O bloco fotogramétrico foi composto por 204 fotografias tomadas em 12 linhas de voo.

Na área de teste, o receptor da base foi instalado no ponto mais elevado da área, para que não houvesse obstruções do sinal GNSS ou erro de multicaminhamento. A maior linha de base (distância entre o receptor móvel e o receptor base) é de 846,7 m.

Assim como nas áreas de estudo 1 e 2, as coordenadas da base da área de teste também foram determinadas por Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), no site do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). O relatório do processamento pelo método PPP, disponibilizados pelo IBGE, encontram-se no Apêndice D.

A posição e a acurácia das 80 primeiras fotografias, antes e após a correção de suas posições pelo método PPK, encontram-se nos apêndices I e J, respectivamente. Na Figura 50 são apresentados o resumo da acurácia antes a após a correção pelo método PPK, além do

número total de fotografias do bloco aerofotogramétrico e a porcentagem de fotografias corrigidas.

Figura 50 - Valor do desvio padrão das coordenadas do centro das fotografias da área de teste, antes geotags in flight e após geotags post-processed, com o georreferenciemento das fotografias no Postflight

Base station position (ARP)

Latitude:	-16.074023190°
Longitude:	-50.187341690°
Ellipsoid height:	1020.970 m

Geotags

Geotags in flight			
RTK fixed:	0	0 %	σ: 0.000 m
Standalone:	204	100 %	σ: 5.203 m
Overall:	204	100 %	σ: 5.203 m

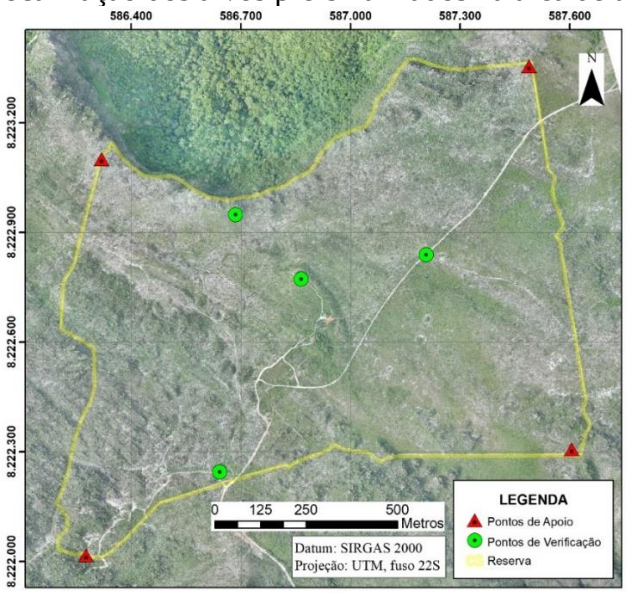
Geotags post-processed			
PPK fixed:	204	100 %	σ: 0.035 m
Standalone:	0	0 %	σ: 0.000 m
Overall:	204	100 %	σ: 0.035 m

Fonte: O autor

Nota-se na Figura 50 que 100% das fotografias do bloco aerofotogramétrico apresentaram acurácia inferior ao tamanho do GSD.

Na Figura 51 é apresentada a localização e distribuição dos 8 alvos pré-sinalizados na área de teste, escolhidos como pontos de apoio os quatro alvos pré-sinalizados situados mais próximos dos vértices da área imageada, e os demais pontos de apoio regularmente distribuídos na área.

Figura 51 – Localização dos alvos pré-sinalizados na área de teste imageada



Fonte: O autor

Na Tabela 20 são apresentadas as discrepâncias entre as coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados obtidas por receptor de sinais GNSS, com as suas coordenadas homólogas lidas nos ortomosaicos e MDS, com e sem pontos de apoio, e com e sem PPK, bem como a média, o desvio padrão, a maior e menor discrepância e a amplitude da área de teste.

Tabela 20 – Discrepâncias entre as coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados obtidas por receptor de sinais GNSS com as suas homólogas lidas nos ortomosaicos e MDS, com e sem pontos de apoio e PPK, média, desvio padrão, maior e menor discrepância

Alvo	Ortomosaico e MDS sem apoio e sem PPK			Ortomosaico e MDS sem apoio e com PPK			Ortomosaico e MDS com apoio e sem PPK			Ortomosaico e MDS com apoio e com PPK		
	ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh
01	1,631	0,980	2,608	-0,077	0,104	0,387	-0,126	0,139	-1,757	-0,076	0,108	-0,008
02	1,464	0,796	2,535	-0,031	-0,027	0,406	-0,163	0,108	-1,120	-0,060	-0,035	-0,040
03	1,618	1,047	2,999	-0,119	0,097	0,475	-0,092	0,067	-1,199	-0,134	0,033	0,101
04	1,825	0,778	2,569	-0,081	0,040	0,374	-0,096	0,086	-1,543	-0,087	0,011	0,001
$\bar{X}$	1,635	0,900	2,678	-0,077	0,054	-0,410	-0,119	0,100	1,405	-0,089	0,029	-0,013
δ	0,148	0,134	0,216	0,036	0,061	0,410	0,033	0,031	0,298	0,031	0,060	0,061
Máx.	1,825	1,047	2,999	-0,031	0,104	0,045	-0,092	0,139	1,757	-0,060	0,108	0,040
Mín.	1,464	0,778	2,535	-0,119	-0,027	0,475	-0,163	0,067	1,120	-0,134	-0,035	-0,101
Amp.	0,361	0,269	0,464	0,088	0,131	0,102	0,071	0,072	0,637	0,073	0,143	0,141

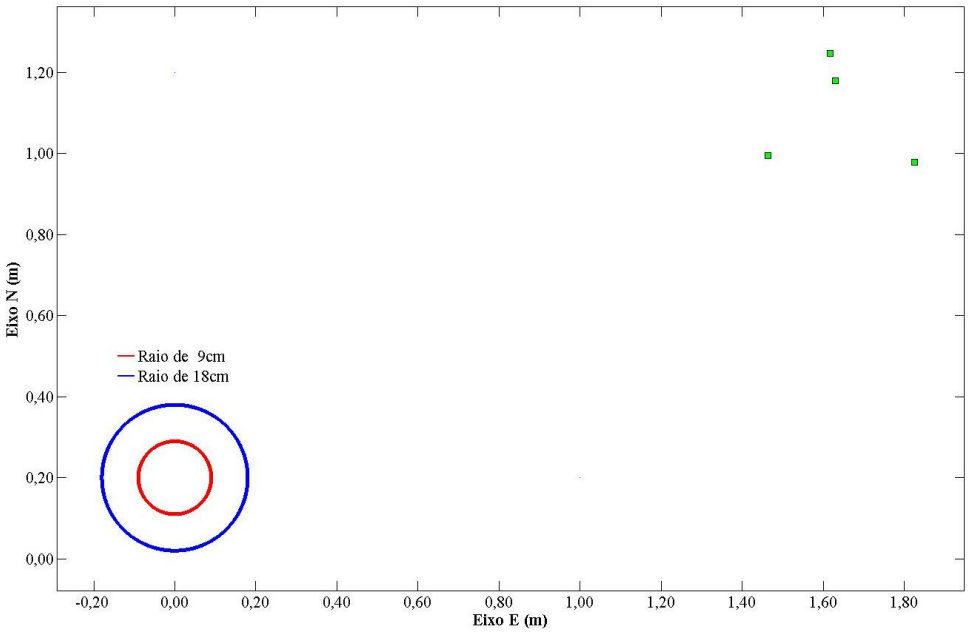
Fonte: O autor

Como esperado, nota-se na Tabela 20 que os maiores valores da média, desvio padrão e amplitude das discrepâncias nos eixos N, E e h foram observadas no ortomosaico e MDS sem apoio e sem PPK; já os menores valores do desvio padrão e amplitude das coordenadas planialtimétricas foram observados no ortomosaico e MDS, com pontos de apoio e com PPK; portanto, esta foi a amostra mais homogênea.

Para avaliar a precisão obtida em cada ortomosaico em relação ao GSD da área de teste, foram gerados os gráficos representados na Figura 52 com os dados das discrepâncias planimétricas obtidas na Tabela 20. Nessa figura, o círculo maior, representado na cor azul, corresponde ao dobro do valor do GSD executado (18 cm), enquanto o círculo menor, representado na cor vermelha, corresponde ao valor do GSD (9 cm). Ressalta-se que ambos os ortomosaicos e MDS possuem os mesmos 4 pontos de verificação.

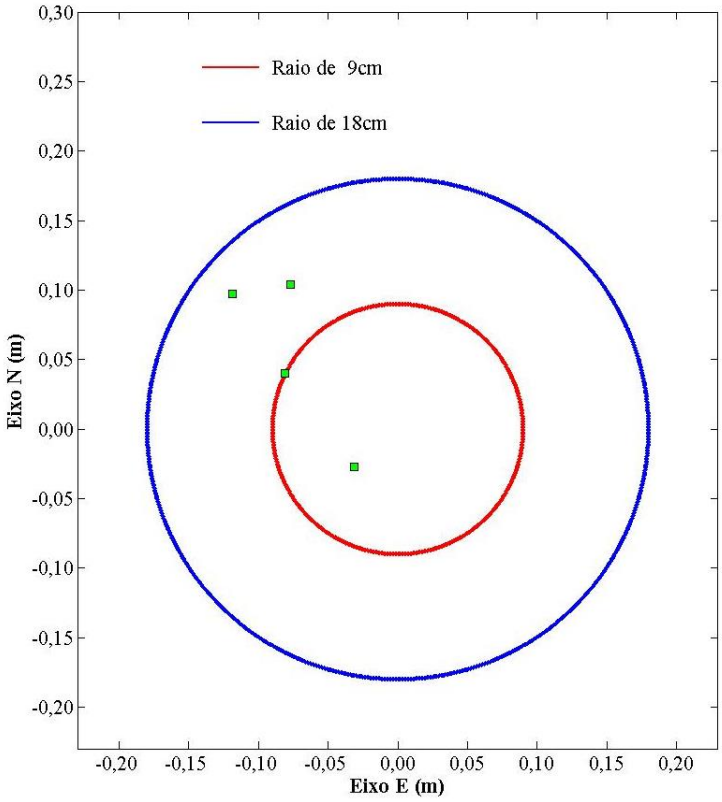
Figura 52 – Representação das discrepâncias planimétricas calculadas nos pontos de verificação ou pontos de checagem nos ortomosaicos da área de teste

Discrepância planimétrica sem pontos de apoio e sem PPK



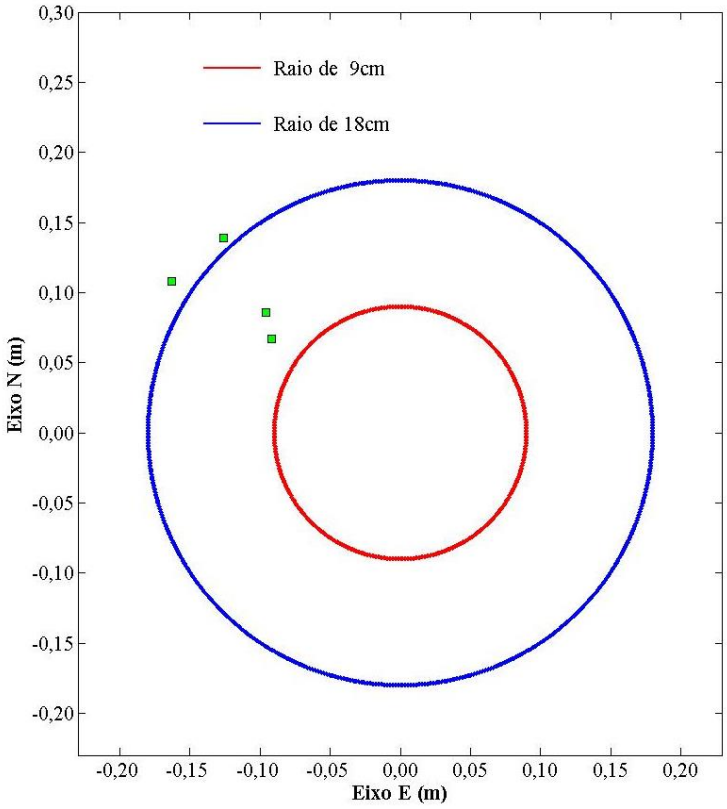
(a)

Discrepância planimétrica sem pontos de apoio e com PPK



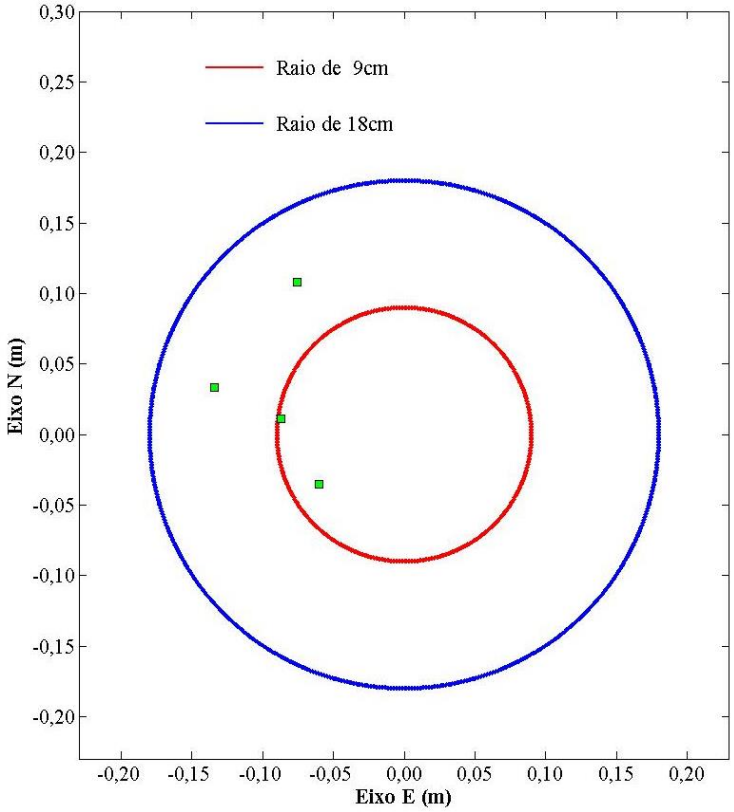
(b)

Discrepância planimétrica com pontos de apoio e sem PPK



(c)

Discrepância planimétrica com pontos de apoio e com PPK



(d)

Fonte: O autor

Ao analisar os gráficos das discrepâncias planimétricas, observa-se que o ortomosaico gerado sem pontos de apoio e sem PPK (Figura 52a) foi o que apresentou as maiores discrepâncias planimétricas. As discrepâncias representadas indicam que o ortomosaico apresentou um deslocamento no sentido nordeste (NE) com azimute de aproximadamente 60°. É possível identificar visualmente que este ortomosaico apresentou tendenciosidade.

Nota-se na Figura 52b que, no ortomosaico gerado sem pontos de apoio e com PPK, dois pontos de verificação apresentaram discrepâncias igual ou inferior ao GSD e dois pontos apresentaram discrepâncias de até duas vezes o GSD.

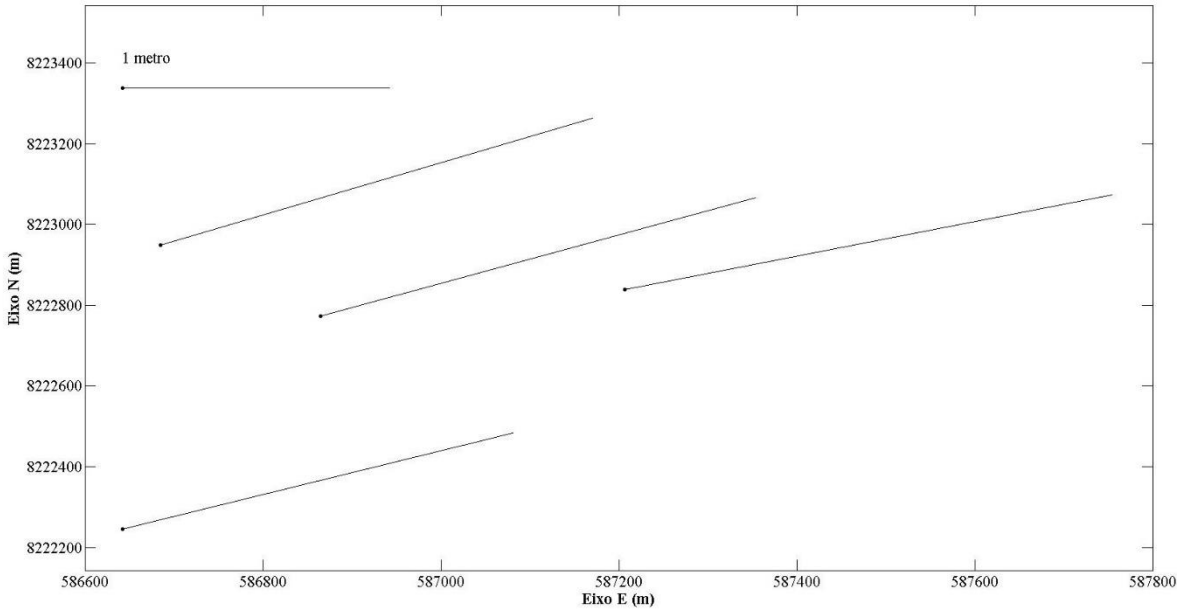
Na Figura 52c, observa-se que no ortomosaico gerado com pontos de apoio e sem PPK, dois pontos de verificação apresentaram discrepâncias de até duas vezes o GSD e dois pontos apresentaram discrepâncias ligeiramente superior a duas vezes o GSD.

Na Figura 52d é possível notar que no ortomosaico gerado com pontos de apoio e com PPK, dois pontos de verificação apresentaram discrepâncias inferior ao GSD e dois pontos apresentaram discrepâncias de até duas vezes o GSD.

Em função das discrepâncias planimétricas calculadas para cada ortomosaico, foram gerados os vetores representados na Figura 53. A análise desses vetores possibilita identificar a direção, o sentido e a intensidade da tendenciosidade.

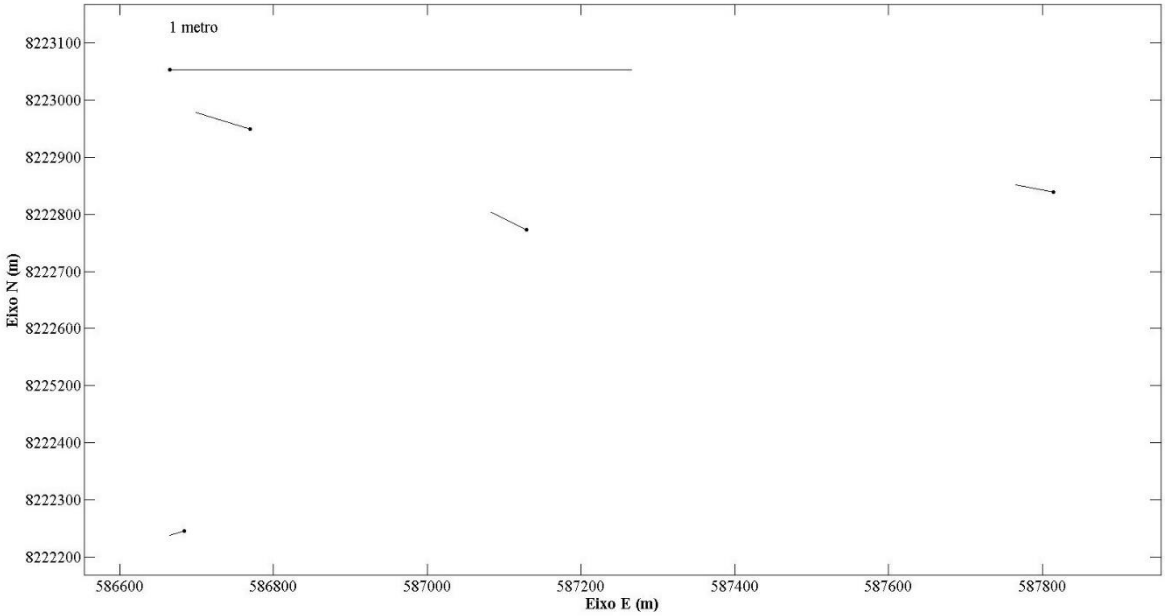
Figura 53 – Vetor das discrepâncias planimétricas calculadas para cada ortomosaico da área de teste

Ortomosaico sem pontos de apoio e sem PPK



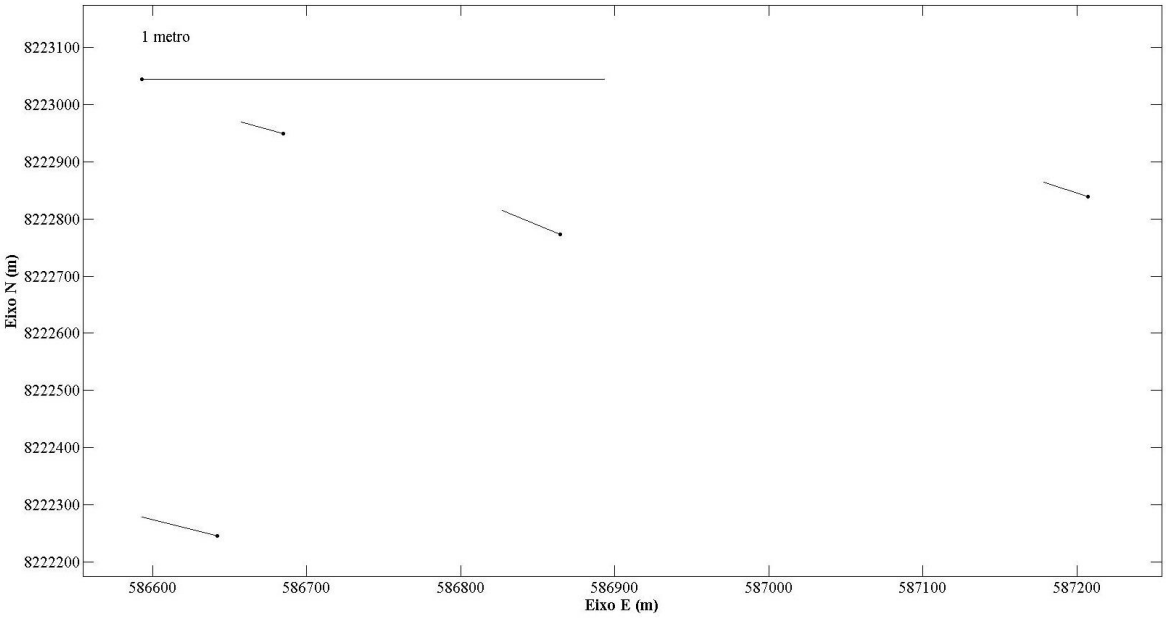
(a)

Ortomosaico sem pontos de apoio e com PPK



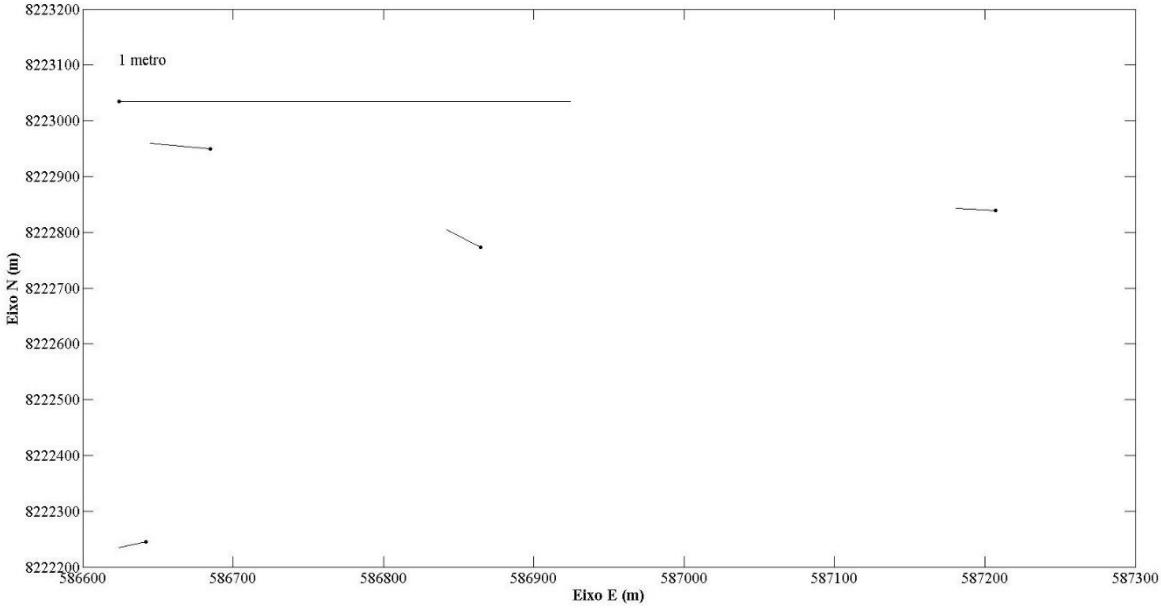
(b)

Ortomosaico com pontos de apoio e sem PPK



(c)

Ortomosaico com pontos de apoio e com PPK



(d)
Fonte: O autor

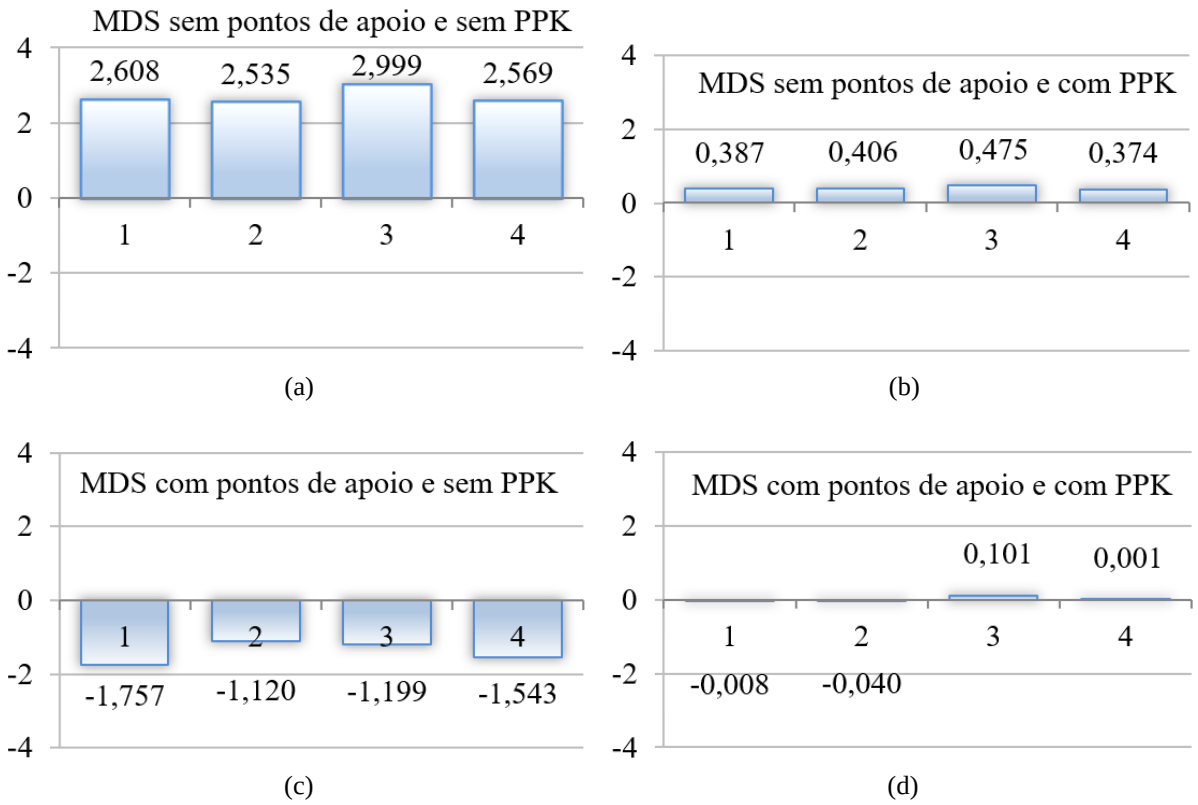
Ao analisar os vetores dos ortomosaicos da Figura 53, fica evidente que a intensidade das discrepâncias foi maior no ortomosaico gerado sem pontos de apoio e sem PPK (Figura 53a), com direção predominante nordeste e azimute de aproximadamente 60° e intensidade (comprimento) variando de 1,67 a 1,98 metros.

Nas Figuras 53b, 53c e 53d, os vetores das discrepâncias apresentaram direção predominante noroeste e azimute de aproximadamente 300°.

É possível identificar visualmente que o ortomosaico gerado sem pontos de apoio e sem PPK apresentou tendenciosidade e provavelmente os demais ortomosaicos também apresentaram tendenciosidade, a ser confirmada ou não pela aplicação do teste t de Student.

Na Figura 54 estão representados os gráficos das discrepâncias altimétricas obtidas entre as altitudes do MDS, com e sem pontos de apoio, e com e sem PPK.

Figura 54 – Representação das discrepâncias altimétricas calculadas nos pontos de verificação nos MDS da área de teste



Fonte: O autor

Ao analisar o gráfico da das discrepâncias altimétricas do MDS gerado sem pontos de apoio e sem PPK (Figura 54a), observa-se que a superfície de referência altimétrica foi elevada em média 2,68 m.

As discrepâncias altimétricas do MDS gerado sem pontos de apoio e com PPK (Figura 54b) indicaram que a superfície de referência altimétrica foi elevada em média de 0,41 m.

As discrepâncias altimétricas do MDS gerado com pontos de apoio e sem PPK (Figura 54c) indicaram que a superfície de referência altimétrica foi rebaixada em média de -1,41 m.

As discrepâncias altimétricas do MDS gerado com pontos de apoio e com PPK (Figura 54d) indicaram que os valores das médias das discrepâncias altimétricas ficaram próximas de zero e, portanto, não sendo possível identificar visualmente a presença ou não de tendenciosidade; no entanto, a tendenciosidade vertical é notória dos demais MDS.

A análise da precisão planimétrica foi realizada comparando-se o desvio padrão das discrepâncias, em ambos os eixos, com o desvio padrão esperado. Com os dados das discrepâncias nos quatro ortomosaicos, realizou-se o cálculo do qui-quadrado, considerando-se uma carta PEC-PCD Classe A na escala de **1/200** para o ortomosaico com pontos de apoio e

com PPK, **1/350** tanto para o ortomosaico sem pontos de apoio e com PPK, como para o ortomosaico com pontos de apoio e com PPK, e **1/1.000** para o ortomosaico sem pontos de apoio e sem PPK. Esses valores estão na Tabela 21. O qui-quadrado tabelado foi determinado com nível de confiança de 90% com 3 graus de liberdade.

Tabela 21 - Qui-amostrais calculados para os eixos E e N e qui-quadrado tabelado $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 3$, da área de teste

Ortomosaico	$\hat{\chi}^2 \Delta E$	$\hat{\chi}^2 \Delta N$	υ	$\chi^{2(n-1)}_{\alpha}$	Escala	ET	EP	Classificação Planimétrica
Sem apoio e sem PPK	4,54	3,71	3	6,25	1/1.000	0,28	0,17	Classe A
Sem apoio e com PPK	2,20	6,25	3	6,25	1/350	0,10	0,06	Classe A
Com apoio e sem PPK	5,55	5,00	3	6,25	1/200	0,06	0,03	Classe A
Com apoio e com PPK	1,68	6,03	3	6,25	1/350	0,10	0,06	Classe A

Fonte: O autor
Nota: ET = Erro no terreno
EP = Erro padrão

Analisando o qui-quadrado da Tabela 21, verifica-se que o qui-quadrado tabelado é maior ou igual ao qui-quadrado calculado para os dois eixos (E e N), nos quatro ortomosaicos gerados. Portanto, pode-se dizer que esses ortomosaicos atendem ao PEC-PCD com nível de confiança de 90%, com Classe A para as escalas testadas. O relatório do processamento do ortomosaico que apresentou a maior escala de restituição PEC-PCD Classe A **1/200** (com pontos de apoio e sem PPK) encontra-se no apêndice M.

A análise da precisão altimétrica foi realizada comparando-se o desvio padrão das discrepâncias, do eixo h com o desvio padrão da melhor equidistância entre as curvas de nível considerando PEC-PCD Classe A.

Utilizando os dados obtidos no relatório de processamento do ortomosaico da área de teste com a maior escala classe A PEC-PCD (Apêndice M), determinou-se a base aerofotogramétrica e a altura de voo, sendo determinada a precisão altimétrica esperada obtida com a aplicação da Equação 26. Na Tabela 22 são apresentados os valores do qui-quadrado calculado, o grau de liberdade, o qui-quadrado tabelado, a precisão altimétrica esperada, a melhor equidistância entre curvas de nível, o erro tolerável no terreno, o erro padrão, e a classificação do MDS.

Tabela 22 – Qui-amostrais calculados para o eixo h e qui-quadrado tabelado $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 3$ da área de teste

MDS	$\hat{\chi}^2 \Delta h$	υ	$\chi^{2(n-1)}_{\alpha}$	PAE	EQ	ET	EP	Classificação Altimétrica
Sem apoio e sem PPK	6,12	3	6,25	0,16	0,89	0,24	0,15	Classe A
Sem apoio e com PPK	5,86	3	6,25	0,16	0,19	0,05	0,03	Classe A
Com apoio e sem PPK	6,19	3	6,25	0,16	1,22	0,33	0,21	Classe A
Com apoio e com PPK	6,13	3	6,25	0,16	0,25	0,07	0,04	Classe A

Fonte: O autor
Nota: PAE = Precisão altimétrica esperada
EQ= Equidistância entre curvas de nível
ET = Erro no terreno
EP = Erro padrão

Nota-se na Tabela 22 que no MDS gerado com pontos de apoio e sem PPK, o erro padrão foi superior ao PAE para uma equidistância entre curvas de nível de 1,22 m. Nos demais MDS, o erro padrão foi superior ao PAE para uma equidistância entre curvas de nível de 0,89 m no MDS gerado sem pontos de apoio e sem PPK, 0,19 m no MDS gerado sem pontos de apoio e com PPK, e 0,25 m no MDS gerado com pontos de apoio e com PPK.

A tendência pode ser verificada, analisando se o valor da média pode ser estatisticamente considerado igual a zero. Essa análise foi realizada pela distribuição do teste t de Student, observando-se as hipóteses propostas na Tabela 6. Se o valor tabelado para a distribuição do teste t de Student for maior que o calculado, aceita-se a hipótese que a média das discrepâncias pode ser considerada estatisticamente igual a zero. Na análise planimétrica, caso o ortomosaico apresente tendenciosidade no eixo E ou N, o produto é considerado tendencioso.

Os valores calculados para a distribuição do teste t de Student, com nível de confiança de 90% e 3 graus de liberdade, incluindo as discrepâncias de cada ortomosaico e MDS, são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Cálculo dos valores da distribuição do teste t de Student para cada ortomosaico $\alpha = 90\%$, $\upsilon = 3$ da área de teste

Ortomosaico	$\hat{t}_{\alpha}^{(n-1)}\Delta E$	$\hat{t}_{\alpha}^{(n-1)}\Delta N$	$\hat{t}_{\alpha}^{(n-1)}\Delta h$	υ	$t_{\alpha}^{(n-1)}$	Classificação	
						Planimétrica	Altimétrica
Sem apoio e sem PPK	19,14	11,66	21,46	3	2,35	Com tendência	Com tendência
Sem apoio e com PPK	3,71	1,53	15,75	3	2,35	Com tendência	Com tendência
Com apoio e sem PPK	6,31	5,58	8,17	3	2,35	Com tendência	Com tendência
Com apoio e com PPK	4,92	0,85	0,38	3	2,35	Com tendência	Sem tendência

Fonte: O autor

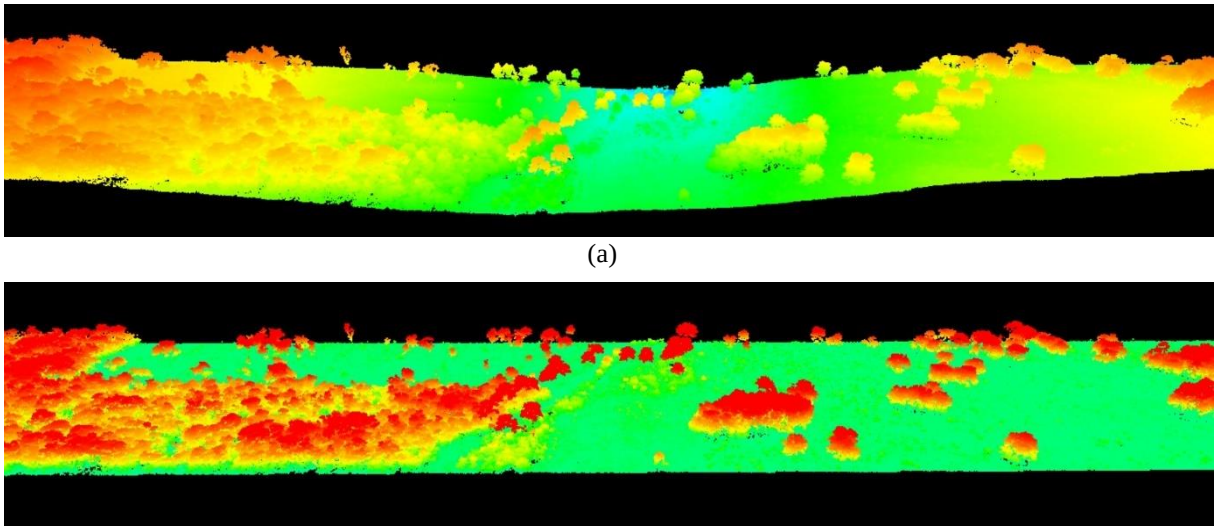
Ao analisar a Tabela 23, percebe-se que todos os ortomosaicos apresentaram tendenciosidade planimétrica. Ainda na Tabela 23, nota-se que apenas no MDS gerado com ponto de apoio e com PPK, os valores do teste t de Student calculado foi inferior ao tabelado no eixo h, portanto, esse MDS não apresentou tendenciosidade altimétrica. Ou seja, o melhor produto cartográfico (ortomosaico e MDS) foi o gerado com pontos de apoio e com PPK.

5.3 Preparo e análise das nuvens de pontos

Com o intuito de realizar a comparação entre as métricas da vegetação foi realizada a normalização das nuvens de pontos de todos os sistemas imageadores. A normalização consiste na subtração da nuvem de pontos do MDS pelo seu respectivo MDT; ao realizar essa operação, faz-se a translação dos dados da nuvem de pontos do MDS para um plano de referência, cuja origem é o solo e não o geoide (altitudes ortométricas) ou elipsoide (altitudes geométricas). O produto gerado com a normalização da nuvem de pontos é o modelo de altura do dossel ou *canopy height model* (CHM). A vantagem da utilização do CHM é a facilidade de comparação entre a altura dos objetos, pois sua origem é sempre o solo. Na nuvem de pontos não normalizada, a origem dos dados é o geoide ou o elipsoide de revolução, assim para comparar a altura de dois objetos, deve-se primeiro subtrair as altitudes dos objetos pelas altitudes do terreno, para posterior comparação entre elas.

Na Figura 55 é representada a nuvem de pontos antes (Figura 55a) e após (Figura 55b) a normalização. Observe que após a normalização todos os objetos passaram a ter sua base como plano de referência, ou seja, o solo.

Figura 55 – Nuvem de pontos da área de estudo 1, gerada com sistema LiDAR (aerotransportado tripulado) antes da normalização (a) e após a normalização (b)



(a)

(b)

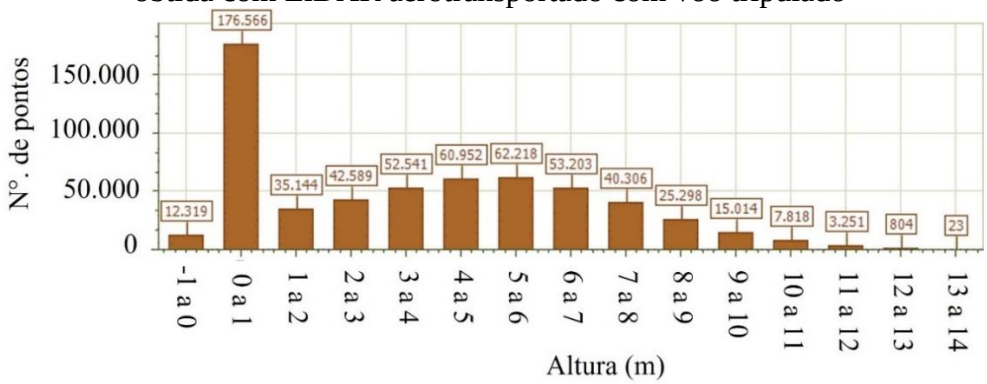
Fonte: O autor

Na Figura 55a pode ser observada a ondulação do relevo que fora planificado após a normalização, Figura 55b. Para maior compreensão, a partir desta etapa da redação do trabalho, onde se lê nuvem de pontos entenda-se nuvem de pontos normalizada.

5.3.1 Área de estudo 1

A nuvem de pontos da área de estudo 1 obtida com LiDAR aerotransportado com **voo tripulado** possui densidade de aproximadamente 47 pontos/m² e um distância entre pontos de 14,5 cm, total de 588.046 pontos e elevação máxima de 13,55 m. A distribuição da nuvem de pontos pode ser observada na Figura 56.

Figura 56 – Classificação por altura dos retornos da nuvem de pontos da área de estudo 1 obtida com LiDAR aerotransportado com voo tripulado

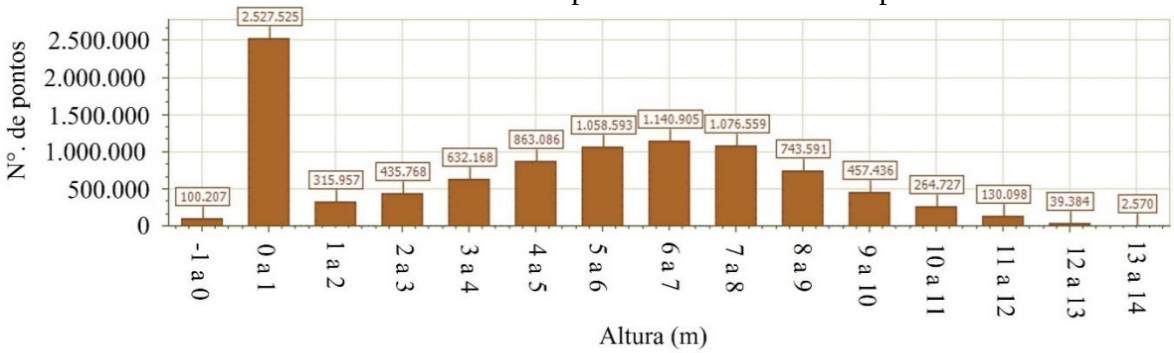


Fonte: O autor

Na Figura 56 é possível notar que o maior número de retornos ficou entre zero e um metro de altura (176.566 pontos), sendo que na vegetação observou-se a maior concentração dos retornos no intervalo de 5 m a 6 m.

A nuvem de pontos da área de estudo 1 obtida com LiDAR aerotransportado com **voo não tripulado** possui densidade de aproximadamente 1.463 pontos/m² e um distância entre pontos de 2,6 cm, total de 9.788.574 pontos e elevação máxima de 13,54 m. A distribuição da nuvem de pontos pode ser observada na Figura 57.

Figura 57 – Classificação por altura dos retornos da nuvem de pontos da área de estudo 1 obtida com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado



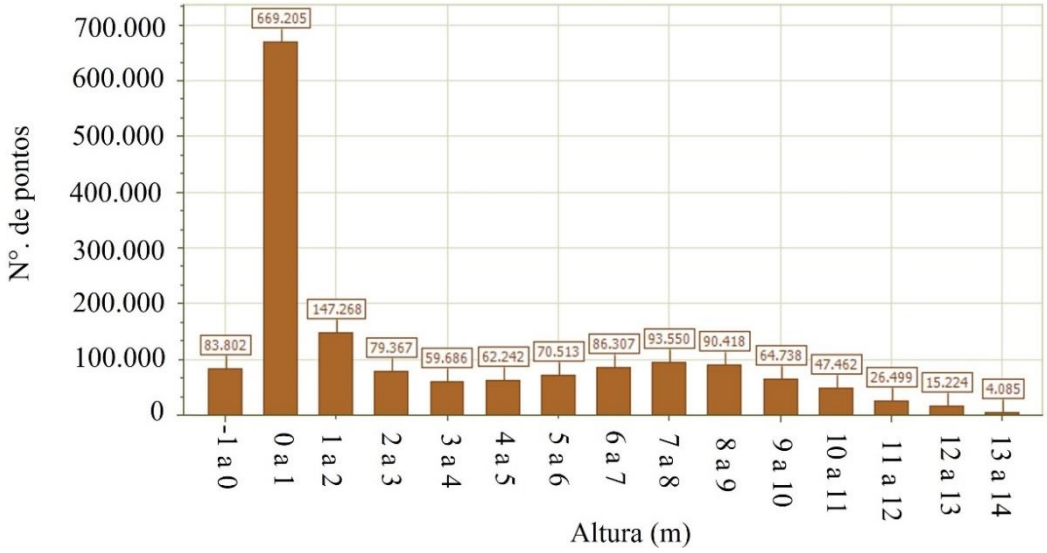
Fonte: O autor

Na Figura 57, baseada no LiDAR aerotransportado com voo não tripulado, é possível notar que o maior número de retornos ficou entre zero e um metro de altura (2.527.525 pontos), sendo que na vegetação observou-se a maior concentração dos retornos no intervalo de 5 m a 8 m.

Tanto na Figura 56 como na Figura 57, os retornos oriundos do solo indicam que, apesar da cobertura vegetal, o pulso *laser* foi capaz de passar pela copa das árvores, atingindo o solo e descrevendo o relevo abaixo da vegetação.

A nuvem de pontos da área de estudo 1 obtida com levantamento aerofotogramétrico (câmera digital RGB) possui densidade de aproximadamente 129 pontos/m² e um distância entre pontos de 8,8 cm, total de 1.602.889 pontos e elevação máxima de 13,89 m. A distribuição da nuvem de pontos pode ser observada na Figura 58.

Figura 58 – Classificação por altura dos retornos da nuvem de pontos da área de estudo 1 obtida com levantamento aerofotogramétrico (RPAS)



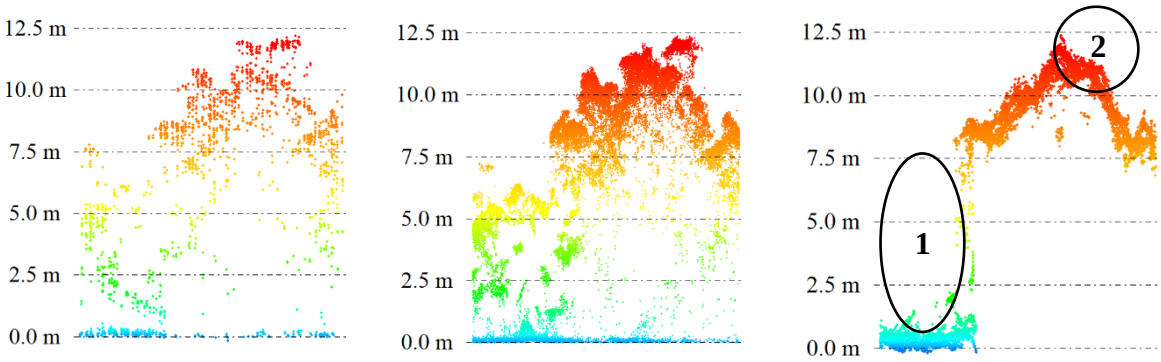
Fonte: O autor

Na Figura 58 é possível notar que o maior número de pontos ficou entre zero e um metro de altura (669.205 pontos), enquanto a segunda maior concentração de pontos ocorreu entre um e dois metros de altura (147.268); isto ocorreu por filtragem inadequada na geração do MDS, como pode ser observado na Figura 58c. Nesta figura observa-se que parte da vegetação arbórea representada no círculo 1 foi reduzida para vegetação arbustiva (de 7,5 m para 2 m). Nota-se, ainda, na Figura 58, que a maior concentração dos pontos na vegetação foi no intervalo de 7 m a 9 m.

Em todas as nuvens de pontos (Figuras 56, 57 e 58), nota-se que a maior concentração de pontos ocorreu no intervalo de zero a um metro, indicando que apesar da vegetação, o solo foi bem representado.

Na Figura 59 são apresentados os perfis longitudinais das nuvens de pontos obtidas com LiDAR aerotransportado com voo tripulado (a), LiDAR aerotransportado com voo não tripulado (b) e levantamento aerofotogramétrico (c).

Figura 59 – Perfil longitudinal da nuvem de pontos em uma das parcelas da área de estudo 1 obtida com: LiDAR aerotransportado com voo tripulado (a); LiDAR aerotransportado com voo não tripulado (b); e levantamento aerofotogramétrico (c), com a identificação da supressão de parte da vegetação (círculos 1 e 2)



(a) (b) (c)

Fonte: O autor

Com base na Figura 59, fica nítida a diferença da densidade de pontos entre as nuvens de pontos, sendo a nuvem mais densa aquela obtida com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado (Figura 59b), seguida da nuvem obtida com o levantamento aerofotogramétrico (Figura 59c) e a obtida com LiDAR aerotransportado com voo tripulado (Figura 59a). As nuvens obtidas com RPAS foram mais densas devido a menor velocidade e altura dos voos em relação ao voo tripulado, além disso ambos os voos com RPAS foram cruzados, ou seja, os dados são coletados em voos ortogonais entre si.

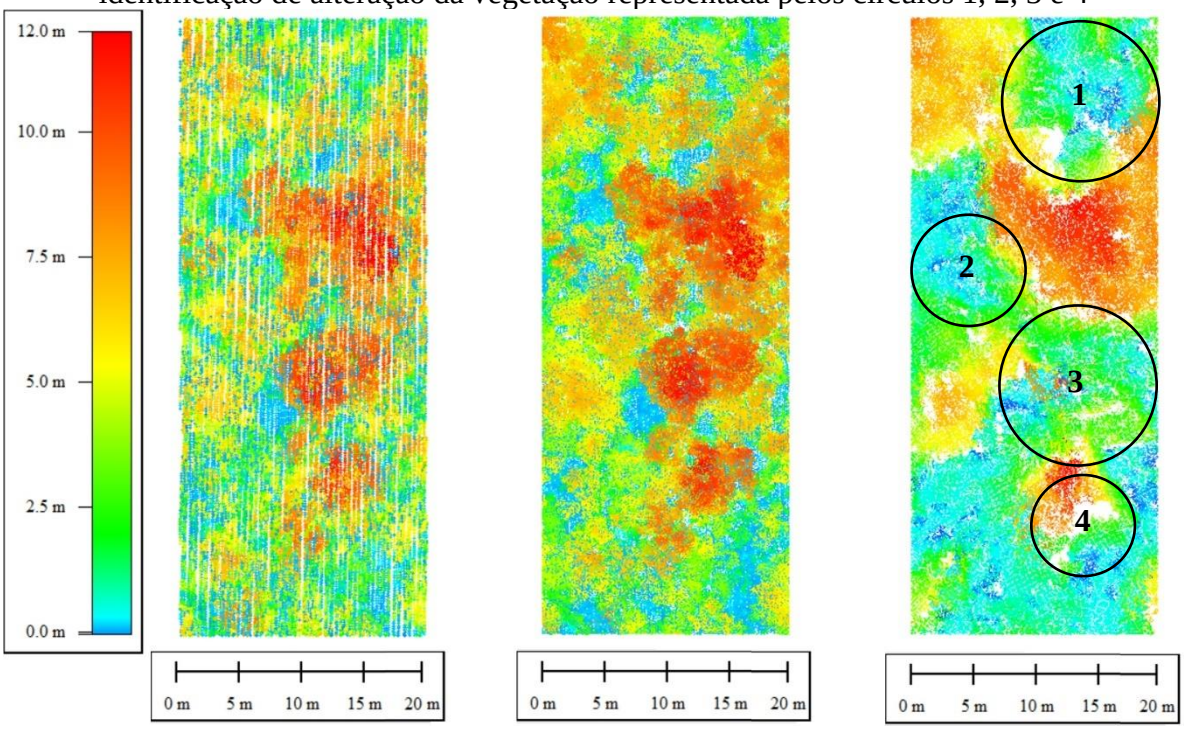
Ao analisar a Figura 59, observa-se que o contorno da vegetação foi melhor definido nas nuvens mais densas. No entanto, na nuvem obtida com o levantamento aerofotogramétrico, percebe-se a supressão de parte da vegetação, como observados nos círculos 1 e 2 (Figura 59c), devido aos filtros automaticamente definidos na geração do MDS.

Nota-se ainda na Figura 59 que todos os modelos (MDS e MDT) foram precisos, pois, ao normalizar as nuvens de pontos, não houve discrepância entre as alturas da vegetação. Conforme observado nas Figuras 59a, 59b e 59c, onde a árvore mais alta possui aproximadamente 12,5 metros em todas as nuvens de pontos.

Outro fato que pode ser constatado na Figura 59 é a ausência de pontos no solo sob a vegetação na nuvem de pontos obtida com o levantamento aerofotogramétrico (Figura 59c), devido à obstrução gerada pela copa das árvores; este fato, porém, não foi observado nas nuvens de pontos obtidas com LiDAR, pois o pulso *laser* consegue passar entre as folhas as árvores e atingir o solo.

Na Figura 60 está representada a hipsometria gerada com as nuvens de pontos em uma das parcelas da área de estudo 1, obtidas com LiDAR aerotransportado com voo tripulado (a), LiDAR aerotransportado com voo não tripulado (b) e levantamento aerofotogramétrico (c).

Figura 60 – Representação hipsométrica das nuvens de pontos em uma das parcelas da área de estudo 1, obtidas com LiDAR aerotransportado com voo tripulado (a), LiDAR aerotransportado com voo não tripulado (b) e levantamento aerofotogramétrico (c), com identificação de alteração da vegetação representada pelos círculos 1, 2, 3 e 4



(a) (b) (c)

Fonte: O autor

A eliminação de parte da vegetação observada na nuvem de pontos obtida com levantamento aerofotogramétrico na Figura 59c, é corroborada também na Figura 60c, pela alteração da vegetação representada pelos círculos 1, 2, 3 e 4.

Na Figura 60a é possível identificar o tipo de varredura *laser* utilizada na coleta de dados LiDAR aerotransportado com voo tripulado, pelo aspecto descontínuo da nuvem de pontos, padrão serrilhado característico da varredura com espelho oscilante.

Nas Figuras 56, 57 e 58, o maior número de pontos ficou entre zero e um metro de altura, pois a vegetação da área de estudo 1 é menos densa e caracterizada por espaços vazios entre as aglomerações de árvores. Estes espaços vazios entre as aglomerações de árvores (polígonos pretos) podem ser observados na Figura 61.

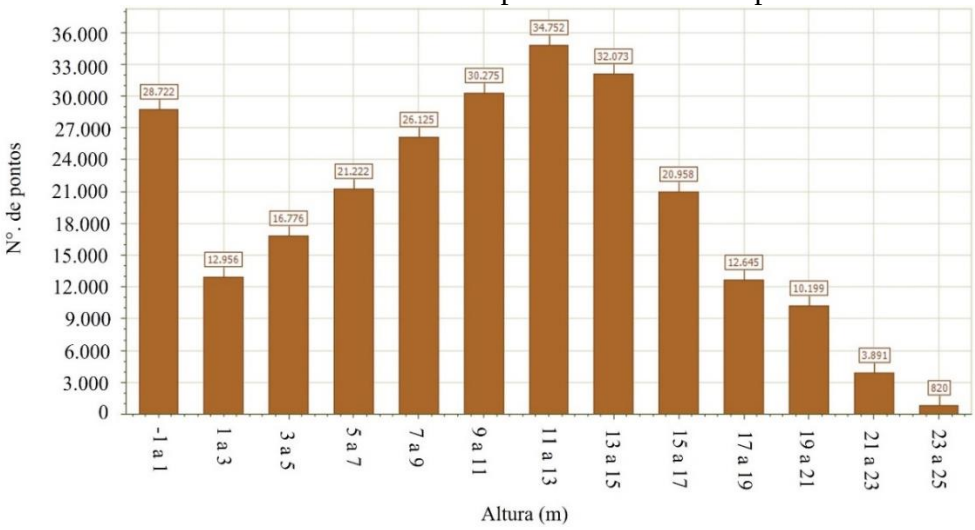
Figura 61 – Vista superior da vegetação da parcela 6 da área de estudo 1 (com as aglomerações de árvores representadas em polígonos pretos) e suas imediações

Fonte: O autor

5.3.2 Área de estudo 2

A nuvem de pontos da área de estudo 2 obtida com LiDAR aerotransportado com voo tripulado possui densidade de aproximadamente 67 pontos/m² e um distância entre pontos de 12,2 cm, total de 251.414 pontos e elevação máxima de 24,84 m. A distribuição da nuvem de pontos pode ser observada na Figura 62.

Figura 62 – Classificação por altura dos retornos da nuvem de pontos da área de estudo 2 obtida com LiDAR aerotransportado com voo tripulado

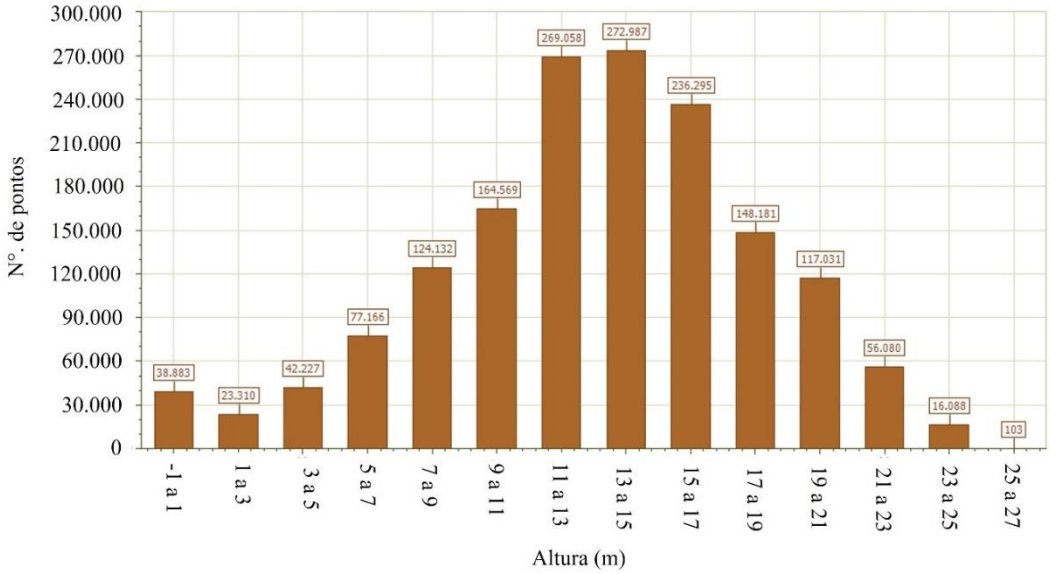


Fonte: O autor

Apesar da presença de dossel na área de estudo 2, nota-se na Figura 62 que os retornos oriundos do solo representam o quarto maior valor; isso indica que, apesar da cobertura vegetal, o pulso *laser* foi capaz de passar pelas copas das árvores, atingindo o solo e descrevendo o relevo abaixo da vegetação.

A nuvem de pontos da área de estudo 2 obtida com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado possui densidade de aproximadamente 379 pontos/m² e um distância entre pontos de 5,1 cm, total de 1.586.110 pontos e elevação máxima de 25,22 m. A distribuição da nuvem de pontos pode ser observada na Figura 63.

Figura 63 – Classificação por altura dos retornos da nuvem de pontos da área de estudo 2 obtida com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado

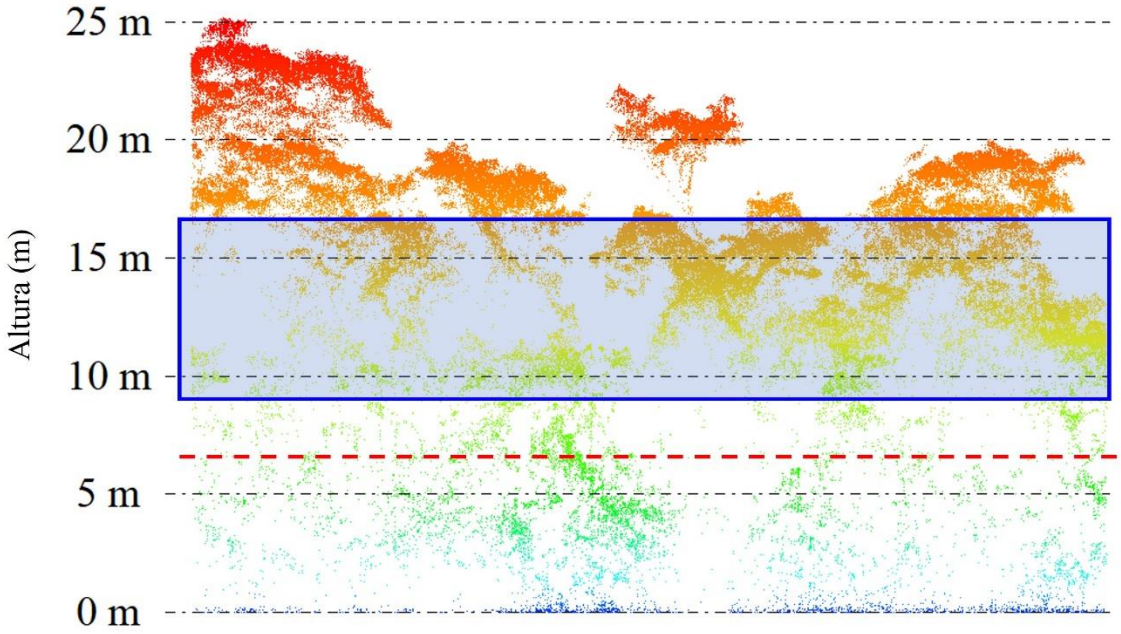


Fonte: O autor

Nota-se nas Figuras 62 e 63 que a maior quantidade de pontos foi observada no intervalo de 9 m a 15 m e 11 m a 17 m de altura, respectivamente. Apesar dessas alturas não serem próximas da moda das alturas da vegetação obtidas pelo levantamento do inventário florestal (Figura 38), as árvores contidas nestes intervalos possuem, pelo seu porte, as copas mais frondosas, consequentemente as mais refletidas pelos pulsos *laser*, justificando, assim, a maior concentração de pontos. Este fato também está ilustrado na Figura 64, na qual está representado um perfil longitudinal da parcela 2 da área de estudo 2, onde é possível notar que a maior quantidade de pontos se encontra dentro do retângulo azul, representando o intervalo de 9 m a 17 m de altura. Nesta figura, a linha vermelha tracejada representa a moda das alturas do inventário florestal da área de estudo 2 (6,5 m).

Também é possível notar na Figura 64 que o maior indivíduo se encontra próximo de 25 m, valor este inferior aos 38 m da maior altura medida no inventário florestal. Como a varredura *laser* foi realizada em 2015 e, portanto, antes do levantamento do inventário florestal, conclui-se assim que houve um erro de anotação ou mensuração do indivíduo que apresentou altura de 38 m (Tabela 11).

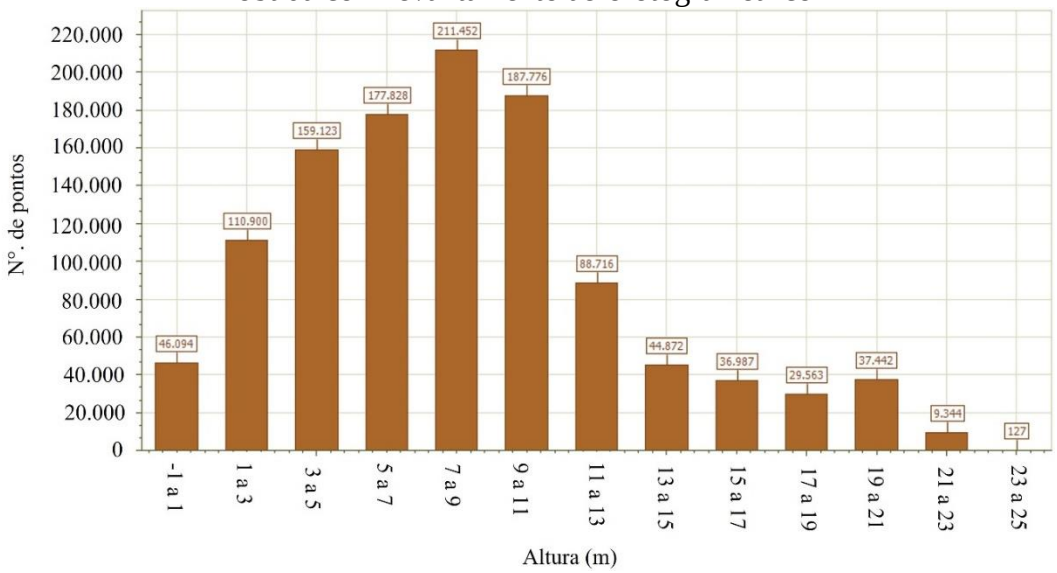
Figura 64 – Perfil longitudinal da parcela 2 da área de estudo 2, com intervalo de maior quantidade de pontos (retângulo azul), e moda das alturas calculada no inventário florestal (linha vermelha tracejada)



Fonte: O autor

A nuvem de pontos da área de estudo 2 obtida com levantamento aerofotogramétrico possui densidade de aproximadamente 258 pontos/m² e um distância entre pontos de 6,2 cm, total de 1.155.683 pontos e elevação máxima de 23,96 m. A distribuição da nuvem de pontos pode ser observada na Figura 65.

Figura 65 – Classificação por altura dos retornos da nuvem de pontos da área de estudo 2 obtida com levantamento aerofotogramétrico



Fonte: O autor

Nota-se na Figura 65 que o valor mais recorrente (211.452) ficou entre 7 m e 9 m de altura, valor este próximo da moda das alturas obtidas com o levantamento do inventário florestal, representada na Figura 39 (Histograma da altura da vegetação obtida com o levantamento do inventário florestal na área de estudo 2). Vale ressaltar que as fotografias aéreas foram tomadas no final da estação seca e, portanto, a maioria das árvores estava sem folhas, reduzindo a área de cobertura vegetal.

O número de pontos que representam o solo visualizados nas Figuras 62, 63 e 65 apresentaram um acréscimo gradual do LiDAR aerotransportado tripulado para o LiDAR aerotransportado não tripulado e para o levantamento aerofotogramétrico, apesar da presença da cobertura vegetal. Este fato foi corroborado pela análise da cobertura do dossel apresentada nas Figuras 67, 68 e 70.

No levantamento aerofotogramétrico, o solo foi bem representado, pois a maior parte da vegetação estava desprovida de folhas no final da estação seca e pelo fato da vegetação na área de estudo 2 ser característica de Mata Seca Decídua (RIBEIRO E WALTER, 2008). Na Figura 66 são apresentadas duas fotografias aéreas tomadas da parcela 5 da área de estudo 2, no meio estação seca (a -13 de julho de 2017) e no final da estação seca (b -13 de setembro de 2018), evidenciando grandes diferenças de biomassa aérea da vegetação lenhosa.

Figura 66 – Fotografia aérea da parcela 5 da área de estudo 2, no meio (a) e no final (b) da estação seca

(a - 13 de julho de 2017) (b - 13 de setembro de 2018)

Fonte: O autor

Os pontos que passaram pela vegetação atingindo o solo possibilitaram a descrição do relevo abaixo da vegetação, condição importantíssima para a obtenção do MDT. Caso o MDT abaixo da vegetação não fosse perfeitamente detalhado, seria impossível determinar com exatidão o CHM, dado essencial para todas as análises relacionadas às nuvens de pontos deste trabalho.

5.4 Cobertura do dossel nas parcelas

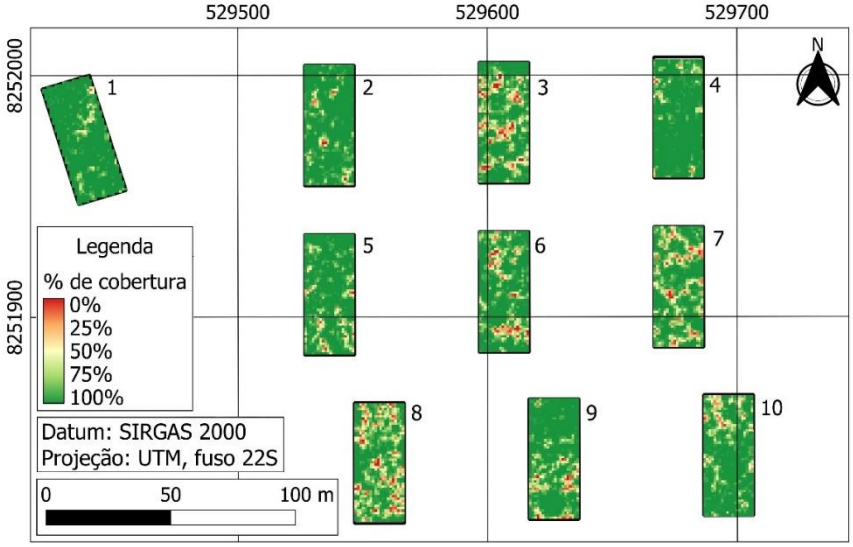
Com intuito de caracterizar a vegetação, foi analisada a cobertura do dossel das áreas de estudo. Para tal, cada parcela foi subdividida em *pixel* de 1 m x 1 m, sendo neste *pixel* avaliado o número de retornos acima da linha de quebra de altura, dividido pelo número total de retornos. Se o valor encontrado for menor ou igual a 0,5, este *pixel* foi considerado como solo, caso contrário cobertura vegetal. Os resultados são apresentados nas sessões 5.4.1 e 5.4.2.

5.4.1 Área de estudo 1

Com o objetivo de verificar o percentual de cobertura vegetal na área estudo 1, foram geradas as Figuras 67, 68 e 70, nas quais a linha de quebra de altura foi delimitada em 1,03 metros, menor indivíduo mensurado no inventário florestal. O percentual de cobertura foi calculado aplicando-se a Equação 27.

Na Figura 67 está a representação da porcentagem de cobertura vegetal da área de estudo 1 acima de 1,03 m de altura do solo, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo tripulado.

Figura 67 – Porcentagem de cobertura vegetal da área de estudo 1 acima de 1.03 m de altura do solo, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo tripulado



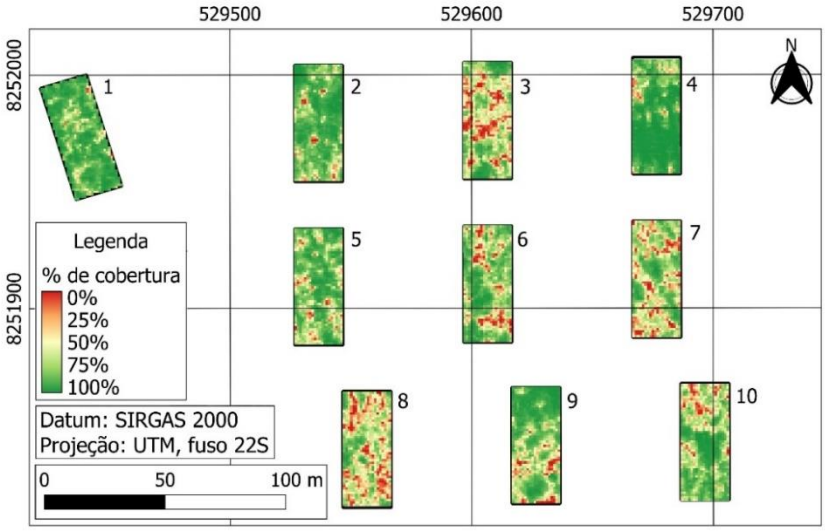
Fonte: O autor

Aplicando-se a Equação 27 nas dez parcelas na nuvem de pontos obtida com LiDAR aerotransportado com **voo tripulado**, obteve-se o percentual de 7,65% para solo e 92,35% para cobertura vegetal.

Na Figura 68 está a representação da porcentagem de cobertura vegetal da área de estudo 1 acima de 1,03 m de altura do solo, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**.

Aplicando-se a Equação 27 nas dez parcelas na nuvem de pontos obtida com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado, obteve-se o percentual de 19,34% para solo e 80,66% para cobertura vegetal.

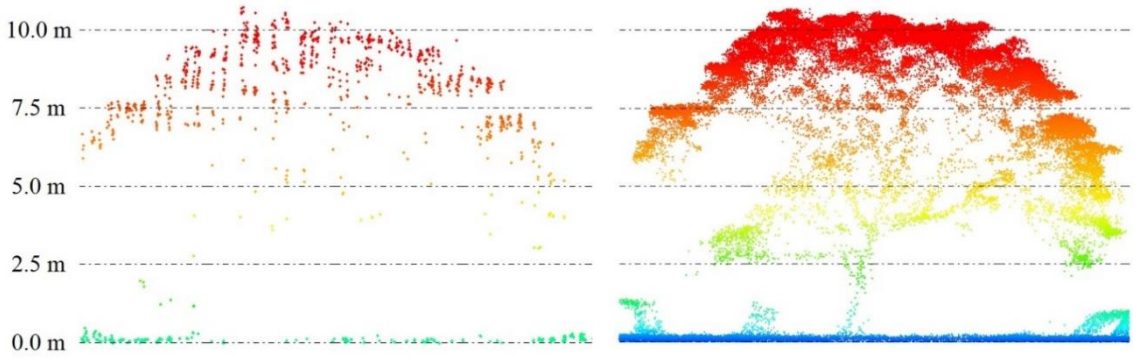
Figura 68 – Estimativa de cobertura vegetal da área de estudo 1 acima de 1,03 m do solo, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo não tripulado



Fonte: O autor

Comparando-se os percentuais de cobertura vegetal obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado e com voo não tripulado, percebe-se que no último a cobertura foi menor, sendo esta diferença oriunda da maior densidade de pontos *laser* da nuvem obtida com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**. Sendo a nuvem mais densa, foi possível caracterizar com maior precisão a cobertura vegetal, pois há uma melhor representatividade da parte aérea das árvores. Nesta nuvem foi possível identificar galhos, troncos e o contorno da vegetação mais próxima do real, conforme pode ser notado na Figura 69. Portanto o percentual de cobertura vegetal determinado com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado** provavelmente foi superestimado, devendo o valor correto ser o determinado com a nuvem de pontos obtida com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**.

Figura 69 – Perfil longitudinal de parte das nuvens de pontos do LiDAR aerotransportado com voo tripulado (a) e não tripulado (b)



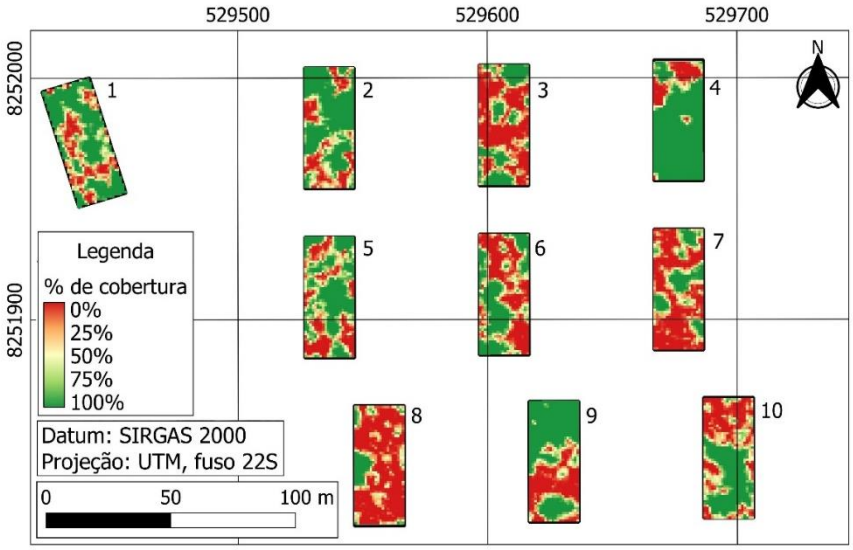
(a) (b)

Fonte: O autor

Na Figura 70 está a representação da porcentagem de cobertura vegetal da área de estudo 1 acima de 1,03 m de altura do solo, obtida com dados oriundos do levantamento aerofotogramétrico. Ressalta-se que nas fotografias digitais, todos os pontos são coletados no mesmo instante e por este motivo não há ordem de retornos como nos pontos *laser*. A altitude de cada ponto é determinada pela diferença de paralaxe entre pontos homólogos.

Aplicando-se a Equação 27 nas dez parcelas na nuvem de pontos obtida com levantamento aerofotogramétrico (i.e., RPAS embarcado com câmera digital), obteve-se o porcentual de 48,28% para solo e 51,72% para cobertura vegetal. Ressalta-se que este valor pode não refletir a realidade, pois os filtros automáticos inerentes ao processamento das fotografias aéreas removem parcialmente os *pixels* de vegetação, como já demonstrado nas Figuras 59c e 60c.

Figura 70 – Estimativa de cobertura vegetal da área de estudo 1 acima de 1,03 m do solo, obtida com dados oriundos do levantamento aerofotogramétrico



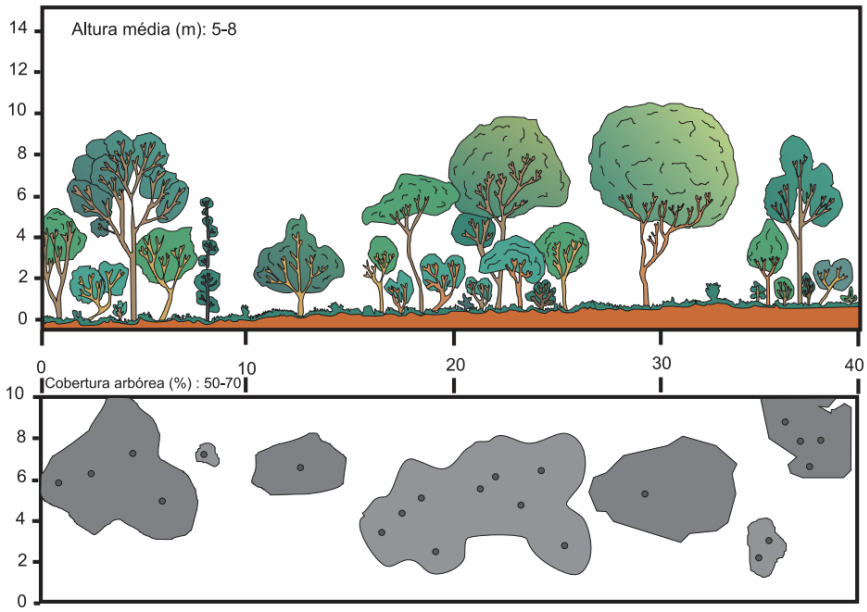
Fonte: O autor

Analisando as alturas mensuradas no inventário florestal (Figura 38 e Tabela 10), a classificação por altura dos retornos das nuvens de pontos (Figuras 56, 57 e 58) e a cobertura vegetal (Figura 68) da área de estudo 1, nota-se que a maior altura da vegetação encontrada foi de 14,9 m, a altura média da vegetação foi de 5,62 m, o maior número de pontos nas nuvens de pontos ficou entre 5 e 8 m e a cobertura vegetal de 80,66%. Estas características corroboram a heterogeneidade na vegetação da área de estudo 1, com transição entre Cerrado Denso e Cerradão, de acordo com a classificação de Ribeiro e Walter (2008). Apenas 3,8% (64 árvores de uma amostra de 1.699) possuem altura superior a 10 m. Portanto, a classificação da

vegetação utilizando apenas imagens de sensores é dificultada para estes dois tipos de fitofisionomias, sendo uma formação savânica (Cerrado Denso) e a outra formação florestal (Cerradão). A distinção em campo baseia-se também na composição florística, fator essencial para diferenciação entre fitofisionomias e cômputo da biodiversidade. Segundo Ribeiro e Walter (2008), o cerrado denso apresenta cobertura entre 50% a 70% e altura média entre 5 e 8 m.

Na Figura 71 é apresentado o diagrama de perfil e cobertura arbórea de um Cerrado Denso de acordo com Ribeiro e Walter (2008).

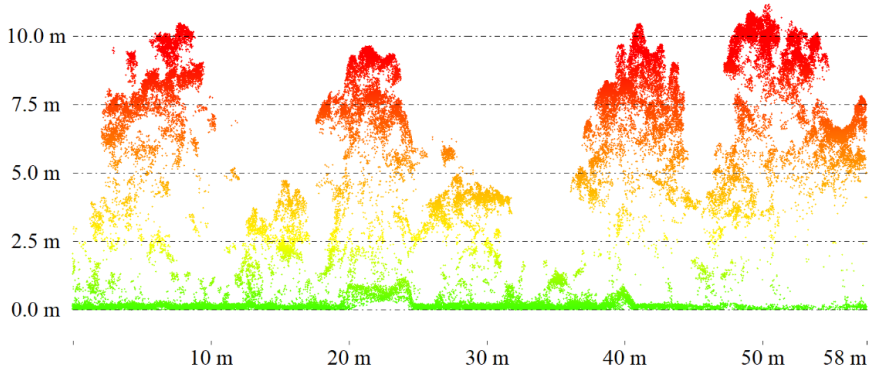
Figura 71 – Diagrama de perfil e cobertura arbórea de um Cerrado Denso



Fonte: Ribeiro e Walter (2008)

Na Figura 72 pode-se notar um perfil similar ao proposto por Ribeiro e Walter (2008), onde a altura máxima das árvores ficou próximo aos 10 m e as árvores menores tiveram alturas próximas de 5 m.

Figura 72 – Perfil longitudinal de parte da nuvem de pontos obtida com LiDAR aerotranspotado com voo não tripulado da parcela 3, área de estudo 1



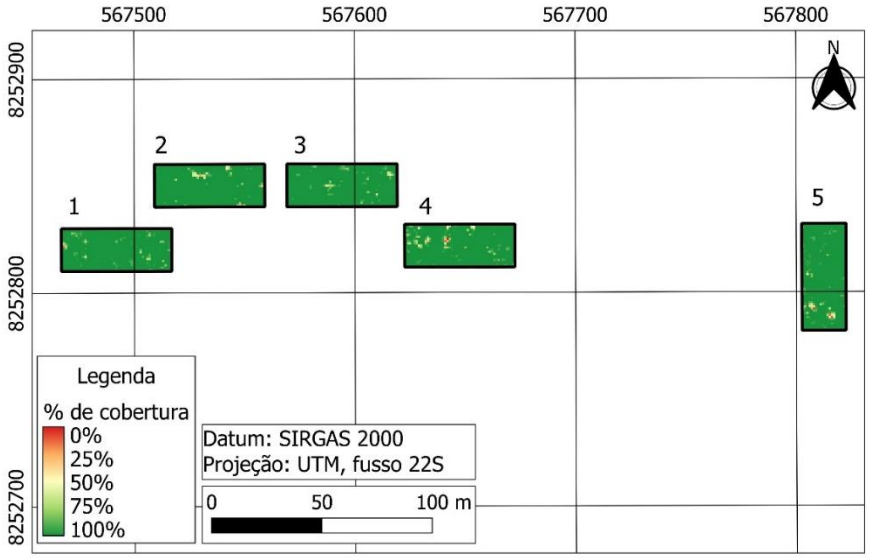
Fonte: O autor

5.4.2 Área de estudo 2

Com o objetivo de verificar o percentual de cobertura vegetal na área estudo 2, foram geradas as Figuras 73, 74 e 75, nas quais a linha de quebra de altura foi delimitada em 2,35 metros, menor indivíduo mensurado no inventário florestal. O porcentual de cobertura foi calculado aplicando-se a Equação 27.

Na Figura 73 são apresentadas as porcentagens de cobertura vegetal da área de estudo 2 acima de 2,35 m de altura do solo, obtidas com LiDAR aerotransportado com voo tripulado.

Figura 73 – Estimativa de cobertura vegetal da área de estudo 2 acima de 2,35 m do solo, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo tripulado

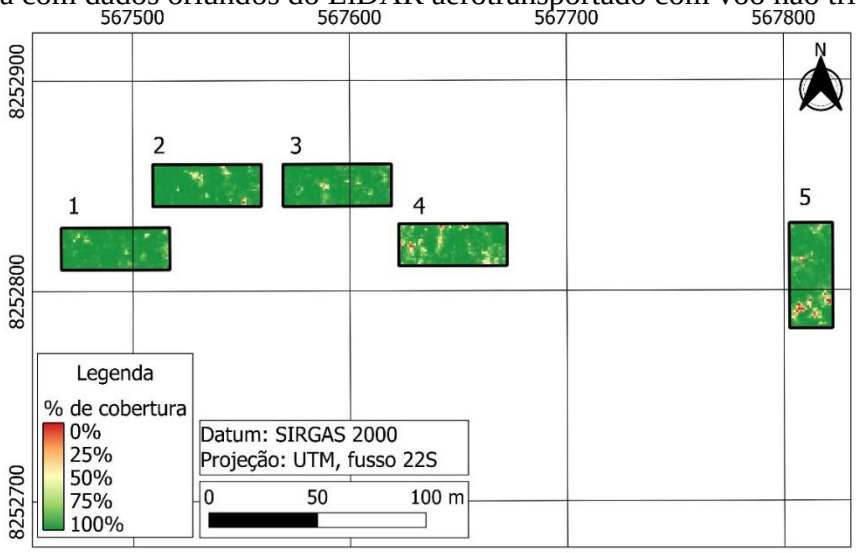


Fonte: O autor

Aplicando-se a Equação 27 nas cinco parcelas na nuvem de pontos obtida com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**, obteve-se o percentual de 0,58% para solo e 99,42% para cobertura vegetal.

Na Figura 74 são apresentadas as porcentagens de cobertura vegetal da área de estudo 2 acima de 2,35 m de altura do solo, obtidas com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**.

Figura 74 – Estimativa de cobertura vegetal da área de estudo 2 acima de 2,35 m do solo, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo não tripulado



Fonte: O autor

Aplicando-se a Equação 27 nas cinco parcelas na nuvem de pontos obtida com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**, obteve-se o percentual de 1,84% para solo e 98,16% para cobertura vegetal.

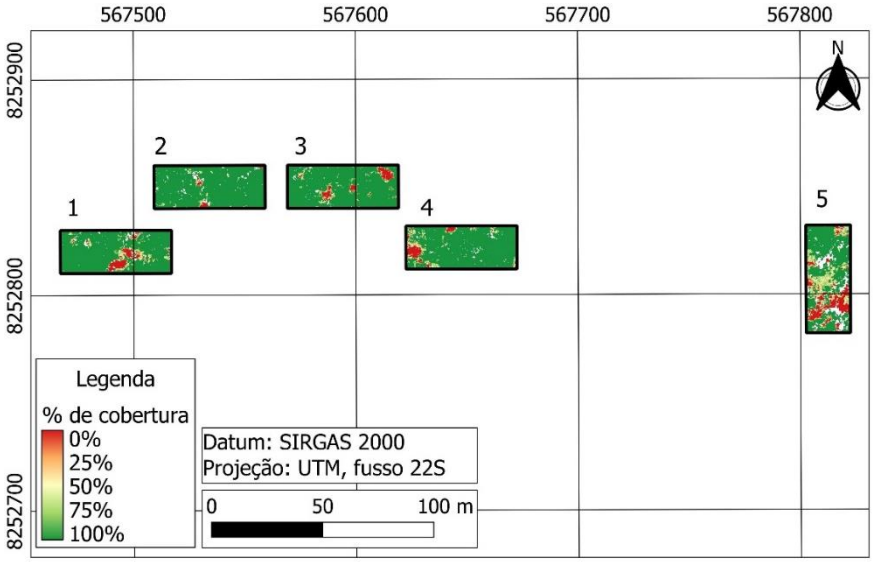
Comparando-se os percentuais de cobertura vegetal obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado** e com voo **não tripulado**, percebe-se que no último a porcentagem de cobertura vegetal foi menor, corroborando o resultado obtido na área de estudo 1, conforme anteriormente explicado e exemplificado com a Figura 69.

Na Figura 75 são apresentadas as porcentagens de cobertura vegetal da área de estudo 2 acima de 2,35 m de altura do solo, obtidas com levantamento aerofotogramétrico.

Aplicando-se a Equação 27 nas cinco parcelas na nuvem de pontos obtida com levantamento aerofotogramétrico, obteve-se o percentual de 3,48% para solo e 90,46% para cobertura vegetal. Observe que este total não corresponde a 100%, fato explicado pela não classificação da vegetação ou solo, percentual de 6,06%. A não classificação pode ser notada em todas as parcelas da Figura 75 (espaços vazios na cor branca), em especial na parcela 5, que

apresentou a maior quantidade de espaços vazios. Esta falha na classificação do solo ou vegetação pode ser explicada pela ausência de informação desses locais na nuvem de pontos.

Figura 75 – Estimativa de cobertura vegetal da área de estudo 2 acima de 2,35 m do solo, obtida com dados oriundos do levantamento aerofotogramétrico



Fonte: O autor

A presença de espaços vazios na nuvem de pontos se deve pela não identificação de pontos homólogos em duas ou mais fotografias pelo programa utilizado na geração do ortomosaico; este fato pode ser explicado pela oclusão do objeto, presença de sombras e/ou baixa iluminação, escala diferente de representação do objeto no estereopar (variação da atitude da câmera), movimentação real (vento) e/ou aparente (paralaxe) do objeto, e homogeneidade nas feições ou do objeto.

A nuvem de pontos com a presença de vazios (ausência de informação) da parcela 5 (parcela mais afetada) pode ser observada na Figura 76.

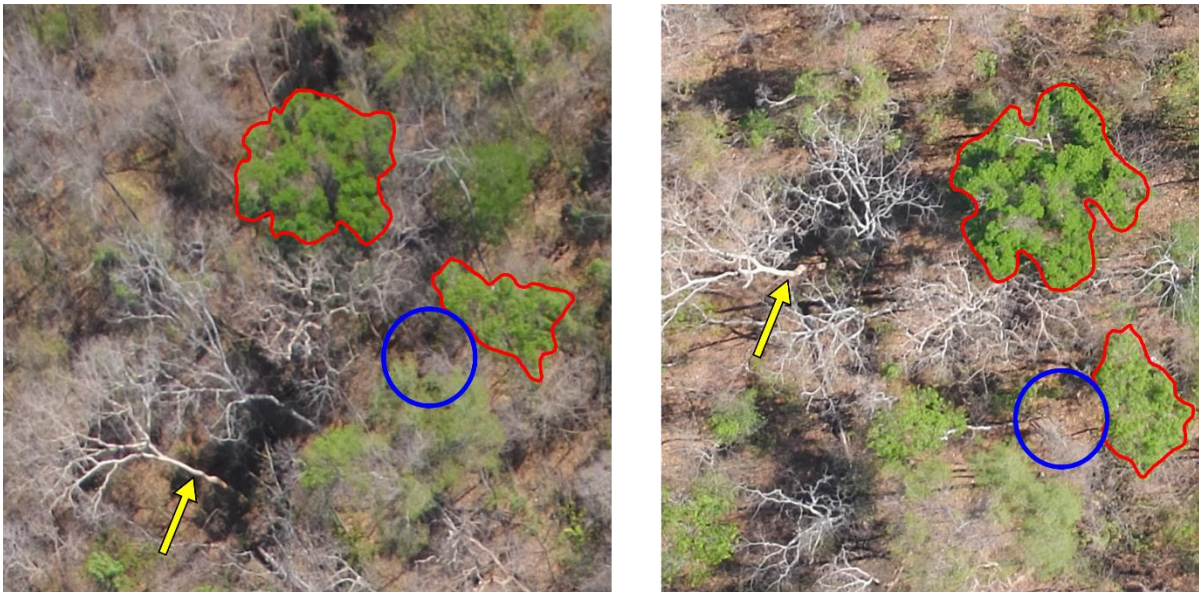
Na Figura 77 é apresentado um estereopar, na qual é possível observar visualmente a dificuldade do programa em identificar pontos homólogos. Nota-se que no círculo azul na fotografia da direita é possível identificar o solo, ao passo que no seu homólogo na fotografia da esquerda aparece somente a copa das árvores que obstrui o solo. Observa-se, também, que a árvore sem folhas indicada pela seta amarela aparece com o caule maior na fotografia da esquerda, devido a sua inclinação, nota-se ainda que os galhos estão em perspectivas diferentes no estereopar; estes fatos podem ser explicados pela diferença de paralaxe e projeção cônica da fotografia. Ressalta-se ainda que as copas (polígonos na cor vermelha) apresentaram formas e escalas distintas no estereopar, devido aos efeitos na variação da atitude da câmera. Todos estes fatores impedem o programa, utilizado na geração do ortomosaico, de identificar

automaticamente os pontos de passagem (*tie point*) no estereopar, gerando locais sem informação que na nuvem de pontos são representados como espaços vazios.

Figura 76 – Nuvem de pontos texturizada da parcela 5 da área de estudo 2, indicando descontinuidade na nuvem de pontos

Fonte: O autor

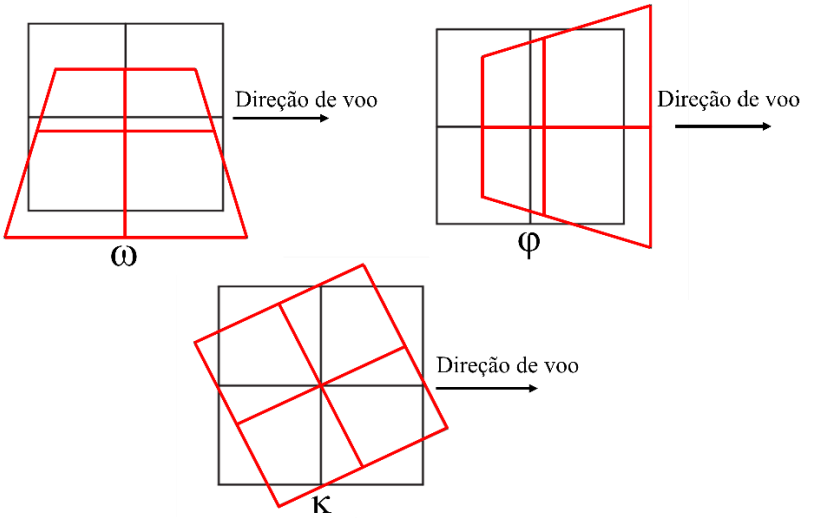
Figura 77 – Objetos homólogos no estereopar



Fonte: O autor

Na Figura 78 é possível observar uma representação genérica dos efeitos da variação da atitude (ω, φ e κ) da câmera na fotografia. Observa-se que somente a rotação em *kappa* não altera a escala da fotografia.

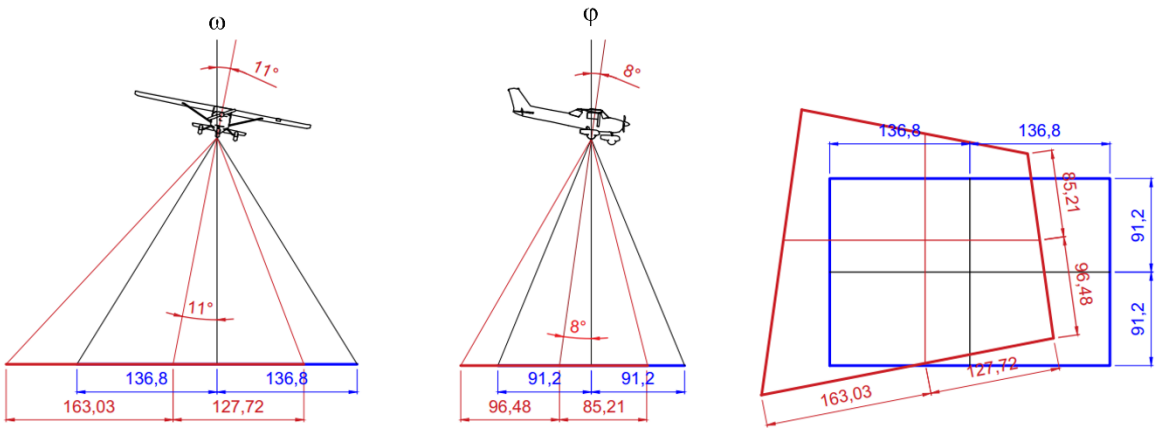
Figura 78 – Efeitos da variação da atitude da câmera (ω, φ e κ)



Fonte: Adaptado de Konecny (2014)

Na Figura 79 são apresentados os efeitos reais verificados em uma das fotografias do estereopar representado na Figura 77. Na Figura 79 as linhas de cor azul representam as dimensões no terreno de uma fotografia tomada na vertical ($\omega = 0$ e $\varphi = 0$), e as linhas de cor vermelha representam as dimensões e a área realmente imageada (Figura 78c) com as variações da atitude da câmera, ângulo *ômega* de 11° (Figura 78a) e o ângulo *phi* de 8° (Figura 78b).

Figura 79 – Efeitos da variação da atitude da câmera (ω e φ) nas dimensões de uma fotografia



(a) (b) (c)

Fonte: O autor

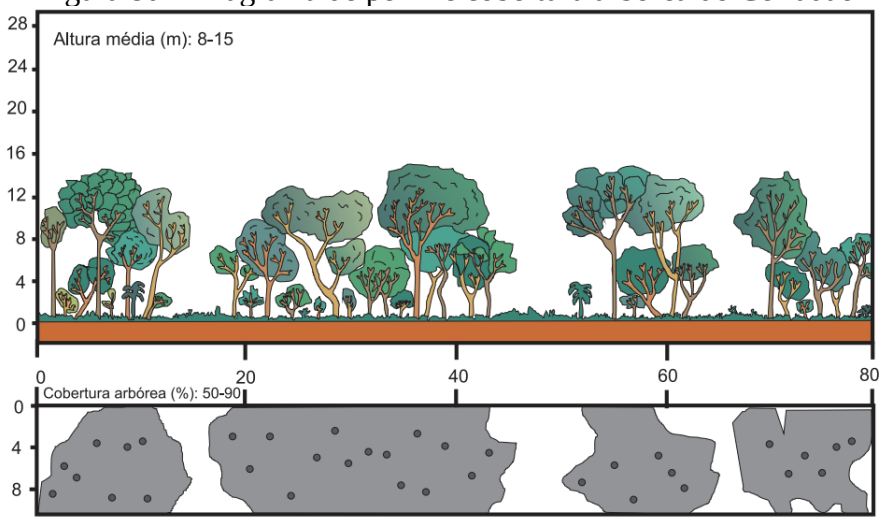
Na Figura 79c é possível verificar que ocorreu variação da escala no sentido horizontal (eixo x) e vertical (eixo y), e assim com dimensões do GSD irregulares. Nota-se que a área imageada no terreno possui um formato trapezoidal, porém esta fotografia no formato digital possui um formato retangular. Por este motivo, a maioria das pessoas entendem que a área

representada no terreno por qualquer fotografia é sempre um retângulo (GSD com dimensões regulares).

Analisando as alturas mensuradas no inventário (Figura 39 e Tabela 11), a classificação por altura dos retornos das nuvens de pontos (Figuras 62, 63 e 65) e a cobertura vegetal (Figura 74) da área de estudo 2, nota-se que a maior altura da vegetação encontrada foi de 26 m, a altura média da vegetação foi de 9,33 m, o maior número de pontos nas nuvens de pontos ficou entre 11 e 15 m e a cobertura vegetal de 98,16%. Baseado nestas características fitofisionômicas, foi possível classificar a vegetação da área de estudo 2 como sendo uma transição entre Cerradão e Mata Seca Semidecídua o de acordo com a classificação proposta por Ribeiro e Walter (2008), com predominância do Cerradão onde apenas 9,6 % (57 árvores de uma amostra de 595) possuem altura superior a 15 m. Segundo Ribeiro e Walter (2008), na Mata Seca a altura média do estrato arbóreo varia entre 15 e 25 m, no período chuvoso a cobertura arbórea pode ser de 70% a 95%. Cerradão a altura média do estrato arbóreo varia de 8 a 15m, com cobertura arbórea entre 50% e 90%.

Na Figura 80 é apresentado o diagrama de perfil e cobertura arbórea do Cerradão, de acordo com Ribeiro e Walter (2008).

Figura 80 – Diagrama de perfil e cobertura arbórea do Cerradão



Fonte: Ribeiro e Walter (2008)

5.5 Número de indivíduos nas parcelas

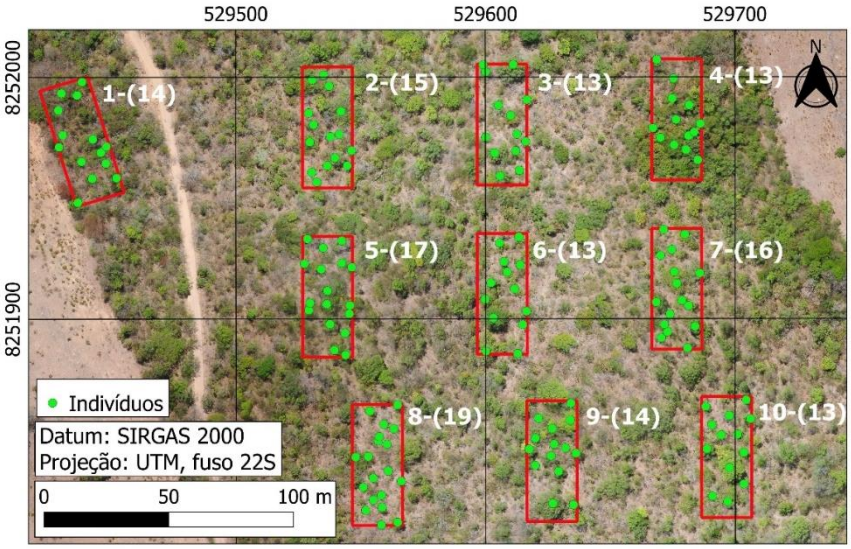
Uma das aplicações florestais da tecnologia LiDAR e RPAS pode ser a identificação e contagem de indivíduos. Neste caso, optou-se pelos métodos propostos por Albuquerque *et al.* (2020), Silva *et al.* (2016) e Wulder *et al.* (2000), no qual aplicam-se os algoritmos filtro

gaussiano e máxima local para a determinação do número de indivíduos nas parcelas. Os resultados obtidos nas áreas de estudo 1 e 2 são apresentados nos itens 5.5.1 e 5.5.2, respectivamente.

5.5.1 Área de estudo 1

As parcelas da área de estudo 1, bem como o número de indivíduos identificados em cada um (círculos na cor verde), acima de 1,03 m de altura do solo, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado** são apresentados na Figura 81.

Figura 81 – Contagem de indivíduos acima de 1,03 m de altura do solo para a área de estudo 1, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo tripulado

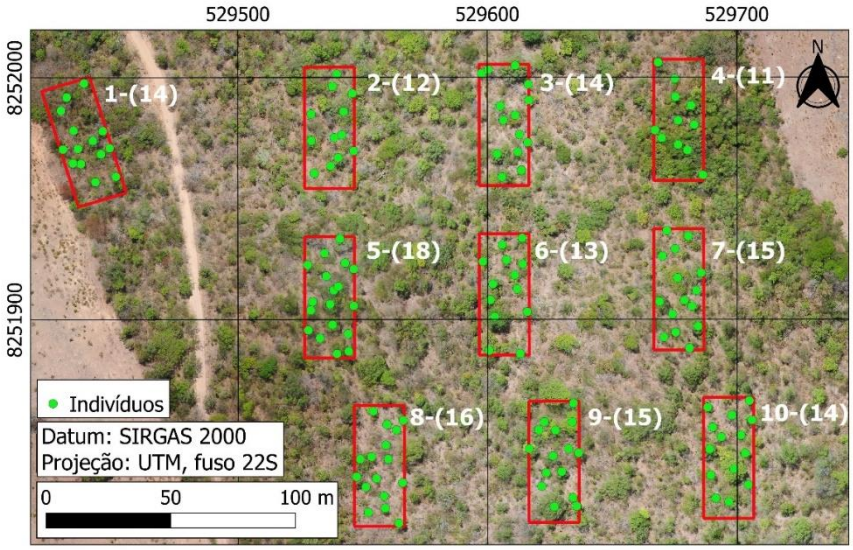


Fonte: O autor

Nota-se na Figura 81 que o número de indivíduos identificados de forma automática por parcela variou de 13 a 19.

Na Figura 82 são apresentadas as parcelas da área de estudo 1 e o número de indivíduos identificados em cada uma (círculos na cor verde), acima de 1,03 m de altura do solo, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**.

Figura 82 – Contagem de indivíduos acima de 1,03 m de altura do solo para a área de estudo 1, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo não tripulado



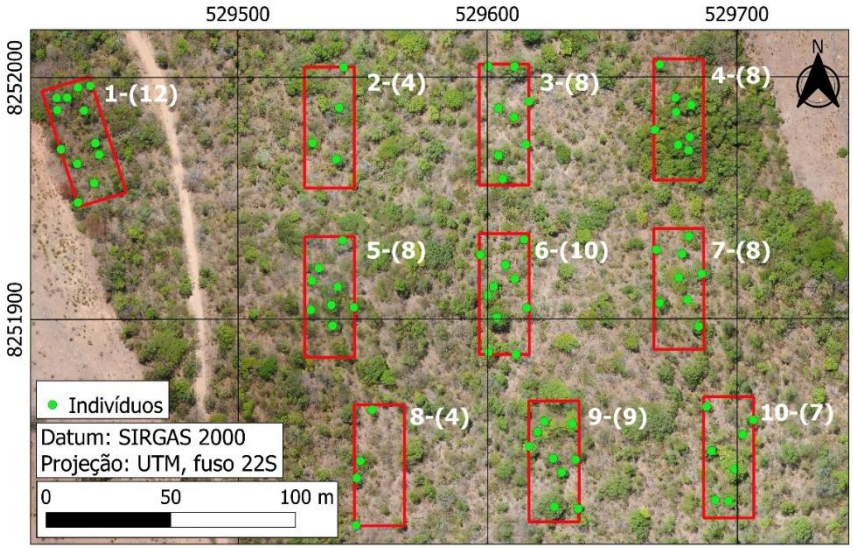
Fonte: O autor

Nota-se na Figura 82 que o número de indivíduos identificados de forma automática por parcela variou de 13 a 18.

Na Figura 83 são apresentadas as parcelas da área de estudo 1 e o número de indivíduos identificados em cada uma (círculos na cor verde), acima de 1,03 m de altura do solo, utilizando os dados obtidos no levantamento aerofotogramétrico.

Nota-se na Figura 83 que o número de indivíduos identificados de forma automática por parcela variou de 4 a 12.

Figura 83 – Contagem de indivíduos acima de 1,03 m de altura do solo para a área de estudo 1, obtida com dados oriundos do levantamento aerofotogramétrico



Fonte: O autor

Para facilitar a comparação dos resultados obtidos com a identificação e contagem do número de indivíduos utilizando dados LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**, dados LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado** e dados do levantamento **aerofotogramétrico**, com a contagem de indivíduos realizada no inventário florestal, foi confeccionada a Tabela 24, na qual são apresentados os resultados obtidos pelos três sistemas imageadores e do inventário florestal.

Tabela 24 – Número de indivíduos acima de 1,03 m de altura do solo, obtido com dados do inventário, LiDAR aerotransportado com voo tripulado, LiDAR aerotransportado com voo não tripulado e levantamento aerofotogramétrico

Parcela	**Inventário**	**Dados LiDAR tripulado**	**Dados LiDAR não tripulado**	**Dados aerofotogrametria**
	Indivíduos	**Indivíduos**	**Indivíduos**	**Indivíduos**
1	260	14	14	12
2	182	15	12	4
3	140	13	14	8
4	157	13	11	8
5	185	17	18	8
6	153	13	13	10
7	157	16	15	8
8	140	19	16	4
9	165	14	15	9
10	160	13	14	7
Total	**1.699**	**147**	**142**	**78**

Fonte: O autor

Nota-se na Tabela 24 que todos os resultados obtidos subestimaram o número de indivíduos obtido no levantamento do inventário, caracterizando-se como erros de omissão. O número de indivíduos obtido com os dados LiDAR (tripulado ou não) foram similares. O número de indivíduos obtido com dados do levantamento aerofotogramétrico foi aproximadamente 50% inferior aos obtidos com dados LiDAR.

A baixa eficiência na identificação de indivíduos utilizando-se dados do levantamento aerofotogramétrico deve-se inicialmente pela filtragem automática da nuvem de pontos pelo *software* adotado, conforme demonstrado nas Figuras 59c e 60c. Além disso, de acordo com Soares *et al*. (2015), os programas de processamento utilizados na geração nuvem de pontos

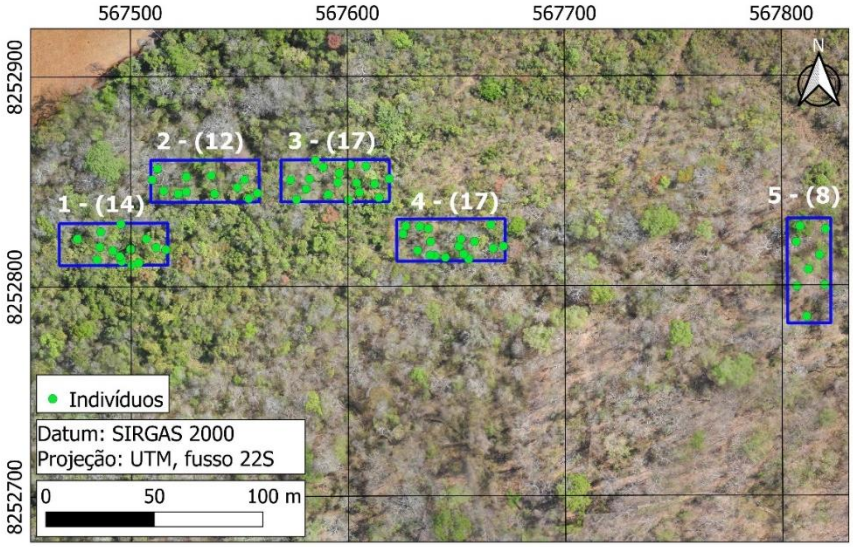
têm dificuldade em obter pontos nas copas das árvores que possuem dimensões reduzidas, como troncos e galhos finos, em fotografias tomadas com GSD de 5cm.

5.5.2 Área de estudo 2

A mesma análise foi realizada na área de estudo 2. Na Figura 84 estão apresentadas as suas referidas parcelas e o número de indivíduos identificados em cada uma (círculos na cor verde), acima de 2,35 m de altura do solo, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**.

Nota-se na Figura 84 que o número de indivíduos identificados de forma automática em cada parcela (área de estudo 2) variou de 8 a 17.

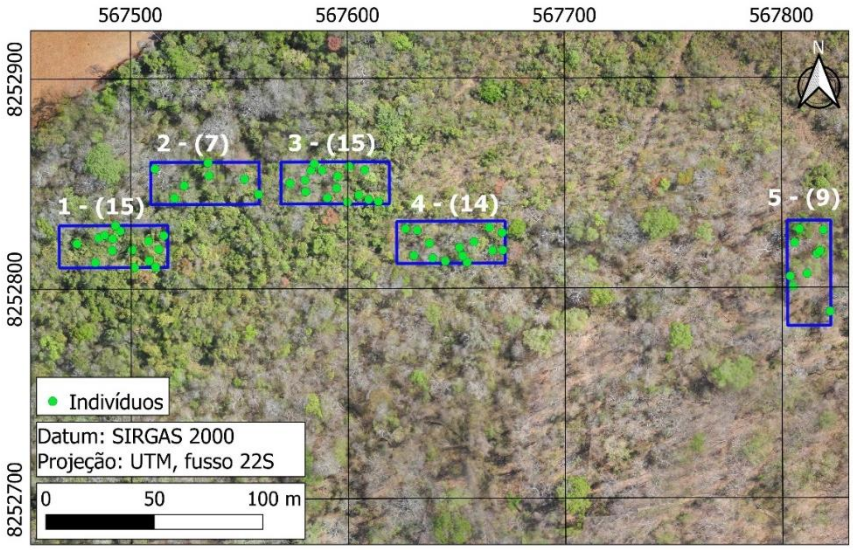
Figura 84 – Contagem de indivíduos acima de 2,35 m de altura do solo na área de estudo 2, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo tripulado



Fonte: O autor

Na Figura 85 são apresentadas as parcelas da área de estudo 2 e o número de indivíduos identificados em cada uma (círculos na cor verde), acima de 2,35 m de altura do solo, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**.

Figura 85 – Contagem de indivíduos acima de 2,35 m de altura do solo na área de estudo 2, obtida com dados oriundos do LiDAR aerotransportado com voo não tripulado

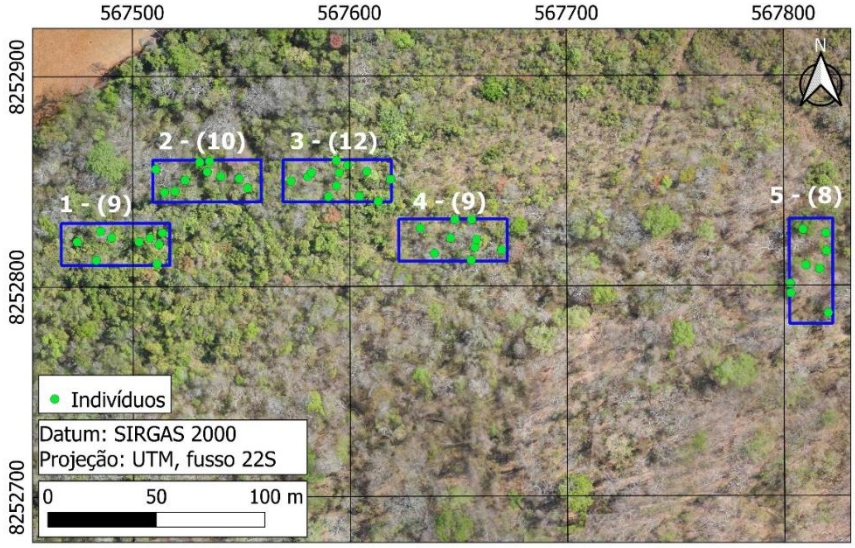


Fonte: O autor

Nota-se na Figura 85 que o número de indivíduos identificados de forma automática em cada parcela (área de estudo 2) variou de 9 a 15.

Na Figura 86 são apresentadas as parcelas da área de estudo 2 e o número de indivíduos identificados em cada uma (círculos na cor verde), acima de 2,35 m de altura do solo, utilizando os dados obtidos no levantamento aerofotogramétrico.

Figura 86 – Contagem de indivíduos acima de 2,35 m de altura do solo na área de estudo 2, obtida com dados oriundos do levantamento aerofotogramétrico



Fonte: O autor

Nota-se na Figura 86 que o número de indivíduos identificados de forma automática em cada parcela (área de estudo 2) variou de 8 a 12.

Da mesma forma que realizado para a área de estudo 1, os resultados obtidos com os três sistemas imageadores na área de estudo 2 foram comparados com a contagem de indivíduos realizada no inventário florestal, conforme demonstrado na Tabela 25.

Tabela 25 – Número de indivíduos acima de 2,35 m de altura do solo na área de estudo 2, obtida com dados do inventário, LiDAR aerotransportado com voo tripulado, LiDAR aerotransportado com voo não tripulado e levantamento aerofotogramétrico

Parcela	**Inventário**	**Dados LiDAR tripulado**	**Dados LiDAR não tripulado**	**Dados aerofotogrametria**
	Indivíduos	**Indivíduos**	**Indivíduos**	**Indivíduos**
1	92	14	15	9
2	102	12	7	10
3	156	17	15	12
4	149	17	14	9
5	96	8	9	8
Total	**595**	**68**	**60**	**48**

Fonte: O autor

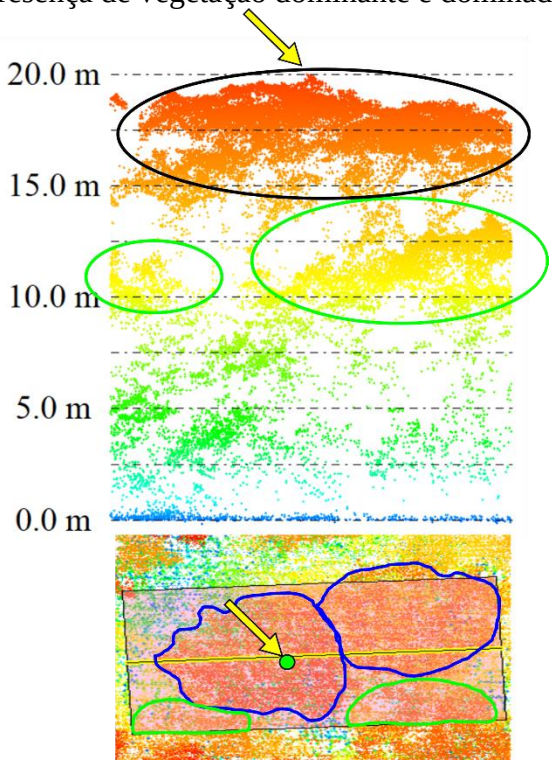
Assim como nos resultados obtidos na área de estudo 1, nota-se na Tabela 25 que todos os valores subestimaram o número de indivíduos obtido no levantamento do inventário florestal, gerando erros de omissão. O número de indivíduos obtido com os dados LiDAR (tripulado ou não) foram similares.

Já o número de indivíduos obtido com dados do levantamento aerofotogramétrico apresentou resultado superior ao encontrado na área de estudo 1; este fato pode ser explicado pela presença de vegetação mais densa na área de estudo 2. Durante o processamento na nuvem de pontos, o programa utilizado não interpretou a rugosidade da vegetação como sendo ruído, como ocorrido na área de estudo 1 (neste caso, devido a presença de vegetação mais esparsa). Por ser voltado para aplicações topográficas, o algoritmo utilizado pelo programa de processamento da nuvem de pontos pressupõe que a vegetação isolada ou esparsa é ruído, sendo, portanto, eliminada parcialmente ou por completo de forma automática.

Ainda na Tabela 25, nota-se que na parcela 2 os algoritmos identificaram 12 indivíduos utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**, ao passo que

utilizando dados obtidos com o LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**, identificou-se 7 indivíduos. Este fato pode ser explicado inicialmente pela maior densidade de pontos na nuvem obtida com o LiDAR aerotransportado com voo não tripulado, em que duas ou mais árvores que possuem aproximadamente a mesma altura e vizinhas são identificadas como sendo um único indivíduo, conforme apresentado na Figura 87.

Figura 87 – Perfil longitudinal e planta baixa de parte da nuvem de pontos obtida com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado, indicando a fusão de duas copas e presença de vegetação dominante e dominada

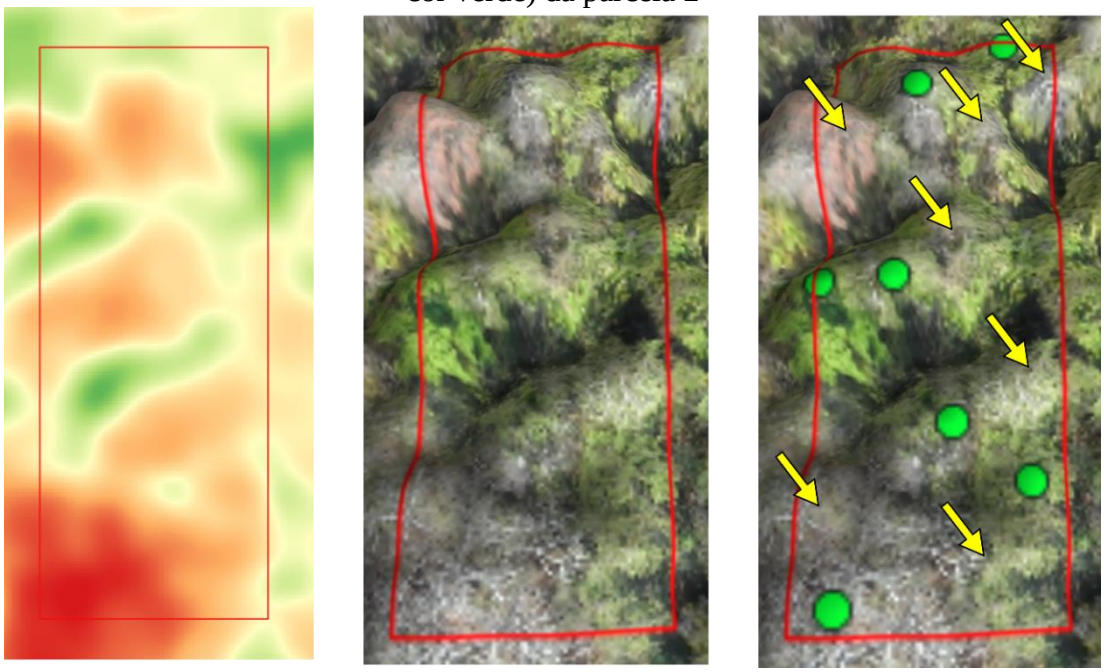


Fonte: O autor

Na Figura 87 é possível notar duas árvores distintas (polígonos na cor azul indicados na planta baixa) que foram identificadas pelo algoritmo como sendo apenas um único indivíduo (ponto na cor verde). Ainda que o algoritmo tenha identificado a posição real do indivíduo no local indicado (pela seta na cor amarela no perfil longitudinal), nota-se que neste espaço há duas árvores e não uma como indicado pela fusão de suas copas. Também é possível notar no perfil longitudinal da Figura 87 a presença de vegetação dominante (círculo na cor preta) e vegetação dominada (círculos na cor verde e polígonos da mesma cor na planta baixa). Entende-se como vegetação dominante aquela que possui maior altura, sombreando a de altura inferior (dominada).

Outra explicação para a omissão de indivíduos é a homogeneização do CHM decorrida da aplicação do filtro gaussiano, conforme pode ser notado na Figura 88a. Nesta figura (88) são apresentados o CHM filtrado em vista superior (a), o CHM filtrado em perspectiva 3D (b), e o CHM filtrado em perspectiva 3D com os indivíduos identificados automaticamente (círculos na cor verde) da parcela 2.

Figura 88 – CHM filtrado em vista superior (a), CHM filtrado em perspectiva 3D (b), CHM filtrado em perspectiva 3D com os indivíduos identificados automaticamente (círculos na cor verde) da parcela 2



(a) (b) (c)

Fonte: O autor

Além do CHM homogeneizado com a aplicação do filtro gaussiano, impedindo a identificação visual do contorno das copas de algumas árvores, é possível notar que o filtro suprimiu algumas árvores não dominantes (Figura 88b), mesmo com a presença de folhas em sua copa, e manteve árvores dominantes mesmo sem a presença de folhas em sua copa no CHM. Na Figura 88c é possível identificar visualmente algumas árvores, mesmo com folhas na copa, que não foram computadas pelo algoritmo conforme indicado pelas setas da cor amarela. O filtro gaussiano, com os parâmetros utilizados, provocou a omissão de parte das árvores identificados pelo algoritmo máxima local.

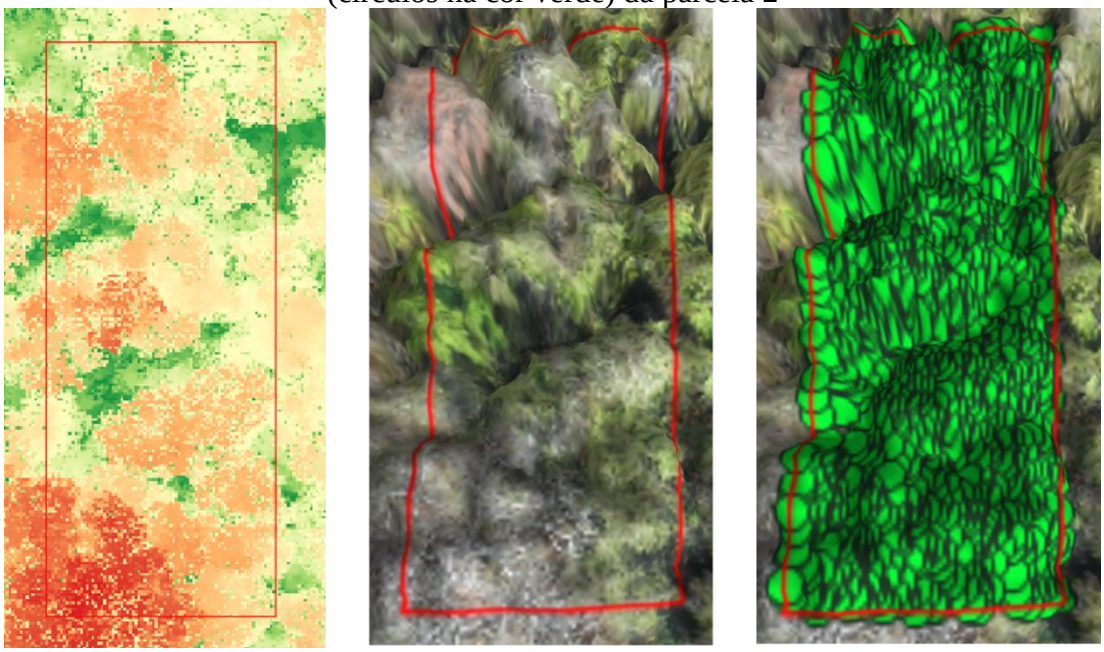
O número total de indivíduos identificados automaticamente no CHM pelo algoritmo máxima local, com a aplicação do filtro gaussiano, foi de 7. Observe-se que este valor é quinze vezes inferior ao número de indivíduos contados com o levantamento do inventário florestal (102) apresentado na Tabela 25.

Na Figura 89 são apresentados o CHM sem filtro em vista superior (a), o CHM sem filtro em perspectiva 3D (b), e o CHM sem filtro em perspectiva 3D com os indivíduos identificados automaticamente (círculos na cor verde) da parcela 2.

Na Figura 89a é possível identificar de forma mais nítida o contorno das copas de um número maior de árvores, se comparado com a Figura 88a. Na Figura 89b é possível notar que mesmo as árvores dominadas tiveram suas copas representadas tridimensionalmente no CHM. Na Figura 89c, os círculos verdes sobrepostos representam os indivíduos identificados de forma automática pelo algoritmo máxima local no CHM, sem a aplicação do filtro gaussiano. Com a ausência do filtro gaussiano, o algoritmo máxima local cometeu comissão (adição) da identificação do número de indivíduos.

O número total de indivíduos identificados automaticamente no CHM pelo algoritmo máxima local, sem a aplicação do filtro gaussiano, foi de 1085. Observe-se que este valor é dez vezes superior ao número de indivíduos contados com o levantamento do inventário florestal (102) apresentado na Tabela 25.

Figura 89 – CHM sem filtro em vista superior (a), CHM sem filtro em perspectiva 3D (b), CHM sem filtro em perspectiva 3D com os indivíduos identificados automaticamente (círculos na cor verde) da parcela 2



(a) (b) (c)

Fonte: O autor

Tanto para a área de estudo 1 quanto para a área de estudo 2, após a obtenção destes resultados, foram testados outros parâmetros além dos propostos por Albuquerque *et al.* (2020), Silva *et al.* (2016) e Wulder *et al.* (2000), para a aplicação dos algoritmos filtro gaussiano e

máxima local; porém, todos eles apresentaram erros de omissão superiores aos obtidos quando aplicados os parâmetros inicialmente sugeridos.

Ao realizar a contagem de indivíduos utilizando dados oriundos do sistema LiDAR aerotransportado **tripulado ou não** esperava-se a omissão do número de indivíduos nas parcelas, seja pela união de copas de árvores vizinhas com mesma altura, ou pela supressão das árvores dominadas, por apresentarem altura inferior ou estarem à sombra das árvores dominantes.

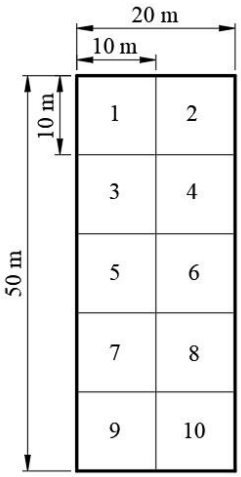
Em relação à contagem de indivíduos utilizando dados oriundos do RPAS, esperava-se a omissão devido à alta resolução espacial das fotografias, pois o programa de processamento apresenta restrição na identificação de pontos homólogos nas copas das árvores, devido ao tamanho das folhas. Ao tomar fotografias (estereopar), o mesmo objeto aparece em posição distinta devido ao seu deslocamento relativo, gerando regiões de oclusão, mudança da forma, ou escala do objeto; assim, nestas regiões, não há geração de pontos de passagem (*tie points*), ocasionando vazios ("buracos") na nuvem de pontos. Além disto, as árvores menores são oclusas pelas árvores de maior porte.

Com base nesses resultados, percebe-se que tais métodos de processamento, aliados aos três sistemas imageadores, terão melhor eficiência na contagem de árvores em áreas de reflorestamento ou restauração ecológica, uma vez que um espaçamento mínimo no plantio será respeitado. Em fato, alguns estudos vêm demonstrando esta aplicação com sucesso, empregando-se RPAS embarcados com câmeras digitais comuns, padrão RGB (ALBUQUERQUE *et al.*, 2021).

5.6 Métricas das nuvens de pontos e intensificação do número de parcelas

Com o intuito de se obter um maior número de observações para a realização das análises estatísticas aplicadas na predição da biomassa, as métricas foram extraídas de subparcelas com dimensões de 10 m x 10 m, obtidas pela subdivisão de cada parcela com dimensão de 20 m x 50 m (Figura 90).

Figura 90 – Parcela de 50 m x 20 m dividida em subparcelas de 10 m x 10 m



Fonte: O autor

Com a divisão das parcelas, obteve-se um total de 100 subparcelas para a área de estudo 1, e 50 subparcelas para a área de estudo 2, totalizando agora 150 subparcelas. Com o processamento das nuvens de pontos das subparcelas no programa Fusion, obteve-se métricas de retornos, elevação e intensidade. As métricas de retornos podem ser observadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Métricas de retornos obtidas com as nuvens de pontos

Total return count	*(All returns above 1.00) / (Total first returns) * 100*
Total return count above 1.00	*First returns above 1.00 All returns above 1.00*
Return 1 count above 1.00	*Percentage first returns above mean*
Return 2 count above 1.00	*Percentage first returns above mode*
Return 3 count above 1.00	*Percentage all returns above mean*
Return 4 count above 1.00	*Percentage all returns above mode*
Return 5 count above 1.00	*(All returns above mean) / (Total first returns) * 100*
Return 6 count above 1.00	*(All returns above mode) / (Total first returns) * 100*
Return 7 count above 1.00	*First returns above mean*
Return 8 count above 1.00	*First returns above mode*
Return 9 count above 1.00	*All returns above mean*
Other return count above 1.00	*All returns above mode*
Percentage first returns above 1.00	*Total first returns*
Percentage all returns above 1.00	*Total all returns*

Fonte: O autor

As métricas de elevação obtidas com as nuvens de pontos podem ser observadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Métricas de elevação obtidas com as nuvens de pontos

Elev minimum	*Elev P30*
Elev maximum	*Elev P40*
Elev mean	*Elev P50*
Elev mode	*Elev P60*
Elev stddev	*Elev P70*
Elev variance	*Elev P75*
Elev CV	*Elev P80*
Elev IQ	*Elev P90*
Elev skewness	*Elev P95*
Elev kurtosis	*Elev P99*
Elev AAD	*Canopy relief ratio*
Elev MAD median	*Elev SQRT mean SQ*
Elev MAD mode	*Elev CURT mean CUBE*
Elev L1	*Elev strata (below 1.00) total return count**
Elev L2	*Elev strata (below 1.00) return proportion**
Elev L3	*Elev strata (below 1.00) min**
Elev L4	*Elev strata (below 1.00) max**
Elev L CV	*Elev strata (below 1.00) mean**
Elev L skewness	*Elev strata (below 1.00) mode**
Elev L kurtosis	*Elev strata (below 1.00) median**
Elev P01	*Elev strata (below 1.00) stddev**
Elev P05	*Elev strata (below 1.00) CV**
Elev P10	*Elev strata (below 1.00) skewness**
Elev P20	*Elev strata (below 1.00) kurtosis**
Elev P25	

Fonte: O autor

Nota: * As métricas Elev strata (Elevação do estrato) se repetem para estratos de um em um metro, até o limite superior da vegetação.

As métricas de intensidade obtidas com as nuvens de pontos podem ser observadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Métricas de intensidade obtidas com as nuvens de pontos

Int minimum	*Int L kurtosis*
Int maximum	*Int P01*
Int mean	*Int P05*
Int mode	*Int P10*
Int stddev	*Int P20*
Int variance	*Int P25*
Int CV	*Int P30*
Int IQ	*Int P40*
Int skewness	*Int P50*
Int kurtosis	*Int P60*
Int AAD	*Int P70*
Int L1	*Int P75*
Int L2	*Int P80*
Int L3	*Int P90*
Int L4	*Int P95*
Int L CV	*Int P99*
Int L skewness	

Fonte: O autor

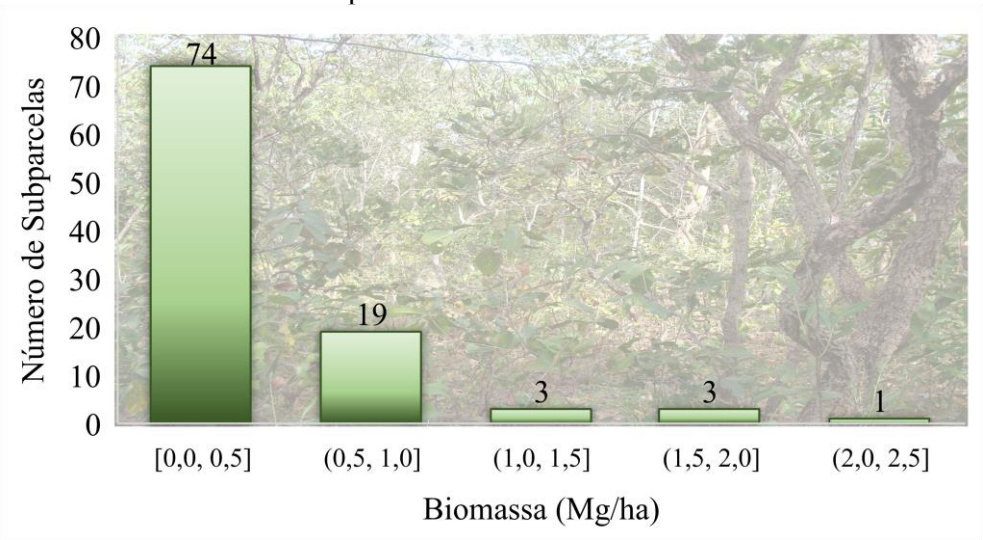
A nuvem de pontos obtida com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**, disponibilizada para esta pesquisa, não continha as informações de intensidade dos retornos. O levantamento aerofotogramétrico não gera intensidade de retorno para os pontos da nuvem. Assim, esta métrica não foi utilizada na predição da biomassa.

5.7 Biomassa calculada

O cálculo da biomassa aérea lenhosa foi realizado com a aplicação da Equação 28, proposta por Scolforo *et al.* (2008), utilizando como variáveis independentes o DAP e altura total dos indivíduos amostrados em campo.

Na área de estudo 1, a biomassa aérea da vegetação lenhosa calculada foi calculada em 40,125 Mg/ha. Na Figura 91 é apresentado o histograma com a distribuição dos valores calculados para a biomassa em cada subparcela da área de estudo 1.

Figura 91 – Histograma com a distribuição dos valores da biomassa calculados em cada subparcela da área de estudo 1

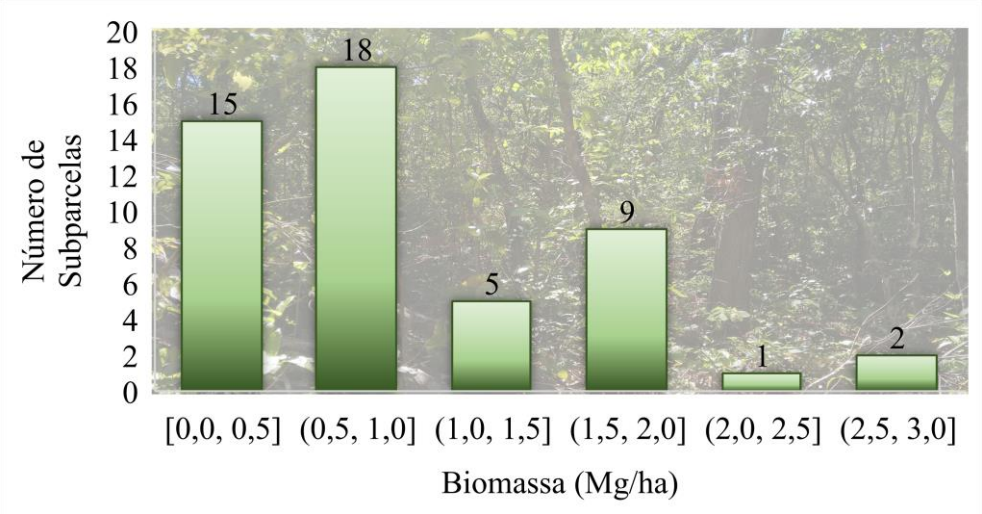


Fonte: O autor

Nota-se na Figura 91 que 74 subparcelas possuem biomassa no intervalo de 0,0 a 0,5 Mg/ha, 19 no intervalo de 0,5 a 1,0 Mg/ha, 3 no intervalo de 1,0 a 1,5 Mg/ha, 3 no intervalo de 1,5 a 2,0 Mg/ha, e 1 no intervalo de 2,0 a 2,5 Mg/ha. Fato relacionado com a estrutura da vegetação amostrada, o fragmento foi caracterizado como um cerradão, com base na análise geral da fitofisionomia e riqueza de espécies. Contudo, as parcelas apresentaram variação estrutural de cerrado denso (quatro parcelas) a cerradão (seis parcelas).

Na área de estudo 2, a biomassa foi calculada foi em 47,110 Mg/há, portanto há maior estoque de biomassa na porção aérea lenhosa da vegetação. Na Figura 92 é apresentado o histograma com a distribuição dos valores calculados para a biomassa em cada subparcela da área de estudo 2. Nota-se na Figura 92 que 15 das subparcelas possuem biomassa no intervalo de 0,0 a 0,5 Mg/ha, 18 no intervalo de 0,5 a 1,0 Mg/ha, 5 no intervalo de 1,0 a 1,5 Mg/ha, 9 no intervalo de 1,5 a 2,0 Mg/ha, 1 no intervalo de 2,0 a 2,5 Mg/ha e 1 no intervalo de 2,5 a 3,0 Mg/ha. Estes resultados corroboram o predomínio do aspecto florestal nesse fragmento, quatro parcelas foram caracterizadas como transição de cerradão para mata seca e apenas uma como cerradão típico.

Figura 92 – Histograma com a distribuição dos valores da biomassa calculados em cada subparcela da área de estudo 2



Fonte: O autor

5.8 Predição da biomassa

Os resultados obtidos na predição da biomassa estão separados em três seções, sendo a primeira (5.8.1) utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**, a segunda (5.8.2) utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**, e a terceira (5.8.3) utilizando dados obtidas com levantamento aerofotogramétrico.

Como a área de estudo 1 apresenta seis parcelas caracterizadas como de Cerradão (típico) e quatro caracterizadas como Cerrado Denso (transição para cerradão) a predição da biomassa na área de estudo 1 foi realizada considerando duas subáreas, área de estudo 1A (Cerradão - parcelas 1, 2, 4, 5, 9 e 10), a área de estudo 1B (Cerrado Denso - parcelas 3, 6, 7 e 8), e a área de estudo 2.

A primeira etapa do processo de predição da biomassa foi a utilização do programa Fusion, para realizar a extração das métricas florestais das nuvens de pontos. A segunda etapa foi a utilização do programa estatístico SPSS, para realizar a regressão linear. A terceira e última etapa foi a utilização do RStudio, para verificar os pressupostos de regressão dos modelos gerados na segunda etapa.

Os resultados obtidos para a predição da biomassa nas três áreas de estudo (área de estudo 1A, área de estudo 1B e área de estudo 2) são apresentados nas seções 5.8.1, 5.8.2 e 5.8.3, separados pela ordem de obtenção de cada resultado.

5.8.1 Resumo (*Summary*) dos modelos gerados

5.8.1.1 Área de estudo 1A (Cerradão)

Para a área de estudo 1A foram gerados 13 modelos de regressão linear de predição da biomassa com a aplicação do método *stepwise* no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**. O *Summary* dos modelos gerados para a área de estudo 1A está apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estuo 1A, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado

Modelo	R múltiplo	R^2	R^2 ajustado	EP da estimativa	Estatísticas da mudança				
					R^2 da mudança	F da mudança	df1	df2	Sig. F da mudança
1	0,725	0,526	0,518	0,287	0,526	64,419	1	58	0,000
2	0,779	0,607	0,593	0,264	0,080	11,644	1	57	0,001
3	0,815	0,664	0,646	0,246	0,057	9,528	1	56	0,003
4	0,841	0,707	0,685	0,232	0,043	8,005	1	55	0,006
5	0,860	0,739	0,715	0,220	0,033	6,778	1	54	0,012
6	0,879	0,773	0,747	0,208	0,034	7,864	1	53	0,007
7	0,889	0,791	0,762	0,201	0,018	4,397	1	52	0,041
8	0,901	0,812	0,783	0,192	0,022	5,933	1	51	0,018
9	0,911	0,831	0,800	0,185	0,018	5,395	1	50	0,024
10	0,920	0,847	0,815	0,178	0,016	5,038	1	49	0,029
11	0,920	0,846	0,819	0,176	0,000	0,012	1	49	0,913
12	0,916	0,839	0,814	0,178	0,007	2,406	1	50	0,127
13	0,925	0,856	0,830	0,170	0,017	5,996	1	50	0,018

Fonte: O autor

Para a área de estudo 1A foram gerados 6 modelos de regressão linear de predição da biomassa, com a aplicação do método *stepwise* no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**. O *Summary* dos modelos gerados para a área de estudo 1A está apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estuo 1A, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado

Modelo	R múltiplo	R^2	R^2 ajustado	EP da estimativa	Estatísticas da mudança				
					R^2 da mudança	F da mudança	df1	df2	Sig. F da mudança
1	0,648	0,420	0,410	0,317	0,420	42,003	1	58	0,000
2	0,726	0,527	0,511	0,289	0,107	12,918	1	57	0,001
3	0,790	0,624	0,604	0,260	0,097	14,429	1	56	0,000
4	0,823	0,677	0,653	0,243	0,053	8,979	1	55	0,004
5	0,844	0,713	0,686	0,231	0,036	6,787	1	54	0,012
6	0,862	0,742	0,713	0,221	0,029	6,024	1	53	0,017

Fonte: O autor

Ainda para a área de estudo 1A, foram gerados 3 modelos de regressão linear de predição da biomassa com a aplicação do método *stepwise* no programa SPSS, utilizando dados obtidos com o levantamento aerofotogramétrico (RPAS com câmera digital comum, RGB). O *Summary* dos modelos gerados para a área de estudo 1A está apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estuo 1A, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico

Modelo	R múltiplo	R^2	R^2 ajustado	EP da estimativa	Estatísticas da mudança				
					R^2 da mudança	F da mudança	df1	df2	Sig. F da mudança
1	0,655	0,429	0,419	0,315	0,429	43,497	1	58	0,000
2	0,702	0,492	0,475	0,299	0,064	7,166	1	57	0,010
3	0,739	0,546	0,521	0,286	0,053	6,577	1	56	0,013

Fonte: O autor

5.8.1.2 Área de estudo 1B (Cerrado Denso)

Para a área de estudo 1B foram gerados 4 modelos de regressão linear de predição da biomassa, com a aplicação do método *stepwise* no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**. O *Summary* dos modelos gerados para a área de estudo 1B está apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estuo 1B, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado

Modelo	R múltiplo	R^2	R^2 ajustado	EP da estimativa	Estatísticas da mudança				
					R^2 da mudança	F da mudança	df1	df2	Sig. F da mudança
1	0,856	0,733	0,726	0,159	0,733	104,185	1	38	0,000
2	0,889	0,790	0,779	0,143	0,057	10,085	1	37	0,003
3	0,916	0,839	0,826	0,127	0,049	10,961	1	36	0,002
4	0,973	0,946	0,932	0,079	-0,003	1,467	1	30	0,040

Fonte: O autor

Para a área de estudo 1B foram gerados 12 modelos de regressão linear de predição da biomassa, com a aplicação do método *stepwise* no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**. O *Summary* dos modelos gerados para a área de estudo 1B está apresentado na Tabela 30.

Tabela 30 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estuo 1B, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado

Modelo	R múltiplo	R^2	R^2 ajustado	EP da estimativa	Estatísticas da mudança				
					R^2 da mudança	F da mudança	df1	df2	Sig. F da mudança
1	0,899	0,809	0,804	0,135	0,809	160,801	1	38	0,000
2	0,940	0,884	0,877	0,107	0,075	23,749	1	37	0,000
3	0,950	0,902	0,893	0,099	0,018	6,576	1	36	0,015
4	0,960	0,921	0,912	0,090	0,019	8,582	1	35	0,006
5	0,968	0,937	0,927	0,082	0,016	8,409	1	34	0,006
6	0,973	0,947	0,938	0,076	0,011	6,757	1	33	0,014
7	0,978	0,956	0,946	0,071	0,008	6,019	1	32	0,020
8	0,981	0,962	0,952	0,067	0,006	5,058	1	31	0,032
9	0,984	0,968	0,958	0,062	0,006	5,150	1	30	0,031
10	0,986	0,973	0,964	0,058	0,005	5,870	1	29	0,022
11	0,989	0,978	0,969	0,053	0,005	6,186	1	28	0,019
12	0,991	0,982	0,974	0,049	0,004	5,802	1	27	0,023

Fonte: O autor

Para a área de estudo 1B foram gerados 3 modelos de regressão linear de predição da biomassa, com a aplicação do método *stepwise* no programa SPSS, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico. O *Summary* dos modelos gerados para a área de estudo 1B está apresentado na Tabela 31.

Tabela 31 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estuo 1B, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico

Modelo	R múltiplo	R^2	R^2 ajustado	EP da estimativa	Estatísticas da mudança				
					R^2 da mudança	F da mudança	df1	df2	Sig. F da mudança
1	0,831	0,691	0,683	0,171	0,691	85,018	1	38	0,000
2	0,900	0,811	0,801	0,136	0,120	23,404	1	37	0,000
3	0,942	0,886	0,877	0,107	0,076	24,015	1	36	0,000

Fonte: O autor

5.8.1.3 Área de estudo 2 (Cerradão/Mata Seca)

Para a área de estudo 2 foram gerados 7 modelos de regressão linear de predição da biomassa, com a aplicação do método *stepwise* no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**. O *Summary* dos modelos gerados para a área de estudo 2 está apresentado na Tabela 32.

Tabela 32 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estudo 2, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado

Modelo	R múltiplo	R^2	R^2 ajustado	EP da estimativa	Estatísticas da mudança				
					R^2 da mudança	F da mudança	df1	df2	Sig. F da mudança
1	0,658	0,433	0,421	0,513	0,433	36,593	1	48	0,000
2	0,727	0,529	0,509	0,476	0,096	9,583	1	47	0,003
3	0,802	0,643	0,620	0,416	0,114	14,738	1	46	0,000
4	0,833	0,693	0,666	0,390	0,050	7,334	1	45	0,010
5	0,823	0,677	0,656	0,395	-0,016	2,334	1	45	0,134
6	0,848	0,719	0,693	0,373	0,041	6,612	1	45	0,014
7	0,862	0,743	0,714	0,360	0,025	4,258	1	44	0,045

Fonte: O autor

Ainda na área de estudo 2, foram gerados 7 modelos de regressão linear de predição da biomassa, com a aplicação do método *stepwise* no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**. O *Summary* dos modelos gerados para a área de estudo 2 está apresentado na Tabela 33.

Tabela 33 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estudo 2, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado

Modelo	R múltiplo	R^2	R^2 ajustado	EP da estimativa	Estatísticas da mudança				
					R^2 da mudança	F da mudança	df1	df2	Sig. F da mudança
1	0,653	0,427	0,415	0,516	0,427	35,723	1	48	0,000
2	0,722	0,522	0,502	0,476	0,095	9,367	1	47	0,004
3	0,783	0,613	0,588	0,433	0,091	10,813	1	46	0,002
4	0,815	0,664	0,635	0,408	0,051	6,902	1	45	0,012
5	0,839	0,704	0,671	0,387	0,040	5,939	1	44	0,019
6	0,858	0,737	0,700	0,369	0,032	5,273	1	43	0,027
7	0,892	0,796	0,762	0,329	0,059	12,131	1	42	0,001

Fonte: O autor

Por fim, para a área de estudo 2 foram gerados 4 modelos de regressão linear de predição da biomassa, com a aplicação do método *stepwise* no programa SPSS, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico. O *Summary* dos modelos gerados para a área de estudo 2 está apresentado na Tabela 34.

Tabela 34 – *Summary* dos modelos de predição da biomassa da área de estudo 2, obtidos com o método *stepwise* de regressão linear múltipla no programa SPSS, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico

Modelo	R múltiplo	R^2	R^2 ajustado	EP da estimativa	Estatísticas da mudança				
					R^2 da mudança	F da mudança	df1	df2	Sig. F da mudança
1	0,680	0,463	0,450	0,517	0,463	37,048	1	43	0,000
2	0,739	0,547	0,525	0,480	0,084	7,751	1	42	0,008
3	0,777	0,604	0,575	0,454	0,058	5,990	1	41	0,019
4	0,795	0,632	0,599	0,427	0,632	19,294	4	45	0,000

Fonte: O autor

Na primeira coluna das Tabelas 26 a 34 é apresentado o número de cada modelo. Na segunda coluna é apresentado o valor de R múltiplo, que representa o grau de correlação entre a variável dependente (biomassa) e o conjunto das variáveis independentes. Logo em seguida, é apresentado o valor do R^2, que representa a porcentagem de variação da variável dependente, explicada pelas variáveis independentes. Vale ressaltar que, na medida em que se adiciona variáveis independentes ao modelo, o valor do R^2 aumenta, ainda que essas variáveis não sejam relevantes.

Na quarta coluna é apresentado o valor do R^2 ajustado, que é regulado para considerar o aumento ao acaso, ou seja, ele só aumenta se um novo preditor melhorar o modelo mais do que seria esperado ao acaso, e diminui quando um preditor melhora o modelo menos do que o esperado ao acaso, sendo o valor do R^2 ajustado indicado para ser utilizado na comparação entre os modelos.

Na quinta coluna é apresentado o erro padrão (EP) da estimativa.

Nas colunas das estatísticas da mudança, é apresentado o valor de R^2 da mudança, que representa o valor em porcentagem que o modelo 1 aumentou a capacidade de predição quando comparado a um modelo sem nenhum preditor, ou quando comparado ao modelo anterior, no caso dos demais modelos. Seu valor é obtido pela subtração do R^2 do modelo analisado pelo R^2 do modelo anterior. Ainda nas colunas das estatísticas da mudança, é possível observar os valores do teste F da mudança e o valor-p (significância do F da mudança), oriundos da análise de variância, ou *Analysis of Variance* (ANOVA). Esta análise diz se a mudança das variáveis foi significativa ou não, onde na hipótese nula (H_0) o ajuste do modelo 1 é igual ao ajuste do modelo sem preditor, quando o valor-p da significância do F da mudança for maior ou igual a 0,05, e na hipótese alternativa (H_1) o ajuste do modelo 1 é diferente do ajuste do modelo sem preditor, quando o valor da significância do F da mudança for menor ou igual a 0,05. Para o modelo 2 em diante, considera-se a hipótese nula (H_0), onde o ajuste modelo é igual ao ajuste do modelo anterior, quando o valor-p for maior ou igual a 0,05, e a hipótese alternativa (H_1), em que o ajuste do modelo é diferente do ajuste do modelo anterior, quando o valor-p for menor ou igual a 0,05, explicando melhor a variável dependente (biomassa).

5.8.2 Determinação do melhor modelo e análise dos coeficientes

Após a geração dos modelos pelo método *stepwise* no programa SPSS, verificou-se qual modelo era o mais eficiente para a predição da biomassa, utilizando o Critério de Informação de Akaike (AIC).

5.8.2.1 Área de estudo 1A (Cerradão)

Os coeficientes do melhor modelo de predição da biomassa da área de estudo 1A, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**, são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado

Modelo 13	Coef. não padronizados		Coef. Pad.	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro padrão	Beta			Tolerância	VIF
(Constante)	1,394	63,664		0,022	0,983		
X1	34,870	7,656	0,263	4,554	0,000	0,861	1,161
X2	-49,300	7,027	-0,462	-7,016	0,000	0,662	1,510
X3	$1,37x10^{-2}$	0,004	0,347	3,809	0,000	0,347	2,882
X4	5,170	1,961	0,184	2,637	0,011	0,589	1,697
X5	-7,475	1,847	-0,231	-4,047	0,000	0,882	1,133
X6	-23,582	6,242	-0,228	-3,778	0,000	0,790	1,265
X7	-1,858	0,757	-0,181	-2,455	0,018	0,528	1,894
X8	$5,09x10^{-4}$	0,000	0,308	3,821	0,000	0,442	2,265
X9	11,267	4.602	0,160	2,449	0,018	0,677	1,478

Fonte: O autor

Os coeficientes para a predição da biomassa são os valores apresentados na coluna B da Tabela 35, sendo estes utilizados para escrever a Equação 41 para a predição da biomassa da área de estudo 1A, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**. Este modelo é estatisticamente significativo com [($F(9,50) = 33,17$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,856$; EP da estimativa = 0,17 Mg/ha].

$$\text{Biomassa (Mg/ha)} = 1,394 + 34,870(X1) - 49,3(X2) + 1,37x10^{-2}(X3) + 5,170(X4) - 7,475(X5) - 23,582(X6) - 1,858(X7) + 5,09x10^{-4}(X8) + 11.267(X9) \quad (41)$$

Onde:
X1 = *Elev strata (7.00 to 8.00) min*
X2 = *Elev strata (3.00 to 4.00) max*
X3 = *(All returns above mean) / (Total first returns) * 100*
X4 = *Elev strata (11.00 to 12.00) return proportion*
X5 = *Elev strata (6.00 to 7.00) stddev*
X6 = *Elev strata (2.00 to 3.00) min*
X7 = *Elev strata (6.00 to 7.00) return proportion*
X8 =*Elev strata (8.00 to 9.00) total return count*
X9 =*Elev strata (12.00 to 13.00) return proportion*

Os coeficientes do melhor modelo de predição da biomassa da área de estudo 1A, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**, são apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado

Modelo 6	Coef. não padronizados		Coef. Pad.	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro padrão	Beta			Tolerância	VIF
(Constante)	-2430,973	505,690		-4,807	0,000		
X1	1,677	0,591	0,276	2,840	0,006	0,467	2,141
X2	414,736	67,128	0,694	6,178	0,000	0,305	3,274
X3	0,159	0,048	0,465	3,311	0,002	0,628	1,593
X4	-0,038	0,011	-0,267	-3,556	0,001	0,802	1,247
X5	193,154	65,310	0,331	2,958	0,005	0,283	3,538
X6	$-6{,}99 \times 10^{-6}$	$2{,}77 \times 10^{-6}$	-0,190	-2,526	0,015	0,816	1,226

Fonte: O autor

Os coeficientes para a predição da biomassa são os valores apresentados na coluna B da Tabela 36, sendo estes utilizados para escrever a Equação 42 para a predição da biomassa da área de estudo 1A, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**. Este modelo é estatisticamente significativo com [($F(6,53) = 25{,}429$; $p < 0{,}001$; $R^2 = 0{,}742$; EP da estimativa = 0,221 Mg/ha].

$$\text{Biomassa (Mg/ha)} = -2430{,}973 + 1{,}677(X1) + 414{,}736(X2) + 10{,}159(X3) - 0{,}038(X4) + 193{,}154(X5) - 6{,}99 \times 10^{-6}\,(X6) \qquad 42$$

Onde:

X1 = *Elev strata (9.00 to 10.00) return proportion*

X2 = *Elev strata (4.00 to 5.00) min*

X3 = *Elev strata (12.00 to 13.00) kurtosis*

X4 = *Elev strata (13.00 to 14.00) mean*

X5 = *Elev strata (3.00 to 4.00) max*

X6 = *Elev strata (below 1.00) total return count*

Os coeficientes do melhor modelo de predição da biomassa da área de estudo 1A, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico, são apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico

Modelo 3	Coef. não padronizados		Coef. Pad.	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro padrão	Beta			Tolerância	VIF
(Constante)	1,259	0,240		5,240	0,000		
X1	2,608	0,630	0,477	4,142	0,000	0,764	1,309
X2	-0,275	0,065	-0,308	-4,209	0,004	0,782	1,279
X3	2,410	1,756	0,235	1,372	0,176	0,969	1,032

Fonte: O autor

Os coeficientes para a predição da biomassa são os valores apresentados na coluna B da Tabela 37, sendo estes utilizados para escrever a Equação 43 para a predição da biomassa da área de estudo 1A, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico. Este modelo é estatisticamente significativo com [($F(3,56) = 22,424$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,546$; EP da estimativa = 0,286 Mg/ha].

$$\text{Biomassa (Mg/ha)} = 1,259 + 2,608(X1) - 0,275(X2) + 2,410(X3) \qquad 43$$

Onde:

X1 = *Elev strata (9.00 to 10.00) return proportion*

X2 = *Elev strata (3.00 to 4.00) mean*

X3 = *Elev strata (11.00 to 12.00) return proportion*

5.8.2.2 Área de estudo 1B (Cerrado Denso)

Os coeficientes do melhor modelo de predição da biomassa da área de estudo 1B, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**, são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado

Modelo 4	Coef. não padronizados		Coef. Pad.	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro padrão	Beta			Tolerância	VIF
(Constante)	-131,269	50,718		-2,588	0,015		
X1	0,557	0,031	1,205	18,201	0,000	0,398	2,514
X2	20,300	5,773	0,178	3,516	0,001	0,679	1,472
X3	-0,001	0,000	-0,424	-6,232	0,000	0,376	2,657
X4	1,397	0,255	0,276	5,490	0,000	0,687	1,455
X5	-0,172	0,047	-0,170	-3,615	0,001	0,788	1,269
X6	15,111	8,434	0,079	1,792	0,083	0,906	1,104
X7	-3,799	1,022	-0,161	-3,717	0,001	0,925	1,081
X8	$2,43x10^{-4}$	$9,44x10^{-5}$	0,138	2,573	0,015	0,609	1,641

Fonte: O autor

Os coeficientes para a predição da biomassa são os valores apresentados na coluna B da Tabela 38, sendo estes utilizados para escrever a Equação 44 para a predição da biomassa da área de estudo 1B, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**. Este modelo é estatisticamente significativo com [($F(8,31) = 67,856$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,946$; EP da estimativa = 0,079 Mg/ha].

$$\text{Biomassa (Mg/ha)} = -131,269 + 0,557(X1) + 20,300(X2) - 0,001(X3) + 1,397(X4) - 0,172(X5) + 15,111(X6) - 3,799(X7) + 2,43x10^{-4}(X8) \quad (44)$$

Onde:

X1 = *Elev strata (11.00 to 12.00) kurtosis*

X2 = *Elev strata (2.00 to 3.00) min*

X3 = *Elev strata (11.00 to 12.00) total return count*

X4 = *Elev P01*

X5 = *Elev strata (2.00 to 3.00) mode*

X6 = *Elev strata (6.00 to 7.00) min*

X7 = *Elev strata (3.00 to 4.00) stddev*

X8 =*Elev strata (3.00 to 4.00) total return count*

Os coeficientes do melhor modelo de predição da biomassa da área de estudo 1B, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**, são apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado

Modelo 12	Coef. não padronizados		Coef. Pad.	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro padrão	Beta			Tolerância	VIF
(Constante)	0,447	0,253		1,766	0,089		
X1	2,152	0,083	0,893	25,793	0,000	0,563	1,778
X2	0,428	0,077	0,224	5,547	0,000	0,414	2,413
X3	-0,125	0,019	-0,208	-6,527	0,000	0,666	1,501
X4	-4,685	0,856	-0,185	-5,471	0,000	0,588	1,699
X5	0,359	0,051	0,236	7,070	0,000	0,604	1,656
X6	-0,228	0,073	-0,100	-3,149	0,004	0,665	1,505
X7	-1,483	0,574	-0,073	-2,584	0,015	0,847	1,181
X8	-0,003	0,001	-0,109	-2,969	0,006	0,505	1,982
X9	-0,120	0,040	-0,133	-2,977	0,006	0,341	2,937
X10	1,829	0,506	0,191	3,613	0,001	0,243	4,124
X11	-3,979	1,431	-0,139	-2,780	0,010	0,270	3,698
X12	-0,142	0,059	-0,082	-2,409	0,023	0,589	1,699

Fonte: O autor

Os coeficientes para a predição da biomassa são os valores apresentados na coluna B da Tabela 39, sendo estes utilizados para escrever a Equação 45 para a predição da biomassa da área de estudo 1B, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**. Este modelo é estatisticamente significativo com [($F(12,27) = 121,264$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,982$; EP da estimativa = 0,049 Mg/ha].

$$\text{Biomassa (Mg/ha)} = 0,447 + 2,152(X1) + 0,428(X2) - 0,125(X3) - 4,685(X4) + 0,359(X5) - 0,228(X6) - 1,483(X7) - 0,003(X8) - 0,120(X9) + 1,829(X10) - 3,979\,(X11) - 0,142(X12) \quad (45)$$

Onde:

X1 = *Elev strata (12.00 to 13.00) skewness*

X2 = *Elev P01*

X3 = *Elev strata (7.00 to 8.00) skewness*

X4 = *Elev strata (13.00 to 14.00) stddev*

X5 = *Elev strata (3.00 to 4.00) kurtosis*

X6 = *Elev strata (5.00 to 6.00) kurtosis*

X7 = *Elev strata (1.00 to 2.00) stddev*

X8 = *(All returns above mode) / (Total first returns) * 100*

X9 = *Elev MAD median*

X10 = *Elev strata (9.00 to 10.00) return proportion*

X11 = *Elev strata (10.00 to 11.00) CV*

X12 = *Elev strata (4.00 to 5.00) kurtosis*

Os coeficientes do melhor modelo de predição da biomassa da área de estudo 1B, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico, são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico

Modelo 3	Coef. não padronizados		Coef. Pad.	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro padrão	Beta			Tolerância	VIF
(Constante)	0,164	0,020		8,265	0,000		
X1	0,091	0,007	0,974	12,410	0,000	0,511	1,955
X2	-35,357	6,190	-0,418	-5,712	0,000	0,589	1,698
X3	$2{,}23X10^{-4}$	$4{,}55x10^{-5}$	0,302	4,901	0,000	0,828	1,208

Fonte: O autor

Os coeficientes para a predição da biomassa são os valores apresentados na coluna B da Tabela 40, sendo estes utilizados para escrever a Equação 46 para a predição da biomassa da área de estudo 1B, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico. Este modelo é estatisticamente significativo com [($F(3,56) = 93{,}727$; $p < 0{,}001$; $R^2 = 0{,}886$; EP da estimativa = 0,107 Mg/ha].

$$\text{Biomassa (Mg/ha)} = 0{,}164 + 0{,}091(X1) - 35{,}357(X2) + 2{,}23X10^{-4}(X3) \qquad 46$$

Onde:

X1 = *Elev strata (12.00 to 13.00) mean*

X2 = *Elev strata (12.00 to 13.00) CV*

X3 = *Elev strata (9.00 to 10.00) total return count*

5.8.2.3 Área de estudo 2 (Cerradão/Mata Seca)

Os coeficientes do melhor modelo de predição da biomassa da área de estudo 2, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**, são apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado

Modelo 7	Coef. não padronizados		Coef. Pad.	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro padrão	Beta			Tolerância	VIF
(Constante)	11,615	3,968		2,927	0,005		
X1	-1,584	0,463	-0,325	-3,424	0,001	-0,408	-0,459
X2	0,001	0,000	0,477	5,529	0,000	0,559	0,640
X3	0,015	0,004	0,320	3,962	0,000	0,541	0,513
X4	4,186	1,847	0,221	2,267	0,028	0,592	0,323
X5	3,468	1,681	0,161	2,063	0,045	0,251	0,297

Fonte: O autor

Os coeficientes para a predição da biomassa são os valores apresentados na coluna B da Tabela 41, sendo estes utilizados para escrever a Equação 47 para a predição da biomassa da área de estudo 2, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**. Este modelo é estatisticamente significativo com [($F(5,44) = 25,487$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,743$; EP da estimativa = 0,36 Mg/ha].

$$\text{Biomassa (Mg/ha)} = 11,615 - 1,584(X1) + 0,001\,(X2) + 0,015(X3) + 4,186\,(X4) + 3,468(X5) \quad (47)$$

Onde:

X1 = *Elev strata (8.00 to 9.00) median*

X2 = *Elev strata (15.00 to 16.00) total return count*

X3 = *(All returns above mean) / (Total first returns) * 100*

X4 = *Elev strata (20.00 to 21.00) return proportion*

X5 = *Elev strata (2.00 to 3.00) stddev*

Os coeficientes do melhor modelo de predição da biomassa da área de estudo 1B, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**, são apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado

Modelo 7	Coef. não padronizados		Coef. Pad.	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro padrão	Beta			Tolerância	VIF
(Constante)	-1080,959	279,053		-3,874	0,000		
X1	0,330	0,033	1,511	10,106	0,000	0,218	4,597
X2	-0,026	0,014	-0,245	-1,783	0,082	0,258	3,880
X3	0,859	0,190	0,485	4,530	0,000	0,424	2,359
X4	107,664	27,922	0,288	3,856	0,000	0,872	1,147
X5	0,603	0,186	0,329	3,240	0,002	0,472	2,118
X6	-3,129	0,824	-0,568	-3,799	0,000	0,218	4,590
X7	-0,038	0,011	-0,387	-3,483	0,001	0,395	2,531

Fonte: O autor

Os coeficientes para a predição da biomassa são os valores apresentados na coluna B da Tabela 42, sendo estes utilizados para escrever a Equação 48 para a predição da biomassa da área de estudo 2, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**. Este modelo é estatisticamente significativo com [($F(7,42) = 23,360$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,796$; EP da estimativa = 0,329 Mg/ha].

$$\text{Biomassa (Mg/ha)} = -1080,959 + 0,330(X1) - 0,026(X2) + 0,859(X3) + 107,664(X4) + 0,603(X5) - 3,129(X6) - 0,038\,(X7) \quad (48)$$

Onde:

X1 = *Elev P25*

X2 = *Elev strata (15.00 to 16.00) mode*

X3 = *Elev strata (8.00 to 9.00) skewness*

X4 = *Elev strata (10.00 to 11.00) min*

X5 = *Elev strata (8.00 to 9.00) mode*

X6 = *Elev strata (16.00 to 17.00) stddev*

X7 = *Profile area*

Os coeficientes do melhor modelo de predição da biomassa da área de estudo 1B, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico, são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 – Valores dos coeficientes do melhor modelo e estatísticas de colinearidade das variáveis independentes utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico

Modelo 4	Coef. não padronizados		Coef. Pad.	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro padrão	Beta			Tolerância	VIF
(Constante)	0,060	0,131		0,461	0,647		
X1	0,075	0,013	0,565	5,609	0,000	0,807	1,239
X2	$3{,}01 \times 10^{-4}$	$7{,}80 \times 10^{-5}$	0,405	3,865	0,000	0,746	1,341
X3	0,525	0,188	0,264	2,790	0,008	0,918	1,090
X3	0,422	0,170	0,237	2,484	0,017	0,902	1,109

Fonte: O autor

Os coeficientes para a predição da biomassa são os valores apresentados na coluna B da Tabela 40, sendo estes utilizados para escrever a Equação 49 para a predição da biomassa da área de estudo 2, utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico. Este modelo é estatisticamente significativo com [($F(4,45) = 19{,}294$; $p < 0{,}001$; $R^2 = 0{,}632$; EP da estimativa = 0,427 Mg/ha].

$$\text{Biomassa (Mg/ha)} = 0{,}060 + 0{,}075(X1) + 3{,}01 \times 10^{-4}(X2) + 0{,}525(X3) + 0{,}422(X4) \quad (49)$$

Onde:

X1 = *Elev mode*

X2 = *Elev strata (13.00 to 14.00) total return count*

X3 = *Elev strata (7.00 to 8.00) skewness*

X4 = *Elev strata (11.00 to 12.00) skewness*

Na primeira coluna das Tabelas 35 a 43 são apresentadas as variáveis independentes que compõem o melhor modelo de cada área para cada fonte de obtenção de dados (LiDAR tripulado, LiDAR não tripulado e levantamento aerofotogramétrico).

Na segunda coluna são apresentados os coeficientes não padronizados; os valores desses coeficientes estão apresentados na mesma unidade de medida das variáveis. Já os coeficientes padronizados, apresentados logo em seguida, não possuem unidade de medida, algo que facilita a comparação entre coeficientes de diferentes variáveis. Ou seja, para avaliar qual das variáveis

é mais relevante para prever a biomassa, basta observar qual delas possui o maior valor do coeficiente padronizado (Beta); se este valor for negativo, significa que a variável preditora é inversamente proporcional à variável dependente.

Em seguida são apresentados os valores do teste t e valor-p (Sig.), cuja hipótese nula (H_0) considera que o coeficiente não padronizado (B) é igual a zero, ou seja, não é relevante para o modelo, se o valor-p for maior ou igual a 0,05. A hipótese alternativa (H_1) considera que o coeficiente não padronizado (B) é estatisticamente diferente de zero quando o valor-p for menor que 0,05. Quando o valor-p para o intercepto (constante) é maior que 0,05, a hipótese alternativa é descartada e a hipótese nula é aceita, indicando que o valor do coeficiente da constante não é estatisticamente diferente de zero, o que significa dizer que a reta desse modelo de regressão passa pela origem os eixos X e Y.

Nas últimas colunas das Tabelas 35 a 43 são apresentados os valores das estatísticas de colinearidade. A ausência de multicolinearidade entre as variáveis independentes é um dos pressupostos de regressão linear e sua verificação é realizada observando-se os valores apresentados na coluna “tolerância”. Caso esse valor seja maior que 0,1, é considerado que não existe multicolinearidade; além desse parâmetro há o valor de *Variance Inflation Factor* (VIF); é considerado que não existe multicolinearidade quando esse valor é menor que 10.

Os demais pressupostos de regressão linear são apresentados na seção 5.8.3.

5.8.3 Testes dos pressupostos de regressão

O diagnóstico dos pressupostos de regressão linear pode ser realizado pela observação gráfica ou pela aplicação de testes estatísticos específicos.

A interpretação gráfica pode gerar dúvidas e pontos de subjetividade; sendo assim, nesta pesquisa foi adotada a verificação dos pressupostos de regressão linear dos modelos apresentados no item 5.8.2. pela aplicação de testes estatísticos específicos, mesmo que os gráficos de diagnóstico de cada modelo de regressão também sejam apresentados.

Os pressupostos verificados são a normalidade, a autocorrelação, a heterocedasticidade, e a presença de *outliers* dos resíduos.

5.8.3.1 Área de estudo 1A (Cerradão)

A verificação dos pressupostos de regressão do modelo 13 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1A, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**, é apresentada na Tabela 44.

Tabela 44 – Pressupostos de regressão linear do modelo 13 de predição da biomassa da área de estudo 1A utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado

Modelo 13[1]	Shapiro-Wilk[2]	Durbin-Watson[3]	Breusch-Pagan[4]	*Outliers*[5]
Valor	0,249	1,915	0,270	[-1,871, 2,129]
Passou no teste[6]	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: O autor

Nota: [1] Melhor modelo de regressão linear múltipla escolhido pelo teste de AIC.

[2] Teste que verifica se há normalidade dos resíduos. Há distribuição normal se p-valor > 0,05.

[3] Teste que verifica se há independência dos resíduos. Há independência se *d* estiver entre 1,5 e 2,5.

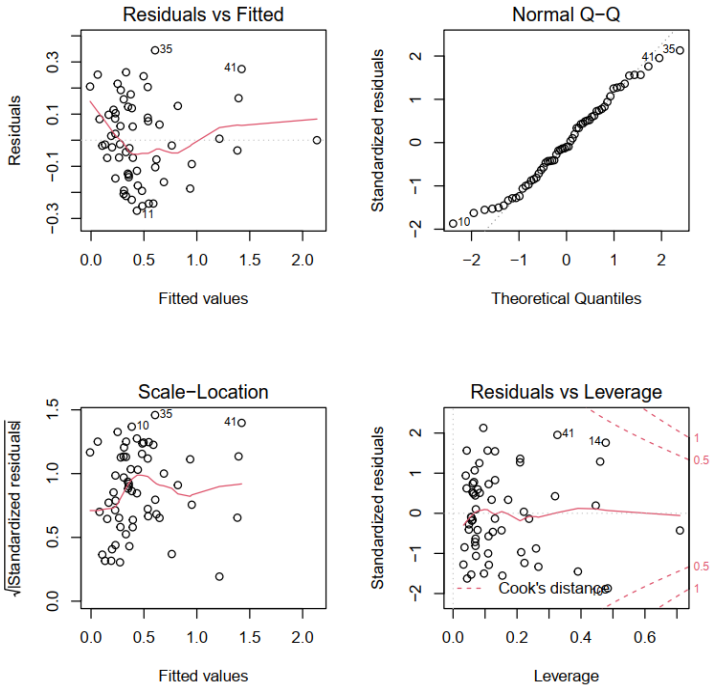
[4] Teste que verifica a há homocedasticidade dos resíduos. Há homocedasticidade se p-valor > 0,05.

[5] Há ausência de *outliers* nos resíduos quando os resíduos padronizados estão entre -3 e +3.

[6] "Sim" caso o modelo tenha passado no teste e "Não" caso o modelo não tenha passado no teste.

Os gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 13 são apresentados na Figura 93.

Figura 93 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 13, utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1A, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado



Fonte: O autor

A verificação dos pressupostos de regressão do modelo 6 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1A, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**, é apresentada na Tabela 45.

Tabela 45 – Pressupostos de regressão linear do modelo 6 de predição da biomassa da área de estudo 1A utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado

Modelo 6[1]	Shapiro-Wilk[2]	Durbin-Watson[3]	Breusch-Pagan[4]	*Outliers*[5]
Valor	0,119	1,769	0,039	[-2,190, 2,712]
Passou no teste[6]	Sim	Sim	Não	Sim

Fonte: O autor

Nota: [1] Melhor modelo de regressão linear múltipla escolhido pelo teste de AIC.

[2] Teste que verifica se há normalidade dos resíduos. Há distribuição normal se p-valor > 0,05.

[3] Teste que verifica se há independência dos resíduos. Há independência se *d* estiver entre 1,5 e 2,5.

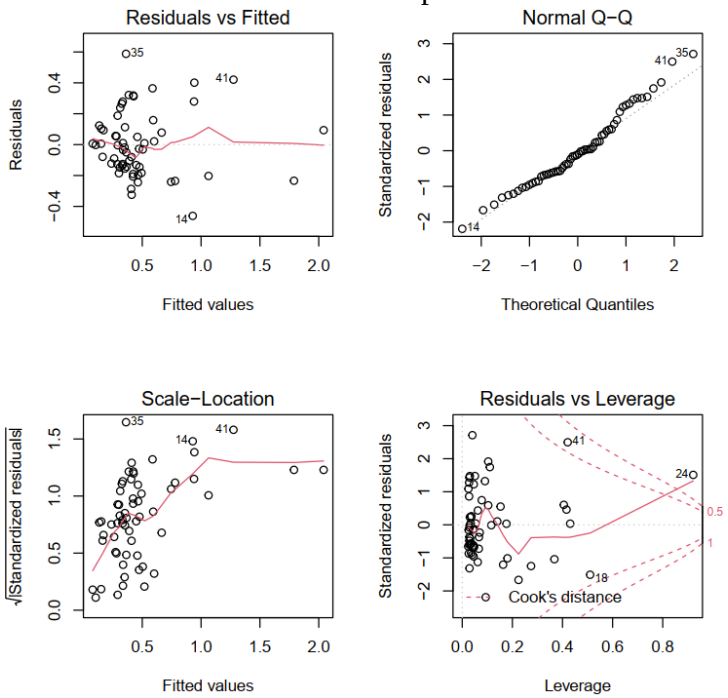
[4] Teste que verifica a há homocedasticidade dos resíduos. Há homocedasticidade se p-valor > 0,05.

[5] Há ausência de *outliers* nos resíduos quando os resíduos padronizados estão entre -3 e +3.

[6] "Sim" caso o modelo tenha passado no teste e "Não" caso o modelo não tenha passado no teste.

Os gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 6 são apresentados na Figura 94.

Figura 94 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 6 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1A, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado



Fonte: O autor

A verificação dos pressupostos de regressão do modelo 3 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1A utilizando os dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico é apresentada na Tabela 46.

Tabela 46 – Pressupostos de regressão linear do modelo 3 de predição da biomassa da área de estudo 1A utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico

Modelo 3[1]	Shapiro-Wilk[2]	Durbin-Watson[3]	Breusch-Pagan[4]	*Outliers*[5]
Valor	0,003	2,127	0,001	[-2,510, 3,435]
Passou no teste[6]	Não	Sim	Não	Não

Fonte: O autor

Nota: [1] Melhor modelo de regressão linear múltipla escolhido pelo teste de AIC.

[2] Teste que verifica se há normalidade dos resíduos. Há distribuição normal se p-valor > 0,05.

[3] Teste que verifica se há independência dos resíduos. Há independência se *d* estiver entre 1,5 e 2,5.

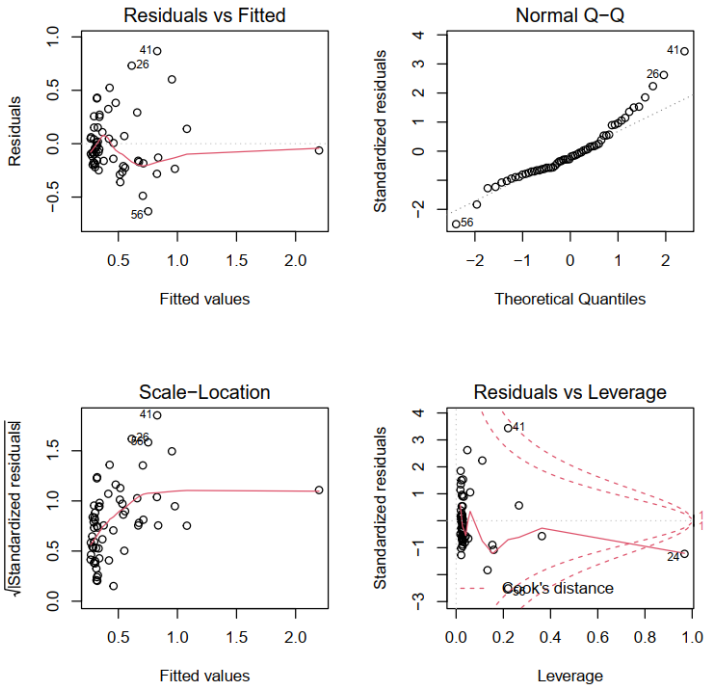
[4] Teste que verifica a há homocedasticidade dos resíduos. Há homocedasticidade se p-valor > 0,05.

[5] Há ausência de *outliers* nos resíduos quando os resíduos padronizados estão entre -3 e +3.

[6] "Sim" caso o modelo tenha passado no teste e "Não" caso o modelo não tenha passado no teste.

Os gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 3 são apresentados na Figura 95.

Figura 95 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 3 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1A, utilizando os dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico



Fonte: O autor

5.8.3.2 Área de estudo 1B (Cerrado Denso)

A verificação dos pressupostos de regressão do modelo 4 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1B, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**, é apresentada na Tabela 47.

Tabela 47 – Pressupostos de regressão linear do modelo 4 de predição da biomassa da área de estudo 1B, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado

Modelo 4[1]	Shapiro-Wilk[2]	Durbin-Watson[3]	Breusch-Pagan[4]	*Outliers*[5]
Valor	0,161	2,042	0,4212	[-1,831, 2,175]
Passou no teste[6]	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: O autor

Nota: [1] Melhor modelo de regressão linear múltipla escolhido pelo teste de AIC.

[2] Teste que verifica se há normalidade dos resíduos. Há distribuição normal se p-valor > 0,05..

[3] Teste que verifica se há independência dos resíduos. Há independência se *d* estiver entre 1,5 e 2,5

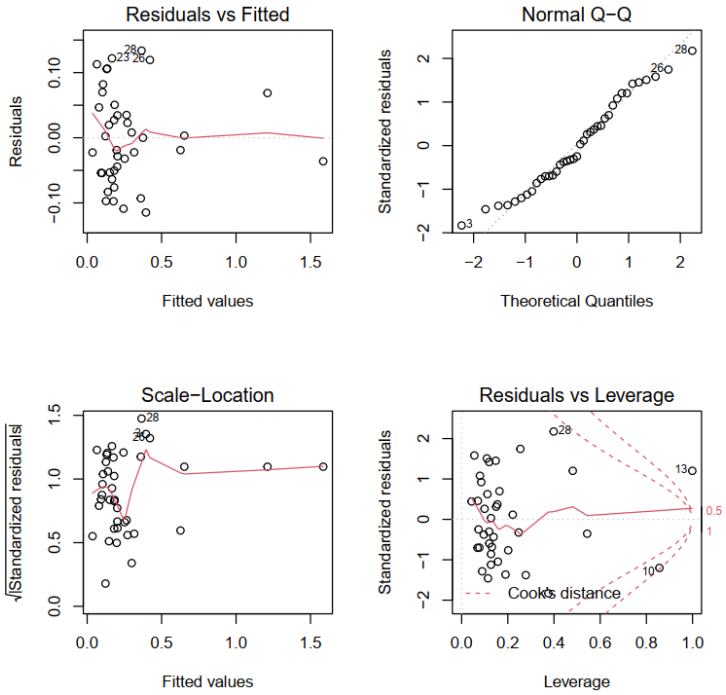
[4] Teste que verifica a há homocedasticidade dos resíduos. Há homocedasticidade se p-valor > 0,05.

[5] Há ausência de *outliers* nos resíduos quando os resíduos padronizados estão entre -3 e +3.

[6] "Sim" caso o modelo tenha passado no teste e "Não" caso o modelo não tenha passado no teste.

Os gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 4 são apresentados na Figura 96.

Figura 96 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 4 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1B, utilizando os dados obtidos LiDAR aerotransportado com voo tripulado



Fonte: O autor

A verificação dos pressupostos de regressão do modelo 12 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1B, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**, é apresentada na Tabela 48.

Tabela 48 – Pressupostos de regressão linear do modelo 12 de predição da biomassa da área de estudo 1B utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado

Modelo 12[1]	Shapiro-Wilk[2]	Durbin-Watson[3]	Breusch-Pagan[4]	*Outliers*[5]
Valor	0,181	2,277	0,772	[-2,867, 1,744]
Passou no teste[6]	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: O autor

Nota: [1] Melhor modelo de regressão linear múltipla escolhido pelo teste de AIC.

[2] Teste que verifica se há normalidade dos resíduos. Há distribuição normal se p-valor > 0,05.

[3] Teste que verifica se há independência dos resíduos. Há independência se *d* estiver entre 1,5 e 2,5.

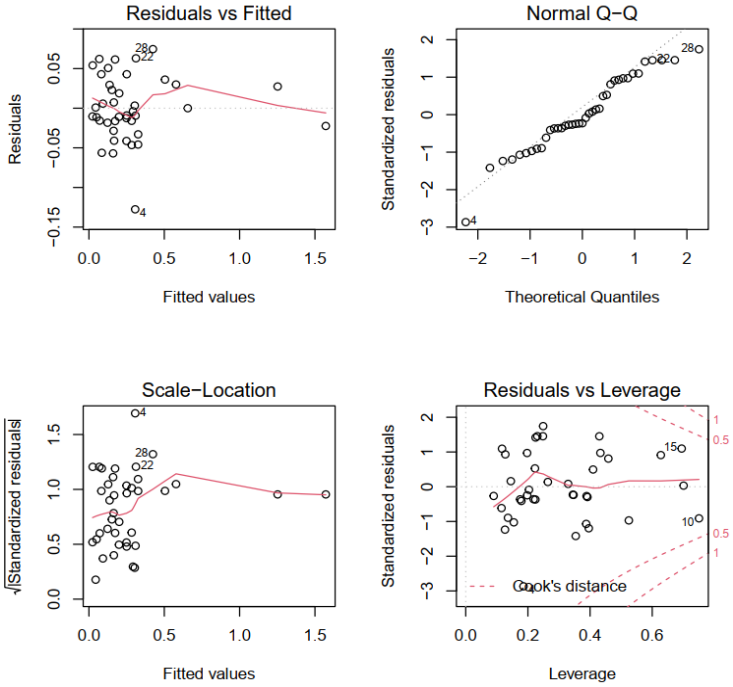
[4] Teste que verifica a há homocedasticidade dos resíduos. Há homocedasticidade se p-valor > 0,05.

[5] Há ausência de *outliers* nos resíduos quando os resíduos padronizados estão entre -3 e +3.

[6] "Sim" caso o modelo tenha passado no teste e "Não" caso o modelo não tenha passado no teste.

Os gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 12 são apresentados na Figura 97.

Figura 97 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 12 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1B, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado



Fonte: O autor

A verificação dos pressupostos de regressão do modelo 3 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1B, utilizando os dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico, é apresentada na Tabela 49.

Tabela 49 – Pressupostos de regressão linear do modelo 3 de predição da biomassa da área de estudo 1B utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico

Modelo 3[1]	Shapiro-Wilk[2]	Durbin-Watson[3]	Breusch-Pagan[4]	*Outliers*[5]
Valor	0,074	2,541	0,958	[1,752, 3,342]
Passou no teste[6]	Sim	Sim	Sim	Não

Fonte: O autor

Nota: [1] Melhor modelo de regressão linear múltipla escolhido pelo teste de AIC.

[2] Teste que verifica se há normalidade dos resíduos. Há distribuição normal se p-valor > 0,05.

[3] Teste que verifica se há independência dos resíduos. Há independência se *d* estiver entre 1,5 e 2,5.

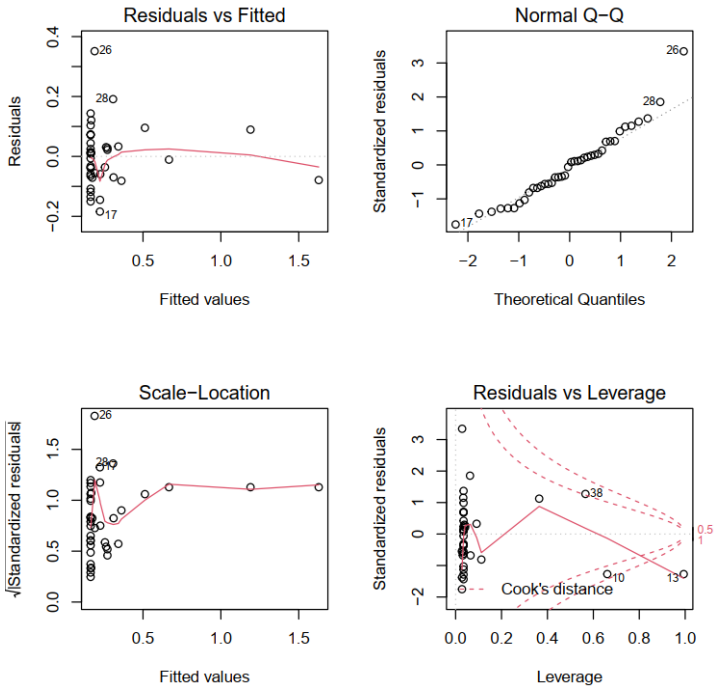
[4] Teste que verifica a há homocedasticidade dos resíduos. Há homocedasticidade se p-valor > 0,05.

[5] Há ausência de *outliers* nos resíduos quando os resíduos padronizados estão entre -3 e +3.

[6] "Sim" caso o modelo tenha passado no teste e "Não" caso o modelo não tenha passado no teste.

Os gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 3 são apresentados na Figura 98.

Figura 98 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 3 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 1B, utilizando os dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico



Fonte: O autor

5.8.3.3 Área de estudo 2 (Cerradão/Mata Seca)

A verificação dos pressupostos de regressão do modelo 7 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 2, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**, é apresentada na Tabela 50.

Tabela 50 – Pressupostos de regressão linear do modelo 7 de predição da biomassa da área de estudo 2, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado

Modelo 7[1]	Shapiro-Wilk[2]	Durbin-Watson[3]	Breusch-Pagan[4]	*Outliers*[5]
Valor	0,255	1,681	0,479	[2,451, 1,864]
Passou no teste[6]	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: O autor

Nota: [1] Melhor modelo de regressão linear múltipla escolhido pelo teste de AIC.

[2] Teste que verifica se há normalidade dos resíduos. Há distribuição normal se p-valor > 0,05.

[3] Teste que verifica se há independência dos resíduos. Há independência se *d* estiver entre 1,5 e 2,5.

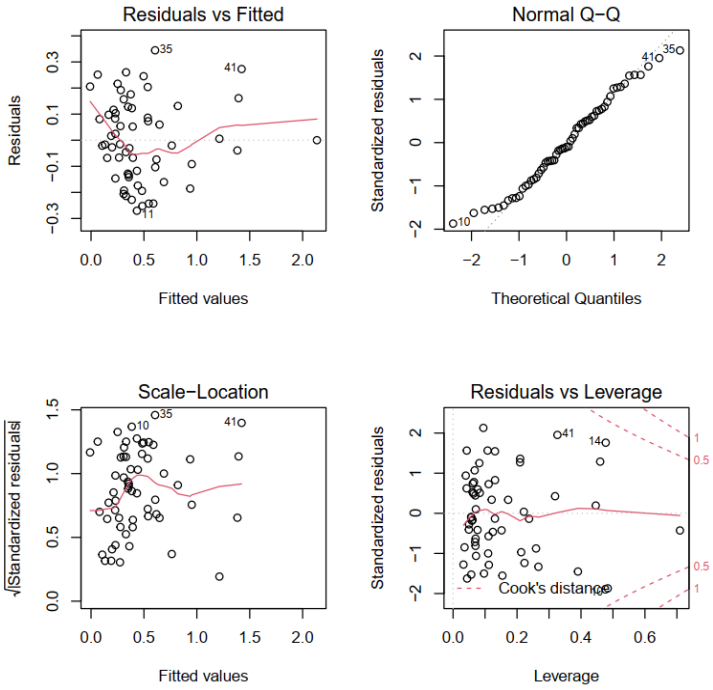
[4] Teste que verifica a há homocedasticidade dos resíduos. Há homocedasticidade se p-valor > 0,05.

[5] Há ausência de *outliers* nos resíduos quando os resíduos padronizados estão entre -3 e +3.

[6] "Sim" caso o modelo tenha passado no teste e "Não" caso o modelo não tenha passado no teste.

Os gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 7 são apresentados na Figura 99.

Figura 99 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 7 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 2, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado



Fonte: O autor

A verificação dos pressupostos de regressão do modelo 7 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 2, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**, é apresentada na Tabela 51.

Tabela 51 – Pressupostos de regressão linear do modelo 7 de predição da biomassa da área de estudo 2, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado

Modelo 7[1]	Shapiro-Wilk[2]	Durbin-Watson[3]	Breusch-Pagan[4]	*Outliers*[5]
Valor	0,484	2,086	0,523	[-1,622, 2,455]
Passou no teste[6]	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: O autor

Nota: [1] Melhor modelo de regressão linear múltipla escolhido pelo teste de AIC.

[2] Teste que verifica se há normalidade dos resíduos. Há distribuição normal se p-valor > 0,05.

[3] Teste que verifica se há independência dos resíduos. Há independência se *d* estiver entre 1,5 e 2,5.

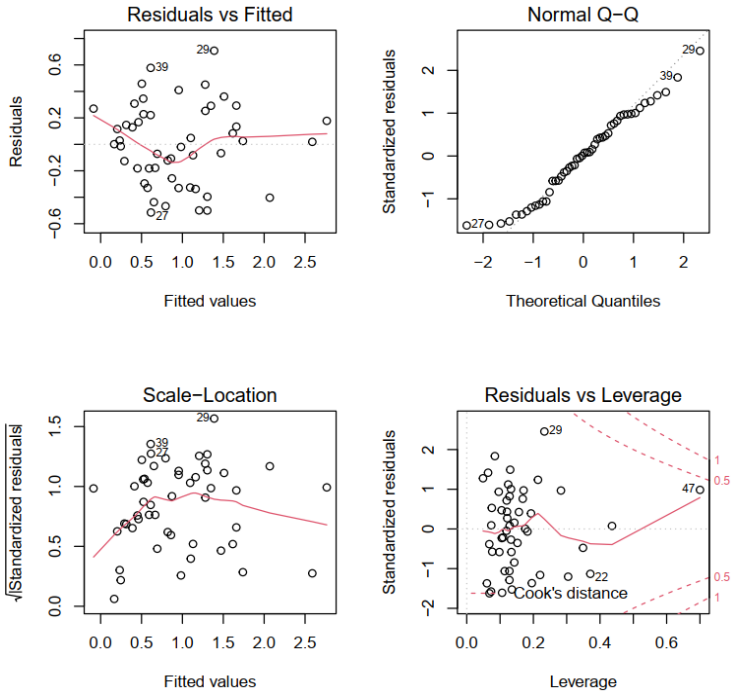
[4] Teste que verifica a há homocedasticidade dos resíduos. Há homocedasticidade se p-valor > 0,05.

[5] Há ausência de *outliers* nos resíduos quando os resíduos padronizados estão entre -3 e +3.

[6] "Sim" caso o modelo tenha passado no teste e "Não" caso o modelo não tenha passado no teste.

Os gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 7 são apresentados na Figura 100.

Figura 100 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 7 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 2, utilizando os dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo não tripulado



Fonte: O autor

A verificação dos pressupostos de regressão do modelo 4 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 2, utilizando os dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico, é apresentada na Tabela 52.

Tabela 52 – Pressupostos de regressão linear do modelo 4 de predição da biomassa da área de estudo 2 utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico

Modelo 4[1]	Shapiro-Wilk[2]	Durbin-Watson[3]	Breusch-Pagan[4]	*Outliers*[5]
Valor	0,060	1,898	0,393	[-1,902, 2,578]
Passou no teste[6]	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: O autor

Nota: [1] Melhor modelo de regressão linear múltipla escolhido pelo teste de AIC.

[2] Teste que verifica se há normalidade dos resíduos. Há distribuição normal se p-valor > 0,05.

[3] Teste que verifica se há independência dos resíduos. Há independência se *d* estiver entre 1,5 e 2,5.

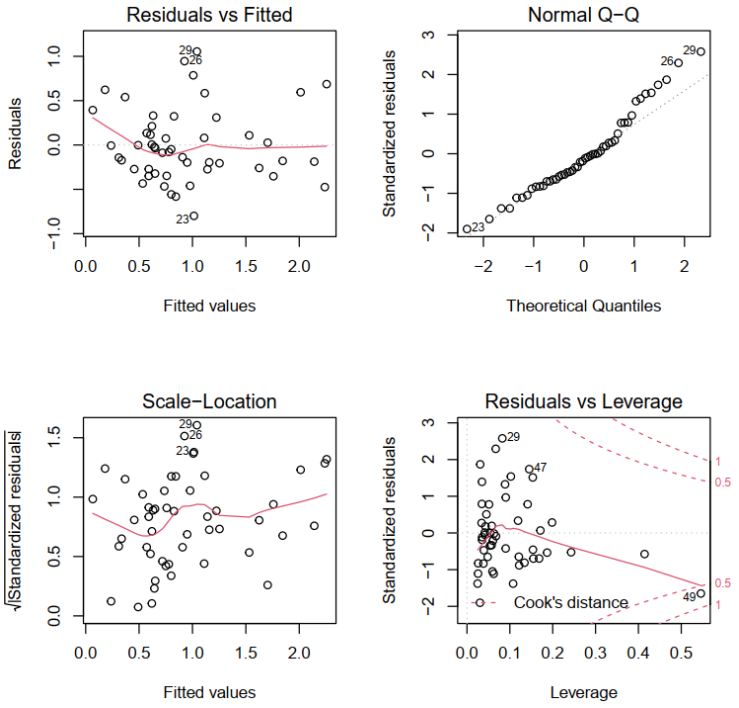
[4] Teste que verifica a há homocedasticidade dos resíduos. Há homocedasticidade se p-valor > 0,05.

[5] Há ausência de *outliers* nos resíduos quando os resíduos padronizados estão entre -3 e +3.

[6] "Sim" caso o modelo tenha passado no teste e "Não" caso o modelo não tenha passado no teste.

Os gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 4 são apresentados na Figura 101.

Figura 101 – Gráficos de diagnóstico de regressão linear do modelo 4 utilizado para predizer a biomassa da área de estudo 2, utilizando os dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico



Fonte: O autor

O gráfico localizado no canto superior esquerdo das Figuras 93 a 101 é o gráfico dos resíduos (eixo Y) em função dos valores ajustados (eixo X) *Residuals vs Fitted*; neste gráfico é possível observar a linearidade (linha contínua na cor vermelha e linha pontilhada na cor cinza) do modelo. Este gráfico mostra se os resíduos têm padrões lineares.

A linearidade é constatada comparando-se a linha contínua na cor vermelha com a linha pontilhada na cor cinza; quanto mais a primeira se aproxima da segunda, maior será a linearidade do modelo.

O gráfico localizado no canto superior direto das Figuras 93 a 101 é o gráfico normal da distribuição normal dos quantis (normal Q-Q). No eixo Y do gráfico encontram-se os resíduos padronizados e no eixo X os resíduos teóricos, ou seja, os resíduos esperados caso a distribuição seja normal. Para que haja distribuição normal dos resíduos, os pontos do gráfico devem estar próximos da linha pontilhada na cor cinza.

O gráfico localizado no canto inferior esquerdo das Figuras 93 a 101 é o gráfico *Scale-Location*, que apresenta a raiz quadrada dos resíduos padronizados (eixo Y) em função dos valores ajustados (eixo X). Neste gráfico é possível verificar a homogeneidade das variâncias (homocedasticidade). Caso haja homocedasticidade, a dispersão dos pontos no gráfico é aproximadamente constante ao longo dos valores ajustados da biomassa (eixo X do gráfico). Caso não haja homogeneidade na dispersão dos pontos, haverá a presença de heterocedasticidade das variâncias.

O gráfico localizado no canto inferior direito das Figuras 93 a 101 é o gráfico dos resíduos padronizados pelos pontos de alavancagem (*Residuals vs Leverage*). Neste gráfico é possível verificar a presença de *outliers* nos resíduos padronizados (eixo Y), quando há pontos fora do intervalo entre -3 e +3. Os pontos de alavancagem são pontos influentes que podem influenciar a estimação do modelo, fazendo com que a reta contínua na cor vermelha saia do alinhamento horizontal e se aproxime destes pontos, a linha pontilhada na cor vermelha representa a distância de Cook e os pontos localizados à direita dessa linha podem estar influenciando o comportamento do modelo.

Os modelos 6, gerado com dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**, e 3, gerado com dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico, ambos para área de estudo 1A (Cerradão), apresentaram ausência de homocedasticidade, ou seja, apresentaram presença de heterocedasticidade e foram corrigidos aplicando-se o método proposto por Maia (2017).

Todos os modelos gerados para as áreas 1A, 1B e 2 apresentaram distribuição normal dos resíduos, com exceção do modelo 3 gerado com dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico para a área 1A.

Ambos os modelos gerados com dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico para as áreas 1A e 1B apresentaram *outliers* com valores acima de +3.

Todos os modelos gerados para as áreas 1A, 1B e 2 apresentaram independência dos resíduos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos para a acurácia e precisão dos ortomosaicos e MDS gerados sem apoio e com PPK são influenciados pela posição da base. Por este motivo, a base sempre deve estar posicionada em um local livre de obstruções.

Comparando-se os ortomosaicos gerados com pontos de apoio e sem PPK, com os ortomosaicos gerados com PPK e sem pontos de apoio, ambos apresentaram a mesma precisão planimétrica; porém, a precisão altimétrica foi melhorada quando se utilizou pontos de apoio.

Se a finalidade do levantamento aerofotogramétrico for a obtenção de produtos planimétricos, a utilização do método PPK é suficiente para garantir a precisão dos produtos gerados. Caso a finalidade seja a obtenção de produtos planialtimétricos, é necessária a utilização de pontos de apoio no terreno; no entanto, a quantidade de pontos de apoio é drasticamente reduzida, sendo 4 ou 5 pontos suficientes para garantir a precisão dos produtos gerados.

Elevando-se a altura de voo, e mantendo-se a mesma câmera e distância focal, aumenta-se o GSD e, consequentemente, a área imageada; porém, a precisão altimétrica é reduzida, mesmo com a utilização de pontos de apoio.

Em ortomosaicos gerados com fotografias tomadas em dois ou mais dias, em horários distintos, recomenda-se a utilização de filtros para redução de sombras e otimização do histograma das fotografias, para melhor identificação de pontos homólogos. Recomenda-se, ainda, a utilização de RPAS (asa rotativa) com plataforma giroestabilizadora (*gimbal*), obtendo assim fotografias verticais na mesma escala em todos os pontos da fotografia, evitando problemas como o apresentado na Figura 78.

Por ser voltado para aplicações topográficas, o algoritmo utilizado pelo programa de processamento da nuvem de pontos, obtida com levantamento aerofotogramétrico, pressupõe que a vegetação isolada ou esparsa é ruído, sendo, portanto, eliminada parcialmente ou por completo de forma automática (Figuras 58 e 59). Por este motivo, a nuvem de pontos obtida não representa a realidade de campo, influenciando negativamente na quantificação da cobertura vegetal (Figuras 69 e 74), na identificação de indivíduos (Figuras 82 e 85), e no modelo de predição da biomassa (Equação 43). Assim, sugere-se a utilização de programas que o usuário possa escolher a aplicação do filtro de ruído e/ou vegetação nas etapas iniciais do processamento.

Em relação às nuvens de pontos obtidas com LiDAR, a maior densidade de pontos representa melhor a parte aérea das árvores, propiciando uma determinação mais precisa da cobertura vegetal (Figura 67 e 73). Por outro lado, no processo de identificação dos indivíduos, uma ou mais árvores vizinhas e com copas aproximadamente da mesma altura podem ser identificadas como sendo apenas um único indivíduo (Figura 86), após a aplicação do filtro gaussiano. Além disto, com uma nuvem de pontos mais densa, aumenta-se a probabilidade do pulso *laser* atravessar a copa das árvores e atingir o solo, representado melhor o MDT. Consequentemente, uma melhor representação do MDT propicia uma normalização da nuvem de pontos mais precisa, gerando-se um melhor CHM.

Devido à alta densidade de informação por metro quadrado, sugere-se a utilização da classificação orientada a objetos para identificar e contar o número de indivíduos.

Com relação à predição da biomassa, foi confeccionada a Tabela 53, na qual são apresentados os pressupostos atendidos, ou não, por cada modelo de regressão linear; os pressupostos não atendidos estão realçados em negrito.

Tabela 53 – Pressupostos de regressão linear dos modelos de predição da biomassa gerados para as áreas de estudo 1A, 1B e 2, utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo tripulado e não tripulado e com levantamento aerofotogramétrico

Pressuposto	Área 1A (Cerradão)			Área 1B (Cerrado Denso)			Área 2		
	LiDAR trip.	**LiDAR ñ trip.**	**Aerolev.**	LiDAR trip.	LiDAR ñ trip.	**Aerolev.**	LiDAR trip.	LiDAR ñ trip.	Aerolev.
Modelo	13	6	3	4	12	3	7	7	4
R^2	85,6	74,2	54,6	94,6	98,2	88,6	74,3	79,6	63,2
Normalidade	Sim	Sim	**Não**	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Outlier	Não	Não	**Sim**	Não	Não	**Sim**	Não	Não	Não
Homocedasticidade	Sim	**Não**	**Não**	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Independência dos Resíduos	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Multicolinearidade	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: O autor
LiDAR trip. = LiDAR aerotransportado com voo tripulado.
LiDAR ñ trip. = LiDAR aerotransportado com voo não tripulado.
Aerolev. = Levantamento aerofotogramétrico.

Para a área de estudo 1A, o modelo capaz de explicar melhor a predição da biomassa foi o modelo gerado com a utilização de dados com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado** (Modelo 13); já na área de estudo 1B e 2, os melhores foram os modelos 12 e 7, ambos utilizando dados obtidos com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**.

A utilização de LiDAR aerotransportado em voo **não tripulado** apresentou a melhor relação custo-benefício quando comparado com o LiDAR aerotransportado em voo **tripulado**, considerando o custo de aquisição dos dados (cerca de 8 a 10 vezes inferior ao do LiDAR transportado com voo **tripulado**) e a eficácia para a predição da biomassa.

Com relação aos modelos gerados utilizando dados obtidos com levantamento aerofotogramétrico, nota-se que a maior discrepância na eficácia da predição da biomassa foi observada na área 1A, com valor de 31% (diferença com o modelo gerado com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**). Essa diferença pode ser explicada pela aplicação prévia e automática de filtros no processo de geração da nuvem de pontos, além da presença na área de estudo 1A de alguns indivíduos (9 árvores) com DAP e altura discrepantes da maior parte da amostra do inventário florestal, por se tratar de uma área de transição (Cerrado Denso e Cerradão).

Nas áreas 1B e 2, as discrepâncias na eficácia da predição da biomassa foram no valor de 9,6% e 16,4%, respectivamente; estes resultados ficaram mais próximos dos obtidos com LiDAR, pois nessas áreas a vegetação possui cobertura mais homogênea, sendo, portanto, uma quantidade menor de vegetação eliminada pelos filtros durante o processo de geração da nuvem de pontos, refletindo, assim, melhor a realidade.

Recomenda-se a utilização da nuvem de pontos obtida com levantamento aerofotogramétrico para a predição de biomassa em áreas de cobertura vegetal mais homogênea (florestas plantadas).

A maioria das métricas utilizadas na obtenção dos modelos de regressão linear com a aplicação do método *stepwise* foi de métricas de elevação, sendo a métrica *Elev strata (9.00 to 10.00) return proportion* a métrica mais utilizada nas áreas de estudo 1A e 1B.

Conclui-se que a utilização de dados obtidos com LiDAR, oriundos de aeronave tripulada ou não, e dados obtidos com aerofotogrametria não podem substituir, e sim complementar o método convencional de levantamento de campo em vegetação nativa de Cerrado Denso e Cerradão. Sendo a eficiência na predição da biomassa da melhor para a pior a nuvem de pontos obtida com LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado**, com LiDAR aerotransportado com voo **tripulado** e com o levantamento aerofotogramétrico.

Para áreas de Cerrado Denso e Cerradão, pode-se concluir que todas as tecnologias utilizadas nesta pesquisa apresentaram resultados eficazes, podendo, portanto, serem aplicadas isoladamente de acordo com a disponibilidade de equipamentos e recursos financeiros do interessado. Ressalta-se que o menor custo foi o do levantamento aerofotogramétrico, seguido

do LiDAR aerotransportado com voo **não tripulado** e do LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**. Em pesquisa de mercado, detectou-se que o levantamento aerofotogramétrico é cerca de 15 a 20 vezes inferior ao custo do LiDAR aerotransportado com voo **tripulado**.

Por fim, sugere-se que sejam aplicados outros modelos de regressão não linear para a predição da biomassa. A utilização de dados híbridos, por exemplo, pode ser também uma boa opção, com a junção das nuvens de pontos obtidas com levantamento aerofotogramétrico e com LiDAR, ou na utilização de nuvem de pontos obtida com levantamento aerofotogramétrico combinada com MDS obtido com LiDAR.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) - **Regulamento Brasileiro Da Aviação Civil Especial (RBAC-E) nº 94**. 2021a. Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-emd-01/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD01.pdf. Acesso em: 05 out. 2021.

_____. **Quantidade de Cadastros – Drones**. 2021b. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones/quantidade-de-cadastros. Acesso em 06 dez. 2021.

Akaike H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. Reprinted from *Breakthroughs in Statistics, Vol.I, Foundations and Basic Theory*, S. Kotz and N.L. Johnson, eds., Springer-Verlag, New York, 1992, 610-624 by permission of Akademia Kiado and Springer-Verlag, New York. (Originally published in **Proceeding** of the Second International Symposium on Information Theory, B.N. Petrovand F. Caski, eds., Akademiai Kiado, Budapest, 1973, 267-281). Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-0919-5_37. Acesso em: 05 nov. 2021.

ALMEIDA, D. R. A de; BROADBENT, E.; ZAMBRANO, A.; STARTK, S.; PAPA, D.; GORGENS, E. B.; SILVA, C. A.; BRANCALION, P. H. S. Monitoramento da estrutura de plantios de restauração florestal estabelecidos sob diferentes intensidades de manejo usando drone-lidar. In: anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2019, Santos. **Anais eletrônicos**... São José dos Campos, INPE, 2019. Disponível em: https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/monitoramento-da-estrutura-de-plantios-de-restauracao-florestal-estabelecidos-sob-diferentes-intensidades-de-manejo-usan. Acesso em: 06 nov. 2021.

ALMEIDA, D. R. A de.; NELSON, B. W.; ALMEIDA, J. S.; GORGENS, E. B.; RESENDE, A. F. Análises de susceptibilidade e impacto de incêndios florestais em uma floresta alagável (igapó) na Amazônia central por meio de lidar terrestre portátil. **Anais** XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, João Pessoa -PB: INPE, 2015. p. 1316-1322. ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em: http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP6W34M/3JM4822. Acesso em: 28 out. 2021.

ALBERTZ, J.; KREILING, W. **Photogrammetric Guide**, Ed. Wichmann, Karlsruhe, 1989.

ALBUQUERQUE, R. W.; COSTA, M. O.; FERREIRA, M. E.; CARRERO, G. C.; GROHMANN, C. H. Remotely piloted aircraft imagery for automatic tree counting in forest restoration areas: a case study in the Amazon. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**. V. 8, n. 3, p. 207-223. 2020. DOI: https://doi.org/10.1139/juvs-2019-0024. Disponível em: https://cdnsciencepub.com/doi/abs/1x0.1139/juvs-2019-0024. Acesso em: 08 jul. 2021.

ALBUQUERQUE, R. W.; FERREIRA, M. E.; OLSEN, S. I.; TYMUS, J. R. C.; BALIEIRO, C. P.; MANSUR, H.; MOURA, C. J. R.; COSTA, J. V. S.; BRANCO, M. R. C.; GROHMANN, C. H. Forest Restoration Monitoring Protocol with a Low-Cost Remotely Piloted Aircraft: Lessons Learned from a Case Study in the Brazilian Atlantic Forest. **Remote Sensing**. 2021, 13, 2401. DOI: https://doi.org/10.3390/rs13122401. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/13/12/2401. Acesso em: 06 dez. 2021.

ALVES JÚNIOR, L. R. **Análise de produtos cartográficos obtidos com câmera digital não métrica acoplada a um veículo aéreo não tripulado em áreas urbanas e rurais no estado de Goiás**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015a.

ALVES JÚNIOR, L. R.; CÔRTES, J. B. R.; SILVA, J. R.; FERREIRA, M. E. Validação de ortomosaicos e modelos digitais de terreno utilizando fotografias obtidas com câmera digital não métrica acoplada a um VANT. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 7, p. 1453-1466, 11. 2015b.

ALVES JÚNIOR, L. R.; FERREIRA, M. E.; CÔRTES, J. B. R.; CASTRO J. L. A. DE. High accuracy mapping with cartographic assessment for a fixed-wing remotely piloted aircraft system. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 12, p. 1-21, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY & REMOTE SENSING (ASPRS). Las Specification Version 1.4 – R13 15 July 2013. Disponível em: <http://asprs.org/a/society/committees/standards/LAS_1_4_r13.pdf> Acesso em 02 abr. 2018.

AMORIM, Diogo Caio Rocha. Quantificação de Biomassa e Altura das Árvore sem uma Floresta de Mata Atlântica em Belo Horizonte - MG, Comparação entre Levantamento Laser Scanner e Inventário Florestal Por Área Fixa. **Gestão e Sustentabilidade Ambiental RG&AS**, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 711-725, jul/set. 2020. DOI: 10.19177/rgsa.v9e32020711-725.

ANDERSEN, Hans-Erik; REUTEBUCH, Stephen E.; MCGAUGHEY, Robert J.; D'OLIVEIRA, Marcus V. N.; KELLER Michael. Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat lidar flights. **Remote Sensing of Environment**, v. 151, p. 157-165, 2014. ISSN 0034-4257. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.049. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425713003441. Acesso em: 27 out. 2021.

ANDRADE, José Bittencourt de. **FOTOGRAMATRIA**. Curitiba: SBEE, 1998. ISBN 85-86180-07-6. 258 p.

ARAÚJO, M. A.; CHAVIER, F.; DOMINGOS, J. L. Avaliação do Potencial de Produtos Derivados de Aeronaves Não Tripuladas na Atividade Florestal Assessment of Potential From Products of Unmanned Airbone Vehicle Use in Forestry Activities. **Ambiência**, 2(3), 69-82, 2006. Disponível em: https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/258/339. Acesso em: 31 out. 2021.

ARAUJO, L. S.; KELLER, M.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; VICTORIA, D. C.; MORTON, D.; TAKEMURA, C. M.; HUNTER, M. O. Dados LiDAR e análise orientada a objeto no monitoramento de manejo florestal. **Anais** XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Foz do Iguaçu - PR: INPE, 2013. p. 6171-6177. Disponível em: http://marte2.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.22.09.25. Acesso em: 28 out. 2021.

BALTSAVIAS, E. P., 1999. A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing No. 54(2-3), pp. 83-94.

BARMPOUTIS, Panagiotis; STATHAKI, Tania; LLOYD, Jonathan; MOURA, Magna Soelma Bessera de; CARVALHO, Herica Fernanda de Sousa. LiDAR Technology and Linear

Dynamical Systems for Classification of Tropical Tree Species. **Proceedings**, 29th International Conference on Wood Modification and Technology 2018.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. do Z.; SILVA FILHO, D. F. da. **Quantificação de recursos florestais**. Oficina de Textos, 2014.
BLOEMBERGEN, N. **Physical Review Records the Birth of the Laser Era** in American Institute of Physics 1993. Disponível em: https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.881380. Acesso em: 19 ago. 2020.

BEGON, M.; TOWNSEND, C.R.; HARPER, J. L. **Ecologia: de indivíduos a ecossistemas**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007. 752p.

BOCCARDO, Piero; FISSORE, Vanina; MORREALE, Salvatore; ILARDI, Elisa; BALDO, Marco. Aerial LiDAR Technology And Support To Avalanches Prevention And Risk Mitigation: An Operative Application At "Colle Della Maddalena" (Italy). 2020, ISPRS **Annals** of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. VI-3/W1-2020, 2020 Gi4DM 2020 – 13th GeoInformation for Disaster Management conference, 2020, Sydney, Australia (online). Disponível em: https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/VI-3-W1-2020/11/2020/isprs-annals-VI-3-W1-2020-11-2020.pdf. Acesso em: 05 out. 2021.

BRASIL. **Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984**. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm>. Acesso em: 29 mar. 2018.

BREUSCH, T. S., PAGAN, A. R. A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation. **Econometrica**, 1979, v. *47*, n.5, p. 1287–1294. DOI: https://doi.org/10.2307/1911963. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/1911963?origin=crossref. Acesso em: 12 out. 2021.

BRILL, D.; MAY, S. M.; MHAMMDI, N.; KING, G.; LEHMANN, B.; BUROW, C.; WOLF, D.; ZANDER, A.; BRÜCKNER, H. Evaluating Optically Stimulated Luminescence Rock Surface Exposure Dating as a Novel Approach for Reconstructing Coastal Boulder Movement on Decadal to Centennial Timescales. **Earth Surface Dynamics**. 2019, v. 9, 205-234 p. DOI: 10.5194/esurf-9-205-2021. Disponível em: https://esurf.copernicus.org/articles/9/205/2021/. Acesso em 16.10.2021.

CENTENO, J. A. S e MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. **Anais** XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3645-3652. Disponível em: http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.00.45/doc/3645-3652.pdf. Acesso em: 28 out. 2021.
CEZARE, C. H. G.; MARCO JÚNIOR, P. de; MIRANDA, S. C.; FERREIRA JÚNIOR, L. G. Efeito da borda na estrutura da vegetação de um fragmento de cerradão em Goiás: uma análise a partir de dados LiDAR (*Light Detection and Ranging*). In: XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, SP, Brasil, 2017. **Anais,** p 8038 - 8045, 2017.

CHEN, Z.; GAO, B.; DEVEREUX, B. State-of-the-Art: DTM Generation Using Airborne LIDAR Data. **Sensors** 2017, v. 17, ed. 1, p. 24. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s17010150. Acesso em: 05 out. 2021.

CONTO, T. de; GÖRGENS, E. B.; SILVA, A. G. P. da; LARANJA, D. C. F.; RODRIGUEZ, L. C. E. Caracterização do perfil vertical do dossel de um trecho de Mata Atlântica através de escaneamento laser aerotransportado. **Scientia Forestalis**. 2015, v. 43, n. 108 p.873-884, 2015. DOI: dx.doi.org/10.18671/scifor.v43n108.12. Disponível em: https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr108/cap12.pdf. Acesso em: 27 out. 2021.

CÔRTES, J. B. R. **Análise da estabilidade de câmeras digitais de baixo custo com diferentes métodos de calibração**. Tese de doutorado. (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

COSTA, M. B. T. da; SILVA, C. A.; BROADBENT, E. N.; LEITE, R. V.; MOHAN, M.; LIESENBERG, V.; STODDART, J.; AMARAL, C. H. do; ALMEIDA, D. R. A. de; SILVA, A. L. da; GOYA, L. R. R. Y.; CORDEIRO, V. A.; REX, F.; HIRSCH, A.; MARCATTI, G. E.; CARDIL, A.; MENDONÇA, B. A. F. de; HAMAMURA, C.; Corte, A. P. D.; MATRICARDI, E. A. T.; HUDAK, A. T.; ZAMBRANO, A. M. A.; VALBUENA, R.; FARIA, B. L. de; SILVA JUNIOR, C. H. L.; ARAGAO, L.; FERREIRA, M. E.; LIANG, J.; CARVALHO, S. P. C.; KLAUBERG, C. Beyond trees: Mapping total aboveground biomass density in the Brazilian savanna using high-density UAV-lidar data, **Forest Ecology and Management**, v. 491, n. 119155, 2021. ISSN 0378-1127. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119155. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112721002437. Acesso em: 27 out. 2021.

CÔTÉ, J. F.; FOURNIER R. A.; EGLI, R. 2011; An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LiDAR, **Environemtnal Modelling & Software** 2011, pp. 761-777.

CRUZ, C. B. M.; BARROS, R. S.; CARDOSO, F. V.; REIS, F. B.; ROSÁRIO, L. S.; BARBOSA, S. S; RABACO, L. M. L.; LOURENÇO, J. S. Q. (2011). Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba: INPE 2011. p. 5463.

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

DEEMS, J.; PAINTER, T.; FINNEGAN, D. Lidar measurement of snow depth: A review. **Journal of Glaciology**, 2013. v. 59 ed. 215, p. 467-479. DOI:10.3189/2013JoG12J154. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-glaciology/article/lidar-measurement-of-snow-depth-a-review/4419DF5C778946103080CB6187D434C0. Acesso em: 05 out. 2021.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO - (DSG). **Norma da especificação técnica para controle de qualidade de dados geoespaciais (ET-CQDG)**. 1ª Edição - 2016. Disponível em: http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET_CQDG_1a_edicao_2016.pdf. Acesso em 29 mar. 2018.

_____. **Especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais (ET-ADGV)**. 2ª Edição - 2011, Versão 2.1.3. Disponível em:

http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET_ADGV_Vs_2_1_3.pdf. Acesso em: 29 mar. 2018.

D'OLIVEIRA, M. V. N.; BROADBENT, E. N.; OLIVEIRA, L. C.; ALMEIDA, D. R. A.; PAPA, D. A.; FERREIRA, M. E.; ZAMBRANO, A. M. A.; SILVA, C. A.; AVINO, F. S.; PRATA, G. A.; MELLO, R. A.; FIGUEIREDO, E. O.; JORGE, L. A. C.; ALVES JUNIOR, L. R.; ALBUQUERQUE, R. W.; Brancalion, P.H.S.; Wilkinson, B.; Oliveira-da-Costa, M. Aboveground Biomass Estimation in Amazonian Tropical Forests: a Comparison of Aircraft- and GatorEye UAV-borne LiDAR Data in the Chico Mendes Extractive Reserve in Acre, Brazil. **Remote Sensing**. 2020, *12*, 1754. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12111754. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/12/11/1754. Acesso em: 27 out. 2021.

DURBIN, J.; WATSON, G. S. Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression. II. **Biometrika**, 1951. *38* n. 1/2, p. 159–177. DOI: https://doi.org/10.2307/2332325. Disponível em https://www.jstor.org/stable/2332325. Acesso em: 12 out. 2021.

ELLOUMI, M.; DHAOU, R.; ESCRIG, B.; IDOUDI, H.; SAIDANE, L. A. Monitoring road traffic with a UAV-based system. 2018 **IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/WCNC.2018.8377077. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8377077. Acesso em 17 out. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10, 1979, Rio de Janeiro. Súmula...Rio de Janeiro, 1979. 87p. Disponível em: https://edepot.wur.nl/480004. Acesso em: 30 out. 2021.

_____. Projeto Paisagens Sustentáveis Brasil, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/210990/paisagens-sustentaveis-brasil. Acesso em: 07 out. 2021.

ESPARTEL, L.; LÜDERITZ, J.; SARRAZIN, O.; OBERBECK, H.; HÖFER, M. **Manual de Topografia e Caderneta de Campo**. Rio de Janeiro: Globo ,1983.

FAKHRULDDIN, S.S.; GHARGHAN, S.K.; AL-NAJI, A.; CHAHL, J. An Advanced First Aid System Based on an Unmanned Aerial Vehicles and a Wireless Body Area Sensor Network for Elderly Persons in Outdoor Environments. **Sensors** 2019, v. *19*, 2955. DOI: https://doi.org/10.3390/s19132955. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/19/13/2955. Acesso em: 17 out. 2021.

FELFILI, J. M., CARVALHO, F. A., HAIDAR, R. F. **Manual para o monitoramento de parcelas permanentes nos biomas Cerrado e Pantanal**. Brasília/DF: Universidade de Brasília, 60 p, 2005.

FELGUEIRAS, Carlos. **Análise sobre modelos digitais de terreno em ambiente de sistemas de informações geográficas**. 1999. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/~carlos/trab_cientific/selper8f.pdf. Acesso em: 05 out. 2021.

FENG, K.; LI, W.; SHENGYANG, Ge; PAN, F. Packages delivery based on marker detection for UAVs, **2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)**, 2020, pp. 2094-2099.

DOI: 10.1109/CCDC49329.2020.9164677. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9164677. Acesso em: 17 out. 2021.

FERNANDES, M. L. F**. Modelo Alométrico para Estimar Biomassa de Banisteriopsis caapi (jagube, mariri) no Estado do Amazonas**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias, Universidade Federal do Amazonas – UFAM). Manaus, 2007.

FERREIRA, L. G.; URBAN, T. J.; NEUENSCHAWANDER, A.; ARAÚJO, F. M. de. Use of Orbital LIDAR in the Brazilian Cerrado Biome: Potential Applications and Data Availability. **Remote Sensing**. 2011, *3*, 2187-2206. DOI: https://doi.org/10.3390/rs3102187. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/3/10/2187. Acesso em: 12 abr. 2018.

FERNANDEZ-DIAZ, Juan C.; CARTER, William E.; SHRESTHA, Ramesh L.; GLENNIE, Craig L. 2014. Now You See It… Now You Don't: Understanding Airborne Mapping LiDAR Collection and Data Product Generation for Archaeological Research in Mesoamerica. **Remote Sensing**. 2014, 6, no. 10: 9951-10001.

FIELD, A. **Descobrindo a estatística usando o SPSS**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

FIGUEIREDO, E. O.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; FEARNSIDE, P. M.; PAPA, D.A. Modelos para estimativa de volume de árvores individuais pela morfometria da copa obtida com lidar. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 621-628, 2014.

FU, Z.; CHEN, Y.; DING, Y.; HE, D. Pollution Source Localization Based on Multi-UAV Cooperative Communication, in **IEEE Access**, vol. 7, pp. 29304-29312, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2900475. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8665856. Acesso em: 17 out. 2021.

GALO, M.; CAMARGO, P. DE O.; O uso do GPS no controle de qualidade de cartas. In: 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Tomo II, Florianópolis – SC, 1994. **Anais**, p. 41-48, 1994.

GIBBS, H. K.; BROWN, S.; NILES, J. O.; FOLEY, J. A. **Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks**: Making REDD a reality, 2007.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; VIDAL, M. R.; BASTOS, P.; SANTOS, A. F.; SANTOPUOLI, G. Estimativa da altura da base das copas com o uso de dados laser scanning aerotransportado (LiDAR). **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 3, p. 48-57, 2012. DOI: https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v3n3.giongo. Disponível em: https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/JBB/article/view/303. Acesso em: 27 out. 2021.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. do A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, ago./out. 2010.

GOMES, L. F.; BRITES, R. S.; LOCKS, C. J.; ANJOS, R. R. dos. Estimativas das Alterações na Biomassa Florestal Utilizando LiDAR em Área de Manejo Florestal Sustentável na Amazônia Sul-Ocidental. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 43- 3, p. 260-268.

ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908. DOI: http://doi.org/10.11137/2020_3_260_268. Disponível em: https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/38565/pdf. Acesso em: 28 out. 2021.

GONÇALVES, J.A.; HENRIQUES, R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. 2015, ISPRS **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,** v. 104, p .101-111. ISSN 0924-2716. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271615000532. Acesso em 17 out. 2021.

GORGENS, E. B.; SOARES, C. P. B.; NUNES, M. H.; LARANJA, D. C. F.; ANDRÉ, A. C.; RODRIGUEZ, L. C. E. Dependência espacial da estrutura vertical de diferentes tipologias florestais por meio de escaneamento laser aerotransportado. **Anais** XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, João Pessoa - PB: INPE, 2015. p. 552-558. ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em: http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP6W34M/3JM45DS. Acesso em: 29 out. 2021.

GRAYSON, B.; Penna, N.T.; MILLS, J.P.; GRANT, D.S. GPS precise point positioning for UAV photogrammetry. **The Photogrammetric Reccord**. 2018, v. 33: p. 427-447. DOI: https://doi.org/10.1111/phor.12259. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/phor.12259. Acesso em: 16 out. 2021.

GRZYBOWSKI, J.; LATOS, K.; CZYBA, R. Low-Cost Autonomous UAV-Based Solutions to Package Delivery Logistics. 2020 In: Bartoszewicz A., Kabziński J., Kacprzyk J. (eds) Advanced, Contemporary Control. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, vol 1196. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50936-1_42. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-50936-1_42. Acesso em: 17 out. 2021.

GUIERA, Anderson J. Azambuja; CENTENO, Tania Mezzadri; DELGADO, Myriam Regattieri; MÜLLER, Mauricio. Segmentação por Agrupamentos Fuzzy Cmeans em Imagens LiDAR Aplicados na Identificação de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica. **Espaço Energia**, ed. 03, 2005. Disponível em: http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/3/003-04.pdf. Acesso em: 28 out. 2021.

HAN, Jen-Yu; GUO, Jenny; JIANG, Yi-Syuan. Monitoring tunnel deformations by means of multi-epoch dispersed 3D LiDAR point clouds: An improved approach, **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 38, 2013, p 385-389, ISSN 0886-7798. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.07.022. Acesso em: 04 out. 2021.

HENTZ, Â. M. K.; DALLA CORTE, A. P.; NETTO, S. P.; STRAGER, M. P.; SCHOENINGER, E. R. Treedetection: Automatic tree detection using UAV-based data. **Floresta**, 48(3), 393-402, 2018. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/56150/35492. Acesso em: 31 out. 2021.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; TRIBUZY, E. S.; LIMA, A. N.; TEIXEIRA, L. M.; CARNEIRO, V. M. C.; FALSEMBURGH, C. A.; PINTO, F. R.; SILVA, R. P.; PINTO, A. C. M. **Noções básicas sobre manejo florestal. Apostila didática curso de manejo florestal**. INPA. 2005.

HORUS AERONAVES. **Precisão de dados: entenda a diferença entre os sistemas GPS, RTK e PPK**, 19 de abril, 2017. Disponível em: https://horusaeronaves.com/precisao-de-dados-entenda-a-diferenca-entre-os-sistemas-gps-rtk-e-ppk/ Acesso em: 28 mar. 2018.

JOHNSON, Katharine M.; OUIMET, William B. Rediscovering the lost archaeological landscape of southern New England using airborne light detection and ranging (LiDAR). **Journal of Archaeological Science**, 2014, v. 43, p. 9-20, ISSN 0305-4403. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.12.004. Acesso em: 05 out. 2021.

KINZEL, P.J.; LEGLEITER, C.J.; NELSON, J.M. Mapping River Bathymetry With a Small Footprint Green LiDAR: Applications and Challenges. 2013. JAWRA **Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, p. 183-204. Disponível em: https://doi.org/10.1111/jawr.12008. Acesso em: 04 out. 2021.

KOENIG, Kristina; HÖFLE, Bernhard; HÄMMERLE, Martin; JARMER, Thomas; SIEGMANN, Bastian; LILIENTHAL, Holger. Comparative classification analysis of post-harvest growth detection from terrestrial LiDAR point clouds in precision agriculture, ISPRS **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. 2015, v. 104, p. 112-125, ISSN 0924-2716, DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.03.003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271615000623. Acesso em: 05 out. 2021.

KONECNY, G. Geoinformation: Remote Sensing, **Photogrammetry and Geographic Information Systems**, Second Edition. Reino Unido, Taylor & Francis, 2014.

KOPARAN, C.; KOC, A.B.; PRIVETTE, C.V.; SAWYER, C.B. In Situ Water Quality Measurements Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System. **Water** 2018, *10*, 264. DOI: https://doi.org/10.3390/w10030264. Acesso em: https://www.mdpi.com/2073-4441/10/3/264/htm. Disponível em: 17 out. 2021.

KOPARAN, C.; KOC, A.B.; SAWYER, C.; PRIVETTE, C. Temperature Profiling of Waterbodies with a UAV-Integrated Sensor Subsystem. **Drones** 2020, *4*, 35. DOI: https://doi.org/10.3390/drones4030035. Disponível em: https://www.mdpi.com/2504-446X/4/3/35. Acesso em: 17 out. 2021.

KOUCKÁ, L.; KOPAČKOVÁ, V.; FÁROVÁ, K.; GOJDA, M. UAV Mapping of an Archaeological Site Using RGB and NIR High-Resolution Data. **Proceedings** 2018, *2*, 351. DOI: https://doi.org/10.3390/ecrs-2-05164. Disponível em: https://www.mdpi.com/2504-3900/2/7/351. Acesso em: 17 out. 2021.

KWAN, Mei-Po; RANSBERGER, Daniel M. LiDAR Assisted Emergency Response: Detection of Transport Network Obstructions Caused By Major Disasters. 2010. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 34, ed 3, p. 179-188, ISSN 0198-9715. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.02.001. Acesso em: 04 out. 2021.

LEAL, E. da M. **Análise da qualidade posicional em bases cartográficas geradas em cad**. Dissertação de mestrado. (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

LEFSKY, M. A., HUDAK, A. T., COHEN, W. B., & ACKER, S. A. 2005. Geographic variability in LiDAR predictions of forest stand structure in the Pacific Northwest. **Remote Sensing of Environment**, 95(4), 532–548. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425705000593. Acesso em: 12 abr. 2018.

LEITOLD, V., KELLER, M., MORTON, D. C., COOK, B. D., SHIMABUKURO, Y. E. Airborne LiDAR-based estimates of tropical forest structure in complex terrain: opportunities and trade-offs for REDD+. Carbon Balance and Management, v. 10, n. 3, p. 1-12, 2015.

LEVICK, S. R., ASNER, G. P., KENNEDY-BOWDOIN, T., & KNAPP, D. E. 2009. The relative influence of fire and herbivory on savanna three-dimensional vegetation structure. **Biological Conservation**, 142(8), 1693–1700. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320709001232. Acesso em: 12 abr. 2018.

LILLESAND, T.M.; KEIFER, R.W (2000): Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Nova York, pp. 568-575. Ackermann F., 1999. Airborne laser scanning – present status and future expectations, ISPRS **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 54(2-3), pp. 64-67.

LOCKS, C. J.; MATRICARDI, E. A. T. Estimativa de impactos da extração seletiva de madeiras na Amazônia utilizando dados LIDAR. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 481-495, abr./jun. 2019. ISSN 1980-5098. DOI: https://doi.org/10.5902/1980509826007. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cflo/a/vgf9jnnVhD6gy4g47cQYSzc/?lang=pt&format=pdf Acesso em: 28 out. 2021.

LOUDERMILK, E.L.; SINGHANIA, A.; FERNANDEZ, J.C.; HIERS, J.K.; O'BRIEN, J.J.; CROPPER JR.; W. P.; SLATTON, K.C.; MITCHELL, R.J. Application of Ground-Based LIDAR for Fine-Scale Forest Fuel Modeling. 2007. In: Butler, Bret W.; Cook, Wayne, comps. (Eds.), The fire environment–innovations, management, and policy; **conference proceedings**, 26–30 March 2007, pp. 515–523. Disponível em: https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p046.pdf. Acesso em: 15 ago. 2020.

LUGNANI, João Bosco. Introdução à Fototriangulação. Curitiba: UFPR, 1987. 134 p.

MAAS, H.G.; BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, E. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. 2008. **International Journal of Remote Sensing**, Vol. 29 (5), pp. 1579–1593.

MAIA, A.G. **Econometria conceitos e aplicações**. 1ª ed. São Paulo/SP: Saint Paul, 2017.

MAIMAN, T. Stimulated Optical Radiation in Ruby. **Nature** 187**,** 493–494 (1960). DOI: https://doi.org/10.1038/187493a0. Disponível em: https://www.nature.com/articles/187493a0. Acesso em: 12 out. 2021.

MAPBIOMAS. **Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil**, Coleção 6 (1985-2020). 2021. Disponível em: https://plataforma.mapbiomas.org/. Acesso em 18 out. 2021.

MARTINEZ-GUANTER, J.; AGÜERA, P.; AGÜERA, J.; PÉREZ-RUIZ, M. Spray and economics assessment of a UAV-based ultra-low-volume application in olive and citrus orchards. **Precision Agriculture** 21, 226–243 (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/s11119-019-09665-7. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-019-09665-7. Acesso em: 17 out. 2021.

MCCORMICK, M.P., 2005. Airborne and spaceborne lidar, in: Lidar. **Springer**, pp. 355–397. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-25101-4_13>. Acesso em: 15 ago. 2020.

MCDOUGALL, K; TEMPLE-WATTS, P. The Use of Lidar And Volunteered Geographic Information To Map Flood Extents And Inundation. 2012. ISPRS **Annals** of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. I-4, p. 251–256, Disponível em: https://doi.org/10.5194/isprsannals-I-4-251-2012, 2012. Acesso em: 04 out. 2021.

MCGAUGHEY, Robert J. FUSION/LDV: **Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. Fusion v. 4.20**. United States Department of Agriculture, Forest Service. 2021.

MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps, in **Proc**. Techinical Congress on Surveing and Mapping. 1982, Vol. 1, pp. 222–231.

MILLER, C. L. **The theory and application of the digital terrain model**. 1958. Dissertação (Massachusetts Institute of Technology) Department of Civil and Environmental Engineering. Disponível em: https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/67142. Acesso em: 05 out. 2021.

MINISTÉRIO DO EXÉRCITO. **Manual Técnico de Aerotriangulação**, T34-304, 2ª ed., 1984.

MIRANDA, S. C. **Estimativa da biomassa aérea lenhosa em formações savânica e florestal do bioma Cerrado através de dados de campo e LiDAR aerotransportado**. projeto de pesquisa n°. 44542020146 Edital Universal CNPq/2014.

MIRANDA, S. C.; BUSTAMANTE, M.; PALACE, M.; HAGEN, S.; KELLER, M.; FERREIRA, L. G. 2014. Regional Variations in Biomass Distribution in Brazilian Savanna Woodland. **Biotropica**, 46(2), 125–138.

MIRZAEI, M.; HENRIKSEN, L. C.; POULSEN, N. K.; NIEMANN, H. H; HANSEN, M. H. Individual Pitch Control Using LIDAR Measurements. 2012, IEEE **International Conference on Control Applications**, 2012, p. 1646-1651, DOI: 10.1109/CCA.2012.6402691. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6402691. Acesso em: 05 out. 2021.

MOHAN, M.; RICHARDSON, G.; GOPAN, G.; AGHAI, M.M.; BAJAJ, S.; GALGAMUWA, G.A.P.; VASTARANTA, M.; ARACHCHIGE, P.S.P.; AMORÓS, L.; CORTE, A.P.D.; DE-MIGUEL, S.; LEITE, R.V.; KGANYAGO, M.; BROADBENT, E.N.; DOAEMO, W.; SHORAB, M.A.B.; CARDIL, A. UAV-Supported Forest Regeneration: Current Trends, Challenges and Implications. **Remote Sensing**. 2021, v. 13, 2596. DOI: https://doi.org/10.3390/rs13132596. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/13/13/2596. Acesso em: 17 out. 2021.

MONICO, J. F. G. - **Posicionamento pelo GNSS**: descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

MOYES, H.; MONTGOMERY, S. Locating Cave Entrances Using Lidar-Derived Local Relief Modeling. **Geosciences**, 2019**.** v. 9, ed. 2: 98. Disponível em: https://doi.org/10.3390/geosciences9020098. Acesso em: 05 out. 2021.

NASA - **National Aeronautics and Space Administration**. ICESat_Brochure, 2017. Disponível em: https://attic.gsfc.nasa.gov/glas/docs/ICESat_Brochure.pdf. Acesso em: 15 ago. 2020.

NAZARENO, N. R. X. de; FERREIRA, N. C.; MACEDO, F. C. Avaliação da Exatidão Cartográfica da Ortoimagem Quickbird e da Ortofoto Digital do Município de Goiânia. In XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, GO, Brasil, 2009. **Anais** p 1771 - 1778, 2009.

NIKLAS, K.J. **Plant Allometry**: The Scaling of Form and Process. The University of Chicago Press. Chicago. 1994, 395p.

NUNES, G. M.; VIEIRA, D. J. E.; CARVALHO, S. P. C. Avaliação preliminar de dados obtidos por VANT em talhão florestal clonal de Eucalyptus urograndis H13 no estado de Mato Grosso. In: XI Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados à Engenharia Florestal. **Anais**, p. 211-218, 2014.

OLIVEIRA, C. P. de; FERREIRA, R. L. C.; SILVA, J. A. A. da; LIMA, R. B. d.; SILVA, E. A.; SILVA, A. F. de; LUCENA, J. D. S. de; SANTOS, N. A. T. dos; LOPES, I. J. C.; PESSOA, M. M. L.; MELO, C. L. S. M. S. de. Modeling and Spatialization of Biomass and Carbon Stock Using LiDAR Metrics in Tropical Dry Forest, Brazil. **Forests**. 2021, *12*, 473. https://doi.org/10.3390/f12040473. Disponível em: https://www.mdpi.com/1999-4907/12/4/473. Acesso em: 27 out. 2021.

PADRÓ, Joan-Cristian; MUÑOZ, Francisco-Javier; PLANAS, Jordi; PONS, Xavier. Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. 2019, v. 75, p. 130-140, ISSN 0303-2434. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243418306421. Acesso em: 16 out. 2021.

PAISAGENS SUSTENTÁVEIS BRASIL – **Sustainable Landscapes GeoNetwork Catalog, 2018**. Disponível em: https://www.paisagenslidar.cnptia.embrapa.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/c8a06ed4-e725-4674-b999-f7141d2643c4 Acesso em: 02 abr. 2018.

PANTOJA, N. V.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; HIGUCHI, Niro. Detecção da exploração madeireira a partir de imagens Landsat e dados LiDAR no Sudoeste da Amazônia. **Anais** XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Santos - SP: INPE 2017. p. 1408-1415. ISBN 978-85-17-00088-1. Disponível em: http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP6W34M/3PS4GLC. Acesso em: 28 out. 2021.

PARK, Hong Joo; TURNER, Russell; YUN, Bu Yeol; LEE, Jae One. Change Detection Analysis Using Airborne LiDAR: Open-cut Mine Environment. 16º Congresso Internacional de Pesquisas de Minas, Brisbane, Austrália. **Anais**. p. 12-16, 2016. Disponível em: https://www.minesurveyors.com.au/files/ISM2016/Proceedings/Section3/2_HJ_Park.pdf. Acesso em: 05 out. 2021.

PINAGÉ, E. R.; KELLER, M. M.; SANTOS, M. N.; SPINELLI-ARAUJO, L.; LONGO, M. Avaliação temporal dos efeitos da exploração madeireira usando dados Lidar. **Anais** XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, João Pessoa - PB: INPE, 2015. p. 834-841. ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em: http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP6W34M/3JM47A6. Acesso em: 28 out. 2021.

PIX4D – Pix4Dmapper Process Suporte **on-line**. Disponível em: https://suport.pix4d.com/entries/27939633. Acesso em: 20 jun. 2014.

POPESCU, S. C. Lidar Remote Sensing in Advances in Environmental Remote Sesning: Sensors Algorithms Applications, USA, FL, Boca Raton: CRC Press, pp. 57-80, 2011.

PULITI, Stefano; SAARELA, Svetlana; GOBAKKEN, Terje; STÅHL, Göran; NÆSSET, Erik. Combining UAV and Sentinel-2 auxiliary data for forest growing stock volume estimation through hierarchical model-based inference. 2018, **Remote Sensing of Environment**, v. 204, p. 485-497. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.007. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717304704. Acesso em: 17 out. 2021.

PURI, Nisha; TURKAN, Yelda. Bridge construction progress monitoring using lidar and 4D design models. **Automation in Construction**. 2020, v. 109, 102961, ISSN 0926-5805, DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102961. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519304820. Acesso em: 05 out. 2021.

QU, Y.; SHAKER, A.; SILVA, C.A.; KLAUBERG, C.; PINAGÉ, E. R. Remote Sensing of Leaf Area Index from LiDAR Height Percentile Metrics and Comparison with MODIS Product in a Selectively Logged Tropical Forest Area in Eastern Amazonia. **Remote Sensing**. 2018, *10*, 970. DOI: https://doi.org/10.3390/rs10060970. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/10/6/970. Acesso em: 27 out. 2021.

RAVI, Radhika; BULLOCK, Darcy; HABIB, Ayman. Highway And Airport Runway Pavement Inspection Using Mobile Lidar, 2020. **XXIV ISPRS Congress. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLIII-B1-2020, p. 349–354. Disponível em: https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLIII-B1-2020/349/2020/. Acesso em: 04 out. 2021.

REVELL, David L.; KOMAR, Paul D.; SALLENGER JR., Asbury H. An Application of LIDAR to Analyses of El Niño Erosion in the Netarts Littoral Cell, Oregon. West Palm Beach, Florida, 2002, **Journal of Coastal Research**, v. 18, ed. 4, p. 792-801. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/4299128. Acesso em: 04 out. 2021.

REX, F.E.; CORTE, A.P.D; MACHADO, S.A.; SANQUETTA, C.R. Identificação e Extração de Copas de Araucária angustifólia (Bertol.) Kuntze a partir de dados LiDAR. **Advances in**

Forestry Science. v. 5, n. 2, p.319-323, 2018a. DOI: 10.34062/afs.v5i2.5815. Disponível em: https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/5815. Acesso em: 28 out. 2021.

REX, F. E.; DALLA Corte, A. P.; DEBASTIANI, A. B.; KAZAMA, V. S.; SANQUETTA, C. R. Uso de Dados LIDAR na Estimativa de Variáveis Biofísica na Amazônia, Sob Diferentes Resoluções Espaciais. 2018b, **Nativa**, v. 6, p. 841-847. DOI: https://doi.org/10.31413/nativa.v6i0.6312. Disponível em: https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/6312. Acesso em 27 out. 2021.

RIBAS, R. P.; ELMIRO, M. A. T. Individualização de árvores em ambiente florestal nativo utilizando métodos de segmentação em modelos digitais produzidos a partir de tecnologias LIDAR. **Revista Brasileira de Cartografia**. n.645/4. p.717-729, 2013. Disponível em: http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43856. Acesso em: 27 out. 2021.

RIBEIRO, J. F., & B.M.T. WALTER. 2008. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In SANO, S.M., S.P. ALMEIDA, & J.F. RIBEIRO (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora**. Embrapa Cerrados, Brasília-DF, v 1, p. 152-213. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/570911/cerrado-ecologia-e-flora. Acesso em: 18 out. 2021.

RODRÍGUEZ, Laura Romero; DUMINIL, Eric; RAMOS, José Sánchez; EICKER, Ursula. Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach, **Solar Energy**, 2017, v. 146, p. 264-275, ISSN 0038-092X, DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.043. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17301445. Acesso em: 05 out. 2021.

ROQUETTE, J. Distribuição da biomassa no cerrado e a sua importância na armazenagem do carbono. **Ciência Florestal**, v. 28, n.3, 2018. DOI: https://doi.org/10.5902/1980509833354. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/33354. Acesso em: 14 out. 2021.

ROSALEN, David; AMAZONAS, Davi. Mapeamento Com Aeronave Remotamente Pilotada de Navegação Precisa em Tempo Real. In: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 2019, Santos. **Anais eletrônicos**. São José dos Campos, INPE, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/mapeamento-com-aeronave-remotamente-pilotada-de-navegacao-precisa-em-tempo-real>. Acesso em: 16 out. 2021.

RUBINOWICZ, P; CZYŃSKA, K. Study of City Landscape Heritage Using Lidar Data and 3d-City Models. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,** 2015, v. XL-7/W3, p. 1395–1402. Disponível em: https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1395-2015. Acesso em: 05 out. 2021.

RUSSKIN, A.; ALEKHIN, M.; ISKHAKOVA, A. Functional Requirements Synthesis in Creation of Modular UAV Multisensory System Payload for Mountain Snow Search and Rescue Missions, **2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)**, 2021, p. 1-4, DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438883.

Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9438883. Acesso em: 17 out. 2021.

SANTOS, P. S. **Caracterização e mapeamento biofísico ambiental da bacia hidrográfica do rio vermelho a partir de dados remotamente sensoriados**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

SATO, L. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; KELLER, M.; SANTOS, M. N.; ARAGÃO, L. E. O. C. Análise da relação entre dados de LiDAR e de biomassa florestal no sudoeste da Amazônia. **Anais** XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, João Pessoa - PB: INPE, 2015. p. 3005-3012. ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em: http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP6W34M/3JM4AKC. Acesso em: 28 out. 2021.

SATO, L. Y.; GOMES, V. C. F.; SHIMABUKURO, Y. E.; KELLER, M.; ARAI, E.; DOS-SANTOS, M. N.; BROWN, I. F.; ARAGÃO, L. E. O.C. de. Post-Fire Changes in Forest Biomass Retrieved by Airborne LiDAR in Amazonia. **Remote Sensing**. 2016, 8, 839. DOI: https://doi.org/10.3390/rs8100839. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/8/10/839. Acesso em: 27 out. 2021.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933. Disponível em: https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43968352/PDF. Acesso em: 19 out. 2021.

SCOLFORO, J. R. et al. Equações para o peso de matéria seca das fisionomias, em Minas Gerias. In: SCOLFORO, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; ACERBI JÚNIOR, F. W. (Ed.). **Inventário Florestal de Minas Gerais - Equações de Volume, Peso de Matéria Seca e Carbono para Diferentes Fisionomias da Flora Nativa**. Lavras: UFLA, 2008. cap. 3, p.103-114.

SENSEFLY. **eBee Plus Drone User Manual** – Revision 1.7 / March, 2018a.

_____. **eBee Plus brochure**, 2018b. Disponível em: https://www.sensefly.com/app/uploads/2017/10/eBee_Plus_PT.pdf. Acesso em 26 mar. 2018.

SHAN, J.; TOTH, C. K. Airborne and Spaceborne LASER Profilers and Scanners no livro Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. Cap. 2 p. 29-85 **CRC Press**, 2ª Edição, 590p., 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/285795168_Airborne_and_Spaceborne_Laser_Profilers_and_Scanners. Acesso em: 15 ago. 2020.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4. 1965, p. 591-611. DOI: https://doi.org/10.2307/2333709. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/2333709. Acesso em: 12 out. 2021.

SILVA, Carlos A.; HUDAK, Andrew T.; VIERLING, Lee A.; LOUDERMILK, E. Louise; O'BRIEN, Joseph J.; HIERS, J. Kevin; JACK, Steve B.; GONZALEZ-BENECKE, Carlos; LEE, Heezin; FALKOWSKI, Michael J.; KHOSRAVIPOUR, Anahita. Imputation of individual longleaf pine (Pinus palustris Mill.) tree attributes from field and LiDAR data. **Canadian Journal of Remote Sensing**. 42(5): p. 554-573, 2016. DOI: https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1196582. Disponível em:

https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/07038992.2016.1196582?scroll=top&needAccess=true. Acesso em: 08 jul. 2021.

SILVA, M. N.; BUCK, A. L. B.; LINGNAU, C.; MACHADO, Á. M. L.; MIRANDA, B. P. Varredura com laser terrestre para determinação das variáveis dendrométricas da Araucaria angustifolia. . **Anais** XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba - PR: INPE 2011. p. 5509-5516. Disponível em: http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/06.28.17.09/doc/p0996.pdf. Acesso em: 28 out. 2021.

SILVEIRA, H. L. F. da; GALVÃO, L. S. G.; SANCHES, I. D. A.; SÁ, I. B. de; TAURA, T. A. Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LiDAR data for mapping vegetation and studying the relationships with soil attributes in the Brazilian semi-arid region. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 179-190, 2018. ISSN 0303-2434. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243418304483. Acesso em> 28 out. 2021.

SNEE, Ron. Origins of the Variance Inflation Factor as Recalled by Cuthbert Daniel.1981 (Technical report). **Snee Associates**. DOI: 10.13140/RG.2.1.3274.8562. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/291808767_Who_Invented_the_Variance_Inflation_Factor. Acesso em: 19 out. 2021.

SOARES, P.; FIRMINO, P.; TOMÉ, M.; CAMPAGNOLO, M.; OLIVEIRA, J.; OLIVEIRA, B.; CÂMARA, F. A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados no inventário florestal–o caso do montado de sobro. In **Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia-CNCG** (Vol. 8, pp. 1-8), 2015. Disponível em: https://viiicncg.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/VIIICNCG/cncg2015_comunicao_45.pdf. Acesso em: 31 out. 2021.

SPATIAL ECOLOGY & CONSERVATION (SPEC) LAB. **GatorEye Unmanned Flying Laboratory**. Disponível em: http://www.speclab.org/gatoreye.html. Acesso em: 07 out. 2021

SUN, S.; LI, C.; PATERSON, A.H. In-Field High-Throughput Phenotyping of Cotton Plant Height Using LiDAR. **Remote Sensing**. 2017, *9*, 377. DOI: https://doi.org/10.3390/rs9040377. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/9/4/377. Acesso em: 06 dez. 2021.

TELLING, J.W.; GLENNIE, C.; FOUNTAIN, A.G.; FINNEGAN, D.C. Analyzing Glacier Surface Motion Using LiDAR Data. **Remote Sensing**. 2017, v. 9: 283, ed. 3, p. 12. Disponível em: https://doi.org/10.3390/rs9030283. Acesso em: 05 out. 2021.

TIRUNEH, H.W.; STETLER, L.D.; OBERLING, Z.A.; MORRISON, D.R.; CONNOLLY, J.L.; RYAN, T.M. Discontinuity Mapping Using Ground-Based LiDAR: Case Study from an Open Pit Mine. **Anais**. 47° Simpósio de Mecânica das Rochas/ Geomecânica dos EUA, São Francisno, California, 2013. Disponível em: https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA13/All-ARMA13/ARMA-2013-663/121225. Acesso em: 05 out. 2021.

TOOKE, T. R.; VANDERLAAN, M.; COOPS, N.; CHRISTEN, A.; KELLETT, R. Classification of residential building architectural typologies using LiDAR, 2011 **Joint Urban**

Remote Sensing Event, 2011, p. 221-224, DOI: 10.1109/JURSE.2011.5764760. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5764760. Acesso em: 05 out. 2021.

TOPCON SOLUTIONS SOTE. **Topcon HIPer Lite**. Disponível em: <http://www.topconsolutions.com/site/cart/productdetail.exc?cmd=view_cart_product&co_id=1074&item_id=127442&prod_id=3695> Acesso em: 30 mar. 2018.

TULER, M.; SARAIVA, S. **Fundamentos de Topografia**. 2. ed. Minas Gerais, 2002.

UNIVERSITY OF FLORIDA (UF) - SCHOOL OF FOREST RESOURCES & CONSERVATION. **Gatoreye Unmanned Flying Laboratory**. 2021. Disponível em: http://naufrp.org/wp-content/uploads/2020/09/Gatoreye-Unmanned-Flying-Laboratory.pdf. Acesso em: 07 out. 2021.

VANVALKENBURGH, Parker; CUSHMAN, K. C; BUTTERS, Luis Jaime Castillo; VEJA, Carol Rojas; ROBERTS, Carson B; KEPLER, Charles; KELLNER, James. Lasers Without Lost Cities: Using Drone Lidar to Capture Architectural Complexity at Kuelap, Amazonas, Peru, **Journal of Field Archaeology**, 2020, v. 45: ed. 1, p. S75-S88, DOI: 10.1080/00934690.2020.1713287. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00934690.2020.1713287?needAccess=true. Acesso em: 05 out. 2021.

VELLEMAN, Paul F.; WELSCH, Roy E. Efficient Computing of Regression Diagnostics. **The American Statistician**, v. 35, n. 4, 1981, p. 234–42. DOI: https://doi.org/10.2307/2683296. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/2683296. Acesso em: 19 out. 2021.

VIEIRA, P. A. **Dinâmica de ocupação, vulnerabilidades e cenários para a bacia hidrográfica do rio Vermelho**. Goiás, 2013. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

VIEIRA, P. A.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. Análise da vulnerabilidade natural da paisagem em relação aos diferentes níveis de ocupação da bacia hidrográfica do Rio Vermelho, estado de Goiás. **Sociedade & Natureza**, v. 26, n. 2, p. 385-400, 2014.

VOLPATO, Leonardo; PINTO, Francisco; GONZÁLEZ-PÉREZ, Lorena; THOMPSON, Iyotirindranath Gilberto; BORÉM, Aluízio; REYNOLDS, Matthew; GÉRARD, Bruno; MOLERO, Gemma; RODRIGUES, Francelino Augusto. High Throughput Field Phenotyping for Plant Height Using UAV-Based RGB Imagery in Wheat Breeding Lines: Feasibility and Validation. **Frontiers in Plant Science**, 2021, v. 12, p. 19. DOI: 10.3389/fpls.2021.591587. Disponível em: https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2021.591587. Acesso em: 16 out. 2021.

WEDAJO, G. K. LiDAR DEM Data for Flood Mapping and Assessment; Opportunities and Challenges: A Review. 2017. **Journal of Remote Sensing & GIS** v. 6: 210. DOI:10.4172/2469-4134.1000211. Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/49fb/a5fbc6c36b1a6791fecba0f8b8365f69c0dc.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.

WEHR A.; LOHR U. Airborne Laser Scanning – An Introduction and Overview. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, v. 54, p. 68-82, 1999.

WESSELS, K. J., MATHIEU, R., ERASMUS, B. F. N., ASNER, G. P., SMIT, I. P. J., VAN AARDT, J. A. N., *et al.* 2011. Impact of communal land use and conservation on woody vegetation structure in the Lowveld savannas of South Africa. Forest Ecology and Management, 261(1), 19–29. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811271000544X. Acesso em: 12 abr. 2018.

WILLIANS, Colin. Graphic Designer/Multimedia Specialist. National Ecological Observatory Network. Disponível em: https://www.earthdatascience.org/courses/use-data-open-source-python/data-stories/what-is-lidar-data/lidar-chm-dem-dsm/. Acesso em: 05 out. 2021.

WOLF, D. **Elements of Photogrammetry with Aplications in GIS**. Third edition - The McGraw-Hill Companies, 2004.

WULDER, Mike; NIEMANN, K. Olaf; GOODENOUGH, David G. Local Maximum Filtering for the Extraction of Tree Locations and Basal Area from High Spatial Resolution Imagery, **Remote Sensing of Environment**, v. 73, n. 1, p. 103-114, 2000. ISSN 0034-4257. DOI: https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00101-2. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425700001012. Acesso em 08 jul. 2021

YAMAMOTO, Kristina H.; POWELL, Rebecca L.; ANDERSON, Sharoly; SUTTON, Paul C. Using LiDAR to quantify topographic and bathymetric details for sea turtle nesting beaches in Florida, **Remote Sensing of Environment**. 2012, v. 125, p. 125-133, ISSN 0034-4257, DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.07.016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712002908. Acesso em: 05 out. 2021.

ZHANG, He; ALDANA-JAGUE, Emilien; CLAPUYT, François; WILKEN, Florian; VANACKER, Veerle**;** VAN OOST, Kristóf. Evaluating the Potential of PPK Direct Georeferencing for UAV-SfM Photogrammetry and Surface Change Detection**. Earth Surface Dynamics**. 2019, v. 7, 205-234 p. DOI: https://doi.org/10.5194/esurf-7-807-2019. Disponível em: https://esurf.copernicus.org/articles/9/205/2021/. Acesso em 16.10.2021.

ZHENG, Hengbiao; ZHOU, Xiang; HE, Jiaoyang; YAO, Xia; CHENG, Tao; ZHU, Yan; CAO, Weixing; TIAN, Yongchao. Early season detection of rice plants using RGB, NIR-G-B and multispectral images from unmanned aerial vehicle (UAV). 2020. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 169,2020, ISSN 0168-1699. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105223. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919305009. Acesso em: 17 out. 2021.

ZIMBRES, Barbara; RODRÍGUEZ-VEIGA, Pedro; SHIMBO, Julia Z.; BISPO, Polyanna da Conceição; BALZTER, Heiko; BUSTAMANTE, Mercedes; ROITMAN, Iris; HAIDAR, Ricardo; MIRANDA, Sabrina; GOMES, Letícia; CARVALHO, Fabrício Alvim; LENZA, Eddie; MARACAHIPES-SANTOS, Leonardo; GONZAGA, Ana Clara Abadia; PRADO JÚNIOR, Jamir Afonso do; MACHADO, Evandro Luiz Mendonça; DIAS, Anne Priscila; TERRA, Marcela de Castro Nunes Santos; MELLO, José Marcio de; SCOLFORO, José Roberto Soares; PINTO, José Roberto Rodrigues; ALENCAR, Ane. Mapping the stock and

spatial distribution of aboveground woody biomass in the native vegetation of the Brazilian Cerrado biome, **Forest Ecology and Management**, v. 499, n. 119615, 2021. ISSN 0378-1127. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119615. Disponível em: (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112721007052. Acesso em: 27 out. 2021.

ZIMBRES, Barbara; SHIMBO, Julia; BUSTAMANTE, Mercedes; LEVICK, Shaun; MIRANDA, Sabrina; ROITMAN, Iris; SILVÉRIO, Divino; GOMES, Leticia; FAGG, Christopher; ALENCAR, Ane. Savanna vegetation structure in the Brazilian Cerrado allows for the accurate estimation of aboveground biomass using terrestrial laser scanning. **Forest Ecology and Management**, v. 458, n. 117798, 2020. ISSN 0378-1127. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117798. Disponível em: (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112719311909) Acesso em: 27 out. 2021.

APÊNDICE A – PASSO A PASSO PARA A OPERAÇÃO DO RPAS MODELO EBEE PLUS RTK

Este material é uma tradução livre com adaptações do manual do usuário do eBee Plus, versão 1,7 de março de 2018.

1 PLANEJAMENTO DO VOO

Cada voo de mapeamento requer um plano de voo, que é um caminho definido por um conjunto de pontos de referência, e um conjunto de ações a serem realizadas, como tirar fotos, avançar para o próximo ponto ou iniciar o pouso. Atualmente, o planejamento do voo é realizado no software eMotion 3, responsável pelo gerenciamento de voo para este RPAS.

Um plano de voo completo é dividido em duas fases distintas; a primeira delas é a fase de configuração do voo e a segunda é a fase da missão do voo.

A fase de configuração do voo inclui a criação de *waypoints* e ações relacionadas à decolagem e pouso, que devem ser cuidadosamente determinados, para garantir que o RPA decole, cumpra sua missão de mapeamento, e retorne com sucesso à base (conhecida também como *homepoint*). Esta fase é geralmente planejada diretamente no campo, pois está intimamente relacionada às condições atmosféricas e físicas do local do mapeamento (velocidade e direção do vento, relevo e presença de obstáculos).

Os pontos criados nessa fase são o ponto de decolagem, o ponto *Start* e o ponto *Home*. O ponto de decolagem (ponto a partir do qual o RPA é lançado) é automaticamente definido para o local calculado a partir de sinais GNSS recebidos no momento de seu lançamento. Esta localização define a altitude de 0 m / ATO (*Above Take-off*, ou acima da decolagem); as altitudes de todos os outros *waypoints*, quando definidos em m / ATO, são referenciados à altitude deste local (e não ao nível do mar).

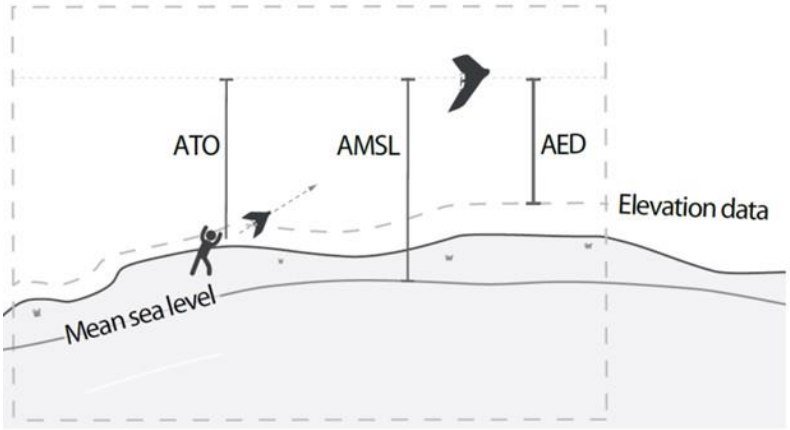
O ponto *Start* é o primeiro ponto para o qual o RPA se dirige quando inicia um voo autônomo. Por padrão, o ponto *Start* é definido a uma altitude de 75 m / ATO. Recomenda-se colocar o ponto *Start* próximo e contra o vento, a partir do local de decolagem, para permitir uma transição suave entre a decolagem e o voo até o ponto *Start* (SENSEFLY, 2018a).

O ponto *Home* é o ponto em que o RPA se dirige ao final de uma missão autônoma. É também uma posição de segurança para a qual se dirigirá, caso encontre um problema durante o voo.

A fase da missão do voo consiste em confeccionar o plano de voo, onde serão definidos os limites da área a ser mapeada, a referência da altura do voo, o tamanho do GSD (*Ground Sample Distance*; equivalente ao tamanho do *pixel* no terreno), as superposições longitudinal e lateral entre as fotografias, além dos pontos de referência e ações relacionadas ao mapeamento e captura de imagens. Com base nos parâmetros que foram definidos durante o planejamento da missão, o eBee Plus RTK obtém fotografias automaticamente em momentos pré-definidos. A área estimada capturada no solo, por cada fotografia, é exibida na forma de um polígono de atualização contínua na área do mapa no momento do voo.

A altura do voo pode ser planejada e determinada a partir de três tipos de referência, como: acima do ponto de decolagem - ATO (*Above Take Off*), acima do nível médio dos mares - AMSL (*Above Mean Sea Level*) e acima dos dados de elevação - AED (*Above Elevation Data*). A Figura 1 apresenta as três opções de referência de altitude disponíveis no eMotion 3.

Figura 1 – Opções de referência de altitude do eBee Plus RTK.



Fonte: Adaptado de SenseFly (2018a).

O eMotion 3 tem a capacidade de levar em conta os dados de elevação para definir a altitude dos *waypoints* da missão e as linhas de voo resultantes de uma missão de mapeamento. Isso não apenas melhora a resolução espacial do *pixel* resultante (GSD), mas também aumenta a segurança da missão (particularmente em terrenos irregulares), mantendo uma altura mais uniforme entre o RPA e a superfície. Os dados de elevação obtidos por satélite (com 30 ou 90 m de resolução espacial) são derivados da versão 2.1 do conjunto de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), combinado com outras fontes de dados (ASTER GDEM, SRTM30, dados cartográficos, etc.). Estes dados abrangem quase todas as terras emergidas, exceto os territórios com latitude inferiore a 56° S e o território da Federação Russa com latitude superior a 60° N. Esses dados podem conter imprecisões de vários metros e não contêm dados

sobre obstáculos, como edifícios ou árvores. A senseFly não oferece garantia quanto à precisão dos dados de elevação, sendo de responsabilidade exclusiva do operador garantir uma trajetória de voo segura em dada altitude.

Um plano de voo é mostrado na área do mapa usando círculos para representar *waypoints*, linhas para representar o caminho do voo e setas para mostrar a direção do voo. Após a finalização do planejamento do voo, é possível realizar uma simulação para a verificação de eventuais ajustes antes de se iniciar a fase da missão (i.e., decolagem).

2 EXECUÇÃO DO VOO

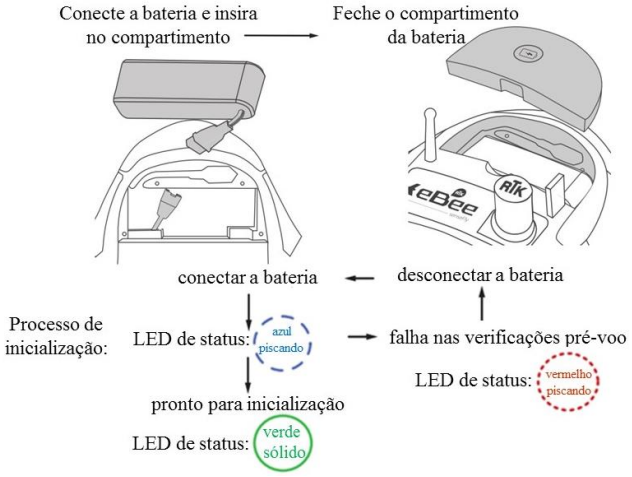
No preparo de cada voo, deve-se sempre realizar um *check list* completo de *hardware* e *software*, onde alguns pontos essenciais são verificados, tais como: nível de bateria no *notebook*; inspeção visual geral do RPAquanto a danos e reparos (corpo da aeronave, tubo de pitot, sensor *laser* de solo – para medir altitude, conectores e suporte de asas, rotação do motor, conectores da bateria e da câmera e lentes da câmera); instalação da hélice; instalação da câmera; montagem das asas; instalação da bateria (sempre com carga total, cerca 12,6 V); e conexão com o programa de monitoramento e controle do voo (eMotion 3).

Após a instalação e conexão da bateria, o eBee RTK realiza uma verificação automática de seus sensores e inicia o recebimento de sinais GNSS (durante essa verificação é importante que o RPA não esteja inclinado em mais de 10 graus; o melhor é que este esteja estabilizado no solo ou numa mesa). As verificações pré-voo podem durar de alguns segundos a vários minutos no caso de recepção de sinal GNSS ruim (esses sinais de satélite são necessários para a conclusão das verificações; o manual recomenda colocar o eBee RTK em área aberta, com uma visão clara do céu).

Durante as verificações pré-voo, o LED de status pisca na cor azul. Uma vez que as verificações pré-voo estejam concluídas, o eBee RTK inclina seus ailerons para cima e para baixo e o LED de status fica aceso na cor verde sólido para indicar que está pronto. Neste momento o usuário pode conectar o RPA ao programa eMotion, e o programa reportará o status para cada item verificado no *check list*.

Se houver algum problema durante as verificações pré-voo realizadas pelo RPA, será indicado um erro de pré-voo no eMotion, bem como um LED de status piscando na cor vermelha na aeronave. A Figura 2 apresenta a etapa de instalação e conexão da bateria, bem como o comportamento do LED de status.

Figura 2 – Conexão da bateria e comportamento do LED status.



Fonte: Adaptado de senseFly (2018a).

3 LINK DE COMUNICAÇÃO

A comunicação entre o programa eMotion e o RPA é feita por um modem transmissor com frequência de 2,4 GHz, ligado ao computador via cabo USB (Universal Serial Bus). Para manter a conexão, o sinal do modem deve sempre alcançar o eBee Plus.

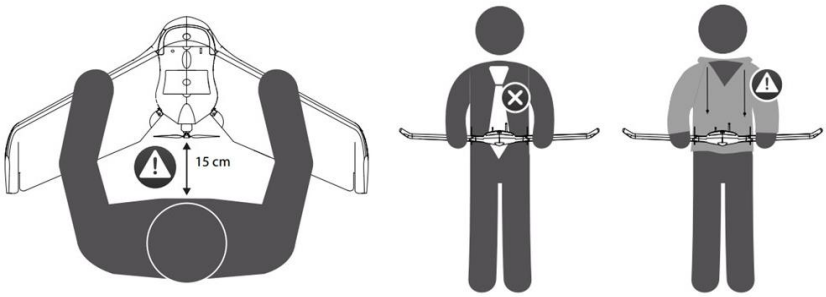
O alcance da conexão de dados pode ser afetado por alguns fatores externos, tais como altura da antena, terreno muito ondulado, obstáculos ou interferências de outras fontes de rádio. Ocasionalmente, durante um voo, pode ocorrer a perda da conexão de dados entre o eMotion e o RPA. Caso haja a perda na comunicação de *uplink* ou *downlink*, o RPA continua a execução da missão até que a conexão seja restabelecida. Quando o tempo sem comunicação entre o RPA e o software eMotion for maior que 30 segundos, um aviso de alerta é gerado no programa e o RPA volta automaticamente para o ponto *Home* (essa ação de segurança é configurável no eMotion).

4 DECOLAGEM

Após a finalização do planejamento da missão, e a checagem pré-voo, o *drone* estará pronto para a inicialização (LED de status verde sólido); a partir deste momento, o motor já pode ser ligado.

Para lançar o *drone* com segurança, o usuário deve segurá-lo a uma distância de pelo menos 15 cm entre a hélice e qualquer parte do seu corpo. Roupa ou quaisquer objetos devem ser mantidos presos ao corpo do usuário (longe do *drone*). A Figura 3 apresenta a forma correta de se segurar o eBee Plus RTK durante as etapas de acionamento do motor e de lançamento.

Figura 3 – Forma correta de segurar o eBee Plus RTK durante o lançamento.



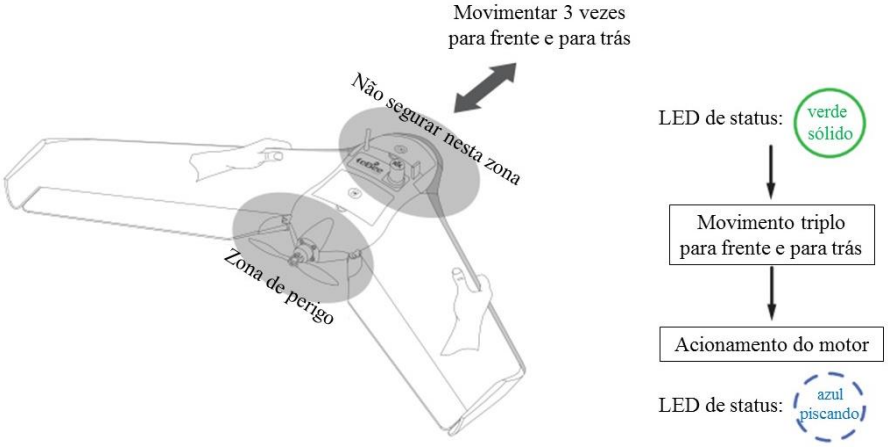
Fonte: Adaptado de senseFly (2018a).

Não é recomendado o uso de roupas que possuam itens pendurados à frente do usuário, tais como gravata, roupas com cordões, casaco ou capuz com cordas (SENSEFLY, 2018a).

O primeiro passo do procedimento de decolagem é a identificação da direção do vento. A decolagem da aeronave deve sempre ser feita em direção contrária ao vento (a velocidade do vento deve ser igual ou inferior a 12 m/s).

O segundo passo do procedimento de decolagem é constituído pelo acionamento do motor, por meio de movimentos realizados com a aeronave no sentido longitudinal (para frente e para trás) repetidos por três vezes (em aproximadamente 3 segundos), conforme indicado na Figura 4. Após o acionamento do motor, o LED de status piscará em azul até que o motor esteja na potência máxima e pronto para decolar.

Figura 4 – Movimentos de acionamento do motor do eBee Plus RTK.

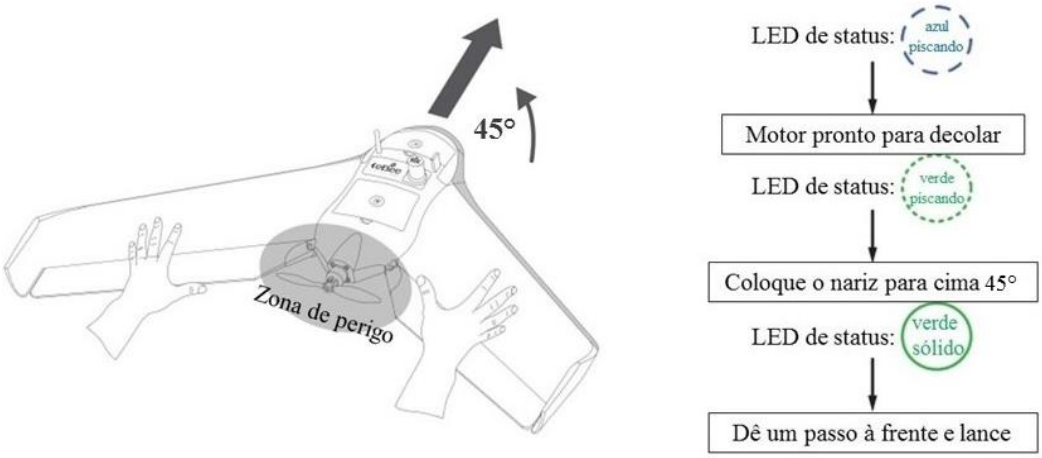


Fonte: Adaptado de senseFly (2018a).

O eBee Plus RTK não necessita de pista para a decolagem; sendo assim, o mesmo deve ser arremessado após o acionamento do motor. O terceiro passo do procedimento de decolagem é a obtenção da inclinação ideal para o lançamento do *drone*. A inclinação de proa (nariz da aeronave) deve ser de 45 graus em relação ao solo, para evitar que a aeronave entre em estol,

ou seja, perca sustentação e caia. A Figura 5 ilustra o ângulo de inclinação necessário para o lançamento do eBee Plus RTK.

Figura 5 – Inclinação correta do nariz do eBee Plus RTK para o lançamento.



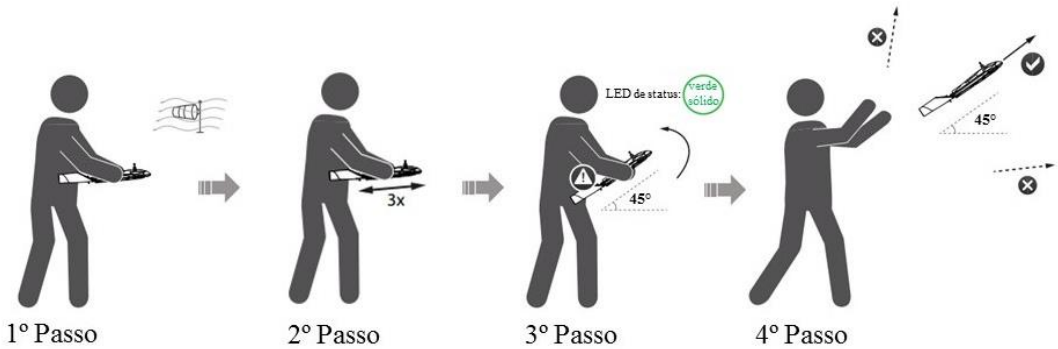
Fonte: Adaptado de senseFly (2018a).

Quando o motor estiver em potência máxima, o LED de status piscará em verde. Neste momento, basta orientar o RPAS com aproximadamente 45 graus de nariz para cima e asas niveladas horizontalmente. Quando o ângulo estiver correto, o LED de status ficará verde, indicando que o RPAS está pronto para decolar.

O quarto passo do procedimento de decolagem é representado pelo lançamento do *drone*, feito com um empurrão suave, andando um a dois passos à frente, liberando-o com ambas as mãos em um movimento para a frente.

Após a obtenção da potência máxima do motor não há necessidade de ter pressa para lançar o RPAS. Caso seja necessário desligar o motor, basta repetir o movimento para frente e para trás três vezes e o motor irá desligar. A Figura 6 ilustra um resumo dos passos do procedimento de lançamento do eBee Plus RTK.

Figura 6 – Sequência de passos do lançamento do eBee Plus RTK.



Fonte: Adaptado de SenseFly (2018a).

Para garantir a perfeita decolagem da aeronave, é recomendado uma distância livre de obstáculos de pelo menos 40 m no alinhamento do lançamento do *drone*.

Imediatamente após a decolagem, ele manterá as asas niveladas e subirá na direção em que foi lançado até atingir a altitude de transição de decolagem, ponto em que começará a voar em direção ao ponto *Start*. Por padrão, a altitude de transição de decolagem é ajustada para 20 m. Em condições difíceis de lançamento, o usuário pode definir o rumo de decolagem e a altitude de transição de decolagem no eMotion.

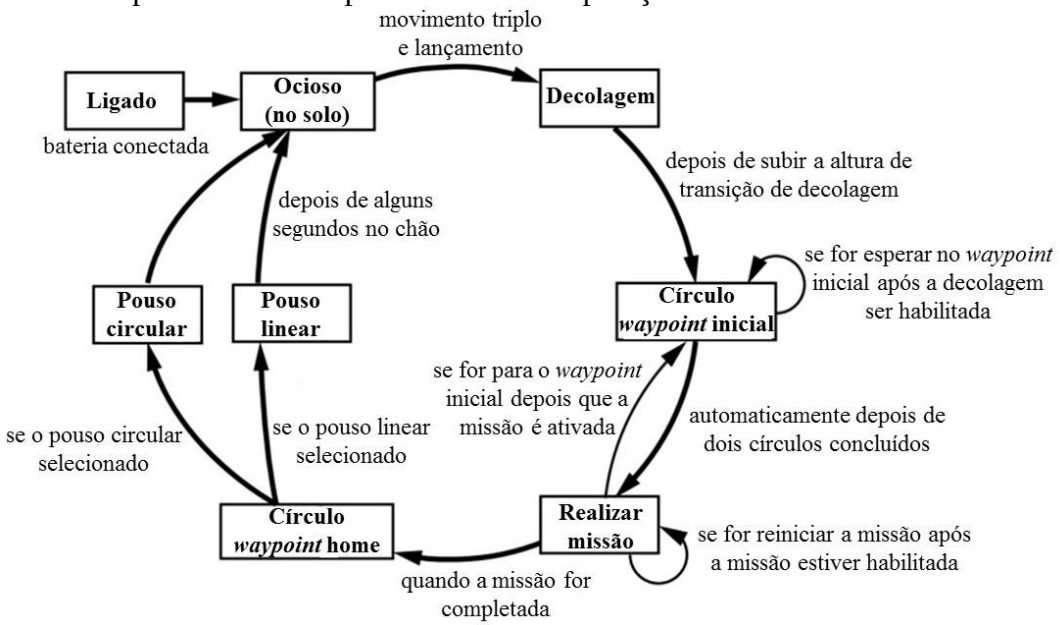
Após atingir o local e a altitude do ponto *Start*, o *drone* inicia um voo circular em torno deste ponto (uma a duas vezes) para estimar o vento e calibrar seus sensores antes de iniciar a missão de mapeamento.

5 MONITORAMENTO E CONTROLE DO VOO

O eBee Plus RTK pode ser controlado manualmente ou por um controlador autônomo. Segundo a senseFly (2018), o voo manual usando o controle remoto só deve ser usado em situações de emergência ou caso dê um problema com o controlador autônomo.

Durante um voo típico, o controlador autônomo no eBee RTK alternará entre os vários modos, dependendo do plano de voo e dos comandos que receber da barra de controle. O controlador muda entre os modos durante uma missão típica. A Figura 7 ilustra os modos de operação autônomos do eBee Plus RTK.

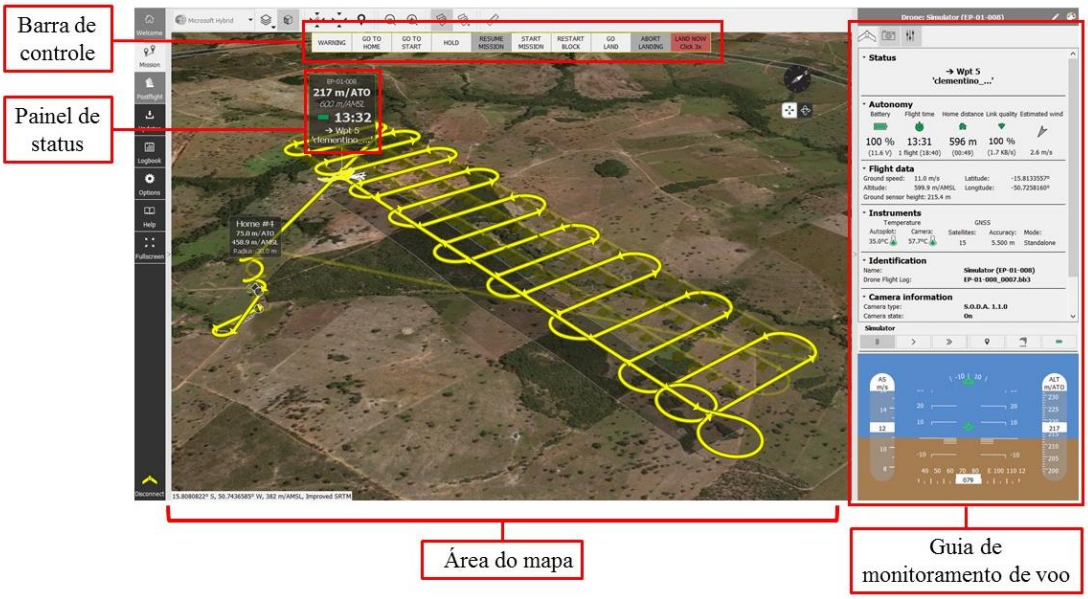
Figura 7 – Etapas de um voo típico no modo de operação autônomo com o eBee Plus RTK.



Fonte: Adaptado de senseFly (2018a).

O RPAS pode ser monitorado pelo usuário durante o voo através do programa eMotion 3. Na tela do programa são exibidas, em tempo real, todas as informações necessárias ao monitoramento, controle e/ou tomada de decisões relativas ao voo e comportamento da aeronave. A interface do programa eMotion 3, durante a execução de um voo com o eBee Plus RTK, é apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Interface do programa eMotion 3 durante a execução de um voo com o eBee Plus RTK na área de estudo desta pesquisa.



Fonte: O autor.

A área do mapa exibe a posição em tempo real do *drone*, atualizada em tempo real enquanto o *drone* executa o voo. Uma pequena seta e uma *infobox* indicam a velocidade e a direção do vento, conforme medido pelo eBee Plus RTK. O painel de status, que acompanha a posição do *drone*, exibe informações básicas de voo, incluindo carga da bateria, tempo de voo e as altitudes ATO e AMSL da aeronave.

No topo da área do mapa está a barra de controle, que pode ser usada a qualquer momento para enviar comandos ao *drone*, bem como para reconhecer mensagens de aviso e falha, se ocorrerem. Os botões de comando permitem que o operador controle diretamente o *drone* enquanto durante o voo. Os botões que compõem a barra de controle, bem como sua funcionalidade, estão descritos no Tabela 1.

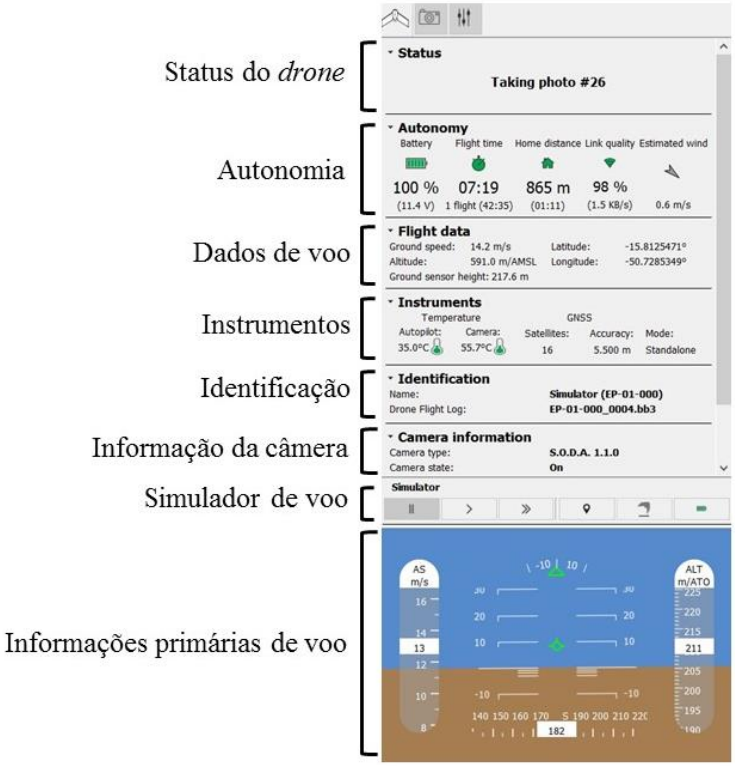
Tabela 1 – Botões da barra de controle, e suas disponibilidades e funcionalidades.

BOTÃO	DISPONIBILIDADE	FUNÇÃO
WARNING	Aviso ativo	Fica na **cor amarela** para avisos em voo, o texto do botão muda para "ACK WARNING", se for clicado significa que o usuário reconheceu o aviso. Fica na **cor vermelha** para falhas críticas, o texto do botão muda para "CRITICAL FAILURE" e o botão não pode ser clicado.
GO TO HOME	A qualquer momento	Diz ao *drone* para voar em direção ao ponto *Home*, e descrever um voo circular neste ponto aguardando o próximo comando.
GO TO START	Nenhuma ação de segurança ativa	Diz ao *drone* para voar em direção ao ponto *Start*, e descrever um voo circular neste ponto aguardando o próximo comando.
HOLD	Nenhuma ação de segurança ativa	Diz ao *drone* para criar um *waypoint* virtual na posição e altitude atual, e descrever um voo circular em torno deste ponto aguardando o próximo comando.
RESUME MISSION	Não está no modo Executar Missão	Diz ao *drone* para retornar à última posição alcançada durante a uma missão interrompida e continuar o plano de voo.
START MISSION	Nenhuma ação de segurança ativa	Diz ao *drone* para voar em direção ao primeiro *waypoint* ativo na lista de *waypoints* e iniciar a missão desde o início.
RESTART BLOCK	A qualquer momento	Diz ao *drone* para reiniciar o bloco atual.
GO LAND	A qualquer momento	Diz ao *drone* para voar em direção ao ponto *Home* e iniciar o procedimento de pouso.
ABORT LANDING	Durante o modo de pouso circular, pouso linear ou pouso de emergência (se não houver falha crítica ativa)	**Pouso Circular ou Linear**: Diz ao *drone* para abortar o procedimento de aterrissagem corrente, retornar à altitude do ponto *Home*, e descrever um voo circular em torno deste ponto aguardando o próximo comando. **Pouso de emergência**: (disponível somente se não houver falha crítica ativa). Diz ao *drone* para abortar o procedimento de pouso corrente, retornar ao local onde o pouso de emergência foi acionado, e descrever um voo circular entorno deste ponto aguardando o próximo comando.
LAND NOW Click 3x	A qualquer momento	Diz ao drone para iniciar um pouso circular em torno de um *waypoint* de 20 m de raio no local atual. Deve ser clicado rapidamente por 3 vezes consecutivas para ser acionado.

Fonte: Adaptado de senseFly (2018).

A guia de monitoramento de voo é usada para monitorar o eBee Plus RTK durante uma missão de mapeamento. A guia é dividida nas seguintes seções: status do *drone*; autonomia; dados de voo; instrumentos; identificação; informação da câmera; simulador de voo; informações primárias de voo. A guia de monitoramento de voo é apresentada de forma detalhada na Figura 9.

Figura 9 – Guia de monitoramento de voo.



Fonte: Adaptado de senseFly (2018a).

A seção “Status do *drone*” indica o status da aeronave e mantém o usuário informado sobre o que o *drone* está fazendo atualmente (ação corrente). Isso pode incluir ações de missão, como "Tirar foto" ou "Ir para o ponto de destino", bem como mensagens de aviso ou falha, como "Fora da área de trabalho" ou "Vento forte".

A seção “Autonomia” indica o nível de carga e voltagem da bateria, além exibir o tempo total de voo, o tempo estimado para o *drone* retornar ao ponto *Home* (com base na velocidade estimada do vento), a distância em linha reta até o ponto *Home*, a qualidade do *link* de dados entre o modem terrestre e o *drone* e a velocidade e direção do vento.

A seção “Dados de voo” inclui informações adicionais que podem ser úteis durante o voo, incluindo velocidade e altura do solo (ATO), altitude acima do nível médio do mar (AMSL) e a posição absoluta detectada pelo receptor GNSS a bordo do eBee Plus RTK.

A seção “Instrumentos” exibe a temperatura interna atual do *drone* (câmera e piloto automático), o número de sinais do Global Positioning System (GPS, sistema americano) e do Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS, sistema russo) detectados, e a precisão estimada da posição, além do podo do posicionamento GNSS utilizado.

A seção “Identificação” exibe o número de série do eBee Plus RTK e o número do log de voo.

A seção “Informação da câmera” exibe o tipo da câmera que está embarcada no avião e o número de fotografias que foram tiradas desde a decolagem, além do espaço ocupado o cartão externo da mesma.

A seção “Simulador” exibe os botões de controle do simulador de voo do eBee.

A seção “Informações primárias de voo” imita a exibição de voo primária clássica usada em aeronaves tripuladas. A coluna à esquerda exibe a velocidade do ar atual do eBee Plus RTK, bem como a velocidade do ar desejada, em metros por segundo. A coluna à direita exibe a altitude atual do *drone* sobre o local de decolagem, bem como a altitude desejada, em metros. A barra inferior exibe a direção, é apresentada na forma de azimute (ângulo medido no sentido horário a partir do Norte variando de 0° a 360°, ou seja, o Norte é indicado em 0°, Leste em 90°, Sul em 180° e Oeste em 270°). Nessa é exibido, também, o horizonte artificial que mostra ao operador qual a inclinação, em graus, da aeronave em relação ao horizonte, com a atitude do RPA em relação ao seu eixo longitudinal e transversal (ângulos *phi* – movimento de bico e *kappa* – movimento de asa).

6 POUSO

No final de uma missão autônoma, após ter visitado o ponto *Home*, o *drone* se dirige para o local de pouso. O eBee Plus RTK pode executar pousos circulares ou lineares; no entanto, o pouso linear é o tipo de aterrissagem padrão e recomendada, especialmente em ventos fortes (SENSEFLY, 2018a).

O procedimento de pouso linear do eBee Plus RTK é composto por oito etapas que são descritas detalhadamente a seguir.

Após chegar no ponto *Home*, o *drone* sobe ou desce até atingir uma altitude entre 50 e 75 m acima do local de pouso, para então iniciar o procedimento de descida

Na primeira etapa, a aeronave voa em direção ao ponto *Home* (definido pelo usuário no eMotion; a altitude padrão é de 75 m acima do ponto escolhido para a aterrissagem).

Na segunda etapa, a aeronave circula o ponto *Home*; após este ser atingido, ele sobe ou desce até a altitude em que iniciará a rampa (virtual) de pouso contra o vento.

Na terceira etapa, o *drone* descreve um voo circular em torno do ponto *Home* para estimar a velocidade e direção do vento. Uma direção de aproximação da rampa de pouso é então calculada o mais próximo possível da direção do vento e dentro dos setores de aproximação permitidos (definidos pelo usuário no programa eMotion).

Na quarta etapa, o *drone* voa a favor do vento contra a direção de aproximação do ponto de início da rampa (virtual) de descida. Depois de voar por uma distância suficiente, ele se volta para se alinhar com ponto de início da rampa de descida.

Na quinta etapa, o *drone* plana para baixo na direção de aproximação, com um ângulo de aproximadamente 20 graus e velocidade de descida controlados, girando sua hélice em sentido inverso, se necessário, para frear.

Na sexta etapa, o *drone* inicia o nivelamento de sua decida, após detectar uma altura de cerca de 20 m acima do solo.

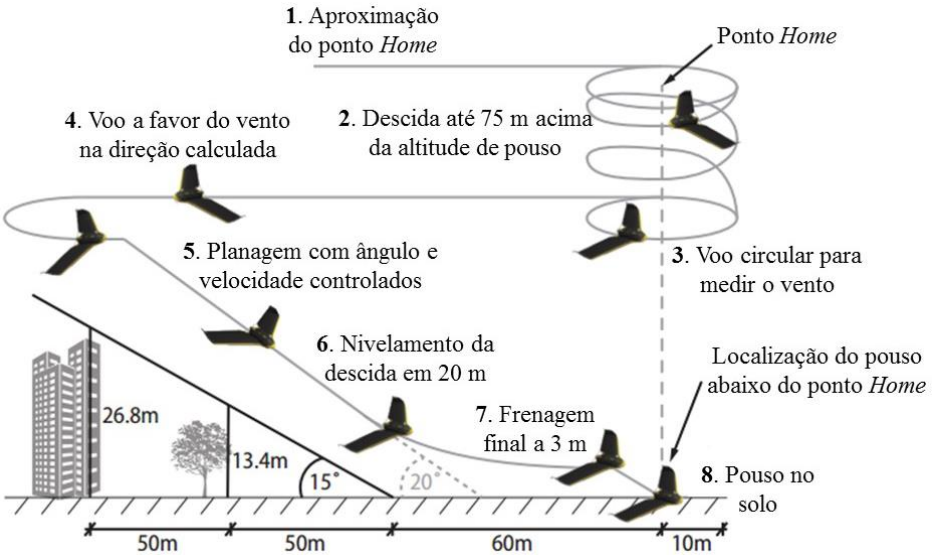
Na sétima etapa, o *drone* executa uma frenagem final (girando o motor no sentido contrário) para reduzir a velocidade e ergue o nariz, após detectar uma altura de 3 m acima do solo. Nesta etapa, a detecção da proximidade com o solo é feita por um sensor óptico (*laser*) localizado na parte inferior da aeronave. O sensor de solo deve ter luz e textura suficientes para detectar com precisão a altura acima do solo. O usuário deve se certificar que a lente do sensor de solo esteja livre de sujeira ou outras obstruções.

Pousos lineares devem ser feitos com plena luz do dia. Deve-se assegurar de que haja superfícies de alto contraste em todos os setores de aterrissagem. Não deve ser definido setores de aterrissagem em superfícies com pouca textura, tais como grandes massas de água, neve ou areia.

Na oitava e última etapa, o *drone* desce os últimos metros até pousar.

A Figura 10 ilustra a sequência de etapas do procedimento de pouso linear adotado pelo eBee Plus RTK.

Figura 10 – Vista lateral das etapas do procedimento de pouso linear.



Fonte: Adaptado de senseFly (2018a).

Segundo o fabricante, um pouso linear deve ser realizado em terrenos planos. O usuário deve certificar-se de que o terreno é plano e está na mesma altitude que o local escolhido para o pouso linear, e de que há uma distância livre de obstáculos com pelo menos 100 m de comprimento, sendo 60 m disponíveis para etapa final do pouso e os 40 m que sobram ficam disponíveis caso o pouso linear seja abortado em seus estágios finais; considerando que, caso o pouso seja abortado, o *drone* voa em linha reta no mesmo alinhamento no qual estava finalizando o procedimento de descida, até ganhar altitude e depois retornar ao ponto *Home*.

A fim de limitar a velocidade no solo durante o pouso e obter a melhor precisão de pouso, o eBee Plus RTK deve realizar o pouso linear sempre contra a direção do vento. Se o *drone* realizar um pouso linear na direção do vento durante condições de vento forte ou pousos emergenciais (falhas críticas), ele pode não ser capaz de desacelerar o suficiente durante a descida, e provavelmente ultrapassará a localização do ponto de aterrissagem e pousar em alta velocidade, resultando em potenciais danos ao *drone*.

APÊNDICE B – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DA BASE DA ÁREA DE ESTUDO 1 UTILIZANDO O MÉTODO PPP DISPONIBILIZADO PELO IBGE

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: log0917m_X05C

Início:AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2017/09/17 12:09:00,00
Fim:AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2017/09/17 16:14:32,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	TPSHIPER_LITE NONE
Órbitas dos satélites:[1]	FINAL
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento(s):	1,00
Sigma[2] **da pseudodistância**(m):	5,000
Sigma da portadora(m):	0,010
Altura da Antena[3](m):	1,546
Ângulo de Elevação(graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância(m):	3,48 GPS 4,42 GLONASS
Resíduos da fase da portadora(cm):	1,43 GPS 1,46 GLONASS

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada)[4]	-15° 48′ 40,9328″	-50° 43′ 30,0280″	377,27	8251910.360	529449.391	-51
Na data do levantamento[5]	-15° 48′ 40,9261″	-50° 43′ 30,0298″	377,27	8251910.566	529449.338	-51
Sigma(95%)[6] (m)	0,008	0,015	0,032			
Modelo Geoidal	MAPGEO2015					
Ondulação Geoidal (m)	-6,58					
Altitude Ortométrica (m)	383,85					

Precisão esperada para um levantamento estático (metros)

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 1 hora	0,700	0,600	0,040	0,040
Após 2 horas	0,330	0,330	0,017	0,018
Após 4 horas	0,170	0,220	0,009	0,010
Após 6 horas	0,120	0,180	0,005	0,008

[1] Órbitas obtidas do International GNSS Service (IGS) ou do Natural Resources of Canada (NRCan).

[2] O termo "Sigma" é referente ao desvio-padrão.

[3] Distância Vertical do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).

[4] A coordenada oficial na data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita na data do levantamento, utilizando o modelo VEMOS em 2000.4.

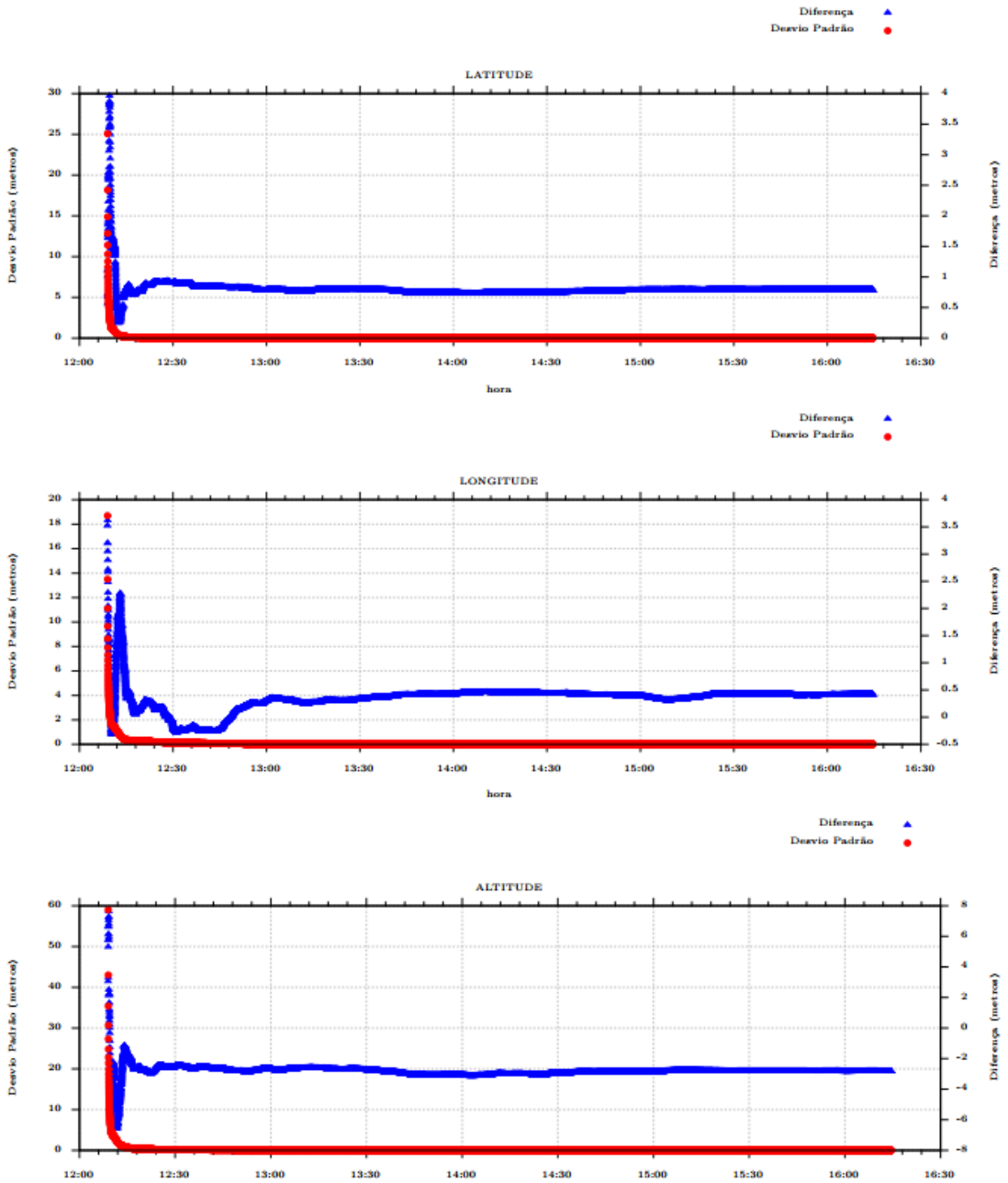
[5] A data de levantamento considerada é a data de início da sessão.

[6] Este desvio-padrão representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.

Os resultados apresentados neste relatório dependem da qualidade dos dados enviados e do correto preenchimento das informações por parte do usuário.
Em caso de dúvidas, críticas ou sugestões contate: ibge@ibge.gov.br ou pelo telefone 0800-7218181.
Este serviço de posicionamento faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP desenvolvido pelo Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCan)

Processamento autorizado para uso do IBGE.

Desvio Padrão e Diferença da Coordenada a Priori
log0260m.17O



Processado em: 27/02/2021 13:27:10

APÊNDICE C – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DA BASE DA ÁREA DE ESTUDO 2 UTILIZANDO O MÉTODO PPP DISPONIBILIZADO PELO IBGE

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: log0912p_X05C

Início:AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2018/09/12 15:59:50,00
Fim:AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2018/09/12 20:10:33,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	TPSHIPER_LITE NONE
Órbitas dos satélites:[1]	FINAL
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento(s):	1,00
Sigma[2] **da pseudodistância(m):**	5,000
Sigma da portadora(m):	0,010
Altura da Antena[3]**(m):**	1,622
Ângulo de Elevação(graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância(m):	0,66 GPS 1,52 GLONASS
Resíduos da fase da portadora(cm):	0,78 GPS 0,97 GLONASS

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada)[4]	-15° 47´ 48,6086˝	-50° 22´ 51,5180˝	402,66	8253439.814	566297.835	-51
Na data do levantamento[5]	-15° 47´ 48,6015˝	-50° 22´ 51,5199˝	402,66	8253440.033	566297.779	-51
Sigma(95%)[6] (m)	0,001	0,002	0,002			
Modelo Geoidal	MAPGEO2015					
Ondulação Geoidal (m)	-7,00					
Altitude Ortométrica (m)	409,66					

Precisão esperada para um levantamento estático (metros)

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 1 hora	0,700	0,600	0,040	0,040
Após 2 horas	0,330	0,330	0,017	0,018
Após 4 horas	0,170	0,220	0,009	0,010
Após 6 horas	0,120	0,180	0,005	0,008

[1] Órbitas obtidas do International GNSS Service (IGS) ou do Natural Resources of Canada (NRCan).

[2] O termo "Sigma" é referente ao desvio-padrão.

[3] Distância Vertical do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).

[4] A coordenada oficial na data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita na data do levantamento, utilizando o modelo VEMOS em 2000.4.

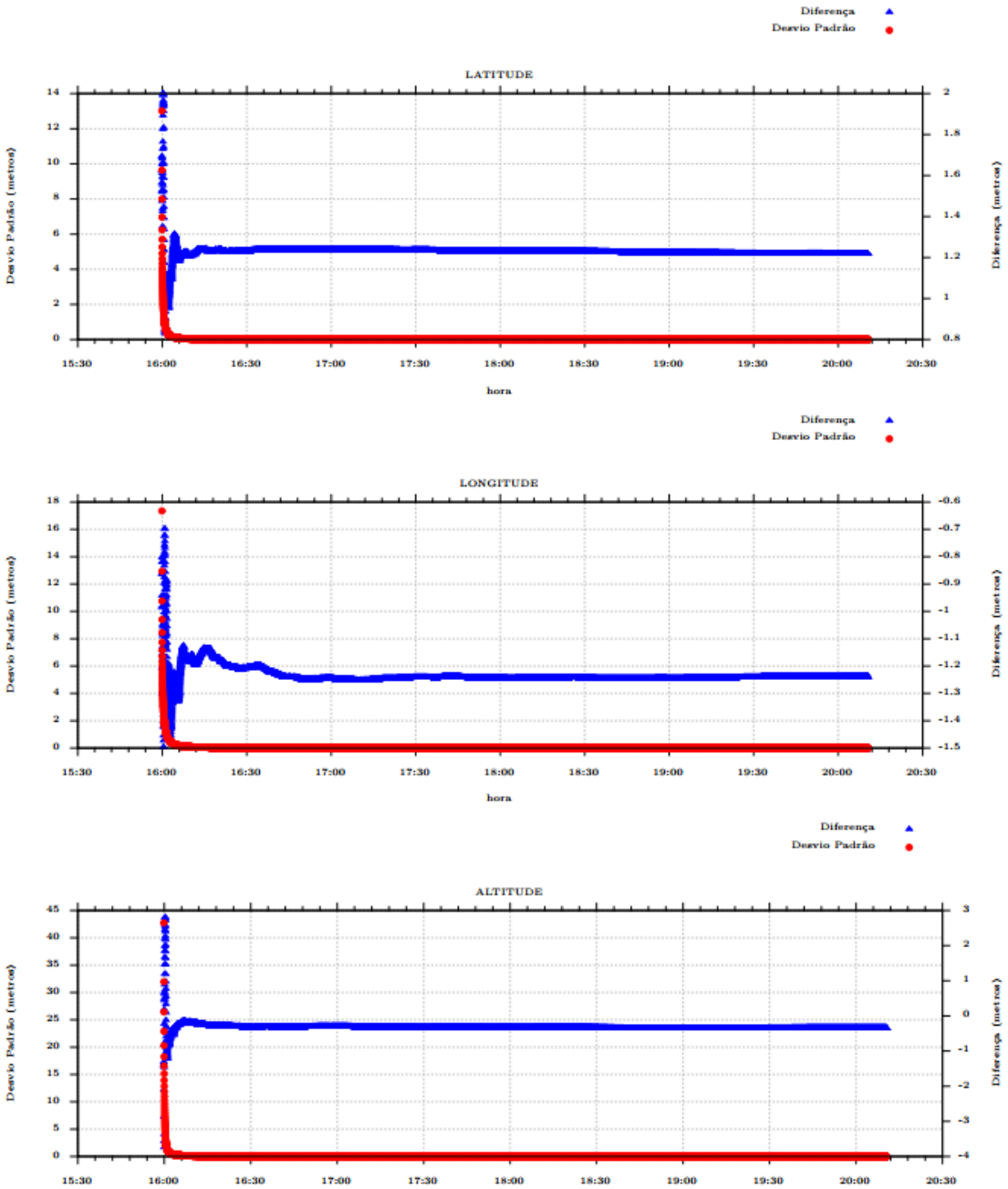
[5] A data de levantamento considerada é a data de início da sessão.

[6] Este desvio-padrão representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.

Os resultados apresentados neste relatório dependem da qualidade dos dados enviados e do correto preenchimento das informações por parte do usuário.
Em caso de dúvidas, críticas ou sugestões contate: ibge@ibge.gov.br ou pelo telefone 0800-7218181.
Este serviço de posicionamento faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP desenvolvido pelo Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCan)

Processamento autorizado para uso do IBGE.

Desvio Padrão e Diferença da Coordenada a Priori
log0255p.18O



APÊNDICE D – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DA BASE DA ÁREA DE TESTE UTILIZANDO O MÉTODO PPP DISPONIBILIZADO PELO IBGE

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: log_0115q_X05C

Início:AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2021/01/15 16:19:01,00
Fim:AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2021/01/15 20:19:29,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	TPSHIPER_LITE NONE
Órbitas dos satélites:[1]	FINAL
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento(s):	1,00
Sigma[2] da pseudodistância(m):	5,000
Sigma da portadora(m):	0,010
Altura da Antena[3](m):	1,120
Ângulo de Elevação(graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância(m):	1,28 GPS 2,06 GLONASS
Resíduos da fase da portadora(cm):	0,77 GPS 1,13 GLONASS

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (£ a que deve ser usada)[4]	-16° 04´ 26,4835˝	-50° 11´ 14,4301˝	1.019,85	8222705.885	586917.990	-51
Na data do levantamento[5]	-16° 04´ 26,4755˝	-50° 11´ 14,4323˝	1.019,85	8222706.131	586917.926	-51
Sigma(95%)[6] (m)	0,001	0,002	0,004			
Modelo Geoidal	MAPGEO2015					
Ondulação Geoidal (m)	-7,02					
Altitude Ortométrica (m)	1.026,87					

Precisão esperada para um levantamento estático (metros)

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 1 hora	0,700	0,600	0,040	0,040
Após 2 horas	0,330	0,330	0,017	0,018
Após 4 horas	0,170	0,220	0,009	0,010
Após 6 horas	0,120	0,180	0,005	0,008

[1] Órbitas obtidas do International GNSS Service (IGS) ou do Natural Resources of Canada (NRCan).

[2] O termo "Sigma" é referente ao desvio-padrão.

[3] Distância Vertical do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).

[4] A coordenada oficial na data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita na data do levantamento, utilizando o modelo VEMOS em 2000.4.

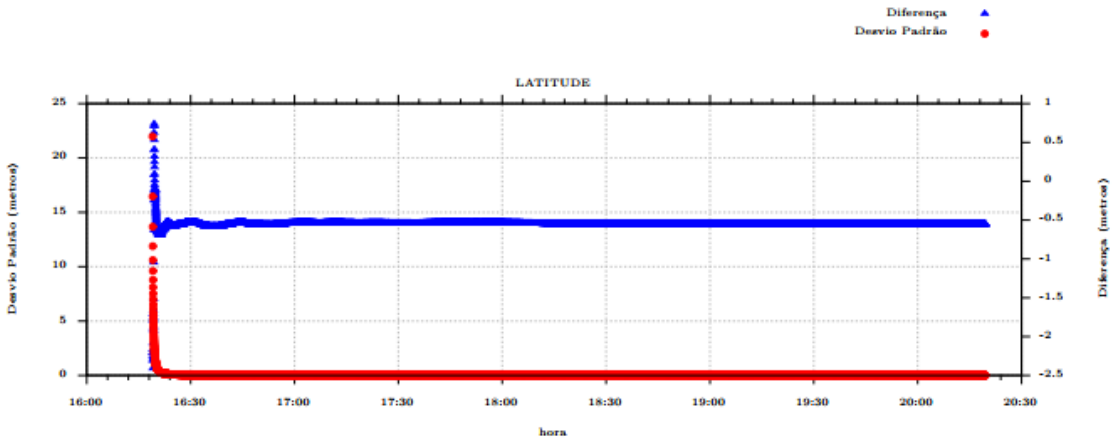
[5] A data de levantamento considerada é a data de início da sessão.

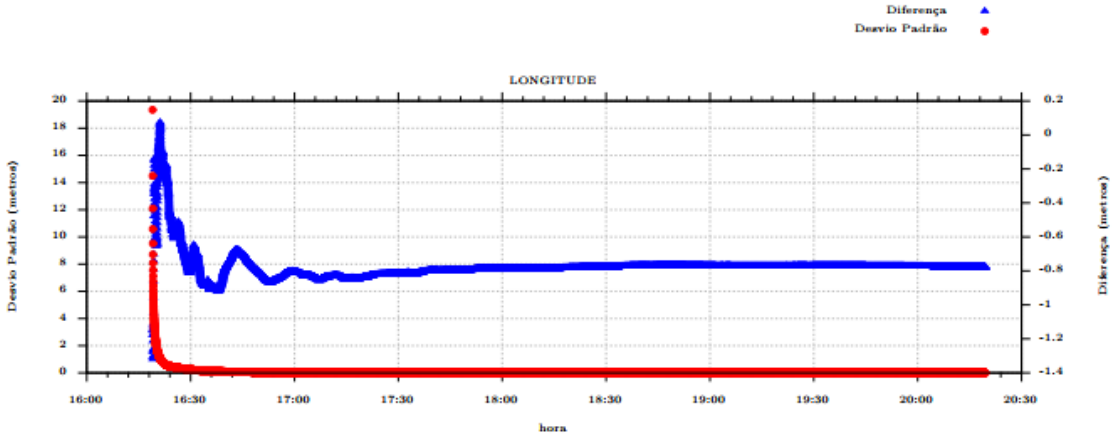
[6] Este desvio-padrão representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.

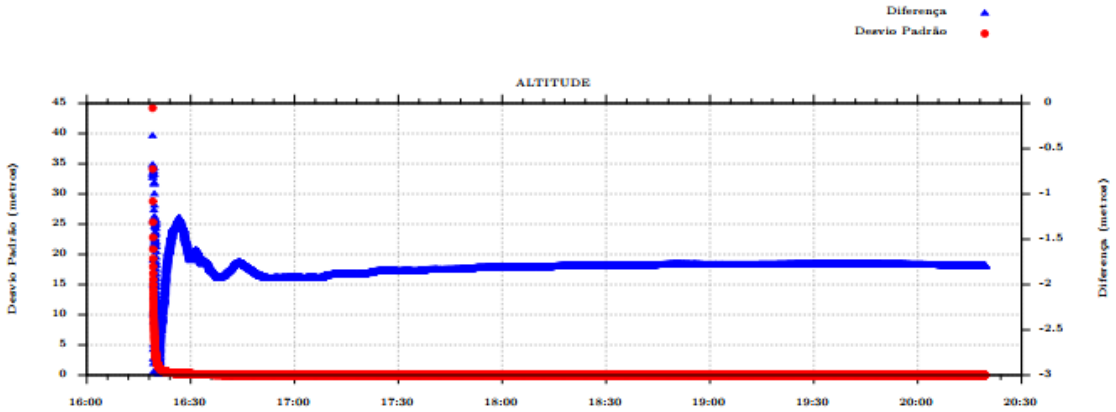
Os resultados apresentados neste relatório dependem da qualidade dos dados enviados e do correto preenchimento das informações por parte do usuário.
Em caso de dúvidas, críticas ou sugestões contate: ibge@ibge.gov.br ou pelo telefone 0800-7218181.
Este serviço de posicionamento faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP desenvolvido pelo Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCan)

Processamento autorizado para uso do IBGE.

Desvio Padrão e Diferença da Coordenada a Priori
log_015q.21O







APÊNDICE E – ERROS INDIVIDUAIS DAS PRIMEIRAS 80 FOTOGRAFIAS DA ÁREA 1 ANTES A COREÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO PPK

#Rev: sensefly/geoinfo/3

fileName	latitude	longitude	altitude_wgs84	Accuracy X	Accuracy Y	Accuracy Z
EP-11-21655_0049_0001.JPG	-15,8091319761	-50,7103735764	592,9009399414	3,0480587482	3,0480587482	4,8304262161
EP-11-21655_0049_0002.JPG	-15,8091396045	-50,7108732253	594,8847656250	2,7492165565	2,7492165565	4,5577292442
EP-11-21655_0049_0003.JPG	-15,8091435223	-50,7113875480	597,7592163086	3,1399414539	3,1399414539	5,0295257568
EP-11-21655_0049_0004.JPG	-15,8091807545	-50,7119226724	594,9635620117	2,9328906536	2,9328906536	4,7218599319
EP-11-21655_0049_0005.JPG	-15,8092172712	-50,7124122761	591,5393676758	3,0274939537	3,0274939537	4,7694282532
EP-11-21655_0049_0006.JPG	-15,8092457713	-50,7129134310	587,2666625977	2,9000399113	2,9000399113	4,7317585945
EP-11-21655_0049_0007.JPG	-15,8092206214	-50,7133918249	587,9320068359	2,9516105652	2,9516105652	4,6200914383
EP-11-21655_0049_0008.JPG	-15,8092446584	-50,7139194392	590,3640136719	2,9567956924	2,9567956924	4,5618543625
EP-11-21655_0049_0009.JPG	-15,8092731458	-50,7144452417	593,1942138672	2,6888005733	2,6888005733	4,3751373291
EP-11-21655_0049_0010.JPG	-15,8092843994	-50,7149759430	591,1427001953	2,8572845459	2,8572845459	4,6583099365
EP-11-21655_0049_0011.JPG	-15,8093022975	-50,7154906952	592,2292480469	3,0332121849	3,0332121849	4,8875598907
EP-11-21655_0049_0012.JPG	-15,8093215660	-50,7160046623	590,4472045898	2,8180773258	2,8180773258	4,6584229469
EP-11-21655_0049_0013.JPG	-15,8093190802	-50,7165378402	592,0073242188	2,8420419693	2,8420419693	4,5898838043
EP-11-21655_0049_0014.JPG	-15,8093904745	-50,7170611202	592,4835205078	2,8084075451	2,8084075451	4,4930815697
EP-11-21655_0049_0015.JPG	-15,8093803499	-50,7175718831	593,3684082031	3,5397045612	3,5397045612	4,9368472099
EP-11-21655_0049_0016.JPG	-15,8094089635	-50,7180828516	591,5219726562	2,7826395035	2,7826395035	4,5092544556
EP-11-21655_0049_0017.JPG	-15,8094093452	-50,7185901366	591,1856079102	2,6231913567	2,6231913567	4,2201371193
EP-11-21655_0049_0018.JPG	-15,8094201388	-50,7190913127	590,2229003906	2,6828160286	2,6828160286	4,3087835312
EP-11-21655_0049_0019.JPG	-15,8094509203	-50,7196261965	591,5098876953	2,6731102467	2,6731102467	4,2684092522
EP-11-21655_0049_0020.JPG	-15,8094643123	-50,7201281836	592,8970947266	2,9862649441	2,9862649441	4,6248965263
EP-11-21655_0049_0021.JPG	-15,8094790486	-50,7206693874	589,8657836914	2,9618012905	2,9618012905	4,5919857025
EP-11-21655_0049_0022.JPG	-15,8095233520	-50,7211690870	588,7183837891	2,7505922318	2,7505922318	4,5131850243
EP-11-21655_0049_0023.JPG	-15,8095450509	-50,7216659977	588,1079711914	2,7959821224	2,7959821224	4,5836763382
EP-11-21655_0049_0024.JPG	-15,8095270769	-50,7221923585	590,6804199219	2,5784916878	2,5784916878	4,2414989471
EP-11-21655_0049_0025.JPG	-15,8095629391	-50,7226960681	595,1448974609	2,7219660282	2,7219660282	4,2121496201
EP-11-21655_0049_0026.JPG	-15,8095601319	-50,7232251379	591,4161987305	2,6140608788	2,6140608788	4,2855186462
EP-11-21655_0049_0027.JPG	-15,8096059002	-50,7237438179	590,7286987305	2,9468753338	2,9468753338	4,7308392525
EP-11-21655_0049_0028.JPG	-15,8096037445	-50,7242657292	588,6617431641	2,7530145645	2,7530145645	4,4825453758
EP-11-21655_0049_0029.JPG	-15,8096245562	-50,7247681439	587,9425659180	2,8111848831	2,8111848831	4,3474202156
EP-11-21655_0049_0030.JPG	-15,8096522846	-50,7252833847	587,7492065430	2,8349952698	2,8349952698	4,4487757683
EP-11-21655_0049_0031.JPG	-15,8096514063	-50,7257878522	589,0299072266	2,7392897606	2,7392897606	4,4423956871
EP-11-21655_0049_0032.JPG	-15,8096764793	-50,7263027117	590,9367675781	2,7298622131	2,7298622131	4,4931402206
EP-11-21655_0049_0033.JPG	-15,8097120647	-50,7268179125	590,8389282227	2,6916489601	2,6916489601	4,3383822441
EP-11-21655_0049_0034.JPG	-15,8097265872	-50,7273471432	591,1621704102	2,8548336029	2,8548336029	4,6794548035
EP-11-21655_0049_0035.JPG	-15,8097258086	-50,7278417896	593,2976074219	2,8845601082	2,8845601082	4,6501879692
EP-11-21655_0049_0036.JPG	-15,8097573538	-50,7283862533	589,2012329102	2,6594216824	2,6594216824	4,3533024788
EP-11-21655_0049_0037.JPG	-15,8097753837	-50,7288727755	590,4916381836	2,8462803364	2,8462803364	4,5627770424
EP-11-21655_0049_0038.JPG	-15,8097888324	-50,7293962027	588,5056152344	2,8073909283	2,8073909283	4,4310154915
EP-11-21655_0049_0039.JPG	-15,8097866269	-50,7299198391	590,2249755859	2,5904362202	2,5904362202	4,3098106384
EP-11-21655_0049_0040.JPG	-15,8110241556	-50,7297089027	586,3394165039	2,9858658314	2,9858658314	4,7613043785
EP-11-21655_0049_0041.JPG	-15,8110015067	-50,7292055575	587,5359497070	3,0365216732	3,0365216732	4,7317810059
EP-11-21655_0049_0042.JPG	-15,8109974734	-50,7286938008	590,8076171875	3,0029959679	3,0029959679	4,6658520699
EP-11-21655_0049_0043.JPG	-15,8109546713	-50,7281803381	596,4177246094	2,7187273502	2,7187273502	4,3657274246
EP-11-21655_0049_0044.JPG	-15,8109725513	-50,7276581627	591,6890258789	2,8646838665	2,8646838665	4,5496706963
EP-11-21655_0049_0045.JPG	-15,8109488534	-50,7271317335	587,8074340820	3,2697567940	3,2697567940	5,1519775391
EP-11-21655_0049_0046.JPG	-15,8109145883	-50,7266182335	590,4898681641	3,1093707085	3,1093707085	6,3027014732
EP-11-21655_0049_0047.JPG	-15,8109097342	-50,7261022470	592,1568603516	2,9574017525	2,9574017525	4,6036148071
EP-11-21655_0049_0048.JPG	-15,8108735664	-50,7255395767	594,3049926758	2,9443104267	2,9443104267	4,6573281288
EP-11-21655_0049_0049.JPG	-15,8108880799	-50,7250565364	593,7708129883	2,8831808567	2,8831808567	4,5653228760
EP-11-21655_0049_0050.JPG	-15,8108473960	-50,7245394100	590,6271362305	3,4926269054	3,4926269054	4,9221906662
EP-11-21655_0049_0051.JPG	-15,8108433443	-50,7240228850	591,9282226562	3,1282515526	3,1282515526	4,8165531158
EP-11-21655_0049_0052.JPG	-15,8108025007	-50,7235107368	593,0565185547	3,0885646343	3,0885646343	4,9206204414
EP-11-21655_0049_0053.JPG	-15,8107711994	-50,7229510573	591,8897094727	3,0537347794	3,0537347794	4,8301014900
EP-11-21655_0049_0054.JPG	-15,8107956827	-50,7224343418	593,8602294922	2,9404189587	2,9404189587	4,6784534454
EP-11-21655_0049_0055.JPG	-15,8107786201	-50,7219486719	595,1100463867	2,8678259850	2,8678259850	4,3751173019
EP-11-21655_0049_0056.JPG	-15,8107445351	-50,7214479178	588,6336669922	2,7243218422	2,7243218422	4,1635508537
EP-11-21655_0049_0057.JPG	-15,8107248964	-50,7209226019	586,0019531250	2,8113560677	2,8113560677	4,3239326477
EP-11-21655_0049_0058.JPG	-15,8106892858	-50,7204279130	591,9378662109	2,7706382275	2,7706382275	4,2794041634
EP-11-21655_0049_0059.JPG	-15,8107036762	-50,7199067050	590,5718994141	2,9429733753	2,9429733753	4,4488649368
EP-11-21655_0049_0060.JPG	-15,8106951680	-50,7193714403	590,2276611328	2,8466043472	2,8466043472	4,5469942093
EP-11-21655_0049_0061.JPG	-15,8106572263	-50,7188580498	593,5056152344	2,8501191139	2,8501191139	4,4128499031
EP-11-21655_0049_0062.JPG	-15,8106250884	-50,7183396919	593,0496826172	2,7375879288	2,7375879288	4,2238602638
EP-11-21655_0049_0063.JPG	-15,8106344333	-50,7178180671	590,3781738281	2,6660654545	2,6660654545	4,1553196907
EP-11-21655_0049_0064.JPG	-15,8106094926	-50,7173122017	591,3263549805	2,9724688530	2,9724688530	4,7214860916
EP-11-21655_0049_0065.JPG	-15,8105914431	-50,7167800648	595,2136230469	2,8620166779	2,8620166779	4,3533205986
EP-11-21655_0049_0066.JPG	-15,8105604078	-50,7162538732	597,4934692383	2,9078259468	2,9078259468	4,4893288612
EP-11-21655_0049_0067.JPG	-15,8105364136	-50,7157433898	597,1318969727	2,9666292667	2,9666292667	4,4881176949
EP-11-21655_0049_0068.JPG	-15,8105429752	-50,7152220881	591,1040039062	2,8981795311	2,8981795311	4,4408836365
EP-11-21655_0049_0069.JPG	-15,8105374012	-50,7147221110	591,5724487305	2,8117403984	2,8117403984	4,3917450905
EP-11-21655_0049_0070.JPG	-15,8105072208	-50,7142102895	592,8177490234	2,7659375668	2,7659375668	4,1974763870
EP-11-21655_0049_0071.JPG	-15,8104479180	-50,7136785495	591,9454345703	2,8022577763	2,8022577763	4,3739724159
EP-11-21655_0049_0072.JPG	-15,8104652606	-50,7131569404	590,4651489258	2,6618721485	2,6618721485	4,1676230431
EP-11-21655_0049_0073.JPG	-15,8104450076	-50,7126731644	589,3229370117	2,8815431595	2,8815431595	4,3673524857
EP-11-21655_0049_0074.JPG	-15,8104157455	-50,7121589206	589,3836059570	2,9585616589	2,9585616589	4,4601321220
EP-11-21655_0049_0075.JPG	-15,8104084345	-50,7116380850	590,2719726562	2,8582286835	2,8582286835	4,5060057640
EP-11-21655_0049_0076.JPG	-15,8103960248	-50,7111113088	592,1665649414	2,7947654724	2,7947654724	4,2837076187
EP-11-21655_0049_0077.JPG	-15,8103755255	-50,7106187128	590,9347534180	2,7916946411	2,7916946411	4,3171825409
EP-11-21655_0049_0078.JPG	-15,8103630446	-50,7100833600	588,6649780273	2,7388901711	2,7388901711	4,2687959671
EP-11-21655_0049_0079.JPG	-15,8115825773	-50,7101183540	590,9359130859	2,7164571285	2,7164571285	4,4382891655
EP-11-21655_0049_0080.JPG	-15,8115841957	-50,7106160004	592,8773803711	2,6660838127	2,6660838127	4,2305421829

APÊNDICE F – ERROS INDIVIDUAIS DAS PRIMEIRAS 80 FOTOGRAFIAS DA ÁREA 1 APÓS A COREÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO PPK

#Rev: sensefly/geoinfo/3

fileName	latitude	longitude	altitude_wgs84	Accuracy X	Accuracy Y	Accuracy Z
EP-11-21655_0049_0001.JPG	-15,8091234751	-50,7103812035	594,5985717773	0,2765718102	0,2765718102	0,3160054684
EP-11-21655_0049_0002.JPG	-15,8091280864	-50,7108810590	597,0742187500	0,2798321843	0,2798321843	0,3275968432
EP-11-21655_0049_0003.JPG	-15,8091326850	-50,7113975144	600,8135375977	0,2843721807	0,2843721807	0,3268474638
EP-11-21655_0049_0004.JPG	-15,8091784659	-50,7119280522	596,6330566406	0,2662951350	0,2662951350	0,3223275840
EP-11-21655_0049_0005.JPG	-15,8092063934	-50,7124210157	593,7064208984	0,2710019946	0,2710019946	0,3190848231
EP-11-21655_0049_0006.JPG	-15,8092346245	-50,7129199616	588,8760375977	0,2873525321	0,2873525321	0,3249642551
EP-11-21655_0049_0007.JPG	-15,8092112921	-50,7133971620	589,6126708984	0,2694461644	0,2694461644	0,2988271713
EP-11-21655_0049_0008.JPG	-15,8092378378	-50,7139229418	592,1770629883	0,2611744106	0,2611744106	0,3034426868
EP-11-21655_0049_0009.JPG	-15,8092682234	-50,7144480436	594,6002807617	0,2267052382	0,2267052382	0,2440636307
EP-11-21655_0049_0010.JPG	-15,8092786015	-50,7149777922	592,0162353516	0,2453441620	0,2453441620	0,2366903871
EP-11-21655_0049_0011.JPG	-15,8092990141	-50,7154899122	592,8343505859	0,2066275775	0,2066275775	0,2177570164
EP-11-21655_0049_0012.JPG	-15,8093183933	-50,7160040379	591,0321655273	0,2135286480	0,2135286480	0,2259962857
EP-11-21655_0049_0013.JPG	-15,8093161596	-50,7165366908	592,7376098633	0,2340333164	0,2340333164	0,2494083643
EP-11-21655_0049_0014.JPG	-15,8093855030	-50,7170631832	593,7279663086	0,2556661665	0,2556661665	0,2455912828
EP-11-21655_0049_0015.JPG	-15,8093748776	-50,7175713984	594,5907592773	0,2190365642	0,2190365642	0,2208953351
EP-11-21655_0049_0016.JPG	-15,8094050162	-50,7180796828	592,3529052734	0,2214925140	0,2214925140	0,2235168964
EP-11-21655_0049_0017.JPG	-15,8094015188	-50,7185883259	591,9567871094	0,2061570585	0,2061570585	0,2236376852
EP-11-21655_0049_0018.JPG	-15,8094118705	-50,7190901873	591,0859375000	0,2041264325	0,2041264325	0,2114936709
EP-11-21655_0049_0019.JPG	-15,8094453954	-50,7196247492	592,5024414062	0,2035286278	0,2035286278	0,2166087329
EP-11-21655_0049_0020.JPG	-15,8094625848	-50,7201257456	594,3119506836	0,2198337764	0,2198337764	0,2261436731
EP-11-21655_0049_0021.JPG	-15,8094820513	-50,7206643409	591,8828735352	0,2421282530	0,2421282530	0,2394932806
EP-11-21655_0049_0022.JPG	-15,8095248922	-50,7211634949	590,8919677734	0,1988874823	0,1988874823	0,2191575766
EP-11-21655_0049_0023.JPG	-15,8095444205	-50,7216606858	590,0792846680	0,2016767710	0,2016767710	0,2247623801
EP-11-21655_0049_0024.JPG	-15,8095214243	-50,7221912005	592,2216796875	0,2103267163	0,2103267163	0,2301853001
EP-11-21655_0049_0025.JPG	-15,8095556303	-50,7226985891	596,8699340820	0,2170664966	0,2170664966	0,2255217433
EP-11-21655_0049_0026.JPG	-15,8095516003	-50,7232267531	593,4752807617	0,2322568297	0,2322568297	0,2405039519
EP-11-21655_0049_0027.JPG	-15,8095954096	-50,7237456885	592,8958129883	0,2355854511	0,2355854511	0,2465528548
EP-11-21655_0049_0028.JPG	-15,8095923538	-50,7242685320	590,3829956055	0,2391501665	0,2391501665	0,2393582463
EP-11-21655_0049_0029.JPG	-15,8096137502	-50,7247728506	589,7215576172	0,2083151489	0,2083151489	0,2143692374
EP-11-21655_0049_0030.JPG	-15,8096401150	-50,7252894809	589,4476318359	0,2136209458	0,2136209458	0,2142186016
EP-11-21655_0049_0031.JPG	-15,8096389062	-50,7257900418	590,8842773438	0,2097318769	0,2097318769	0,2160082012
EP-11-21655_0049_0032.JPG	-15,8096676633	-50,7263035021	593,0651855469	0,2068371177	0,2068371177	0,2206975222
EP-11-21655_0049_0033.JPG	-15,8097050456	-50,7268203321	592,6271362305	0,1764239967	0,1764239967	0,2002614588
EP-11-21655_0049_0034.JPG	-15,8097193044	-50,7273493156	592,5812377930	0,2151715755	0,2151715755	0,2303561121
EP-11-21655_0049_0035.JPG	-15,8097186176	-50,7278405251	594,2628784180	0,2210905254	0,2210905254	0,2372452021
EP-11-21655_0049_0036.JPG	-15,8097498126	-50,7283847266	590,2379150391	0,2411331683	0,2411331683	0,2632562816
EP-11-21655_0049_0037.JPG	-15,8097704889	-50,7288735219	591,2316284180	0,2517805398	0,2517805398	0,2537920475
EP-11-21655_0049_0038.JPG	-15,8097872316	-50,7293945012	588,4804077148	0,2119348943	0,2119348943	0,2248412669
EP-11-21655_0049_0039.JPG	-15,8097832819	-50,7299165584	590,1018676758	0,2178638279	0,2178638279	0,2352813482
EP-11-21655_0049_0040.JPG	-15,8110188596	-50,7297059229	586,6265258789	0,2719509006	0,2719509006	0,2783206403
EP-11-21655_0049_0041.JPG	-15,8109959508	-50,7292021208	587,4650878906	0,2206539959	0,2206539959	0,2610958517
EP-11-21655_0049_0042.JPG	-15,8109923241	-50,7286876917	590,9263916016	0,2624407113	0,2624407113	0,3185649216
EP-11-21655_0049_0043.JPG	-15,8109495536	-50,7281764509	597,4612426758	0,2938666940	0,2938666940	0,3499823213
EP-11-21655_0049_0044.JPG	-15,8109649957	-50,7276583854	594,8791503906	0,6474048495	0,6474048495	0,9191461802
EP-11-21655_0049_0045.JPG	-15,8109496880	-50,7271258615	588,9945678711	0,2901060879	0,2901060879	0,3278825581
EP-11-21655_0049_0046.JPG	-15,8109195897	-50,7266092732	592,1635742188	0,2995228767	0,2995228767	0,3491944373
EP-11-21655_0049_0047.JPG	-15,8109138728	-50,7260934526	594,6646118164	0,3125772476	0,3125772476	0,3597594500
EP-11-21655_0049_0048.JPG	-15,8108810824	-50,7255281917	596,7561035156	0,2907706499	0,2907706499	0,3460742235
EP-11-21655_0049_0049.JPG	-15,8108969099	-50,7250451516	595,7244262695	0,2661574483	0,2661574483	0,3391282260
EP-11-21655_0049_0050.JPG	-15,8108544020	-50,7245297616	591,7415771484	0,2557755113	0,2557755113	0,3146821856
EP-11-21655_0049_0051.JPG	-15,8108517710	-50,7240099180	592,6363525391	0,2670960426	0,2670960426	0,2989850044
EP-11-21655_0049_0052.JPG	-15,8108105645	-50,7234933979	593,5692138672	0,2633280754	0,2633280754	0,2989756465
EP-11-21655_0049_0053.JPG	-15,8107762807	-50,7229347170	592,3942871094	0,2910854816	0,2910854816	0,3179957271
EP-11-21655_0049_0054.JPG	-15,8107990993	-50,7224185250	595,0347900391	0,2681208849	0,2681208849	0,3077319562
EP-11-21655_0049_0055.JPG	-15,8107795355	-50,7219312098	596,8649902344	0,2801085711	0,2801085711	0,3087570965
EP-11-21655_0049_0056.JPG	-15,8107463046	-50,7214320452	589,8199462891	0,2710638046	0,2710638046	0,3130326271
EP-11-21655_0049_0057.JPG	-15,8107246402	-50,7209083176	587,1801757812	0,2804828584	0,2804828584	0,3122795224
EP-11-21655_0049_0058.JPG	-15,8106888701	-50,7204142611	593,2084960938	0,2689736784	0,2689736784	0,2851850390
EP-11-21655_0049_0059.JPG	-15,8107021163	-50,7198946851	592,6151123047	0,3057487607	0,3057487607	0,3170343339
EP-11-21655_0049_0060.JPG	-15,8106959694	-50,7193594520	592,8881225586	0,2903583050	0,2903583050	0,3027727604
EP-11-21655_0049_0061.JPG	-15,8106595695	-50,7188465332	596,4353637695	0,2703085840	0,2703085840	0,2975360751
EP-11-21655_0049_0062.JPG	-15,8106318178	-50,7183317591	595,6968994141	0,2879537344	0,2879537344	0,3091989458
EP-11-21655_0049_0063.JPG	-15,8106455802	-50,7178102831	592,7343139648	0,2642919719	0,2642919719	0,2810129225
EP-11-21655_0049_0064.JPG	-15,8106243997	-50,7173019380	593,4926147461	0,2916170955	0,2916170955	0,3031598032
EP-11-21655_0049_0065.JPG	-15,8106135138	-50,7167727108	597,3472900391	0,3498251438	0,3498251438	0,3346557021
EP-11-21655_0049_0066.JPG	-15,8105800964	-50,7162465998	600,0816650391	0,3012800217	0,3012800217	0,3012946546
EP-11-21655_0049_0067.JPG	-15,8105490840	-50,7157368797	600,9905395508	0,2650370598	0,2650370598	0,2845439315
EP-11-21655_0049_0068.JPG	-15,8105594968	-50,7152161124	593,8546752930	0,3005654812	0,3005654812	0,3178106248
EP-11-21655_0049_0069.JPG	-15,8105474834	-50,7147163672	595,3436279297	0,2649278045	0,2649278045	0,2811027765
EP-11-21655_0049_0070.JPG	-15,8105177629	-50,7142042938	596,5736083984	0,2867313027	0,2867313027	0,2998872101
EP-11-21655_0049_0071.JPG	-15,8104564445	-50,7136720465	595,3771972656	0,2580597103	0,2580597103	0,2767017186
EP-11-21655_0049_0072.JPG	-15,8104718384	-50,7131535188	594,9133300781	0,2854219973	0,2854219973	0,2992865443
EP-11-21655_0049_0073.JPG	-15,8104514584	-50,7126708787	593,6624145508	0,3433009386	0,3433009386	0,3411861062
EP-11-21655_0049_0074.JPG	-15,8104251091	-50,7121586431	593,4772338867	0,2778606117	0,2778606117	0,2977986336
EP-11-21655_0049_0075.JPG	-15,8104248191	-50,7116320874	594,0697631836	0,2469922900	0,2469922900	0,2588573694
EP-11-21655_0049_0076.JPG	-15,8104129942	-50,7111023414	595,0627441406	0,2843519747	0,2843519747	0,2744140923
EP-11-21655_0049_0077.JPG	-15,8103929609	-50,7106081366	593,0113525391	0,2677755058	0,2677755058	0,2670891881
EP-11-21655_0049_0078.JPG	-15,8103807252	-50,7100731280	590,3941650391	0,2534888387	0,2534888387	0,2492374927
EP-11-21655_0049_0079.JPG	-15,8115822893	-50,7101080219	592,4083251953	0,0265975744	0,0265975744	0,0306941345
EP-11-21655_0049_0080.JPG	-15,8115848522	-50,7106054821	594,3009033203	0,0288295355	0,0288295355	0,0324430987

APÊNDICE G – ERROS INDIVIDUAIS DAS PRIMEIRAS 80 FOTOGRAFIAS DA ÁREA 2 ANTES A COREÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO PPK

#Rev: sensefly/geoinfo/3

fileName	latitude	longitude	altitude_wgs84	Accuracy X	Accuracy Y	Accuracy Z
EP-11-21655_0112_0001.JPG	-15,8018716534	-50,3846498803	617,7966308594	3,3636696339	3,3636696339	8,6465063095
EP-11-21655_0112_0002.JPG	-15,8023798856	-50,3846658143	618,5799560547	3,4263148308	3,4263148308	8,2301807404
EP-11-21655_0112_0003.JPG	-15,8028696838	-50,3846308927	616,7179565430	3,1222119331	3,1222119331	7,7639074326
EP-11-21655_0112_0004.JPG	-15,8033794507	-50,3846274718	618,9360351562	3,0398950577	3,0398950577	7,3584561348
EP-11-21655_0112_0005.JPG	-15,8038770533	-50,3846149524	617,2133789062	3,0663411617	3,0663411617	7,3442716599
EP-11-21655_0112_0006.JPG	-15,8043710490	-50,3846072229	618,5440673828	3,1277520657	3,1277520657	7,6661863327
EP-11-21655_0112_0007.JPG	-15,8048832852	-50,3845697569	617,0982055664	3,1659502983	3,1659502983	7,6598496437
EP-11-21655_0112_0008.JPG	-15,8044758131	-50,3833413384	617,5531005859	3,1328773499	3,1328773499	7,5216217041
EP-11-21655_0112_0009.JPG	-15,8040127120	-50,3833352579	618,5984497070	3,1485311985	3,1485311985	7,3636217117
EP-11-21655_0112_0010.JPG	-15,8034922376	-50,3833368906	618,0369873047	3,3430800438	3,3430800438	7,8202228546
EP-11-21655_0112_0011.JPG	-15,8030120923	-50,3833634448	617,6895751953	3,1328971386	3,1328971386	7,3551039696
EP-11-21655_0112_0012.JPG	-15,8025184385	-50,3833817197	615,5211791992	3,6950380802	3,6950380802	8,7112779617
EP-11-21655_0112_0013.JPG	-15,8020340585	-50,3833685111	615,7552490234	3,6395597458	3,6395597458	8,7548151016
EP-11-21655_0112_0014.JPG	-15,8015450041	-50,3833650434	616,3351440430	3,2959425449	3,2959425449	7,9621319771
EP-11-21655_0112_0015.JPG	-15,8017947633	-50,3821072681	613,4058227539	3,1605176926	3,1605176926	7,3918561935
EP-11-21655_0112_0016.JPG	-15,8022938796	-50,3820935928	610,6049804688	3,5903661251	3,5903661251	8,6283597946
EP-11-21655_0112_0017.JPG	-15,8028010445	-50,3820751813	612,4664306641	3,7099907398	3,7099907398	9,0061283112
EP-11-21655_0112_0018.JPG	-15,8033028178	-50,3820819542	612,9468994141	3,6081423759	3,6081423759	9,0231914520
EP-11-21655_0112_0019.JPG	-15,8037943037	-50,3820845147	613,3292236328	3,1876595020	3,1876595020	7,8636970520
EP-11-21655_0112_0020.JPG	-15,8043058334	-50,3820346430	613,5920410156	3,2112863064	3,2112863064	7,7708411217
EP-11-21655_0112_0021.JPG	-15,8048220770	-50,3820221723	613,5671997070	3,0703110695	3,0703110695	7,6374945641
EP-11-21655_0112_0022.JPG	-15,8045026104	-50,3807638995	612,1970825195	3,3785836697	3,3785836697	8,0660963058
EP-11-21655_0112_0023.JPG	-15,8039991092	-50,3807652609	615,6108398438	3,5988469124	3,5988469124	8,8237428665
EP-11-21655_0112_0024.JPG	-15,8035179039	-50,3807956008	619,0441894531	3,4080572128	3,4080572128	8,0328388214
EP-11-21655_0112_0025.JPG	-15,8029863461	-50,3808061031	616,5682373047	3,2965209484	3,2965209484	7,8323826790
EP-11-21655_0112_0026.JPG	-15,8024984154	-50,3808082803	615,4000244141	3,2430295944	3,2430295944	7,7104072571
EP-11-21655_0112_0027.JPG	-15,8019975947	-50,3808118429	617,2003784180	3,2722482681	3,2722482681	7,7937922478
EP-11-21655_0112_0028.JPG	-15,8018164600	-50,3795349633	614,5414428711	3,1847276688	3,1847276688	7,6250848770
EP-11-21655_0112_0029.JPG	-15,8023180262	-50,3795425151	614,9691162109	3,0620129108	3,0620129108	7,5057821274
EP-11-21655_0112_0030.JPG	-15,8028168923	-50,3795282231	615,7897949219	3,1152796745	3,1152796745	7,5683007240
EP-11-21655_0112_0031.JPG	-15,8033129853	-50,3795103977	617,7875366211	3,7597196102	3,7597196102	9,5447072983
EP-11-21655_0112_0032.JPG	-15,8038124857	-50,3795033789	616,3874511719	3,7335653305	3,7335653305	9,4351396561
EP-11-21655_0112_0033.JPG	-15,8043100798	-50,3794966984	617,1431274414	3,6061594486	3,6061594486	9,2984619141
EP-11-21655_0112_0034.JPG	-15,8044080362	-50,3782001420	614,8479614258	3,6451785564	3,6451785564	8,7759141922
EP-11-21655_0112_0035.JPG	-15,8039093156	-50,3782394138	613,1154785156	3,7054841518	3,7054841518	9,2147407532
EP-11-21655_0112_0036.JPG	-15,8034053911	-50,3782374756	613,6080932617	3,2384166718	3,2384166718	7,8148860931
EP-11-21655_0112_0037.JPG	-15,8028942687	-50,3782410923	612,0516357422	3,7055096626	3,7055096626	8,7898950577
EP-11-21655_0112_0038.JPG	-15,8023998493	-50,3782544960	609,7165527344	3,4684395790	3,4684395790	8,1979093552
EP-11-21655_0112_0039.JPG	-15,8018938941	-50,3782598039	611,5893554688	3,1133918762	3,1133918762	7,7362437248
EP-11-21655_0112_0040.JPG	-15,8018155114	-50,3769873137	611,1890869141	3,7692947388	3,7692947388	9,4259757996
EP-11-21655_0112_0041.JPG	-15,8023348995	-50,3769808881	610,6703491211	3,5168502331	3,5168502331	8,9283370972
EP-11-21655_0112_0042.JPG	-15,8028066388	-50,3769571425	611,8442382812	3,2545547485	3,2545547485	8,4250640869
EP-11-21655_0112_0043.JPG	-15,8033163453	-50,3769712081	611,2534179688	3,6072249413	3,6072249413	9,0424613953
EP-11-21655_0112_0044.JPG	-15,8037986671	-50,3769669723	609,0374755859	3,1905026436	3,1905026436	7,6174540520
EP-11-21655_0112_0045.JPG	-15,8042811641	-50,3769292262	610,3222045898	3,1117806435	3,1117806435	7,7084736824
EP-11-21655_0112_0046.JPG	-15,8043974250	-50,3756447316	607,9855957031	3,2883136272	3,2883136272	8,0697126389
EP-11-21655_0112_0047.JPG	-15,8038870040	-50,3756531497	607,8334960938	3,1798622608	3,1798622608	7,7199048996
EP-11-21655_0112_0048.JPG	-15,8034074010	-50,3756802819	612,0981445312	3,6798849106	3,6798849106	8,9343156815
EP-11-21655_0112_0049.JPG	-15,8029111399	-50,3757008909	609,1086425781	3,6007771492	3,6007771492	8,3916101456
EP-11-21655_0112_0050.JPG	-15,8024037810	-50,3756985954	608,7011718750	3,8547525406	3,8547525406	9,1374664307
EP-11-21655_0112_0051.JPG	-15,8018929913	-50,3757130110	611,2191772461	3,8388550282	3,8388550282	9,2363595963
EP-11-21655_0112_0052.JPG	-15,8014117884	-50,3757144205	607,5038452148	3,2445111275	3,2445111275	7,7698717117
EP-11-21655_0112_0053.JPG	-15,8013275606	-50,3744445415	599,8693847656	3,4988045692	3,4988045692	8,6577615738
EP-11-21655_0112_0054.JPG	-15,8018058785	-50,3744569151	601,3939819336	3,7288115025	3,7288115025	9,5929679871
EP-11-21655_0112_0055.JPG	-15,8023077034	-50,3744398171	601,7538452148	3,4218113422	3,4218113422	8,5820560455
EP-11-21655_0112_0056.JPG	-15,8028168311	-50,3744078296	598,1988525391	3,5560717583	3,5560717583	9,0183839798
EP-11-21655_0112_0057.JPG	-15,8033031740	-50,3743767042	598,8439941406	3,2730810642	3,2730810642	7,9959521294
EP-11-21655_0112_0058.JPG	-15,8038066866	-50,3743586246	600,4409179688	3,3569674492	3,3569674492	8,2174158096
EP-11-21655_0112_0059.JPG	-15,8043021935	-50,3743674984	603,0175170898	3,2256791592	3,2256791592	8,0452222824
EP-11-21655_0112_0060.JPG	-15,8044539724	-50,3730831790	598,0905761719	3,3162617683	3,3162617683	8,1858015060
EP-11-21655_0112_0061.JPG	-15,8039468067	-50,3730889166	598,1651000977	3,3223519325	3,3223519325	8,2178134918
EP-11-21655_0112_0062.JPG	-15,8034627373	-50,3731359423	598,7724609375	3,3318693638	3,3318693638	8,0484848022
EP-11-21655_0112_0063.JPG	-15,8029517766	-50,3731133725	596,1732788086	3,1977002621	3,1977002621	7,8756160736
EP-11-21655_0112_0064.JPG	-15,8024589599	-50,3731392846	598,2974853516	3,9146120548	3,9146120548	9,1156787872
EP-11-21655_0112_0065.JPG	-15,8019508690	-50,3731658971	596,9174194336	3,8048040867	3,8048040867	9,2480688095
EP-11-21655_0112_0066.JPG	-15,8014541220	-50,3731698663	597,8438110352	3,5228180885	3,5228180885	8,4661798477
EP-11-21655_0112_0067.JPG	-15,8017096631	-50,3718671832	590,0018920898	3,2693827152	3,2693827152	8,0942726135
EP-11-21655_0112_0068.JPG	-15,8022092247	-50,3718883769	591,4776611328	3,8848628998	3,8848628998	9,7861194611
EP-11-21655_0112_0069.JPG	-15,8027215329	-50,3718483490	591,7791137695	3,8542284966	3,8542284966	9,2890329361
EP-11-21655_0112_0070.JPG	-15,8032037058	-50,3718649579	592,6395874023	3,5189085007	3,5189085007	8,6011581421
EP-11-21655_0112_0071.JPG	-15,8036872729	-50,3718212416	591,0244750977	3,5371234417	3,5371234417	9,0096349716
EP-11-21655_0112_0072.JPG	-15,8042140246	-50,3718071161	590,9035034180	3,4928920269	3,4928920269	9,0302343369
EP-11-21655_0112_0073.JPG	-15,8042870466	-50,3705453692	603,1867065430	3,8057134151	3,8057134151	9,1148471832
EP-11-21655_0112_0074.JPG	-15,8037767030	-50,3705445341	603,1062622070	3,4756565094	3,4756565094	8,2973012924
EP-11-21655_0112_0075.JPG	-15,8032728215	-50,3705724490	603,0137939453	3,5165803432	3,5165803432	8,5825452805
EP-11-21655_0112_0076.JPG	-15,8027738510	-50,3705661048	603,6312866211	3,1868498325	3,1868498325	7,6823387146
EP-11-21655_0112_0077.JPG	-15,8022864474	-50,3705904060	602,7742309570	3,3611004353	3,3611004353	8,1388072968
EP-11-21655_0112_0078.JPG	-15,8017760753	-50,3705900340	602,4019165039	3,1601731777	3,1601731777	7,7648525238
EP-11-21655_0112_0079.JPG	-15,8016672673	-50,3693340281	616,7681274414	3,3142738342	3,3142738342	8,2664203644
EP-11-21655_0112_0080.JPG	-15,8021563327	-50,3693213068	619,0158081055	3,4590156078	3,4590156078	8,8946332932

APÊNDICE H – ERROS INDIVIDUAIS DAS PRIMEIRAS 80 FOTOGRAFIAS DA ÁREA 2 APÓS A COREÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO PPK

#Rev: sensefly/geoinfo/3

fileName	latitude	longitude	altitude_wgs84	Accuracy X	Accuracy Y	Accuracy Z
EP-11-21655_0112_0001.JPG	-15,8018539222	-50,3846441429	621,9719848633	0,0164991450	0,0164991450	0,0298407301
EP-11-21655_0112_0002.JPG	-15,8023626591	-50,3846594259	622,6989135742	0,0166165717	0,0166165717	0,0302047301
EP-11-21655_0112_0003.JPG	-15,8028532404	-50,3846243503	620,8488769531	0,0166294444	0,0166294444	0,0296909474
EP-11-21655_0112_0004.JPG	-15,8033636182	-50,3846213024	623,0625000000	0,0167698115	0,0167698115	0,0295581259
EP-11-21655_0112_0005.JPG	-15,8038603405	-50,3846096460	621,1895751953	0,0166559126	0,0166559126	0,0298148580
EP-11-21655_0112_0006.JPG	-15,8043543960	-50,3846015563	622,4533691406	0,0167927779	0,0167927779	0,0302669350
EP-11-21655_0112_0007.JPG	-15,8048664505	-50,3845635013	620,9088745117	0,0168628786	0,0168628786	0,0303664897
EP-11-21655_0112_0008.JPG	-15,8044617710	-50,3833348697	620,9346313477	0,0220748093	0,0220748093	0,0498700514
EP-11-21655_0112_0009.JPG	-15,8039986534	-50,3833300655	621,7885742188	0,0187847242	0,0187847242	0,0364120938
EP-11-21655_0112_0010.JPG	-15,8034786869	-50,3833313797	621,0053100586	0,0182766300	0,0182766300	0,0331638828
EP-11-21655_0112_0011.JPG	-15,8029992151	-50,3833571825	620,5751342773	0,0188968461	0,0188968461	0,0398506857
EP-11-21655_0112_0012.JPG	-15,8025057786	-50,3833754038	618,2846679688	0,0183139294	0,0183139294	0,0333262011
EP-11-21655_0112_0013.JPG	-15,8020213585	-50,3833626584	618,4497680664	0,0193477459	0,0193477459	0,0420133732
EP-11-21655_0112_0014.JPG	-15,8015325697	-50,3833611057	618,9103393555	0,0163441431	0,0163441431	0,0295009837
EP-11-21655_0112_0015.JPG	-15,8017840891	-50,3821026343	616,0193481445	0,0164023601	0,0164023601	0,0298483055
EP-11-21655_0112_0016.JPG	-15,8022832099	-50,3820891891	613,1312255859	0,0164779369	0,0164779369	0,0300019272
EP-11-21655_0112_0017.JPG	-15,8027897320	-50,3820714185	615,0158081055	0,0165855773	0,0165855773	0,0302503295
EP-11-21655_0112_0018.JPG	-15,8032905749	-50,3820784426	615,4434814453	0,0164769851	0,0164769851	0,0295108836
EP-11-21655_0112_0019.JPG	-15,8037817339	-50,3820808926	615,8093872070	0,0166035350	0,0166035350	0,0299212914
EP-11-21655_0112_0020.JPG	-15,8042933226	-50,3820298421	616,0175781250	0,0166804213	0,0166804213	0,0300111733
EP-11-21655_0112_0021.JPG	-15,8048093741	-50,3820170778	616,0009155273	0,0173432622	0,0173432622	0,0309326760
EP-11-21655_0112_0022.JPG	-15,8044920734	-50,3807603932	614,4710083008	0,0160003174	0,0160003174	0,0308962390
EP-11-21655_0112_0023.JPG	-15,8039900119	-50,3807625101	617,6967773438	0,0159655344	0,0159655344	0,0307687093
EP-11-21655_0112_0024.JPG	-15,8035082935	-50,3807929784	620,9201049805	0,0173426885	0,0173426885	0,0335495546
EP-11-21655_0112_0025.JPG	-15,8029761532	-50,3808035496	618,4255981445	0,0161061678	0,0161061678	0,0306320302
EP-11-21655_0112_0026.JPG	-15,8024883466	-50,3808056542	617,1330566406	0,0169001054	0,0169001054	0,0326929837
EP-11-21655_0112_0027.JPG	-15,8019887378	-50,3808087646	618,8623046875	0,0159309171	0,0159309171	0,0307827443
EP-11-21655_0112_0028.JPG	-15,8018070512	-50,3795331799	616,0861816406	0,0156819168	0,0156819168	0,0304892119
EP-11-21655_0112_0029.JPG	-15,8023086078	-50,3795404608	616,4520874023	0,0155381598	0,0155381598	0,0296504349
EP-11-21655_0112_0030.JPG	-15,8028081083	-50,3795260459	617,2200927734	0,0158505924	0,0158505924	0,0306908544
EP-11-21655_0112_0031.JPG	-15,8033048396	-50,3795072843	619,2113037109	0,0157174151	0,0157174151	0,0300573483
EP-11-21655_0112_0032.JPG	-15,8038039769	-50,3795003238	617,8803100586	0,0159284808	0,0159284808	0,0308178607
EP-11-21655_0112_0033.JPG	-15,8043018529	-50,3794932340	618,5804443359	0,0171586350	0,0171586350	0,0308639016
EP-11-21655_0112_0034.JPG	-15,8044008911	-50,3781978332	616,3142700195	0,0158365984	0,0158365984	0,0301836636
EP-11-21655_0112_0035.JPG	-15,8039023733	-50,3782370226	614,4451293945	0,0176520031	0,0176520031	0,0324764028
EP-11-21655_0112_0036.JPG	-15,8033989924	-50,3782349331	614,8068847656	0,0163552761	0,0163552761	0,0313942842
EP-11-21655_0112_0037.JPG	-15,8028878089	-50,3782384801	613,0310668945	0,0159667898	0,0159667898	0,0304914508
EP-11-21655_0112_0038.JPG	-15,8023945042	-50,3782521269	610,5833129883	0,0170847196	0,0170847196	0,0333361886
EP-11-21655_0112_0039.JPG	-15,8018887148	-50,3782563232	612,4604492188	0,0162783153	0,0162783153	0,0312749743
EP-11-21655_0112_0040.JPG	-15,8018088148	-50,3769841998	611,9877319336	0,0159109738	0,0159109738	0,0306169521
EP-11-21655_0112_0041.JPG	-15,8023285209	-50,3769778952	611,5695800781	0,0157542676	0,0157542676	0,0305041559
EP-11-21655_0112_0042.JPG	-15,8028001643	-50,3769540877	612,8070678711	0,0159815568	0,0159815568	0,0312366281
EP-11-21655_0112_0043.JPG	-15,8033101362	-50,3769690789	612,2664184570	0,0160187576	0,0160187576	0,0308944676
EP-11-21655_0112_0044.JPG	-15,8037919142	-50,3769649318	610,0684204102	0,0159357917	0,0159357917	0,0306226239
EP-11-21655_0112_0045.JPG	-15,8042743247	-50,3769267089	611,2476806641	0,0161047895	0,0161047895	0,0312128291
EP-11-21655_0112_0046.JPG	-15,8043923758	-50,3756423119	608,9597778320	0,0170757510	0,0170757510	0,0331976339
EP-11-21655_0112_0047.JPG	-15,8038822716	-50,3756501787	608,6799926758	0,0162545536	0,0162545536	0,0314274170
EP-11-21655_0112_0048.JPG	-15,8034037244	-50,3756770932	612,9212646484	0,0185314100	0,0185314100	0,0365876853
EP-11-21655_0112_0049.JPG	-15,8029069752	-50,3756981440	609,7687988281	0,0160984956	0,0160984956	0,0310958680
EP-11-21655_0112_0050.JPG	-15,8023985902	-50,3756959997	609,2706909180	0,0160362292	0,0160362292	0,0308898371
EP-11-21655_0112_0051.JPG	-15,8018883034	-50,3757107498	611,7390747070	0,0174075402	0,0174075402	0,0345805548
EP-11-21655_0112_0052.JPG	-15,8014077290	-50,3757130132	607,9494018555	0,0168491919	0,0168491919	0,0332096778
EP-11-21655_0112_0053.JPG	-15,8013226550	-50,3744418128	600,4890136719	0,0161025263	0,0161025263	0,0317850150
EP-11-21655_0112_0054.JPG	-15,8018005823	-50,3744539717	602,0377197266	0,0176482461	0,0176482461	0,0377080105
EP-11-21655_0112_0055.JPG	-15,8023020528	-50,3744367293	602,4406738281	0,0178992283	0,0178992283	0,0382886305
EP-11-21655_0112_0056.JPG	-15,8028112669	-50,3744044233	598,8978271484	0,0180573761	0,0180573761	0,0389082618
EP-11-21655_0112_0057.JPG	-15,8032985141	-50,3743748322	599,5840454102	0,0180522874	0,0180522874	0,0390777886
EP-11-21655_0112_0058.JPG	-15,8038018675	-50,3743574076	601,3093872070	0,0169939790	0,0169939790	0,0348926559
EP-11-21655_0112_0059.JPG	-15,8042977936	-50,3743656794	603,8950805664	0,0162746999	0,0162746999	0,0317658111
EP-11-21655_0112_0060.JPG	-15,8044495344	-50,3730823671	598,9090576172	0,0166854765	0,0166854765	0,0329191945
EP-11-21655_0112_0061.JPG	-15,8039431295	-50,3730878883	598,7344970703	0,0179368556	0,0179368556	0,0378396362
EP-11-21655_0112_0062.JPG	-15,8034589173	-50,3731344649	599,2326660156	0,0180512611	0,0180512611	0,0361850634
EP-11-21655_0112_0063.JPG	-15,8029489486	-50,3731117474	596,5725097656	0,0165722556	0,0165722556	0,0328888632
EP-11-21655_0112_0064.JPG	-15,8024557104	-50,3731384504	598,6566772461	0,0189553369	0,0189553369	0,0383381583
EP-11-21655_0112_0065.JPG	-15,8019478426	-50,3731642015	597,1859130859	0,0179460011	0,0179460011	0,0356654450
EP-11-21655_0112_0066.JPG	-15,8014513343	-50,3731681006	598,0412597656	0,0162396170	0,0162396170	0,0316295028
EP-11-21655_0112_0067.JPG	-15,8017062810	-50,3718655043	590,4314575195	0,0165191796	0,0165191796	0,0328148641
EP-11-21655_0112_0068.JPG	-15,8022061767	-50,3718860098	591,9255371094	0,0165061764	0,0165061764	0,0325971544
EP-11-21655_0112_0069.JPG	-15,8027183673	-50,3718457140	592,3063354492	0,0165905450	0,0165905450	0,0330668055
EP-11-21655_0112_0070.JPG	-15,8031985107	-50,3718611633	593,1692504883	0,0164780803	0,0164780803	0,0323964953
EP-11-21655_0112_0071.JPG	-15,8036816814	-50,3718180513	591,5940551758	0,0167570636	0,0167570636	0,0335364342
EP-11-21655_0112_0072.JPG	-15,8042088193	-50,3718037429	591,5629272461	0,0166002363	0,0166002363	0,0327019207
EP-11-21655_0112_0073.JPG	-15,8042842287	-50,3705416388	603,7972412109	0,0167754088	0,0167754088	0,0328042880
EP-11-21655_0112_0074.JPG	-15,8037737724	-50,3705414440	603,5042114258	0,0167143624	0,0167143624	0,0326374285
EP-11-21655_0112_0075.JPG	-15,8032701556	-50,3705701195	603,3048095703	0,0167362392	0,0167362392	0,0331414677
EP-11-21655_0112_0076.JPG	-15,8027717338	-50,3705633642	603,6966552734	0,0192493778	0,0192493778	0,0426020473
EP-11-21655_0112_0077.JPG	-15,8022838087	-50,3705882776	602,7903442383	0,0183205251	0,0183205251	0,0364205316
EP-11-21655_0112_0078.JPG	-15,8017730939	-50,3705885063	602,3244628906	0,0168319959	0,0168319959	0,0340139419
EP-11-21655_0112_0079.JPG	-15,8016645539	-50,3693315377	617,0826416016	0,0171644595	0,0171644595	0,0346036255
EP-11-21655_0112_0080.JPG	-15,8021538856	-50,3693195381	619,2421264648	0,0171138793	0,0171138793	0,0343502127

APÊNDICE I – ERROS INDIVIDUAIS DAS PRIMEIRAS 80 FOTOGRAFIAS DA ÁREA DE TESTE ANTES A COREÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO PPK

#Rev: sensefly/geoinfo/3

fileName	latitude	longitude	altitude_wgs84	Accuracy X	Accuracy Y	Accuracy Z
EP-11-21655_0158_0001.JPG	-16,0667956617	-50,1815094936	1366,8468017578	2,9679231644	2,9679231644	4,0759253502
EP-11-21655_0158_0002.JPG	-16,0668786351	-50,1823752046	1367,7080078125	2,9975252151	2,9975252151	4,1556153297
EP-11-21655_0158_0003.JPG	-16,0669505852	-50,1832320634	1367,0371093750	2,9581480026	2,9581480026	4,1080722809
EP-11-21655_0158_0004.JPG	-16,0670258541	-50,1840737797	1364,7998046875	3,4296033382	3,4296033382	4,6001429558
EP-11-21655_0158_0005.JPG	-16,0671234663	-50,1849263938	1364,3160400391	3,3381962776	3,3381962776	4,4547624588
EP-11-21655_0158_0006.JPG	-16,0671838776	-50,1857759334	1365,7851562500	3,0736830235	3,0736830235	4,2347025871
EP-11-21655_0158_0007.JPG	-16,0672856040	-50,1866153937	1363,8502197266	2,9473528862	2,9473528862	4,0822057724
EP-11-21655_0158_0008.JPG	-16,0673490342	-50,1874647004	1363,3602294922	2,8855772018	2,8855772018	4,0393061638
EP-11-21655_0158_0009.JPG	-16,0674235739	-50,1883196176	1363,4892578125	3,2984118462	3,2984118462	4,4371037483
EP-11-21655_0158_0010.JPG	-16,0674949116	-50,1891786560	1362,4509277344	3,2898652554	3,2898652554	4,4365940094
EP-11-21655_0158_0011.JPG	-16,0675731607	-50,1900254393	1363,2258300781	3,1546895504	3,1546895504	4,3577346802
EP-11-21655_0158_0012.JPG	-16,0676606431	-50,1908689912	1362,6157226562	2,9463760853	2,9463760853	4,1001443863
EP-11-21655_0158_0013.JPG	-16,0677425962	-50,1917304635	1362,5283203125	3,1302781105	3,1302781105	4,1348147392
EP-11-21655_0158_0014.JPG	-16,0678077681	-50,1925908633	1362,0590820312	3,3428673744	3,3428673744	4,5120468140
EP-11-21655_0158_0015.JPG	-16,0678873754	-50,1934357641	1361,9471435547	3,1511654854	3,1511654854	4,3282718658
EP-11-21655_0158_0016.JPG	-16,0679683771	-50,1942910795	1361,9694824219	3,1603033543	3,1603033543	4,3344101906
EP-11-21655_0158_0017.JPG	-16,0691778546	-50,1938245119	1361,7756347656	3,3488135338	3,3488135338	4,5168786049
EP-11-21655_0158_0018.JPG	-16,0690786821	-50,1929786041	1361,2332763672	3,3557419777	3,3557419777	4,5370168686
EP-11-21655_0158_0019.JPG	-16,0689950859	-50,1921294633	1361,1744384766	3,2789525986	3,2789525986	4,4048752785
EP-11-21655_0158_0020.JPG	-16,0689148569	-50,1912700212	1360,8549804688	2,9257977009	2,9257977009	4,0500936508
EP-11-21655_0158_0021.JPG	-16,0688278707	-50,1904178233	1361,2894287109	2,9523634911	2,9523634911	4,0838475227
EP-11-21655_0158_0022.JPG	-16,0687738756	-50,1895704503	1361,5273437500	3,3471856117	3,3471856117	4,5610909462
EP-11-21655_0158_0023.JPG	-16,0686890834	-50,1887166512	1361,1894531250	3,2989854813	3,2989854813	4,4304456711
EP-11-21655_0158_0024.JPG	-16,0686126287	-50,1878591462	1360,6739501953	3,0845961571	3,0845961571	4,2182621956
EP-11-21655_0158_0025.JPG	-16,0685246941	-50,1870208179	1360,6855468750	2,8976030350	2,8976030350	4,0150971413
EP-11-21655_0158_0026.JPG	-16,0684675030	-50,1861694298	1359,4448242188	3,4282414913	3,4282414913	4,6778903008
EP-11-21655_0158_0027.JPG	-16,0683722901	-50,1853233498	1360,7043457031	3,3051247597	3,3051247597	4,5145821571
EP-11-21655_0158_0028.JPG	-16,0683047778	-50,1844597258	1360,9246826172	3,1878490448	3,1878490448	4,3548231125
EP-11-21655_0158_0029.JPG	-16,0682212505	-50,1836016773	1360,6120605469	2,9176173210	2,9176173210	4,0628962517
EP-11-21655_0158_0030.JPG	-16,0681412317	-50,1827379748	1360,3884277344	3,1335308552	3,1335308552	4,2828674316
EP-11-21655_0158_0031.JPG	-16,0680654777	-50,1818899490	1360,6436767578	3,2171635628	3,2171635628	4,2736330032
EP-11-21655_0158_0032.JPG	-16,0679948383	-50,1810389900	1360,5648193359	3,0819776058	3,0819776058	4,1713256836
EP-11-21655_0158_0033.JPG	-16,0692020790	-50,1805732092	1399,7501220703	2,9864904881	2,9864904881	4,1039576530
EP-11-21655_0158_0034.JPG	-16,0692469620	-50,1814246816	1395,2857666016	3,2882590294	3,2882590294	4,4053277969
EP-11-21655_0158_0035.JPG	-16,0693263353	-50,1822646571	1394,8703613281	3,2459511757	3,2459511757	4,3604459763
EP-11-21655_0158_0036.JPG	-16,0694005830	-50,1831193133	1395,0093994141	2,8914716244	2,8914716244	3,9997336864
EP-11-21655_0158_0037.JPG	-16,0694916870	-50,1839682628	1394,5498046875	2,8339807987	2,8339807987	3,9416370392
EP-11-21655_0158_0038.JPG	-16,0695623901	-50,1848203829	1393,9473876953	2,7979018688	2,7979018688	3,9244747162
EP-11-21655_0158_0039.JPG	-16,0696423544	-50,1856768224	1393,3143310547	3,2134017944	3,2134017944	4,3706021309
EP-11-21655_0158_0040.JPG	-16,0697309702	-50,1865276589	1395,0953369141	3,0445790291	3,0445790291	4,1967115402
EP-11-21655_0158_0041.JPG	-16,0697876902	-50,1873723201	1391,6582031250	2,8094937801	2,8094937801	3,9281129837
EP-11-21655_0158_0042.JPG	-16,0698706825	-50,1882287521	1395,6734619141	2,8061878681	2,8061878681	3,9590399265
EP-11-21655_0158_0043.JPG	-16,0699591170	-50,1890930704	1394,7398681641	3,3873302937	3,3873302937	4,5936207771
EP-11-21655_0158_0044.JPG	-16,0700407559	-50,1899526536	1393,7497558594	3,2518565655	3,2518565655	4,4235339165
EP-11-21655_0158_0045.JPG	-16,0701056990	-50,1907922151	1394,2154541016	2,9233458042	2,9233458042	4,0101704597
EP-11-21655_0158_0046.JPG	-16,0701860982	-50,1916597759	1393,5946044922	2,8735246658	2,8735246658	3,9782605171
EP-11-21655_0158_0047.JPG	-16,0702762306	-50,1925090371	1394,4785156250	2,8179681301	2,8179681301	3,9648001194
EP-11-21655_0158_0048.JPG	-16,0703380904	-50,1933700654	1392,1096191406	3,5578401089	3,5578401089	4,6397137642
EP-11-21655_0158_0049.JPG	-16,0704239264	-50,1942186865	1393,1614990234	3,2771017551	3,2771017551	4,4299993515
EP-11-21655_0158_0050.JPG	-16,0717044684	-50,1945635827	1393,1531982422	2,8185086250	2,8185086250	3,9440991879
EP-11-21655_0158_0051.JPG	-16,0716072773	-50,1937232710	1393,6181640625	3,8880743980	3,8880743980	4,9041819572
EP-11-21655_0158_0052.JPG	-16,0715264035	-50,1928629052	1393,6331787109	3,0947623253	3,0947623253	4,2259826660
EP-11-21655_0158_0053.JPG	-16,0714455179	-50,1920119513	1392,8155517578	2,9558353424	2,9558353424	4,0744128227
EP-11-21655_0158_0054.JPG	-16,0713797375	-50,1911547623	1393,3450927734	2,8333554268	2,8333554268	3,9755921364
EP-11-21655_0158_0055.JPG	-16,0712862284	-50,1903052946	1392,9062500000	3,2245435715	3,2245435715	4,3621883392
EP-11-21655_0158_0056.JPG	-16,0712140834	-50,1894441314	1393,7625732422	2,9922933578	2,9922933578	4,0584907532
EP-11-21655_0158_0057.JPG	-16,0711365283	-50,1885965722	1393,0140380859	2,9465358257	2,9465358257	4,0929150581
EP-11-21655_0158_0058.JPG	-16,0710827452	-50,1877482850	1392,5953369141	2,8622882366	2,8622882366	3,9811329842
EP-11-21655_0158_0059.JPG	-16,0709928915	-50,1869100454	1393,5545654297	2,7982861996	2,7982861996	3,9348125458
EP-11-21655_0158_0060.JPG	-16,0709016998	-50,1860506844	1391,6184082031	3,0831377506	3,0831377506	4,2225084305
EP-11-21655_0158_0061.JPG	-16,0708098423	-50,1852257448	1394,3826904297	2,9125051498	2,9125051498	4,0195817947
EP-11-21655_0158_0062.JPG	-16,0707676231	-50,1843544011	1392,5352783203	2,8477532864	2,8477532864	4,0126562119
EP-11-21655_0158_0063.JPG	-16,0706615282	-50,1835076451	1393,8986816406	2,8340466022	2,8340466022	4,0077204704
EP-11-21655_0158_0064.JPG	-16,0705963484	-50,1826565750	1393,6859130859	3,2711324692	3,2711324692	4,4818406105
EP-11-21655_0158_0065.JPG	-16,0705271116	-50,1817962471	1392,4682617188	3,1224408150	3,1224408150	4,2920660973
EP-11-21655_0158_0066.JPG	-16,0704396699	-50,1809478824	1393,7545166016	2,7819178104	2,7819178104	3,9769272804
EP-11-21655_0158_0067.JPG	-16,0716409601	-50,1802709468	1379,6478271484	3,2067644596	3,2067644596	4,4552054405
EP-11-21655_0158_0068.JPG	-16,0716775031	-50,1811262202	1380,2333984375	3,3161275387	3,3161275387	4,5970697403
EP-11-21655_0158_0069.JPG	-16,0717654460	-50,1819942763	1381,0980224609	2,8458678722	2,8458678722	4,0511493683
EP-11-21655_0158_0070.JPG	-16,0718395664	-50,1828553846	1381,5313720703	2,8103854656	2,8103854656	4,0374646187
EP-11-21655_0158_0071.JPG	-16,0719185086	-50,1836911237	1379,8996582031	3,2913136482	3,2913136482	4,6240353584
EP-11-21655_0158_0072.JPG	-16,0719993187	-50,1845330455	1381,2152099609	3,1805567741	3,1805567741	4,4021482468
EP-11-21655_0158_0073.JPG	-16,0720817828	-50,1853921480	1380,6511230469	3,0344665051	3,0344665051	4,2939739227
EP-11-21655_0158_0074.JPG	-16,0721514374	-50,1862428365	1380,8952636719	2,8343629837	2,8343629837	4,0503525734
EP-11-21655_0158_0075.JPG	-16,0722431743	-50,1870955886	1381,5187988281	3,0290439129	3,0290439129	4,3993029594
EP-11-21655_0158_0076.JPG	-16,0723122174	-50,1879561586	1380,9130859375	3,2540912628	3,2540912628	4,5783782005
EP-11-21655_0158_0077.JPG	-16,0723916434	-50,1888081208	1380,9858398438	3,2797861099	3,2797861099	4,5316896439
EP-11-21655_0158_0078.JPG	-16,0724592786	-50,1896597899	1381,4340820312	2,9963400364	2,9963400364	4,2189793587
EP-11-21655_0158_0079.JPG	-16,0725508385	-50,1905068056	1380,4576416016	2,9401729107	2,9401729107	4,2077913284
EP-11-21655_0158_0080.JPG	-16,0726225559	-50,1913642838	1381,6433105469	2,8621146679	2,8621146679	4,1438512802

APÊNDICE J – ERROS INDIVIDUAIS DAS PRIMEIRAS 80 FOTOGRAFIAS DA ÁREA DE TESTE APÓS A COREÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO PPK

#Rev: sensefly/geoinfo/3

fileName	latitude	longitude	altitude_wgs84	Accuracy X	Accuracy Y	Accuracy Z
EP-11-21655_0158_0001.JPG	-16,0668016757	-50,1815340889	1365,1650390625	0,0185413882	0,0185413882	0,0269280933
EP-11-21655_0158_0002.JPG	-16,0668838671	-50,1823991206	1366,0866699219	0,0176333655	0,0176333655	0,0251966193
EP-11-21655_0158_0003.JPG	-16,0669552722	-50,1832574831	1365,4982910156	0,0176241342	0,0176241342	0,0251143854
EP-11-21655_0158_0004.JPG	-16,0670312318	-50,1840992353	1363,2565917969	0,0182749461	0,0182749461	0,0265881289
EP-11-21655_0158_0005.JPG	-16,0671294842	-50,1849516224	1362,8382568359	0,0181659255	0,0181659255	0,0265124235
EP-11-21655_0158_0006.JPG	-16,0671903929	-50,1858014834	1364,2702636719	0,0175935645	0,0175935645	0,0249650013
EP-11-21655_0158_0007.JPG	-16,0672907720	-50,1866417158	1362,3577880859	0,0173576903	0,0173576903	0,0248570479
EP-11-21655_0158_0008.JPG	-16,0673547994	-50,1874900018	1361,8863525391	0,0175654553	0,0175654553	0,0249366127
EP-11-21655_0158_0009.JPG	-16,0674301542	-50,1883451802	1362,0052490234	0,0175303649	0,0175303649	0,0249346644
EP-11-21655_0158_0010.JPG	-16,0675005972	-50,1892038714	1360,9782714844	0,0175011121	0,0175011121	0,0249653533
EP-11-21655_0158_0011.JPG	-16,0675793780	-50,1900498786	1361,7545166016	0,0174274743	0,0174274743	0,0249924511
EP-11-21655_0158_0012.JPG	-16,0676670394	-50,1908933374	1361,1451416016	0,0174482148	0,0174482148	0,0250462405
EP-11-21655_0158_0013.JPG	-16,0677492202	-50,1917537104	1361,0565185547	0,0176811311	0,0176811311	0,0252287183
EP-11-21655_0158_0014.JPG	-16,0678139379	-50,1926143214	1360,5549316406	0,0175233223	0,0175233223	0,0252767336
EP-11-21655_0158_0015.JPG	-16,0678942000	-50,1934584176	1360,3978271484	0,0176848620	0,0176848620	0,0254341755
EP-11-21655_0158_0016.JPG	-16,0679753051	-50,1943134455	1360,4039306641	0,0179078970	0,0179078970	0,0256306734
EP-11-21655_0158_0017.JPG	-16,0691848405	-50,1938468601	1360,1483154297	0,0183183011	0,0183183011	0,0273411181
EP-11-21655_0158_0018.JPG	-16,0690864897	-50,1930005102	1359,6104736328	0,0183575507	0,0183575507	0,0272775684
EP-11-21655_0158_0019.JPG	-16,0690019814	-50,1921509047	1359,5064697266	0,0184114501	0,0184114501	0,0272339676
EP-11-21655_0158_0020.JPG	-16,0689218241	-50,1912910649	1359,1741943359	0,0180586595	0,0180586595	0,0270396583
EP-11-21655_0158_0021.JPG	-16,0688355593	-50,1904379024	1359,6593017578	0,0180707350	0,0180707350	0,0270123538
EP-11-21655_0158_0022.JPG	-16,0687807510	-50,1895911362	1359,8819580078	0,0172980241	0,0172980241	0,0252568033
EP-11-21655_0158_0023.JPG	-16,0686948444	-50,1887380631	1359,4709472656	0,0172287785	0,0172287785	0,0249630455
EP-11-21655_0158_0024.JPG	-16,0686187368	-50,1878802531	1358,9420166016	0,0182079561	0,0182079561	0,0270496309
EP-11-21655_0158_0025.JPG	-16,0685310764	-50,1870410849	1358,9511718750	0,0170904491	0,0170904491	0,0249481630
EP-11-21655_0158_0026.JPG	-16,0684735141	-50,1861900330	1357,6553955078	0,0182566363	0,0182566363	0,0271594170
EP-11-21655_0158_0027.JPG	-16,0683786232	-50,1853437098	1358,9395751953	0,0182136502	0,0182136502	0,0272457767
EP-11-21655_0158_0028.JPG	-16,0683122893	-50,1844796451	1359,1240234375	0,0181975029	0,0181975029	0,0273436978
EP-11-21655_0158_0029.JPG	-16,0682274344	-50,1836230538	1358,7662353516	0,0180588868	0,0180588868	0,0274234843
EP-11-21655_0158_0030.JPG	-16,0681466239	-50,1827577821	1358,4466552734	0,0173946489	0,0173946489	0,0255269222
EP-11-21655_0158_0031.JPG	-16,0680710414	-50,1819088857	1358,6907958984	0,0185150448	0,0185150448	0,0278637521
EP-11-21655_0158_0032.JPG	-16,0680017141	-50,1810582035	1358,7111816406	0,0184160955	0,0184160955	0,0279819034
EP-11-21655_0158_0033.JPG	-16,0692069625	-50,1805917183	1398,0681152344	0,0177485161	0,0177485161	0,0262973588
EP-11-21655_0158_0034.JPG	-16,0692523815	-50,1814432471	1393,5596923828	0,0174261462	0,0174261462	0,0257011224
EP-11-21655_0158_0035.JPG	-16,0693324978	-50,1822834060	1393,2203369141	0,0179881733	0,0179881733	0,0270949099
EP-11-21655_0158_0036.JPG	-16,0694063108	-50,1831368769	1393,4210205078	0,0178014934	0,0178014934	0,0269581806
EP-11-21655_0158_0037.JPG	-16,0694976477	-50,1839857422	1392,9698486328	0,0174534228	0,0174534228	0,0261882339
EP-11-21655_0158_0038.JPG	-16,0695695985	-50,1848391045	1392,2905273438	0,0171300024	0,0171300024	0,0252661947
EP-11-21655_0158_0039.JPG	-16,0696488963	-50,1856960481	1391,6547851562	0,0168719608	0,0168719608	0,0251399148
EP-11-21655_0158_0040.JPG	-16,0697368474	-50,1865456723	1393,5814208984	0,0169650596	0,0169650596	0,0251232665
EP-11-21655_0158_0041.JPG	-16,0697934073	-50,1873898469	1390,1375732422	0,0168872010	0,0168872010	0,0250946842
EP-11-21655_0158_0042.JPG	-16,0698763947	-50,1882467974	1394,2325439453	0,0170582626	0,0170582626	0,0251864698
EP-11-21655_0158_0043.JPG	-16,0699656275	-50,1891116559	1393,2003173828	0,0178798288	0,0178798288	0,0274223797
EP-11-21655_0158_0044.JPG	-16,0700475988	-50,1899708069	1392,3101806641	0,0176776294	0,0176776294	0,0274386909
EP-11-21655_0158_0045.JPG	-16,0701128014	-50,1908094251	1392,8271484375	0,0179052949	0,0179052949	0,0276275016
EP-11-21655_0158_0046.JPG	-16,0701930561	-50,1916767545	1392,1917724609	0,0185112115	0,0185112115	0,0295818876
EP-11-21655_0158_0047.JPG	-16,0702830112	-50,1925257592	1393,0317382812	0,0181790311	0,0181790311	0,0279849991
EP-11-21655_0158_0048.JPG	-16,0703444865	-50,1933872702	1390,7175292969	0,0180926397	0,0180926397	0,0281072222
EP-11-21655_0158_0049.JPG	-16,0704300374	-50,1942360365	1391,7283935547	0,0183033440	0,0183033440	0,0283466950
EP-11-21655_0158_0050.JPG	-16,0717099346	-50,1945813118	1391,6833496094	0,0182582438	0,0182582438	0,0283900537
EP-11-21655_0158_0051.JPG	-16,0716134786	-50,1937409535	1392,1638183594	0,0182678495	0,0182678495	0,0282888580
EP-11-21655_0158_0052.JPG	-16,0715335742	-50,1928808331	1392,1881103516	0,0180848856	0,0180848856	0,0281149559
EP-11-21655_0158_0053.JPG	-16,0714532806	-50,1920298766	1391,3868408203	0,0178256314	0,0178256314	0,0279311463
EP-11-21655_0158_0054.JPG	-16,0713866374	-50,1911725727	1391,9108886719	0,0175887626	0,0175887626	0,0277660657
EP-11-21655_0158_0055.JPG	-16,0712929402	-50,1903229305	1391,4199218750	0,0177075230	0,0177075230	0,0277395677
EP-11-21655_0158_0056.JPG	-16,0712200275	-50,1894615603	1392,2784423828	0,0177414846	0,0177414846	0,0277123358
EP-11-21655_0158_0057.JPG	-16,0711431093	-50,1886144258	1391,4559326172	0,0173846111	0,0173846111	0,0275683310
EP-11-21655_0158_0058.JPG	-16,0710888177	-50,1877661244	1391,0432128906	0,0175254047	0,0175254047	0,0276195146
EP-11-21655_0158_0059.JPG	-16,0709986576	-50,1869276776	1391,9517822266	0,0174548980	0,0174548980	0,0276476536
EP-11-21655_0158_0060.JPG	-16,0709072611	-50,1860683893	1390,1072998047	0,0174816642	0,0174816642	0,0277401395
EP-11-21655_0158_0061.JPG	-16,0708156544	-50,1852424046	1392,8261718750	0,0175031815	0,0175031815	0,0278761685
EP-11-21655_0158_0062.JPG	-16,0707732704	-50,1843714761	1391,0272216797	0,0176532827	0,0176532827	0,0280592423
EP-11-21655_0158_0063.JPG	-16,0706678735	-50,1835243748	1392,3802490234	0,0177445281	0,0177445281	0,0282562729
EP-11-21655_0158_0064.JPG	-16,0706027572	-50,1826736413	1392,2415771484	0,0177576989	0,0177576989	0,0284368601
EP-11-21655_0158_0065.JPG	-16,0705330644	-50,1818128767	1390,9542236328	0,0178599469	0,0178599469	0,0286518279
EP-11-21655_0158_0066.JPG	-16,0704471632	-50,1809646893	1392,2048339844	0,0182787608	0,0182787608	0,0290046595
EP-11-21655_0158_0067.JPG	-16,0716461064	-50,1802880620	1378,1883544922	0,0181233305	0,0181233305	0,0290943999
EP-11-21655_0158_0068.JPG	-16,0716826909	-50,1811416872	1378,7684326172	0,0178996548	0,0178996548	0,0288708042
EP-11-21655_0158_0069.JPG	-16,0717706329	-50,1820099750	1379,6070556641	0,0180138107	0,0180138107	0,0287794806
EP-11-21655_0158_0070.JPG	-16,0718445241	-50,1828716092	1380,0900878906	0,0175511818	0,0175511818	0,0284985229
EP-11-21655_0158_0071.JPG	-16,0719246510	-50,1837077569	1378,3293457031	0,0174850598	0,0174850598	0,0283665881
EP-11-21655_0158_0072.JPG	-16,0720046182	-50,1845494888	1379,5974121094	0,0174644124	0,0174644124	0,0282572396
EP-11-21655_0158_0073.JPG	-16,0720872398	-50,1854092078	1379,0244140625	0,0175846536	0,0175846536	0,0282356385
EP-11-21655_0158_0074.JPG	-16,0721565549	-50,1862597816	1379,2235107422	0,0173954088	0,0173954088	0,0281323288
EP-11-21655_0158_0075.JPG	-16,0722481403	-50,1871129867	1379,8326416016	0,0172145702	0,0172145702	0,0280391909
EP-11-21655_0158_0076.JPG	-16,0723172661	-50,1879740511	1379,2507324219	0,0173875988	0,0173875988	0,0281453710
EP-11-21655_0158_0077.JPG	-16,0723966803	-50,1888250890	1379,3234863281	0,0171831362	0,0171831362	0,0281598084
EP-11-21655_0158_0078.JPG	-16,0724643275	-50,1896769433	1379,7910156250	0,0174465235	0,0174465235	0,0283692498
EP-11-21655_0158_0079.JPG	-16,0725560099	-50,1905239895	1378,8507080078	0,0173729341	0,0173729341	0,0284943487
EP-11-21655_0158_0080.JPG	-16,0726270205	-50,1913815093	1380,0050048828	0,0177611820	0,0177611820	0,0287874173

APÊNDICE K – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DO VOO AEROFOTOGRAMÉTRICO DA ÁREA 1 COM GCP CLASSIFICADO COMO PEC CLASSE A NA ESCALA 1/250

Quality Report

Generated with Pix4Dmapper version 4.5.6

Important: Click on the different icons for:

Help to analyze the results in the Quality Report

Additional information about the sections

Click here for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	Processamento_Clementino_GCP
Processed	2021-03-05 09:06:23
Camera Model Name(s)	S.O.D.A_10.2_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	5.16 cm / 2.03 in
Area Covered	1.686 km^2 / 168.5934 ha / 0.65 sq. mi. / 416.8189 acres

Quality Check

Images	median of 77468 keypoints per image	✓
Dataset	281 out of 281 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	2.25% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 31147.6 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, 6 GCPs (6 3D), mean RMS error = 0.005 m	✓

Preview

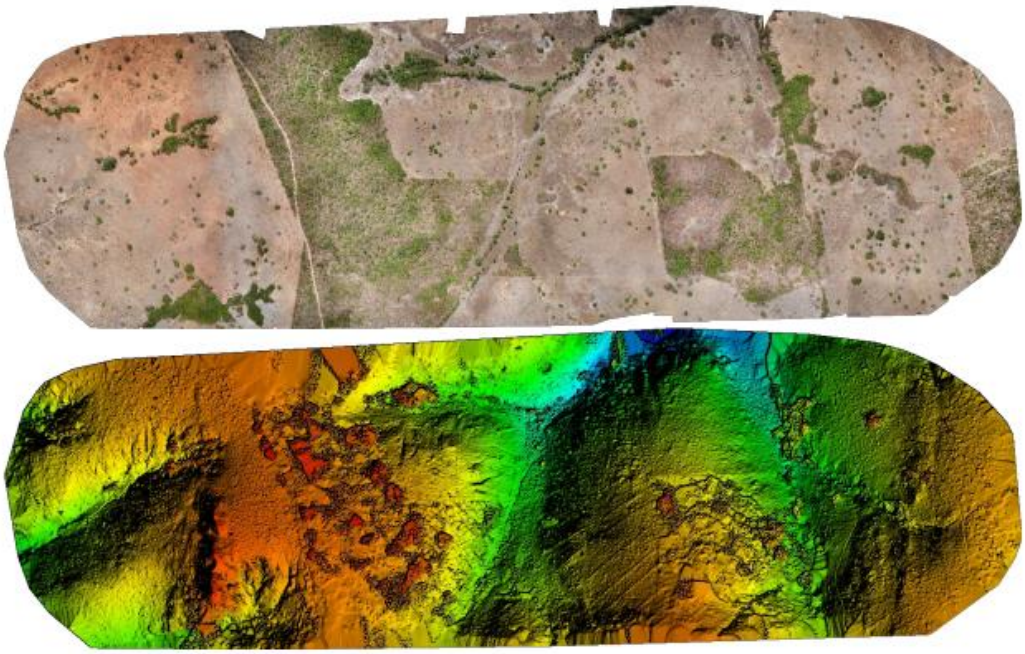


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	281 out of 281
Number of Geolocated Images	281 out of 281

Initial Image Positions

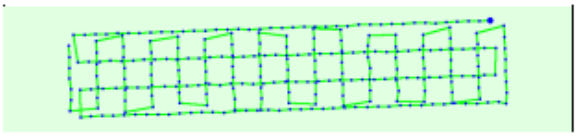
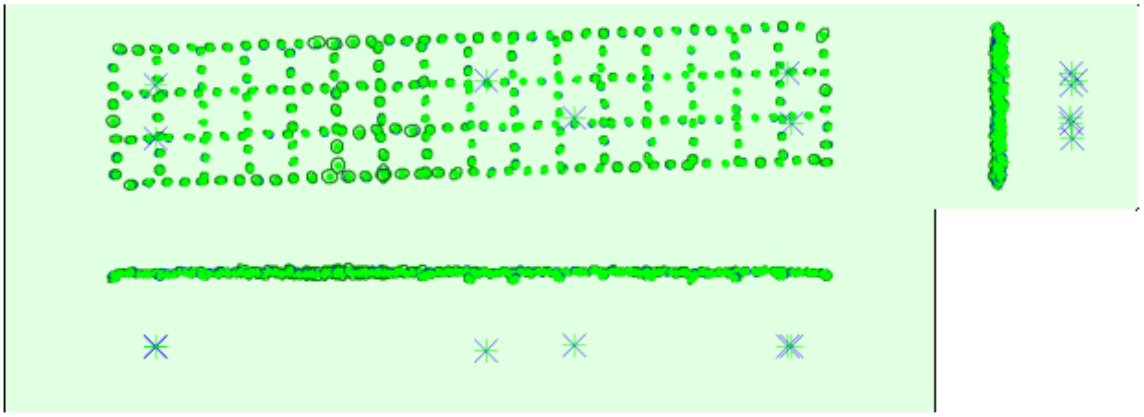


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



Uncertainty ellipses 500x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Absolute camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.026	0.026	0.028	0.006	0.006	0.002
Sigma	0.006	0.005	0.005	0.001	0.001	0.001

Overlap

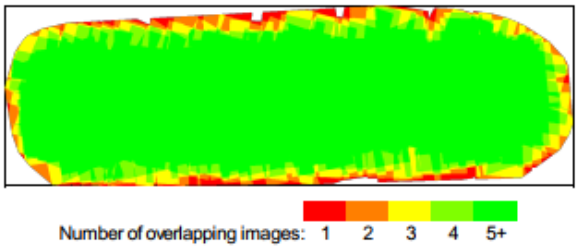


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic.
Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

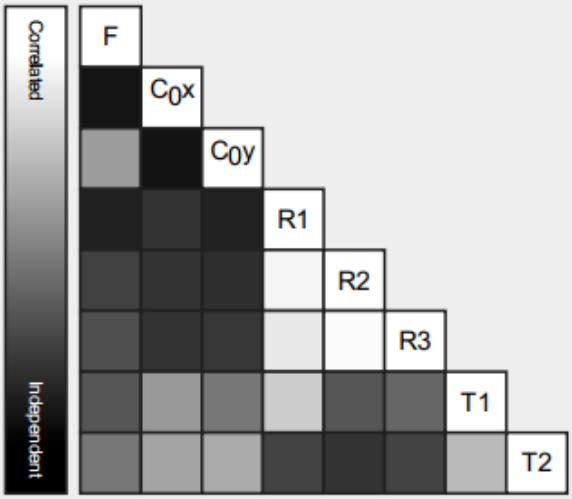
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	8087561
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	2544867
Mean Reprojection Error [pixels]	0.164

Internal Camera Parameters

S.O.D.A._10.2_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 13.132 [mm] x 8.754 [mm]

EXIF ID: S.O.D.A._10.2_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4250.340 [pixel] 10.200 [mm]	2736.000 [pixel] 6.566 [mm]	1824.000 [pixel] 4.377 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	4346.371 [pixel] 10.430 [mm]	2688.124 [pixel] 6.451 [mm]	1815.963 [pixel] 4.358 [mm]	0.126	-0.439	0.412	-0.001	-0.002
Uncertainties (Sigma)	0.408 [pixel] 0.001 [mm]	0.094 [pixel] 0.000 [mm]	0.108 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000



The correlation between camera internal parameters determined by the bundle adjustment. White indicates a full correlation between the parameters, ie. any change in one can be fully compensated by the other. Black indicates that the parameter is completely independent, and is not affected by other parameters.

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to the see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.

2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	77468	31148
Min	38801	1135
Max	92447	54021
Mean	74266	28781

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	1425084

In 3 Images	478813
In 4 Images	234673
In 5 Images	134936
In 6 Images	84785
In 7 Images	56937
In 8 Images	39935
In 9 Images	28202
In 10 Images	21347
In 11 Images	15644
In 12 Images	10699
In 13 Images	6559
In 14 Images	3691
In 15 Images	1888
In 16 Images	964
In 17 Images	463
In 18 Images	185
In 19 Images	53
In 20 Images	9

2D Keypoint Matches

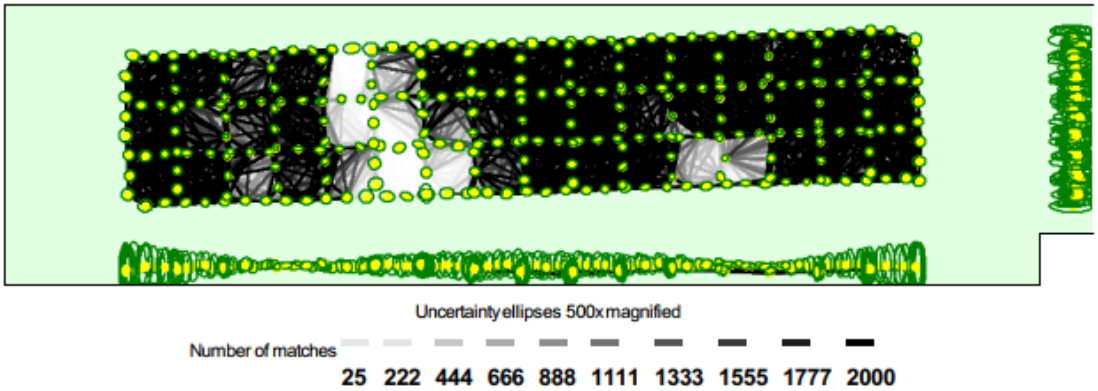


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.027	0.023	0.059	0.007	0.012	0.003
Sigma	0.005	0.005	0.031	0.002	0.005	0.001

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
M01 (3D)	0.020/ 0.020	0.003	-0.003	-0.003	0.651	14 / 14
M02 (3D)	0.020/ 0.020	-0.004	0.001	0.004	0.630	15 / 15
M05 (3D)	0.020/ 0.020	-0.000	0.008	-0.006	0.548	17 / 17
M07 (3D)	0.020/ 0.020	0.004	-0.008	0.007	0.684	13 / 13
M10 (3D)	0.020/ 0.020	0.005	0.002	0.007	0.762	14 / 14

M11 (3D)	0.020/ 0.020	-0.009	-0.000	-0.013	0.429	11 / 11
Mean [m]		-0.000174	-0.000140	-0.000551		
Sigma [m]		0.005086	0.004898	0.007405		
RMS Error [m]		0.005089	0.004900	0.007425		

0 out of 4 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
M03		0.0467	0.0563	0.0309	0.4497	12 / 12
M06		0.0216	0.0254	0.0184	0.6974	13 / 13
M08		0.0007	-0.0004	-0.1093	0.5297	15 / 15
M09		0.0095	0.0069	-0.0423	0.6574	12 / 12
Mean [m]		0.019654	0.022034	-0.025554		
Sigma [m]		0.017305	0.021915	0.055695		
RMS Error [m]		0.026187	0.031077	0.061278		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Absolute Geolocation Variance

Mn Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-9.45	0.00	0.00	0.00
-9.45	-7.56	0.00	0.00	0.00
-7.56	-5.67	0.00	0.00	0.00
-5.67	-3.78	0.00	0.00	0.00
-3.78	-1.89	0.00	0.00	0.00
-1.89	0.00	44.84	43.77	45.91
0.00	1.89	55.16	56.23	54.09
1.89	3.78	0.00	0.00	0.00
3.78	5.67	0.00	0.00	0.00
5.67	7.56	0.00	0.00	0.00
7.56	9.45	0.00	0.00	0.00
9.45	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		0.036246	-0.265877	0.488118
Sigma [m]		0.447762	0.623742	0.681326
RMS Error [m]		0.449227	0.678044	0.838132

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	0.030484	-0.276714	0.474497

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	2.831499	2.831499	4.627129
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.138255	0.138255	0.251679

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	4.383
Phi	4.493
Kappa	16.627

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz RAM: 32GB GPU: NVIDIA NVS 810 (Driver: 23.21.13.9133), NVIDIA NVS 810 (Driver: 23.21.13.9133)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS 84 / UTM zone 22S
Output Coordinate System	WGS 84 / UTM zone 22S

Processing Options

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	02h:30m:48s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	16m:29s

Results

Number of Processed Clusters	2

Number of Generated Tiles	10
Number of 3D Densified Points	180576666
Average Density (per m^3)	73.42

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (5.16 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Raster DTM	Generated: yes Merge Tiles: yes
DTM Resolution	5 x GSD (5.16 [cm/pixel])
Time for DSM Generation	01h:14m:54s
Time for Orthomosaic Generation	36m:43s
Time for DTM Generation	14m:19s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

APÊNDICE L – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DO VOO AEROFOTOGRAMÉTRICO DA ÁREA 2 COM PPK CLASSIFICADO COMO PEC CLASSE A NA ESCALA 1/300

Quality Report

Generated with Pix4Dmapper version 4.5.6

Important: Click on the different icons for:

Help to analyze the results in the Quality Report

Additional information about the sections

Click here for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	Processamento_Xuca_PPK
Processed	2021-03-02 18:12:21
Camera Model Name(s)	S.O.D.A._10.6_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	5.55 cm / 2.18 in
Area Covered	1.802 km^2 / 180.2138 ha / 0.70 sq. mi. / 445.5484 acres
Time for Initial Processing (without report)	27m:10s

Quality Check

Images	median of 75049 keypoints per image	✓
Dataset	264 out of 282 images calibrated (93%), all images enabled	⚠
Camera Optimization	0.11% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 17262.8 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

Preview

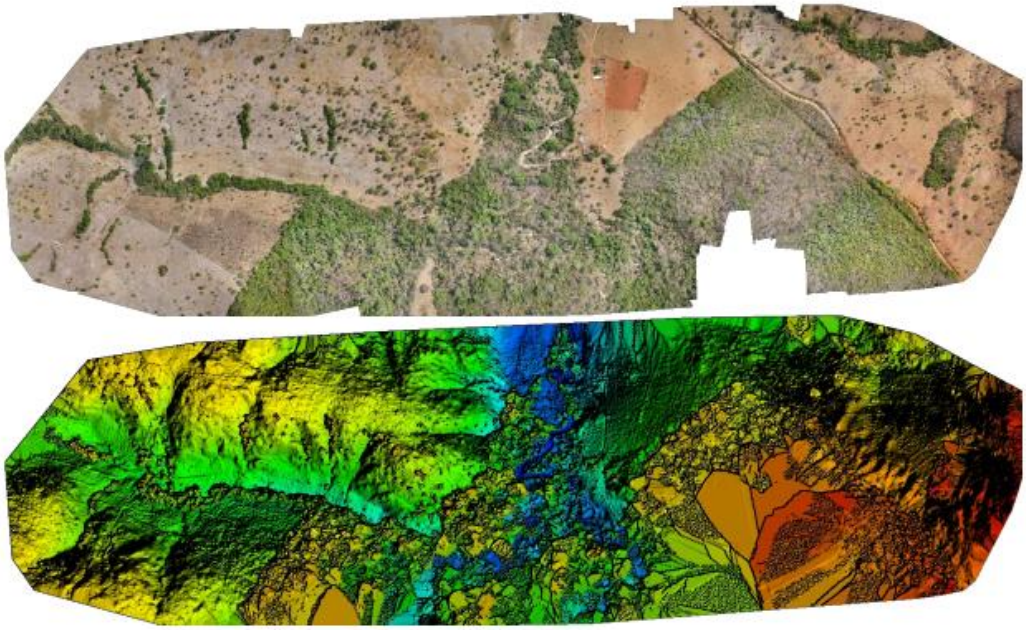


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	264 out of 282
Number of Geolocated Images	282 out of 282

Initial Image Positions

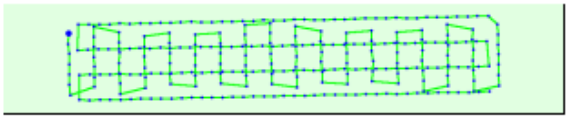
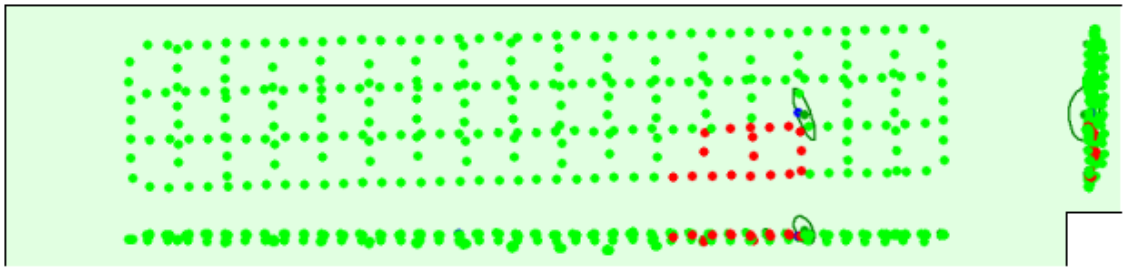


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



Uncertainty ellipses 1000x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Red dots indicate disabled or uncalibrated images. Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Absolute camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.007	0.007	0.007	0.002	0.002	0.002
Sigma	0.002	0.004	0.003	0.001	0.001	0.001

Overlap

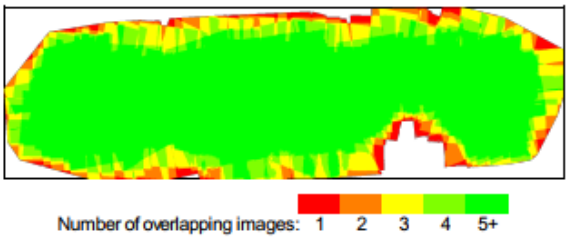


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic.
Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	4561883

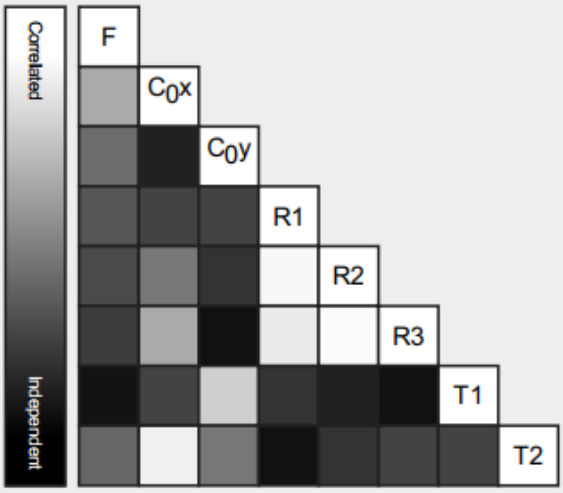
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	1654643
Mean Reprojection Error [pixels]	0.173

Internal Camera Parameters

S.O.D.A._10.6_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 13.132 [mm] x 8.754 [mm]

EXIF ID: S.O.D.A._10.6_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4417.020 [pixel] 10.600 [mm]	2736.000 [pixel] 6.566 [mm]	1824.000 [pixel] 4.377 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	4411.918 [pixel] 10.588 [mm]	2681.711 [pixel] 6.436 [mm]	1800.677 [pixel] 4.321 [mm]	0.025	-0.176	0.263	-0.001	-0.002
Uncertainties (Sigma)	0.132 [pixel] 0.000 [mm]	0.097 [pixel] 0.000 [mm]	0.086 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000



The correlation between camera internal parameters determined by the bundle adjustment. White indicates a full correlation between the parameters, ie. any change in one can be fully compensated by the other. Black indicates that the parameter is completely independent, and is not affected by other parameters.

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to the see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.

2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	75049	17263
Min	42427	356
Max	85184	36487
Mean	71243	17280

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	1099700
In 3 Images	289965
In 4 Images	117659
In 5 Images	55161
In 6 Images	30948
In 7 Images	19362

In 8 Images	12552
In 9 Images	8830
In 10 Images	6261
In 11 Images	4371
In 12 Images	3088
In 13 Images	2393
In 14 Images	1702
In 15 Images	1217
In 16 Images	741
In 17 Images	395
In 18 Images	191
In 19 Images	70
In 20 Images	21
In 21 Images	11
In 22 Images	5

2D Keypoint Matches

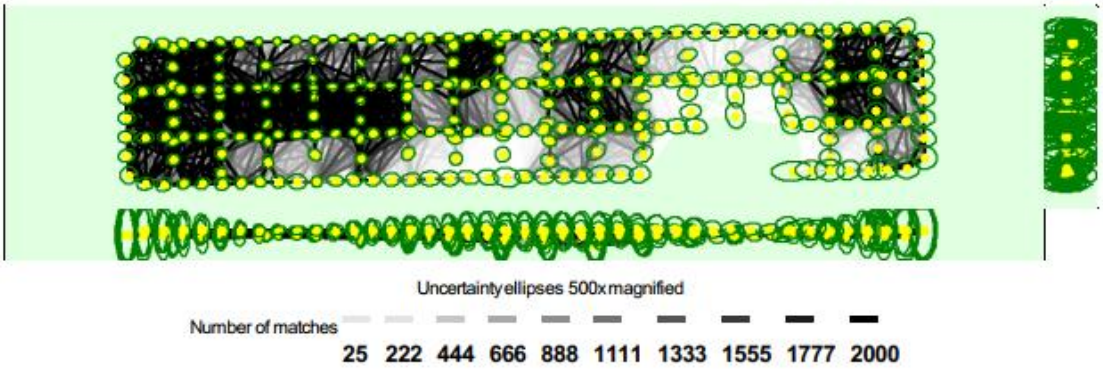


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.046	0.037	0.085	0.009	0.016	0.005
Sigma	0.013	0.011	0.038	0.003	0.006	0.002

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-0.09	0.00	0.00	0.00
-0.09	-0.07	0.00	0.00	0.38
-0.07	-0.05	0.00	0.00	1.90
-0.05	-0.04	0.38	0.00	8.37
-0.04	-0.02	1.14	1.52	15.59
-0.02	0.00	47.53	47.15	25.10
0.00	0.02	50.19	50.57	19.39
0.02	0.04	0.76	0.76	11.03
0.04	0.05	0.00	0.00	11.41

0.05	0.07	0.00	0.00	4.56
0.07	0.09	0.00	0.00	1.52
0.09	-	0.00	0.00	0.76
Mean [m]		-0.000102	-0.000065	0.003022
Sigma [m]		0.007425	0.007802	0.032640
RMS Error [m]		0.007426	0.007802	0.032779

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	98.10	96.58	68.44
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	98.10
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	0.017893	0.017893	0.037661
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.001808	0.001808	0.006549

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	4.119
Phi	4.105
Kappa	9.846

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz RAM: 32GB GPU: NVIDIA NVS 810 (Driver: 23.21.13.9133), NVIDIA NVS 810 (Driver: 23.21.13.9133)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84
Output Coordinate System	WGS 84 / UTM zone 22S

Processing Options

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	01h:43m:39s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	15m:09s

Results

Number of Processed Clusters	3
Number of Generated Tiles	8
Number of 3D Densified Points	151652602
Average Density (per m^3)	50.11

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (5.55 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Raster DTM	Generated: yes Merge Tiles: yes
DTM Resolution	5 x GSD (5.55 [cm/pixel])
Time for DSM Generation	01h:04m:32s
Time for Orthomosaic Generation	34m:37s
Time for DTM Generation	15m:47s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

APÊNDICE M – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DO VOO AEROFOTOGRAMÉTRICO DA ÁREA DE TESTE COM GCP CLASSIFICADO COMO PEC CLASSE A NA ESCALA 1/200

Quality Report

Generated with Pix4Dmapper version 4.5.6

Important: Click on the different icons for:

Help to analyze the results in the Quality Report

Additional information about the sections

Click here for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	Processamento_GCP_Serra_Dourada
Processed	2021-03-18 00:56:36
Camera Model Name(s)	S.O.D.A._10.6_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	8.96 cm / 3.53 in
Area Covered	3.837 km^2 / 383.7061 ha / 1.48 sq. mi. / 948.6492 acres

Quality Check

Images	median of 83691 keypoints per image	✓
Dataset	204 out of 204 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	0.69% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 26483 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, 4 GCPs (4 3D), mean RMS error = 0.018 m	✓

Preview

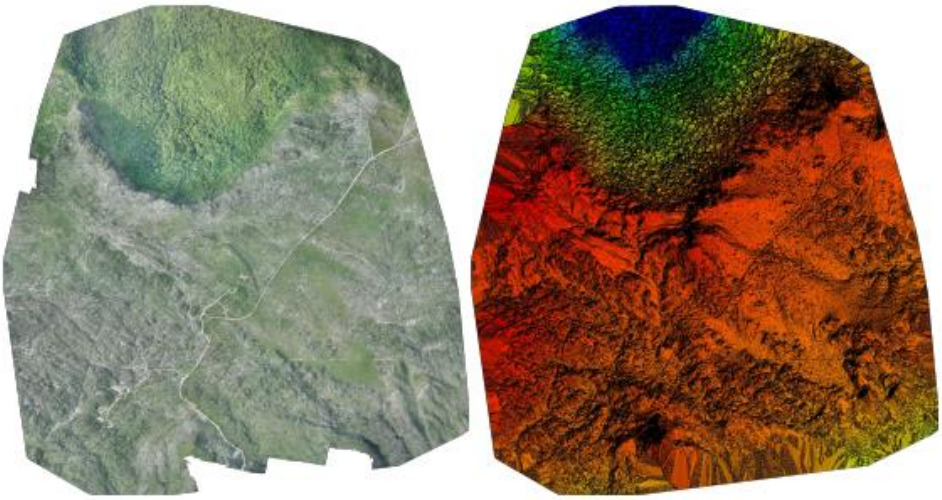


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	204 out of 204
Number of Geolocated Images	204 out of 204

Initial Image Positions

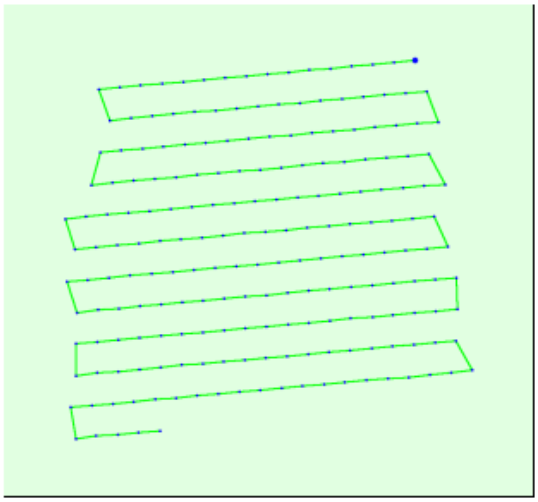
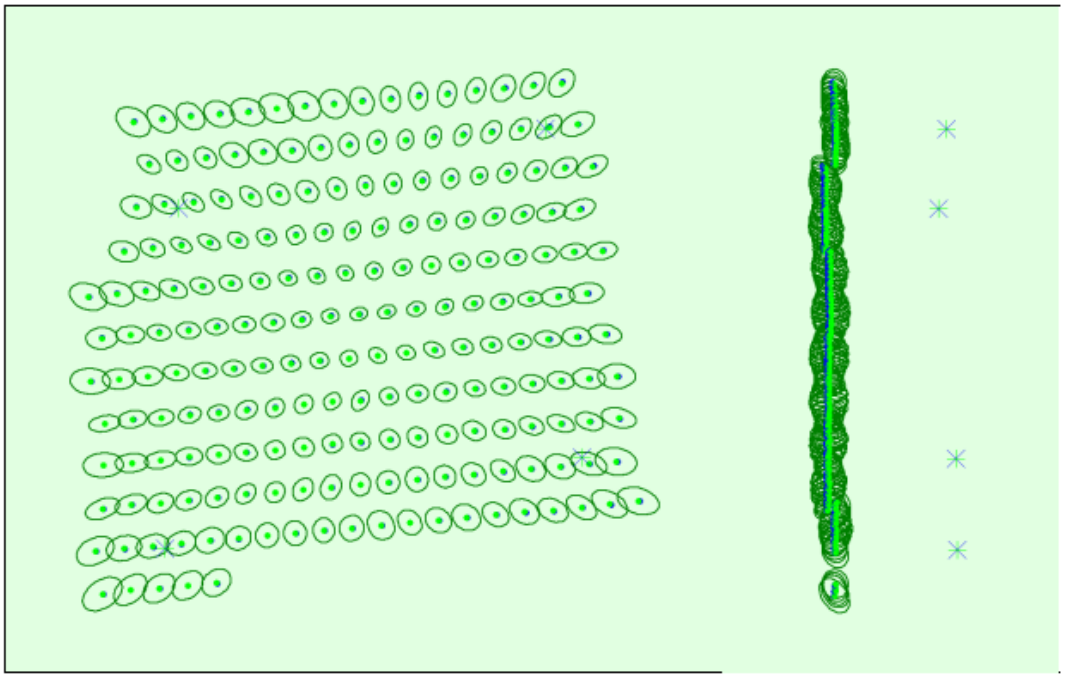
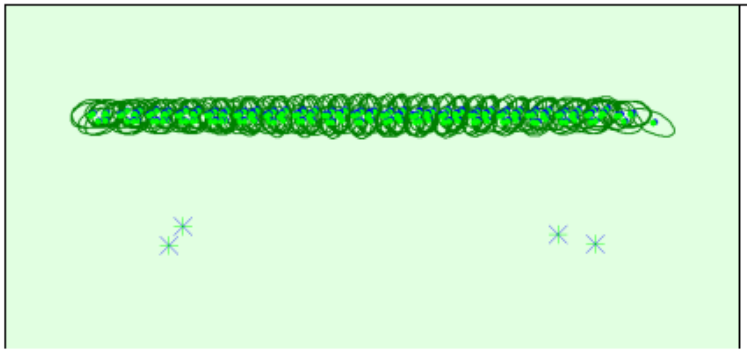


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions





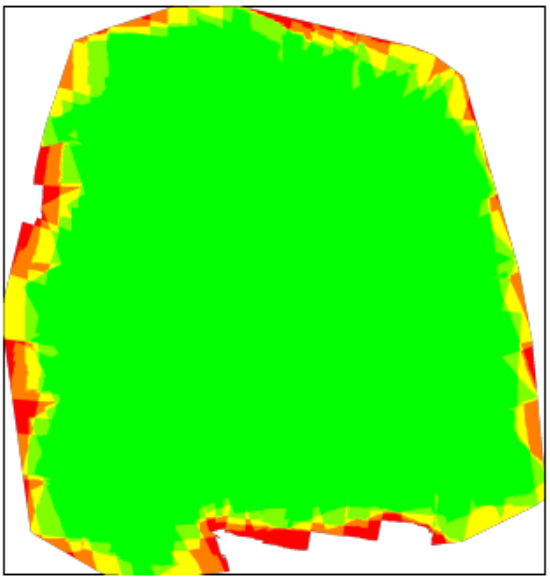
Uncertainty ellipses 1000x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Absolute camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.040	0.033	0.048	0.005	0.006	0.002
Sigma	0.009	0.007	0.007	0.001	0.001	0.001

Overlap



Number of overlapping images: 1 2 3 4 5+

Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic.
Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	5325859
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	2110225

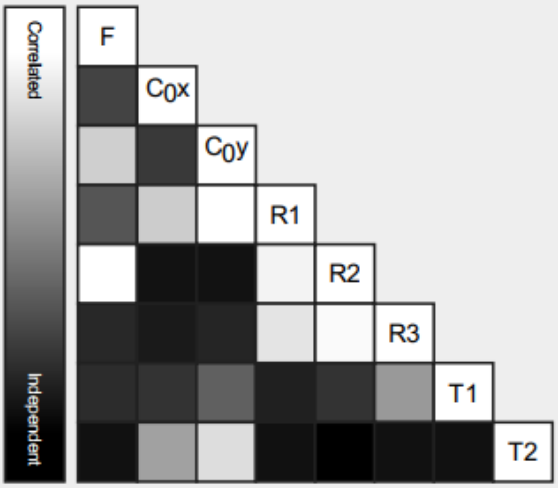
Mean Reprojection Error [pixels]	0.144

Internal Camera Parameters

S.O.D.A._10.6_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 13.132 [mm] x 8.754 [mm]

EXIF ID: S.O.D.A._10.6_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4417.020 [pixel] 10.600 [mm]	2736.000 [pixel] 6.566 [mm]	1824.000 [pixel] 4.377 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	4386.484 [pixel] 10.527 [mm]	2683.009 [pixel] 6.439 [mm]	1807.736 [pixel] 4.338 [mm]	0.022	-0.169	0.251	-0.001	-0.002
Uncertainties (Sigma)	0.411 [pixel] 0.001 [mm]	0.094 [pixel] 0.000 [mm]	0.130 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000



The correlation between camera internal parameters determined by the bundle adjustment. White indicates a full correlation between the parameters, ie. any change in one can be fully compensated by the other. Black indicates that the parameter is completely independent, and is not affected by other parameters.

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to the see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.

2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	83691	26483
Min	78445	11034
Max	88377	40937
Mean	83738	26107

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	1561657
In 3 Images	314589
In 4 Images	106539
In 5 Images	50017
In 6 Images	28910
In 7 Images	18142
In 8 Images	11714

In 9 Images	7931
In 10 Images	5004
In 11 Images	3130
In 12 Images	1580
In 13 Images	684
In 14 Images	262
In 15 Images	54
In 16 Images	12

2D Keypoint Matches

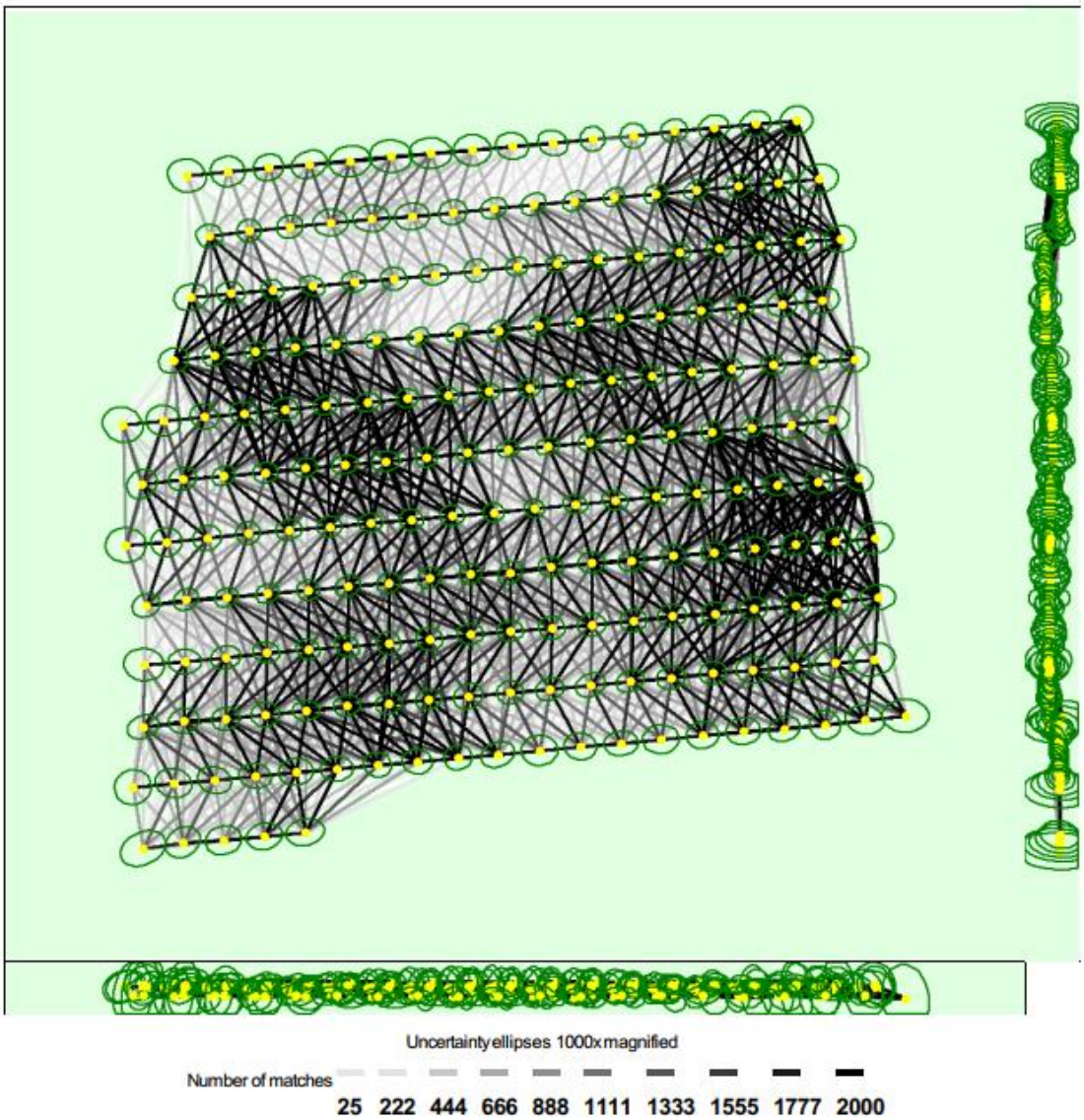


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.032	0.027	0.030	0.006	0.007	0.002
Sigma	0.006	0.005	0.015	0.002	0.003	0.001

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
3 (3D)	0.020/ 0.020	-0.005	0.008	0.039	0.524	9 / 9
5 (3D)	0.020/ 0.020	0.002	-0.002	-0.060	0.504	6 / 6
7 (3D)	0.020/ 0.020	-0.008	-0.005	0.042	0.680	9 / 9
8 (3D)	0.020/ 0.020	0.007	0.003	-0.031	0.702	11 / 11
Mean [m]		-0.001108	0.001198	-0.002438		
Sigma [m]		0.006098	0.004921	0.044235		
RMS Error [m]		0.006198	0.005065	0.044302		

0 out of 4 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
1		0.0259	-0.0942	1.8322	0.5387	10 / 10
2		0.0561	-0.0525	1.2096	0.7384	12 / 12
4		0.0552	-0.0523	1.2279	0.7392	9 / 9
6		0.0534	-0.0786	1.6048	0.5270	13 / 13
Mean [m]		0.047664	-0.069396	1.468644		
Sigma [m]		0.012594	0.017887	0.262580		
RMS Error [m]		0.049299	0.071665	1.491933		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Absolute Geolocation Variance

Mn Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-7.56	0.00	0.00	0.00
-7.56	-6.05	0.00	0.00	0.00
-6.05	-4.54	0.00	0.00	0.00
-4.54	-3.02	0.00	0.00	0.00
-3.02	-1.51	0.49	6.86	4.90
-1.51	0.00	50.00	40.69	40.20
0.00	1.51	48.04	40.69	54.90
1.51	3.02	1.47	11.76	0.00
3.02	4.54	0.00	0.00	0.00
4.54	6.05	0.00	0.00	0.00
6.05	7.56	0.00	0.00	0.00
7.56	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		1.596376	0.791123	4.347790
Sigma [m]		0.817615	1.079153	0.861368
RMS Error [m]		1.793575	1.338076	4.432294

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	1.597498	0.725457	4.365108

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	2.980728	2.980728	4.262977
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.210306	0.210306	0.251964

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	3.691
Phi	2.633
Kappa	12.917

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz RAM: 32GB GPU: NVIDIA NVS 810 (Driver: 23.21.13.9133), NVIDIA NVS 810 (Driver: 23.21.13.9133)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS 84 / UTM zone 22S
Output Coordinate System	WGS 84 / UTM zone 22S

Processing Options

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no

LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	01h:22m:05s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	23m:36s

Results

Number of Generated Tiles	5
Number of 3D Densified Points	127409006
Average Density (per m^3)	9.88

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (8.96 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Raster DTM	Generated: yes Merge Tiles: yes
DTM Resolution	5 x GSD (8.96 [cm/pixel])
Time for DSM Generation	59m:04s
Time for Orthomosaic Generation	18m:55s
Time for DTM Generation	09m:23s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s