



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



PAULO HENRIQUE COSTA BORGES

**USO DE RPA COMO FERRAMENTA AUXILIAR NA
INSPEÇÃO DE SEGURANÇA VIÁRIA: AVALIAÇÃO DO
IMPACTO DE ESCOLHA DOS PARÂMETROS DE VOO**

Uberlândia, 2025

PAULO HENRIQUE COSTA BORGES

**USO DE RPA COMO FERRAMENTA AUXILIAR NA
INSPEÇÃO DE SEGURANÇA VIÁRIA: AVALIAÇÃO DO
IMPACTO DE ESCOLHA DOS PARÂMETROS DE VOO**

Dissertação de mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como
parte dos requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia Urbana –
Geomática

Orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon
Schmidt

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B732u Borges, Paulo Henrique Costa, 1998-
2025 Uso de RPA como ferramenta auxiliar na inspeção de segurança viária
[recurso eletrônico] : avaliação do impacto de escolha dos parâmetros de
voo / Paulo Henrique Costa Borges. - 2025.

Orientador: Marcio Augusto Reolon Schmidt.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5131>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia Civil. I. Schmidt, Marcio Augusto Reolon, 1978-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

André Carlos Francisco
Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/3408



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 316, PPGEC				
Data:	04 de fevereiro de 2025	Hora de início:	14h00	Hora de encerramento:	15h59
Matrícula do Discente:	12222ECV012				
Nome do Discente:	Paulo Henrique Costa Borges				
Título do Trabalho:	Uso de RPA como ferramenta auxiliar na inspeção de segurança viária: avaliação do impacto de escolha dos parâmetros de voo				
Área de concentração:	Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Linha de pesquisa:	Engenharia Urbana				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Análise Espacial Ambiental				

Reuniu-se, em sessão pública na Sala de Projeções da FECIV, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Rodrigo Mikosz Gonçalves - UFPE, Raquel Naiara Fernandes Silva - UFU e Márcio Augusto Reolon Schmidt, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Márcio Augusto Reolon Schmidt, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Augusto Reolon Schmidt, Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/02/2025, às 16:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raquel Naiara Fernandes Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/02/2025, às 10:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Mikosz Gonçalves, Usuário Externo**, em 05/02/2025, às 10:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6042092** e o código CRC **F2F2DC82**.

Referência: Processo nº 23117.004052/2025-18

SEI nº 6042092

Dedico este trabalho aos meus pais e minha avó que sempre estiveram presentes em todos os momentos de minha vida e nunca permitiram que eu desistisse de persistir em meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

A todos que se fizeram presente durante essa caminhada.

Aos meus pais, Dilma Aparecida e Paulo José, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando todas as minhas escolhas e sempre me incentivando a correr atrás de meus próprios sonhos. É por eles, graças a toda batalha, a cada gota de suor derramada, que posso estar aqui hoje, caminhando e buscando novas conquistas.

À minha avó Ildenise Severiana, que assim como meus pais, sempre me ofereceu todo o apoio emocional, as melhores palavras de carinho nos momentos difíceis e que sempre me colocou em suas orações, me abençoando nessa jornada.

Ao meu orientador Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt, por abraçar essa ideia comigo, e mesmo nos momentos mais desafiadores, demonstrar paciência para que juntos, pudéssemos alcançar esse resultado.

A todos os professores, técnicos e colegas que se fizeram presentes nessa trajetória, meu mais profundo agradecimento. Em especial, à equipe do Laboratório de Topografia da Faculdade de Engenharia Civil em Uberlândia, com quem compartilhei medos, angústias, ideias e conhecimento. Mais do que isso, agradeço por acreditarem na força da pesquisa científica em nosso país. Vocês mantêm viva a chama da ciência e da academia, e por isso, minha eterna gratidão!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por viabilizar o desenvolvimento desta pesquisa e contribuir para o avanço do conhecimento.

Por fim, às amigas e às pessoas mais que especiais que fazem parte de minha vida e guardo em meu coração, meu muito obrigado. Por estarem comigo nos levantamentos de campo, pela companhia nos momentos de escrita, pelos desabafos nos momentos de medo e angústia e por serem minha rede de apoio incondicional. Vocês são parte essencial desta etapa marcante em minha vida pessoal e acadêmica.

Meu mais sincero obrigado a todos!

RESUMO

No Brasil, o modal rodoviário é o principal responsável no transporte de cargas e de passageiros. Apesar de seu papel central, sua infraestrutura ainda apresenta deficiências significativas que comprometem sua eficiência e sobretudo sua segurança. A alta demanda aliada à baixa oferta, resulta em desgaste acentuado das vias, maiores custos operacionais e aumento dos índices de sinistros de trânsito. Apesar do país adotar medidas em suma corretivas, estudos apontam que a adoção de medidas preventivas, como as Inspeções de Segurança Viária (ISV), é capaz de gerar resultados mais satisfatórios, especialmente em relação à economia de recursos. Com os constantes avanços em tecnologia, novas ferramentas, como as Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) podem ser agregadas às metodologias tradicionais de inspeção *in loco*, simplificando o processo por meio da redução de tempo em levantamentos e diminuindo a subjetividade das análises, buscando técnicas cada vez mais automatizadas. Partindo disto, este trabalho possui como objetivo avaliar os efeitos da escolha de parâmetros de voo sobre os produtos do processamento de imagens, voltado para procedimentos de ISV com foco na avaliação da sinalização horizontal de trânsito. Foram realizados três estudos de caso em três trechos das vias internas do campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, utilizando um RPA modelo Phantom 4 RTK, seguindo os princípios de um planejamento fatorial fracionário em dois níveis para 4 variáveis independentes. A partir das análises estatísticas, os efeitos das variáveis altura de voo e uso de RTK foram classificados como significativos. A modelagem por regressão linear múltipla resultou em um modelo completo e um modelo reduzido, com valores desempenho como R (0,962 e 0,938), R^2 (0,925 e 0,880), R^2 ajustado (0,826 e 0,832), p-valor (0,049 e 0,005) e erro padrão (2,204 e 2,164). Tais valores indicam forte correlação entre as variáveis e sugerem boa precisão preditiva dos modelos, os quais foram validados pela análise gráfica dos resíduos, que apresentaram boa distribuição em relação à normal e dispersão equilibrada em torno do eixo zero.

Palavras-chave: modal rodoviário; inspeção de segurança viária; manutenção; RPA; parâmetros de voo.

ABSTRACT

In Brazil, roads are the main mode of transport for freight and passengers. Despite its central role, its infrastructure still has significant deficiencies that compromise its efficiency and, above all, its safety. High demand combined with low supply results in heavy wear and tear on roads, higher operating costs and an increase in traffic accident rates. Although the country adopts mostly corrective measures, studies show that the adoption of preventive measures, such as Road Safety Inspections (ISV), is capable of generating more satisfactory results, especially in terms of saving resources. With constant advances in technology, new tools such as Remotely Piloted Aircraft (RPAs) can be added to traditional on-site inspection methodologies, simplifying the process by reducing survey time and reducing the subjectivity of analysis, seeking increasingly automated techniques. With this in mind, the aim of this study is to evaluate the effects of the choice of flight parameters on the products of image processing, aimed at ISV procedures with a focus on the evaluation of horizontal traffic signs. Three case studies were carried out on three sections of the internal roads of the Santa Monica campus of the Federal University of Uberlândia, using an RPA model Phantom 4 RTK, following the principles of a two-level fractional factorial design for 4 independent variables. Based on the statistical analyses, the effects of the flight height and RTK use variables were classified as significant. Multiple linear regression modeling resulted in a full model and a reduced model, with performance values such as R (0.962 and 0.938), R^2 (0.925 and 0.880), adjusted R^2 (0.826 and 0.832), p -value (0.049 and 0.005) and standard error (2.204 and 2.164). These values indicate a strong correlation between the variables and suggest good predictive accuracy of the models, which were validated by the graphical analysis of the residuals, which showed a good distribution in relation to the normal and a balanced dispersion around the zero axis.

Keywords: road modal; road safety inspection; maintenance; RPA; flight parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Malha rodoviária brasileira	14
Figura 2 - Diagrama de medidas corretivas e preventivas.....	25
Figura 3 - Esquema metodológico de uma ISV.....	27
Figura 4 - Modelos de aeronaves: asa fixa (a), asa rotativa (b) e asa híbrida (c)	29
Figura 5 - Tipos de ângulo de captura de imagens com RPA	34
Figura 6 - Sobreposições lateral e longitudinal (frontal).....	34
Figura 7 - Fluxograma metodológico	43
Figura 8 - Mapa da Universidade Federal de Uberlândia.....	45
Figura 9 - Delimitação das áreas de teste	46
Figura 10 - Áreas experimentais.....	48
Figura 11 - DJI Phantom 4 RTK e rádio controle SDK	50
Figura 12 - Esquema de combinações das variáveis experimentais.....	57
Figura 13 - Efeito domo ocorrido no processamento do Experimento 7 (Bloco 1H)	71
Figura 14 - Relatório posicional dos pontos de amarração (Experimento 7 - Bloco 1H)	72
Figura 15 - Identificação dos elementos a serem medidos.....	73
Figura 16 - Efeito da copada das árvores sobre o processamento	95
Figura 17 - Passagem de veículos durante a execução dos levantamentos	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resumo das características - Extensão total	16
Gráfico 2 - Gráficos de resíduos do modelo completo referente ao erro médio da largura para o Bloco 1Y	89
Gráfico 3 - Gráficos de resíduos do modelo reduzido referente ao erro médio da largura para o Bloco 1Y	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planejamento fatorial completo em dois níveis (2^k).....	54
Tabela 2 - Planejamento fatorial fracionário em dois níveis (2^{k-1}).....	55
Tabela 3 - Resumo do novo planejamento fatorial fracionário em dois níveis (2^{k-1}).....	58
Tabela 4 - Resumo dos parâmetros utilizados nos voos de teste.....	61
Tabela 5 - Estimativas dos planos de voo experimentais	62
Tabela 6 - Resumo da execução dos levantamentos experimentais	63
Tabela 7 - Classificação das imagens dos levantamentos	64
Tabela 8 - Resumo da execução dos levantamentos de repetição	65
Tabela 9 - Classificação das imagens dos levantamentos de repetição	66
Tabela 10 - Resumo dos tempos de processamento	68
Tabela 11 - Erros médios reordenados de acordo com o uso do RTK	70
Tabela 12 - Tabelas de medidas com trena dos elementos de sinalização	75
Tabela 13 - Tabela de medidas digitais de comprimento e largura do Bloco 1Y (por voo).....	76
Tabela 14 - Tabela de medidas digitais de comprimento e largura do Bloco 1H (por voo).....	76
Tabela 15 - Tabela de medidas digitais de comprimento e largura do Bloco 3P (por voo)	77
Tabela 16 - Tabela de erro absoluto de comprimento e largura do Bloco 1Y (por voo).....	78
Tabela 17 - Tabela de erro absoluto de comprimento e largura do Bloco 1H (por voo).....	78
Tabela 18 - Tabela de erro absoluto de comprimento e largura do Bloco 3P (por voo)	79
Tabela 19 - Tabela dos efeitos para erro absoluto médio do Bloco 1Y.....	81
Tabela 20 - Tabela dos efeitos (Bloco 1Y) - sem efeito (2)	81
Tabela 21 - Tabela de efeitos significativos para erro médio total (Bloco 1Y).....	82
Tabela 22 - Tabela de efeitos significativos para erro médio total (Bloco 1H).....	82
Tabela 23 - Tabela de efeitos significativos para erro médio total (Bloco 3P)	82
Tabela 24 - Tabela de efeitos significativos para erro médio de comprimento (Bloco 1Y).....	83
Tabela 25 - Tabela de efeitos significativos para erro médio de comprimento (Bloco 1H).....	83
Tabela 26 - Tabela de efeitos significativos para erro médio de comprimento (Bloco 3P)	83
Tabela 27 - Tabela de efeitos significativos para erro médio de largura (Bloco 1Y).....	84
Tabela 28 - Tabela de efeitos significativos para erro médio de largura (Bloco 1H).....	84
Tabela 29 - Tabela de efeitos significativos para erro médio de largura (Bloco 3P)	84
Tabela 30 - Resultado da regressão para o modelo completo	90
Tabela 31 - Resultado da regressão para o modelo reduzido	91

Tabela 32 - Resumo das aparições de cada variável como significativa nas análises.....	93
Tabela 33 - Padrão de exatidão cartográfica planimétrica dos produtos cartográficos digitais	93
Tabela 34 - Classificação PEC-PCD para as medidas de comprimento	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Regras vigentes e órgãos brasileiros	30
Quadro 2 - Resumo de trabalhos e países.....	36
Quadro 3 - Resumo dos voos de teste	47
Quadro 4 - Resumo dos parâmetros de acordo com a revisão bibliográfica	49
Quadro 5 - Modos de operação e distância de sinal base D-RTK 2	52
Quadro 6 - Níveis das variáveis do planejamento	54
Quadro 7 - Níveis das variáveis do planejamento atualizadas	56
Quadro 8 - Resumo dos níveis das variáveis de teste.....	60
Quadro 9 - Padrão de nitidez das imagens experimentais	69
Quadro 10 - Codificação dos elementos a serem medidos	74
Quadro 11 - Resumo dos efeitos significativos	85
Quadro 12 - Resumo estatístico de regressão múltipla para o Bloco 1Y	87
Quadro 13 - Resumo estatístico de regressão múltipla para o Bloco 1H	88
Quadro 14 - Resumo estatístico de regressão múltipla para o Bloco 3P	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASV	Auditoria de Segurança Viária
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DENER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IA	Inteligência Artificial
ISV	Inspeção de Segurança Viária
LV	Lista de Verificação
PIARC	<i>Permanent International Association of Road Congresses</i>
PNATRANS	Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito
PNL	Plano Nacional de Logística
RPA	<i>Remotely Aircraft System</i> (Aeronave Remotamente Pilotada)
SEST	Serviço Social do Transporte
SENAT	Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte

SUMÁRIO

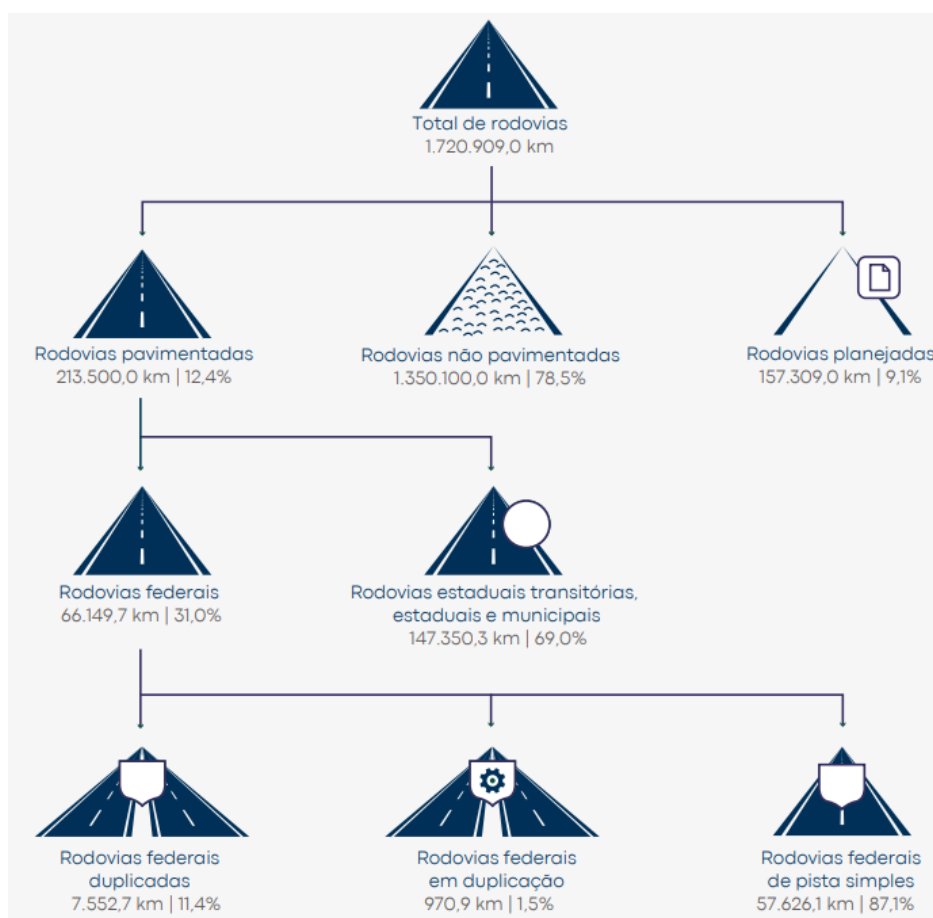
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	20
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	20
1.2	JUSTIFICATIVA	20
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2	REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	23
2.1	SEGURANÇA VIÁRIA.....	23
2.1.1	<i>Modal rodoviário no Brasil.....</i>	23
2.1.2	<i>Procedimentos de segurança viária</i>	24
2.1.3	<i>Auditorias e Inspeções de Segurança Viária (ASV e ISV).....</i>	25
2.2	AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (RPAS)	28
2.2.1	<i>Conceitos e classificação</i>	28
2.2.2	<i>Normas e regulamentação.....</i>	30
2.2.3	<i>Fotogrametria por meio de RPAs.....</i>	32
2.2.4	<i>Revisão sistemática do uso de RPA na engenharia.....</i>	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	44
3.2	LEVANTAMENTO DE CAMPO	49
3.2.1	<i>Critérios de escolha dos parâmetros.....</i>	49
3.2.2	<i>Identificação dos equipamentos utilizados.....</i>	50
3.2.3	<i>Planejamento de experimentos.....</i>	52
3.2.4	<i>Plano de voo e lançamento das missões.....</i>	58
3.2.5	<i>Processamento dos dados.....</i>	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1	CÁLCULOS ESTATÍSTICOS E ANÁLISE DE ERROS.....	72
4.1.1	<i>Medidas de sinalizações e cálculo dos erros</i>	72
4.1.2	<i>Modelo estatístico para Planejamento Fatorial Fracionário</i>	79
5	CONCLUSÕES.....	97
	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	100
	APÊNDICE A – RESUMO GERAL DOS LEVANTAMENTOS EXPERIMENTAIS.109	

1 INTRODUÇÃO

Na matriz de transportes brasileira, de acordo com o Plano Nacional de Logística (PNL) 2025, o modal rodoviário representa o principal e mais utilizado meio para o transporte de cargas e passageiros. Ele é responsável por 65% da movimentação de cargas, representando um total de 1.548 bilhões de toneladas por quilometro (TKU), distribuídos em uma malha federal de 76,4 mil quilômetros dos quais 64,2 mil são pavimentados.

Historicamente, segundo Balduino e Pontes (2021), o modal rodoviário surge no cenário brasileiro de transportes entre os séculos XIX e XX sob forte influência do desenvolvimento em infraestrutura dos Estados Unidos. Mas conforme Schneider (2021) é durante os governos de Getúlio Vargas e Juscelino Kubstchek que o modal sofre um efeito catalisador e se torna o principal meio de transporte no país. Atualmente, de acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias 2024, como mostra a Figura 1, a malha rodoviária brasileira possui uma extensão de mais de 1,72 milhões de quilômetros, dos quais apenas 12,4% são pavimentadas.

Figura 1 – Porcentagens atuais da malha rodoviária brasileira.



Fonte: CNT, SEST, SENAT (2024).

O Brasil registra um constante aumento no número de veículos em circulação (IBGE, 2022), que em comparação à densidade de sua malha rodoviária (CNT, SEST, SENAT, 2024), representa alta demanda de suas rodovias. De acordo com dados do IBGE, no ano de 2022, houve um aumento de aproximadamente 51,19% da frota de veículos em relação ao ano de 2012, enquanto dados do DNIT (2013) apontam que, no ano de 2012, a malha rodoviária pavimentada brasileira era de 202.988,10 km, que em comparação com o ano de 2022 representa um aumento de aproximadamente 5,18%. Fica evidente que, dentro da complexa matriz de transportes brasileira, o sistema rodoviário assume o posto de mais utilizado no que se diz respeito à movimentação de cargas e passageiros. A alta e crescente demanda das vias implicam na exigência da implementação de procedimentos tanto corretivos quanto preventivos, a fim de assegurar a segurança e conforto adequados para todos os seus usuários.

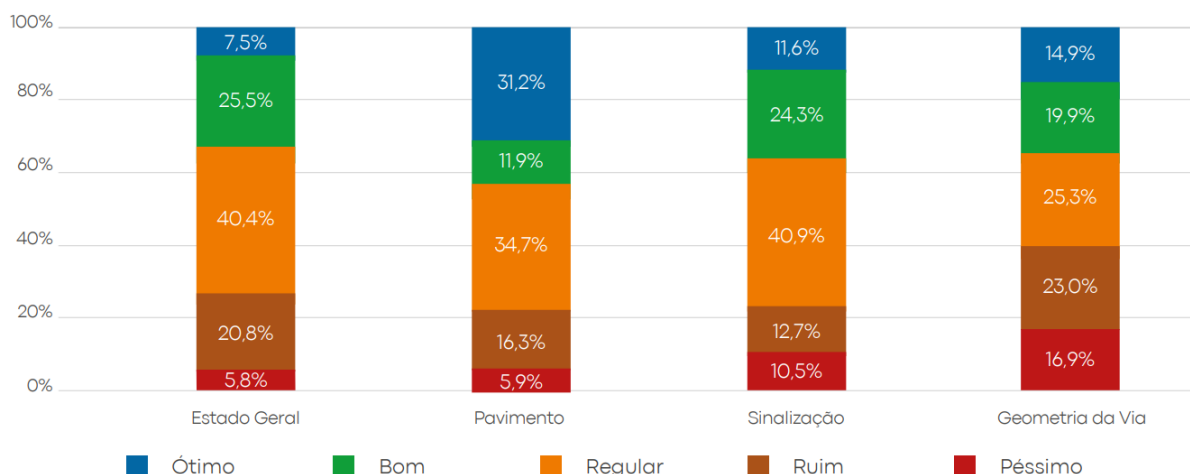
Ainda de acordo com CNT (2024), a baixa extensão de rodovias pavimentadas, apresenta um impacto negativo nas condições de segurança, desempenho e conforto dos usuários, que representa desgaste acentuado dos veículos e aumento considerável nos tempos de viagem. Além disso, o transporte rodoviário é responsável pela oferta de serviços e participação na produção de riquezas em todos os setores de atividade econômica que consequentemente apresenta considerável influência de acordo com seu desempenho (Moreira et al., 2019).

O Plano Nacional de Logística e Transporte (CNT, 2018), diz que a partir de um estudo realizado pelo Fórum Econômico Mundial, com 137 países, o Brasil está classificado no 65º lugar quanto a infraestrutura de transportes, estando a qualidade das estradas em 103º lugar. Apesar de seu protagonismo, o modal rodoviário apresenta em infraestrutura, problemas decorrentes de deficiências no planejamento, execução e manutenção de suas vias e evidentemente em seu pavimento, sinalização e geometria (CNT, 2018). Segundo o DNIT (2006) a solicitação intensa de tráfego, juntamente com a idade dos pavimentos, constitui a grande problemática dentro do modal.

Como resultado dessa demanda, torna-se necessária a realização de manutenções frequentes para garantir a segurança adequada das vias. Conforme mostra o Gráfico 1, de acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias (2024), quanto ao estado geral de conservação das rodovias brasileiras, 40,4% apresentaram classificação regular, 20,8% classificação ruim e 5,8% classificação péssima, mantendo comportamento semelhante de classificação quanto ao estado do pavimento, sinalização e geometria da via. Para isso podem ser adotadas medidas de segurança, dentre as quais se destacam medidas corretivas, como a determinação de pontos

críticos, e preventivas, como a Auditoria de Segurança Viária (ASV), que em rodovias ativas, também é conhecida como Inspeção de Segurança Viária (ISV).

Gráfico 1 - Resumo das características - Extensão total



Fonte: CNT, SEST, SENAT (2024).

Os conceitos de ASV e ISV não são definidos de forma consensual, podendo ser apresentados de forma separada, como definido por ASTROADS (2019), mas também como parte integrante um do outro, como definido por PIARC (2007). Ribeiro e Andrade (2021), mostram que alguns manuais consideram a ISV como uma etapa da ASV ou como um tipo específico de auditoria enquanto outros indicam como uma atividade específica e independente. Entretanto, ambos os procedimentos, assim como afirmam os autores, tratam de uma verificação técnica, sistemática e periódica com a finalidade de levantar características, defeitos e dados operacionais que possam requerer medidas de manutenção ou alterações definitivas por razões de segurança.

No Brasil, ainda são adotadas medidas em suma corretivas, ou seja, procedimentos de manutenção que ocorrem após a incidência de problemas de segurança, no caso, sinistros de trânsito. Segundo Lopes e Martinez Filho (2010), a ASV ainda não é adotada sistematicamente como processo formal pelos órgãos gestores de trânsito, estando restrita a auditorias voluntárias incluídas nos editais para contratação de alguns projetos e obras, além de iniciativas realizadas por concessionárias que operam rodovias brasileiras.

A falta da difusão dos procedimentos de ISV no Brasil é um reflexo da preocupante abordagem corretiva e não preventiva na manutenção de sua malha rodoviária, abordagem essa que prioriza a resposta a acidentes e que geram implicações significativas no aumento com gastos relacionados aos mesmos. A adoção de medidas corretivas influencia também no fato de

que ainda não são disseminados no país um conjunto normativo que estabeleça especificamente as diretrizes dos procedimentos de uma ASV ou ISV. De acordo com Silva e Fontana (2016), são principalmente adotadas metodologias de países estrangeiros, dos quais pode ser destacado os procedimentos realizados na Austrália (AUSTROADS, 2002).

A priorização de medidas preventivas, como a realização de ASV e ISV, é um componente importante na redução de acidentes, que podem não apenas salvar vidas, mas também reduzir significativamente os custos associados (Silva e Fontana, 2016). Sendo assim, é necessário promover a realização de práticas de inspeções que possam agir diretamente na identificação antecipada de pontos críticos nas estradas, que impactam em seu funcionamento, com a finalidade de implementar medidas corretivas antes da ocorrência de possíveis tragédias.

Para fomentar a prática da ASV e ISV de forma imparcial, ou seja, sem o envolvimento de interpretações pessoais das partes envolvidas, a introdução de novas tecnologias pode tornar os procedimentos mais eficientes e acessíveis. Com a possibilidade de integração de tecnologias, como sistemas de monitoramento semiautomatizados, análise de dados em tempo real além de sistemas de inteligência artificial, uma combinação de análises manuais e informatizadas podem ser geradas, formando um procedimento híbrido a partir da relação homem e máquina, o que permite a identificação de padrões. Essas tecnologias ainda podem ser associadas a sistemas de aprendizado de máquina, como a rede neural YOLOv8, que surge como uma solução promissora na detecção de perigos em estradas, alcançando um equilíbrio entre precisão, velocidade e eficiência de recursos, contribuindo para maior segurança e eficiência na manutenção da infraestrutura rodoviária (Khare et al., 2023).

No contexto de manutenção do sistema de transporte rodoviário brasileiro, é fundamental a busca de procedimentos que tornem mais eficazes e precisas as verificações de campo para subsidiar as ISV/ASV, buscando também a melhoria de seu custo-benefício. Portanto, é necessário aprofundar os conhecimentos e as discussões de aplicações de novas tecnologias dentro dos procedimentos de uma ASV ou ISV. A bibliografia já mostra pesquisas em torno dessa aplicabilidade, como exemplo disso, Ribeiro e Andrade (2021) propõem o uso ambientes virtuais para auditorias e inspeções por meio de filmagens em 360°, gerando um cenário virtual. Porém, essas abordagens esbarram em limitações quanto a carência de normas específicas brasileiras e a constituição de equipes de especialistas para a realização destes trabalhos, já que o país não é adepto à prática de ASV. Apesar disso, as conclusões atingidas evidenciaram a eficiência do método, sendo a realidade virtual ampliada uma ferramenta útil na melhoria das análises dos projetos de segurança viária no Brasil, ressaltando a importância

da exploração de novas tecnologias sem que haja prejuízo na qualidade dos procedimentos tradicionais de segurança viária.

Uma alternativa a ser explorada nesta pesquisa é o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA). Atualmente, as RPAs vêm sendo propagadas dentre vários setores da engenharia, desde seu uso na agricultura como ferramenta para agricultura de precisão (Guebsi et al., 2024), até mesmo dentro da engenharia de transportes no monitoramento de tráfego (Bisio et al., 2022). Novos estudos ainda apontam o uso dessas imagens juntamente com a aplicação de ferramentas de *machine learning* na detecção de avarias em pavimentos asfálticos (Khare et al., 2023). O fato é que em termos técnicos, imagens obtidas de forma remota apresentam um crescente avanço quanto a sua resolução, dando abertura para uma gama de novas funções a serem exploradas.

Em se tratando dos procedimentos de ASV e ISV, os drones podem representar uma poderosa ferramenta, pois são equipados com câmeras de alta resolução, possuem autonomia de voo para cobrir vários quilômetros e podem contribuir, complementando a realização das famosas vistorias *in loco* e transformando o procedimento tradicional em um procedimento mais eficiente, por meio da precisão dos dados levantados, velocidade de análise e consequente facilitação do processo de tomada de decisões, além de seguir a proposta de Ribeiro (2019) buscando garantir a segurança da equipe auditora.

Apesar de pesquisas recentes apontarem para o uso de imagens obtidas por meio de RPAs associadas a algoritmos de *machine learning* na detecção de buracos e trincas em pavimentos asfálticos (Chen et al., 2024), os parâmetros utilizados não são devidamente destacados, ou apresentados de forma que seja compreendida a sua escolha. Sabe-se que parâmetros como altura e velocidade de voo, sobreposição lateral e frontal, além do uso ou não de RTK, são informações básicas a serem discutidas durante a fase de planejamento de voos com drones e suas respectivas escolhas devem ser feitas de modo que o melhor resultado seja garantido, sendo assim, é interessante que se tenha conhecimento do nível de influência de cada um sobre o resultado obtido no pós-processamento das imagens.

Com esse propósito, é crucial a ampliação dos horizontes em torno do conhecimento a respeito do uso de RPAs, juntamente com todos os seus parâmetros e limitações, assim como avaliar cuidadosamente sua aplicação dentro dos procedimentos de ASV e ISV, por meio da identificação das etapas potencialmente promissoras para incorporar esse tipo de tecnologia, proposição de método e avaliação de resultados. Recentes pesquisas, além de abordarem o tema, trazem consigo bons resultados, principalmente no que se diz respeito ao uso das imagens de drones na detecção de buracos e sinalização de vias (Silva et al., 2023).

O emprego das imagens obtidas por meio de RPAs nas engenharias vem sendo amplamente discutido, já que a adoção de novas tecnologias pode simplificar as metodologias tradicionalmente utilizadas. Em se tratando da infraestrutura de transportes, no último ano, Abidin et al. (2023) trouxe uma metodologia utilizando RPAs na detecção de defeitos em rodovias por meio de voos realizados em duas épocas distintas. Por meio da comparação dos processamentos para cada época, e análise das ortofotos obtidas, os autores chegaram à conclusão de que a metodologia pode sim detectar o avanço dos defeitos das estradas, apesar de suas limitações, como rugosidade e presença de água nos buracos, podendo ser ferramenta importante para auxiliar no mapeamento e classificação desses defeitos, evitando acidentes nas estradas.

Seguindo a mesma linha, Zhao *et al.* (2023) e Ibrahim *et al.* (2024) também examinaram o uso do RPA como ferramenta para a detecção de problemas em estradas, incluindo rachaduras e buracos. Ambos os autores além de empregarem o RPA, também fizeram o uso de algoritmos de inteligência artificial na detecção e classificação dessas falhas. Os resultados obtidos em ambos os trabalhos apontam para o RPA como um recurso significativo, apresentando elevados valores de precisão geral, e uma solução abrangente, considerando a possibilidade do emprego de filtros para suavização das imagens além do desenvolvimento tanto dos algoritmos quanto dos bancos de dados, para a detecção e classificação de defeitos em pavimentos asfálticos, melhorando significativamente sua eficiência e desempenho associado às redes neurais.

Partindo do pressuposto de uma ISV com o foco na avaliação do estado de conservação de sinalizações de trânsito horizontais por meio de imagens obtidas por drones, surge a hipótese de que os parâmetros de voo, incluindo altura de voo, sobreposições frontal e lateral, além do uso de RTK, podem influenciar a precisão de medidas e detecções nas ortoimagens processadas, sobretudo, dada a carência de trabalhos que mostrem os efeitos dessa variação. Portanto, os efeitos desses parâmetros e de suas interações, podem ser quantificados e modelados por meio de cálculos do planejamento estatístico, fornecendo uma base para se entender e prever o impacto de escolha de cada fator no produto final do processamento das imagens, que podem complementar a metodologia tradicional de uma ISV.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral deste trabalho é determinar a influência dos parâmetros de configuração de drones durante a fase de planejamento de voo para a obtenção de imagens para serem utilizadas como ferramenta complementar aos procedimentos de uma ISV na avaliação do estado de conservação das sinalizações de trânsito horizontais.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- A. Investigar e determinar as limitações do RPA como ferramenta complementar para a realização de uma ISV voltada à avaliação de sinalizações horizontais de trânsito.
- B. Analisar a confiabilidade dos resultados obtidos em diferentes configurações de voo considerando o erro absoluto de medidas extraídas das ortoimagens.
- C. Examinar a influência de cada parâmetro sobre a qualidade das ortoimagens, por meio de cálculos estatísticos, ao estabelecer um modelo de regressão linear múltipla para cada análise.

1.2 JUSTIFICATIVA

A incorporação de RPAs dentro de uma ISV pode proporcionar uma forma ágil e eficiente para determinar parâmetros qualitativos e quantitativos referentes, principalmente, a elementos horizontais das vias, tais como sinalização e defeitos de pavimento, relevantes nos procedimentos de inspeções. Estes parâmetros podem contribuir para o aprimoramento da metodologia geral existente de ISV, onde as inspeções são realizadas *in loco*, resultando em um método mais abrangente e preciso para identificar áreas de risco, tomar decisões concisas e finalmente aprimorar a segurança das vias públicas, garantindo também a segurança da equipe auditora.

Como justificativa para a concepção e elaboração deste trabalho está a necessidade de que seja fomentada a adoção de novas práticas e tecnologias dentro dos procedimentos envolvendo a segurança das rodovias brasileira. Para isso, em consonância com essa demanda, urge também a necessidade de que os estudos em torno dessas tecnologias, como o uso de RPAs

sejam examinados e refinados, principalmente no que se diz respeito aos parâmetros utilizados para a obtenção de suas imagens, buscando correlacionar tais produtos aos problemas de segurança viária como o estado de conservação dos pavimentos asfálticos.

Em consequência às práticas em suma corretivas e ausência de um conjunto conciso de normas, a incidência de sinistros de trânsito nas rodovias Brasileiras ainda é alarmante, sendo considerado um problema de saúde pública. A partir desta problemática é evidente a necessidade de desmistificar e simplificar os procedimentos de ISV como forma de atrair os olhares para essa possibilidade de mudança e avanço dentro dos procedimentos de manutenção da malha rodoviária nacional.

Diante desse contexto, emerge o objetivo dessa dissertação, que é avaliar a escolha dos parâmetros fundamentais durante a fase de planejamento de voo em levantamentos com RPA, sobre o produto gerado pelo processamento das imagens obtidas. Para isso, foi conduzido um estudo de caso que, além de analisar os parâmetros de voo adotados, também propõe a obtenção de um modelo de regressão. Esse modelo visa determinar os pesos de cada parâmetro, correlacionando sua influência sobre o produto final, especificamente na tomada de medidas de sinalização de trânsito horizontais, buscando mostrar o potencial de tal ferramenta como um recurso complementar aos procedimentos tradicionais de ISV.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação se encontra distribuída em cinco capítulos nos quais pretende-se desenvolver a pesquisa de forma contínua, clara e objetiva, de forma a alcançar o máximo entendimento do projeto.

Na sequência deste primeiro capítulo introdutório, encontra-se o segundo capítulo referente à revisão da bibliografia que discute o embasamento teórico em torno do cenário atual e técnico do modal rodoviário no país, passando pela inspeção da bibliografia no que se diz respeito aos procedimentos de segurança viária, ASV e ISV, por fim, revisando a bibliografia em torno dos RPAs, desde suas especificações, regras e normas vigentes, até sua aplicação atual dentro do cenário da infraestrutura rodoviária mundial.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia proposta, constituída de levantamentos utilizando RPA com a finalidade de investigar o conjunto de parâmetros ideais para que tal ferramenta seja utilizada dentro dos processos atuais de uma ISV. Neste capítulo são especificadas as áreas de estudo, reconhecimento dos equipamentos utilizados, modelagem

de experimentos além da determinação dos parâmetros experimentais e métodos estatísticos para análise dos resultados.

No quarto capítulo está presente os resultados obtidos no estudo de caso proposto, realizado nas vias internas da Universidade Federal de Uberlândia, campus Santa Mônica, localizado na cidade de Uberlândia, estado de Minas Gerais, bem como a análise estatística dos dados obtidos.

Por fim, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas em torno dos objetivos específicos, suas contribuições e limitações bem como recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

2.1 SEGURANÇA VIÁRIA

2.1.1 Modal rodoviário no Brasil

Desde os governos de Getúlio Vargas e Juscelino Kubstchek que o modal rodoviário é tido como o principal modal no transporte de cargas e passageiros. Em termos de disponibilidade de rodovias pavimentadas, dada sua extensão em razão da dimensão territorial, o Brasil possui uma baixa densidade de malha rodoviária pavimentada. De acordo com DNIT (2006), a demanda de tráfego é um dos grandes agentes que afetam as condições do pavimento, o que a partir da comparação das porcentagens de frota de veículos e extensão pavimentada, indica alto desgaste da malha rodoviária.

Avaliando o cenário geral da malha rodoviária brasileira, tem-se que o modal apresenta dois gargalos, sendo eles a baixa extensão de rodovias pavimentadas que por sua vez apresenta uma significativa parcela em condições insatisfatórias. Consequentemente, rodovias em condições inadequadas, somada à elevada idade média da frota rodoviária, acabam por gerar custos operacionais mais elevados, além do aumento nos riscos de acidentes e avarias nos veículos, implicando em um elevado número de vítimas e expressiva emissão de poluentes (CNT, 2018).

As condições de qualidade da malha rodoviária não possuem apenas grande impacto dentro dos setores de economia, mas também representam um grave risco à saúde pública em decorrência dos sinistros de trânsito. De acordo com INFRA (2022), no Brasil, as mortes no trânsito são a oitava principal causa de óbitos, sendo registradas 836 mil mortes em sinistros de trânsito no período de 1996 a 2018, sendo o terceiro país com mais mortes no trânsito em todo o mundo.

De acordo com WHO (2023), sinistros de trânsito representam um problema de saúde pública. Em um ranking de todas as idades, as mortes no trânsito ocupam do décimo segundo lugar, enquanto considerando um intervalo de idade de 5 a 29 anos, esse tipo de ocorrência lidera a lista. Só no ano de 2021, são estimadas 1,19 milhões de mortes por sinistros de trânsito, o que corresponde a 15 mortes no trânsito para cada 100.000 habitantes, sendo que nas Américas, 33% das mortes envolvem veículos de quatro rodas e 25% veículos de duas rodas.

Para além dos custos físicos, em decorrência da perda humana, e de sua contribuição para inaptidão física, segundo WHO (2023), os sinistros de trânsito representam um forte impacto negativo na economia, sendo estimados custos entre 1% e 3% do Produto Interno Bruto de um país, podendo chegar, em algumas situações, a 6%. Conforme aponta a Pesquisa CNT de Rodovias (2023), só no ano de 2021, foi estimado um gasto de R\$ 12,75 bilhões com acidentes, sendo R\$ 7,39 bilhões em acidentes com vítimas feridas, R\$435,70 milhões em registros sem vítimas e R\$ 4,92 bilhões em acidentes com vítimas fatais.

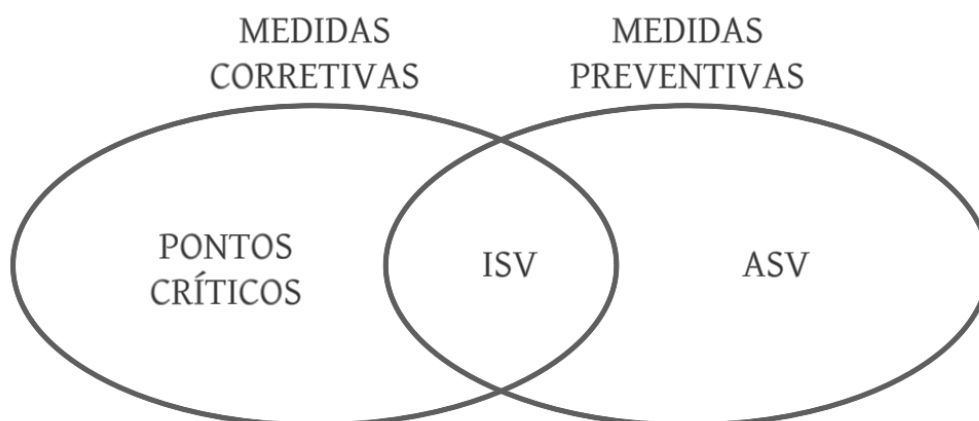
Mesmo com o entendimento de que acidentes em rodovias possuem diversos fatores, principalmente em função das condições desfavoráveis das vias, ainda são registrados em maioria, boletins de ocorrência em que se é atribuída a culpa totalmente ao fator comportamental do condutor, o que abre a necessidade de que seja realizada uma análise aprofundada que seja capaz de avaliar as reais condições da via que possam ter influenciado diretamente, conforme é apontado por CNT (2018).

Dentre os pilares do PNATRANS, apresentado por INFRA (2022), para aumentar a segurança viária, é necessária a tomada de ações na melhoria da qualidade das vias e na gestão de segurança no trânsito. De acordo com Aquino, et. al. (2018), em função das deficiências no estado de conservação da malha rodoviária, causadas principalmente pela manutenção inadequada das vias, reflexo do baixo montante de investimentos em infraestrutura (CNT, SEST, SENAT, 2022), deve-se investir em uma tecnologia de sistemas de gerência de pavimentos, além de, conforme DNIT (2006), incluir procedimentos de manutenção, nos quais se enquadram a prática de ASV.

2.1.2 Procedimentos de segurança viária

Partindo da grande influência do modal rodoviário no país, a segurança de seu funcionamento torna-se um de seus pilares, já que tangencia tópicos como conforto, saúde e economia. Com isso, volta-se a atenção para os procedimentos de manutenção que podem ser realizados para que haja a melhoria do sistema viário e sua infraestrutura. Nesse contexto, surge o conceito de gestão de segurança viária, possuindo a ASV, ISV e determinação de pontos críticos como parte dos procedimentos de manutenção, como ilustra a Figura 2.

Figura 2 - Diagrama de medidas corretivas e preventivas



Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2021).

No Brasil, é comum a prática de determinação de pontos críticos, que são definidos como pontos de ocorrências atípicas ao longo das vias e que representam grande risco à segurança e possível incremento de custos de operação em decorrência de acidentes e desvios de rotas (CNT, SEST, SENAT, 2022). Trata-se de uma prática corretiva, já que realiza a identificação de pontos de deficiência na malha viária a partir de eventos já ocorridos (Lopes e Martinez Fº, 2010).

A prática de medidas corretivas apresenta menor eficiência quanto a segurança viária, sendo assim, Nodari e Lindau (2001) apontam para a adoção de medidas preventivas, que por possibilitarem a tomada antecipada de decisão, evita a ocorrência de acidentes e resulta em economias significativas de recursos. Dessa maneira, de acordo com Lopes e Martinez Fº (2010) a adoção de medidas preventivas representa a aplicação do conceito de gerenciamento de risco à via pública, já que possui abrangência da fase de planejamento inicial até a fase operacional das vias.

2.1.3 Auditorias e Inspeções de Segurança Viária (ASV e ISV)

Conforme definido por AUSTROADS (2002), a ASV trata-se de um exame formal realizado em uma rodovia nova ou existente, onde uma equipe independente, qualificada e sem participações no projeto, avalia os potenciais riscos de acidentes e a performance de segurança das vias. AUSTROADS (2002) ainda salienta que os procedimentos de ASV deveriam se tornar uma prática de rotina assim como a fiscalização e *checklist* dos elementos, haja vista que este

procedimento deveria ser realizado em intervalos regulares de tal forma que sejam prevenidos pontos de acidentes.

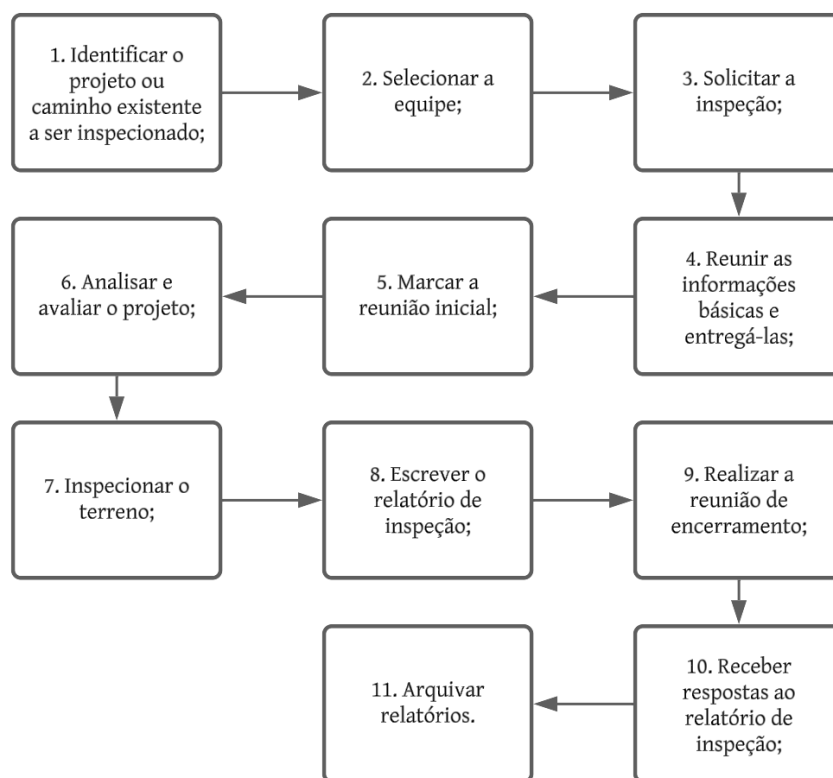
Por outro lado, o conceito de ISV não apresenta uma definição consensual, pois suas características esbarram nos conceitos de uma ASV. De acordo com PIARC (2007) uma ISV é definida como uma revisão sistemática local, conduzida por um especialista em segurança rodoviária em uma via existente ou seção dela, com a finalidade de identificar condições de risco e deficiências que possam acarretar a ocorrência de graves acidentes, sendo ela, uma ferramenta de gestão da segurança, ou seja, faz parte dos processos de uma ASV. Já tomando como base a definição dada por AUSTROADS (2019), uma ISV é considerada uma ASV de uma via já existente, sendo então um procedimento distinto.

Considerando os conceitos definidos por AUSTROADS (2019) e PIARC (2007), tanto ASV quanto ISV possuem conceitos semelhantes, sendo que a primeira é aplicada durante as fases de planejamento até construção de obras viárias, enquanto a última é aplicada já na fase de operação. Sendo assim, há a tendência para a consideração da ISV como uma fase da ASV.

Silva e Fontana (2016) definem a ASV como uma medida proativa nos procedimentos de melhora das condições das vias, haja vista que sua aplicação é dada antes da ocorrência de deficiências na malha rodoviária. Para mais, conforme Lopes e Martinez Fº (2010), a ASV vai além dos procedimentos de verificação de conformidade às normas de projeto, possuindo um papel maior de orientação do que fiscalização, por se tratar de um procedimento de revisão multidisciplinar dos níveis de segurança e não de conferência.

A Figura 3 ilustra, de maneira simplificada, as fases de uma ISV. Inicialmente é necessário identificar o objeto a ser inspecionado, selecionada a equipe devidamente qualificada para então ser solicitada a inspeção. Feito isso, são reunidas as informações básicas necessárias e marcada a reunião inicial da equipe para análise e avaliação do projeto, que após isso realiza a inspeção do terreno, redige o relatório de auditoria que é discutido em uma reunião final onde são dadas as respostas finais ao procedimento (SEGURIDAD VIAL, 2022).

Figura 3 - Esquema metodológico de uma ISV



Fonte: Adaptado de Seguridad Vial (2022).

Apesar do tema “segurança viária” estar cada vez mais presente, como é o caso do conceito de “rodovias que perdoam”, tratado por CNT (2021), onde são apresentadas medidas que são empregadas com o propósito de mitigar a ocorrência de acidentes por meio da adequação da infraestrutura rodoviária aos comportamentos humanos de condução, a prática de ASV ainda é pouco difundida. Trata-se de um procedimento que ainda não é efetivo no Brasil e ainda não apresenta listas de verificação oficiais (SILVA e FONTANA, 2016).

Em trabalho desenvolvido por Ribeiro e Andrade (2019) é abordada uma metodologia de ASV para rodovias rurais em operação com a inclusão de verificações em ambientes virtuais. Diante desta proposta, os autores esbarram no fato de que a ASV ainda é uma vertente de estudo pouco explorada no Brasil, que acarreta limitações quanto à formação de equipes qualificadas e um conjunto normativo para especificação das LVs, criando então, uma lista com base na realidade do país por meio da avaliação de profissionais capacitados. O referido trabalho ainda abre um rol de possibilidades para que novos trabalhos, com a inclusão de novas tecnologias, como o uso de RPA, sejam desenvolvidos.

2.2 AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (RPAS)

2.2.1 Conceitos e classificação

As aeronaves remotamente pilotadas (RPA) ou drones, como são popularmente conhecidos, são ferramentas que inicialmente foram utilizadas para fins militares que acabaram se tornando populares em atividades de lazer e que atualmente, graças a sua versatilidade técnica, vem ganhando espaço em diversas aplicabilidades na engenharia (PATELLA, 2016). De acordo com EISENBEISS (2009), o uso de RPA proporciona uma combinação de fotogrametria aérea e terrestre introduzindo novas aplicações de acompanhamento em tempo quase real, oferecendo alternativas de baixo custo em comparação à fotogrametria aérea tripulada para projetos que necessitem de informações atualizadas da superfície terrestre.

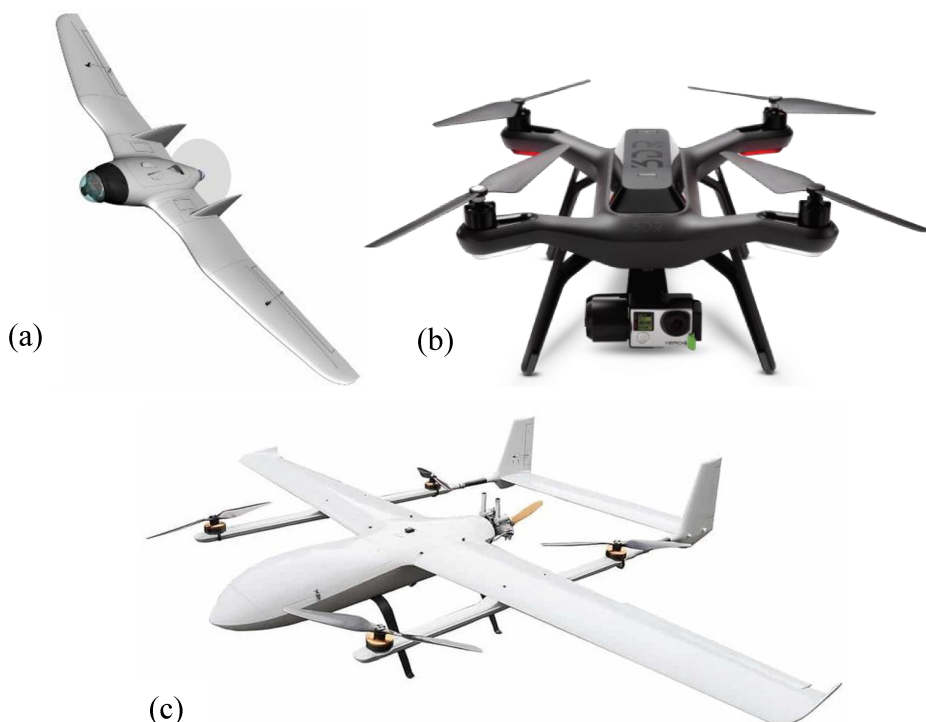
Segundo a definição de BRASIL (2023a), as Aeronaves Não Tripuladas ainda são amplamente conhecidas como *drones*, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), nomenclatura oriunda de *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), considerada obsoleta pela comunidade aeronáutica internacional, ou Aeronave Remotamente Pilotada (*Remotely Piloted Aircraft* – RPA). De acordo com a OACI, as aeronaves não tripuladas abrangem um amplo espectro de aeronaves que vão desde balões livres não tripulados até aeronaves altamente complexas, que podem conforme o DOC 100-19, podem ser subdivididas em RPA, *Small Unmanned Aircraft*, Aeromodelos e Autônomas (não permitem intervenção humana após o início do voo).

De acordo com BRASIL (2023b), as RPAs são um subconjunto de aeronaves não tripuladas, pilotadas a partir de uma estação de pilotagem remota, com a finalidade diversa de recreação, que seja capaz de interagir com o Controle de Tráfego Aéreo em tempo real (BRASIL, 2023a). Essas aeronaves são divididas em três classes, conforme seu peso máximo de decolagem, sendo Classe 1, para decolagens com peso máximo maior que 150 kg, Classe 2, para decolagens com peso máximo maior que 25 kg e menor ou igual a 150 kg e por fim Classe 3, para decolagens com peso máximo menor ou igual a 25 kg.

Com os avanços tecnológicos, são encontrados no mercado uma vasta quantidade de modelos de RPAs de diversos tamanhos e pesos. De acordo com Oliveira (2019), conforme a categorização de Bouabdallah et al. (2004), os RPA são subdivididos em três categorias, sendo asa fixa, que apresentam maior autonomia, possibilitando maiores rotas, além de atingir maiores velocidades e possuir maior capacidade de carga; asa rotativa, que possuem um sistema de hélices rotativas, além de possuir maior capacidade de manobras e capacidade de decolagem e

pouso vertical; e por fim, híbrida, que possui um sistema composto por asas fixas e rotativas que possibilitam a associação das capacidades das configurações com asa fixa e asa rotativa, a Figura 4 ilustra os modelos categorizados.

Figura 4 - Modelos de aeronaves: asa fixa (a), asa rotativa (b) e asa híbrida (c)



Fonte: AgricOnline (2021)

Segundo Behnck (2014), as aeronaves de asa fixa, conforme ilustrada a Figura 4 (a), geram sustentação através da passagem do ar em velocidade ao longo de suas asas que permanecem fixas à fuselagem. Quanto ao pouso e decolagem, essas aeronaves podem ser arremessadas manualmente ou com o auxílio de lançadores, entretanto precisam de pistas para pousos. Por outro lado, de acordo com Elmeseiry et al. (2021), modelos de asa rotativa apresentam a facilidade de decolarem e pousarem verticalmente, podendo ser operados em voos de baixa altitude além de serem capazes de pairar no ar.

Como uma forma de combinar as capacidades de aeronaves de asa rotativa, como pouso e decolagem na vertical além da possibilidade de pairar no ar, com a alta velocidade de voo e autonomia para longas distâncias, de aeronaves de asa fixa, que surgiu a ideia da aeronave de asa híbrida (AUSTIN, 2010). Sendo assim, aeronaves híbridas possuem a capacidade de mudar sua configuração para asa fixa durante a missão, para ganhar velocidade e consumir menos energia durante o voo (ELMESEIRY et al., 2021).

2.2.2 Normas e regulamentação

Em se tratando de sua legislação, conforme SOUZA e SANTOS (2019) as normas vigentes que regulamentam a atividade dos RPAs no Brasil são controladas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), sendo o país, também signatário da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), devendo seguir todas as suas normas e recomendações expedidas. Os principais conjuntos de regras e seus respectivos órgãos, são listados no site da ANATEL de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 - Regras vigentes e órgãos brasileiros

ÓRGÃO	REGRA	ASSUNTO
ANAC	RBAC-E Nº 94	Requisitos Gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil
	IS E94.503-001	Emissão de Certificado de Autorização de Voo Experimental para Aeronaves Remotamente Pilotadas
	IS E94-001	Autorização de Projeto de Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada - Procedimentos Gerais
	IS E94-002	Autorização de Projeto de Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada - Requisitos Técnicos
	IS E94-003	Procedimentos para elaboração e utilização de avaliação de risco operacional para operadores de aeronaves não tripuladas
ANATEL	Res. nº 715, 23/10/2019	Regulamento de Avaliação da Conformidade e de Homologação de Produtos para Telecomunicações
	Res. nº 506, 01/07/2008	Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita
	Res. nº 635, 09/05/2014	Regulamento sobre Autorização de Uso Temporário de Radiofrequências
	Port. 465, 22/08/2007	Procedimentos operacionais necessários ao requerimento para a execução do Serviço Especial para fins Científicos ou Experimentais
DECEA	ICA 100-40	Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro
	ICA 100-12	Regras do ar
	MCA 56-2	Aeronaves não tripuladas para uso recreativo - aeromodelos
	MCA 56-5	Aeronaves não tripuladas para uso exclusivo em operações aéreas especiais
	Lei nº 7.565, 19/12/1986	Código Brasileiro de Aeronáutica (CBA)

Fonte: Autor (2024)

Um dos principais conjuntos normativos regentes no Brasil trata-se do Regulamento Brasileiro da Aviação Civil RBAC-E Nº 94, desenvolvido pela ANAC. Nele, são abordados os requisitos gerais de competência da ANAC para aeronaves não tripuladas, regulando a matéria exclusivamente técnica que possa afetar a segurança da aviação civil, com vigência limitada no tempo e restrita a um número razoável de requisitos e pessoas (BRASIL, 2023b).

De acordo com o RBAC-E Nº94 (2023) todas as operações de aeronaves não tripuladas de uso não recreativo, acima de 250 gramas de peso, devem possuir seguro com cobertura de danos a terceiros, exceto as operações de aeronaves pertencentes a entidades controladas pelo estado, em áreas distantes de terceiros, sob total responsabilidade do seu operador. Nessas mesmas condições, durante a operação, devem estar disponíveis Certidão de Cadastro, Certificado de Matrícula ou o Certificado de Marca Experimental, certificado de aeronavegabilidade, manual de voo, apólice de seguro ou certificado de seguro com comprovante de pagamento dentro da validade.

Junto ao RBAC-E Nº 94, outro conjunto importante trata-se do ICA 100-40 que visa regulamentar os procedimentos e responsabilidades necessários para o acesso seguro ao Espaço Aéreo Brasileiro por aeronaves não tripuladas. Nele, é especificado que essas aeronaves somente poderão acessar o Espaço Aéreo Brasileiro após a emissão de autorização por parte do órgão regional competente. Em relação a análise de tráfego aéreo, operações realizadas a alturas abaixo de 120 metros são consideradas operações em alturas muito baixas. Para a realização de voos de alturas muito baixas, além de atender às necessidades legais, devem ser respeitadas as condições meteorológicas seguras, manter uma distância horizontal que permita a visualização da aeronave, não sobrevoar terceiros, e manter distância de segurança de edificações, estruturas, patrimônios e animais.

Além do conjunto de regras que devem ser seguidas durante a realização de operações com RPAs, é necessário que os equipamentos utilizados estejam devidamente homologados juntos à ANATEL. De acordo com a Resolução nº 715 de 23 de outubro de 2019 da ANATEL, o requerimento de homologação deve ser feito em formulário eletrônico próprio, contendo a Declaração de Conformidade e Relatório Fotográfico da aeronave. A descrição de todos os procedimentos é disponibilizada no site da ANATEL, na aba de Formulários e Manuais dentro da seção Certificação de Produtos, incluindo os manuais de instrução para homologação, lista de drones importados conformes e não conformes para operação em território nacional, além dos modelos de declarações e formulários a serem preenchidos.

2.2.3 Fotogrametria por meio de RPAs

Fotogrametria, segundo a definição dada pela Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, de acordo com Wolf et al. (2014) é a arte, a ciência e a tecnologia de obter informações confiáveis sobre objetos físicos e o ambiente por meio de processos de registro, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante registrada além de outros fenômenos. Conforme Silva (2015), a história da fotogrametria se iniciou com a fotogrametria terrestre simples, passando pela fotogrametria terrestre estereoscópica, até chegar na fotogrametria aérea, que se desenvolveu de procedimentos envolvendo pombos e balões até os conhecidos RPAs.

Diferentemente da fotogrametria terrestre, onde as fotos são obtidas a partir de estações fixas sobre o terreno, na fotogrametria aérea, as imagens são obtidas a partir de estações sobre a superfície, com o eixo ótico da câmera na horizontal (Zanetti, 2017). Dentro das definições de fotogrametria ainda se encontram as definições de fotogrametria métrica, que é destinada a tomada de medidas precisas a partir das fotos tais como distâncias, ângulos, áreas e volumes, assim como a fotogrametria interpretativa, destinada a reconhecer e identificar objetos e julgar suas respectivas significâncias em uma análise sistemática (Wolf et al., 2014).

Em decorrência dos avanços tecnológicos, com o surgimento dos RPAs, surge também uma nova forma de se trabalhar a fotogrametria aérea. Esses avanços impulsionados pela tecnologia e a integração de metodologias derivadas das ciências da computação e inteligência artificial, incluindo processamento de imagens, reconhecimento de padrões e automatização de operações, fazem parte não apenas do conceito de Fotogrametria Digital, como também do Sistema Fotogramétrico Digital (Silva, 2015).

A análise dos dados obtidos por RPA é possível a partir do processamento de seu produto que é constituído de um conjunto de fotografias chamado ortomosaico, que também pode ser definido como a união de várias fotografias sequenciadas, capturadas ortogonalmente à superfície, onde cada imagem é sobreposta longitudinalmente e lateralmente à sua vizinha para que essa união seja feita (Furtado, 2021). Entretanto esse processamento também pode englobar análises de vídeos, ou mesmo análises mais aprofundadas com a inclusão de câmeras térmicas, multiespectrais e tecnologia de infravermelho (Themistocleous *et. al.*, 2014).

A realização de voos com RPAs pode ser feita de forma manual como também por meio da execução de um plano de voo. Para a coleta de dados com fins fotogramétricos, são desenvolvidos planos de voos que podem ser definidos como a especificação da trajetória a ser

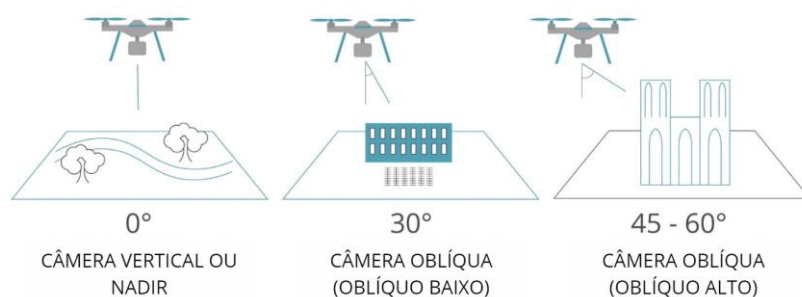
seguida pela aeronave conforme a área de interesse a ser levantada e seguindo uma série de critérios de voo pré-estabelecidos pelo usuário. O desenvolvimento dos planos de voos pode ser feito tanto por meio de aplicações desenvolvidas pela própria fabricante da aeronave a ser utilizada, como o DJI Pilot, assim como por meio de *softwares* de terceiros, desde que compatíveis com a aeronave, como o *Drone Harmony*, *Drone Deploy* e *Pix4D Capture*.

No Brasil, a fotogrametria, conforme é definida pelo Ministério da Defesa, é uma técnica de aerolevantamento que utiliza imagens aéreas para produzir dados geoespaciais precisos, como ortofotos, modelos digitais e mapas. Sua regulamentação é feita, principalmente pelo Decreto-Lei nº 1.177 de 21 de junho de 1971 e pela Portaria nº 3.703/GM-MD, de 6 de setembro de 2021, do Ministério da defesa. Essas normas, geridas pela Coordenação-Geral de Geoinformação, Meteorologia e Aerolevantamento (CGGMA) por meio do Sistema de Cadastro de Levantamentos Aeroespaciais do Território Nacional (SisCLATEN), exigem o cadastro de entidades públicas e privadas que realizem serviços de aerolevantamentos.

De acordo com Brasil (2024), a realização de cadastro e autorização no SisCLATEN garantem que os aerolevantamentos respeitem normas de segurança nacional, estejam em conformidade com a legislação brasileira e protejam áreas estratégicas. O sistema trata-se de uma plataforma digital onde entidades executantes fornecem informações detalhadas para a obtenção da Autorização de Aerolevantamento Fase Aeroespacial (AAFA) e, após avaliação da Seção de Geoinformação, Meteorologia e Aerolevantamento (SEGMA), a Autorização de Voo (AVO). A partir desse sistema, além do devido controle, também são registrados metadados dos produtos fotogramétricos, permitindo rastreabilidade e consulta pública.

Durante a fase de desenvolvimento do plano de voo, é importante conhecer a área de interesse para que seja feito um planejamento criterioso do levantamento de campo a ser realizado. É importante não apenas garantir a qualidade dos dados levantados, como também a segurança dos equipamentos e de todos os envolvidos na realização dos trabalhos. Neste momento, partindo dessa área, são determinados o número de linhas de passagem da aeronave, direção de voo, sobreposições lateral e frontal, altura e velocidade de voo, além de outros detalhes como especificação do modelo de câmera, tipo de voo, ângulo de captura, que pode ser a nadir, onde a captura é vertical com a câmera perpendicular ao solo e oblíquo, onde o eixo de captura da câmera é deslocado da perpendicular, conforme a Figura 5.

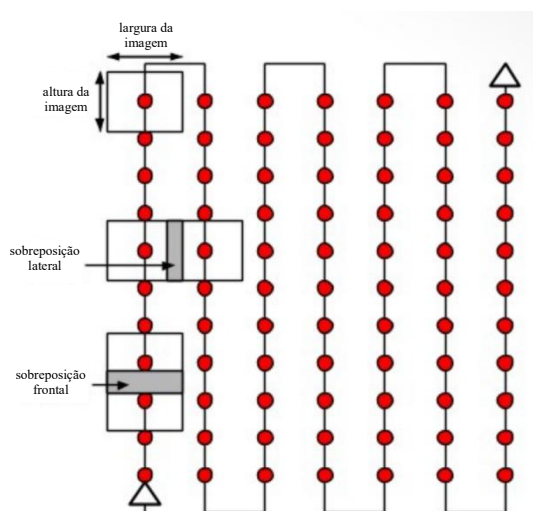
Figura 5 - Tipos de ângulo de captura de imagens com RPA



Fonte: Adaptado de UoM Enterprise (2017)

A escolha adequada dos parâmetros utilizados no plano de voo possui influência direta sobre a qualidade final das imagens obtidas. A altura do voo está associada tanto à escala das imagens quanto ao Ground Sample Distance, também chamado de GSD, que traduzido significa distância da amostragem do solo e de acordo com Purcell (2000), é descrito como uma relação geométrica da distância focal, tamanho ou inclinação do pixel e distância até o alvo, em unidades equivalentes no solo. Os valores de sobreposição longitudinal ou frontal e lateral, de acordo com Redweik (2007), são comumente descritos respectivamente como a sobreposição entre fotos sucessivas e a sobreposição entre linhas de voo sucessivas, conforme mostra a Figura 6. Ainda segundo a autora, o objetivo da sobreposição frontal é permitir a visualização tridimensional e a restituição estereoscópica, enquanto a sobreposição lateral tem a principal função de ser uma margem de segurança para evitar lacunas entre fiadas, sendo comum a adoção de valores de 60% para sobreposição frontal e lateral para medidas de alta precisão.

Figura 6 - Sobreposições lateral e longitudinal.



Fonte: Adaptado de CARVALHO (2020)

Além da influência sobre a qualidade das imagens capturadas, o conjunto de parâmetros escolhido também apresenta influência sobre o tamanho da rota e consequentemente no número de imagens a serem capturadas. Valores de sobreposição maiores implicam em um aumento da rota de voo para que seja feita a cobertura total da área e consequente aumento no número de imagens capturadas e tempo de voo. Da mesma forma, a altura de voo também influencia o tamanho da rota e tempo de voo, já que as imagens de voos com maiores alturas possuem maior escala e consequente maior cobertura de área, implicando em uma rota menor e mais rápida. Sendo assim, o cuidado para escolha dos parâmetros deve levar em consideração não apenas a qualidade dos dados a serem obtidos, como também no tempo de voo e autonomia de bateria da aeronave.

O processamento desses dados é realizado por meio de algoritmos que identificam pontos comuns entre várias imagens, unindo-as por meio destes. Para que seja assegurada a qualidade da união dessas imagens, preza-se pela adoção de valores de sobreposição lateral e frontal que garantam a presença de um número maior de pontos em comum, consequentemente aumentando o número de combinações entre as imagens. Atualmente, se encontram no mercado, inúmeros *softwares* para o processamento de imagens, podendo ser de iniciativa comercial, como o Pix4D e Agisoft MetaShape, e de código aberto, como a versão Web do Open Drone Map (WebODM).

Durante o processamento dos dados, esses *softwares* oferecem uma gama de opções que acabam por gerar produtos distintos e possibilitam diversas análises. Derivados do ortomosaico, são extraídas a ortofoto (junção de todas as imagens), modelo digital de terreno (MDT) que representa a superfície terrestre sem incluir objetos sobre o solo como edificações e vegetação, modelo digital de superfície (MDS), semelhante ao MDT, porém considerando os objetos acima do solo, nuvem de pontos 3D, que é uma representação tridimensional da área levantada, além dos modelos texturizados, índices de vegetação, entre outros.

2.2.4 Revisão sistemática do uso de RPA na engenharia

Dada a versatilidade de aplicações dos RPAs em função da propagação de uma infinidade de sensores, câmeras e programas para processamento de imagens, a tecnologia vem crescendo e atingindo outro patamar de alastramento, principalmente nos setores das engenharias agrônômicas e civil (Granemann, 2019). Segundo Patella (2016), foi na parte de georreferenciamento e topografia que foi dado o início da aplicação tecnológica do RPA, já na

construção civil, a ferramenta é utilizada em atividades de mapeamento de terreno, locação, monitoramento de obras, qualificação de laudos, entre outros.

No cenário de transportes, de acordo com Miranda (2020), RPAs já possuem registros de aplicações no controle de tráfego por alguns Departamentos de Transportes dos Estados Unidos no monitoramento das condições ambientais do entorno das rodovias, controle de avalanches, monitoramento de acidentes, coleta de dados em reformas e manutenções. O autor ainda aborda os estudos realizados por Zhang (2008) e Themistocleous *et. al.* (2014), ambos desenvolvidos na área de transportes.

Em uma revisão sistemática da literatura, é possível encontrar diversos trabalhos que estão surgindo em torno do tema. A aplicação do RPA dentro de metodologias tradicionais vem ganhando destaque não apenas no cenário da pesquisa acadêmica, como também no mercado, principalmente devido a agilidade em seus levantamentos e ao leque de aplicações possíveis graças a sua versatilidade tecnológica. Em buscas nas plataformas de banco de dados acadêmicos como *ResearchGate*, *Scopus* e Portal Periódicos Capes, foram selecionados 26 trabalhos realizados entre os anos de 2008 e 2024 que abordam o uso de tal ferramenta dentro do cenário de Infraestrutura de Transportes conforme mostra o Quadro 2.

Quadro 2 - Resumo de trabalhos e países

ANO	PAÍS	AUTORES	TÍTULO EM TRADUÇÃO LIVRE
2008	Pequim	ZHANG, C.	Um sistema de mapeamento fotogramétrico baseado em VANT para avaliação das condições das estradas
2014	Chipre	THEMISTOCLEOUS, K. et al.	Avaliação de danos usando métodos avançados de inspeção não intrusiva: Integração de espaço, VANT, GPR e espectroscopia de campo
2016	Brasil	ALMEIDA, I. C. et al.	Estudo sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários
2017	Malásia	GOHARI, A. et al.	Drones para gerenciamento de acidentes rodoviários: uma revisão sistemática
2018	Brasil	KEPLER, M. A. et al.	O uso de drones como ferramenta de mapeamento para estudos de rodovias - Case do edital de concessão da rodovia de integração sul, Brasil
2019	Brasil	DE OLIVEIRA, D. V.; BRITO, J. L. S.	Avaliação da Acurácia Posicional de Dados Gerados por Aeronave Remotamente Pilotada
2019	Califórnia	FAN, R. et al.	Visão estereoscópica densa em tempo real incorporado em um UAV para inspeção de estradas
2020	Espanha	PROSSER-CONTRERAS, M. et al.	Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e Fotogrametria para Obter o Índice Internacional de Rugosidade (IRI) em Estradas
2020	Brasil	MIRANDA, W. I.	Uso de veículo aéreo para monitoramento de obras com ênfase no acompanhamento, planejamento e tomada de ações: um estudo de caso no Condomínio Terras Alpha Caruaru
2021	Coréia	HASSAN, S. et al.	Um esquema aprimorado de inspeção rodoviária autônoma baseado em rede neural convolucional profunda usando veículos aéreos não tripulados
2021	Índia	HEMAMALINI, B. H. et al.	Deteção de buracos em estradas usando um drone
2021	Brasil	FURTADO, R. A.	Uso de veículo aéreo não tripulado para monitoramento e auxílio de medições de obras de pavimentação urbana
2022	Países Baixos	TILON, S. et al.	Rumo à Melhoria da Inteligência de Borda em Veículos Aéreos Não Tripulados: Um Estudo de Caso de Monitoramento de Infraestrutura Viária
2022	China	ZHU, C. et al.	Monitoramento e Identificação de Fatores de Segurança em Obras Rodoviárias por meio de VANT

2022	Irlanda	QURESHI, W. S. et al.	Uma Exploração das Técnicas Recentes de Análise Inteligente de Imagens para Avaliação Visual das Condições da Superfície de Pavimentos
2022	Países Baixos	ZEYBEK, M.; BIÇICI, S.	Extração automatizada de informações sobre estradas a partir de dados baseados em VANT
2023	Espanha	NARANJO, M. et al.	Sistema Baseado em Detecção de Objetos para Sinais de Trânsito em Imagens Capturadas por Drones
2023	Alemanha	SAMADZADEGAN, F. et al.	Reconhecimento Automático de Fissuras em Pavimentos com Base em Redes de Deep Learning a Partir de Imagens de VANT
2023	Malásia	ABIDIN, M. S. Z.; ARIFF, M. F. M.	Fotogrametria com VANT para Mapeamento de Defeitos em Pavimentos
2023	China	ZHAO, Y. et al.	Detecção e Classificação de Fissuras em Rodovias Usando Imagens de Sensoriamento Remoto de VANT com Base em CrackNet e CrackClassification
2023	Espanha	SILVA, L. A. et al.	Detecção Automatizada de Danos em Rodovias Usando Imagens de VANT e Técnicas de Deep Learning
2023	China	JIANG, Y. et al.	RDD-YOLOv5: Algoritmo de Detecção de Defeitos em Rodovias com Autoatenção Baseado em Inspeção por Veículo Aéreo Não Tripulado
2023	Egito	ELAMIN, A.; EL-RABBANY, A.	Fusão de Imagens e LiDAR Baseada em VANT para Segmentação de Fissuras em Pavimentos
2024	Egito	IBRAHIM, H. B. et al.	Monitoramento Inteligente de Deformações em Pavimentos Rodoviários a partir de Imagens de VANT com Uso de Aprendizado de Máquina
2024	China	CHEN, X. et al.	Uma Estrutura de Detecção e Avaliação de Fissuras em Pavimentos para um Sistema de Inspeção por VANT Baseado em Deep Learning
2024	Inglaterra	RAHNAMAYIEZEKAVAT, P. et al.	Avaliação Automatizada da Integridade de Marcas Viárias Utilizando uma Plataforma de VANT – Um Estudo de Caso em Estacionamentos Públicos

Fonte: Autor (2024)

Ao longo das últimas décadas, o uso de RPA para monitoramento e manutenção de estradas evoluiu significativamente, passando de abordagens mais simplificadas, relacionadas a coleta de dados, até sistemas sofisticados incorporando a inteligência artificial. Este avanço foi impulsionado pela crescente demanda de soluções mais eficientes e econômicas, buscando a integração de agilidade e segurança para lidar com os desafios relacionados a infraestrutura rodoviária. Estudos iniciais, como o de Zhang (2008), aborda o uso de RPA no monitoramento de estradas não pavimentadas associando modelos de ortoimagem e modelo digital de terreno (MDT), obtidos pela RPA, a um modelo preditivo das condições de estradas com base em dados de sensoriamento remoto de satélites. O trabalho ressalta, para a época, a necessidade de avanços para a integração de dados tridimensionais mais detalhados, possibilitando estimativas de dimensões verticais do problema. Essa base inicial foi se expandindo, como apresenta Themistocleous et al. (2014), que fizeram o uso de câmeras com resolução de 3 centímetros associada a sensores multiespectrais e térmicos, permitindo uma análise mais detalhada no que tange a identificação de rachaduras no pavimento com base nas diferenças de temperaturas.

No contexto brasileiro, os estudos começaram a explorar a viabilidade técnica e econômica do uso de RPA no mapeamento e análise rodoviária. Almeida et al. (2016) conduziram uma análise para fins de elaboração de projetos de interseções rodoviárias, destacando a necessidade de aperfeiçoamentos em equipamentos e processamento, principalmente quanto ao estabelecimento de padrões de operação, definições, especificações e

normas oficiais que padronizem os resultados. Os autores ainda destacam como desafios a densidade de vegetação, prejudicando cálculo de volumes e a precisão planimétrica em função da dificuldade da aeronave em manter a linha de voo e de visada da câmera na vertical. Em um contexto semelhante, Kepler et al. (2018) abordam seu uso em uma extensa área montanhosa, destacando sua capacidade de gerar um modelo digital com bilhões de pontos, possibilitando diversas análises visuais, sendo uma opção vantajosa quanto a segurança dos operadores durante os levantamentos, apesar de enfrentar limitações quanto a autonomia da aeronave e cobertura de vegetação.

No cenário urbano, ainda no Brasil, Oliveira (2019) avaliaram a acurácia posicional de dados gerados por RPA de baixo custo para mapeamentos de grande escala, explorando seu potencial para uso em cartografia cadastral. Embora tenham observado aspectos positivos quanto a qualidade cartográfica, vantagem econômica de tempo e o leque de possibilidades de análises, apontaram limitações como instabilidade e autonomia da aeronave, baixa qualidade de câmera e sistema de posicionamento, além de longos períodos de processamento e alto custo de investimento computacional. Já Miranda (2020) utilizou a tecnologia no acompanhamento, planejamento e tomada de decisões em um canteiro de obras, destacando a viabilização de aerolevantamentos em regiões de difícil acesso com baixo custo por outro lado, Furtado (2021) avaliou a viabilidade do uso de RPAs no monitoramento e medições de obras de pavimentação em ruas do município de Mossoró. O autor ressalta a riqueza de detalhes com baixo tempo para realização dos levantamentos e equipes reduzidas, apontando também para pontos negativos como o alto custo inicial para aquisição de equipamentos além da necessidade de capacitação e autorização de profissionais para manuseio da aeronave.

No panorama internacional, outros estudos expandiram a aplicação de RPAs em diferentes cenários. Gohari et al. (2017), realizaram uma revisão sistemática em torno de seu uso no gerenciamento de acidentes de trânsito, ressaltando a capacidade de sobrevoo das áreas de acidente e reconstrução tridimensional georreferenciada das cenas apesar de desafios como restrições de voo, segurança dos dados de levantamentos e processamento de grandes quantidades de arquivos. Prosser-Conteras et al. (2020) avaliaram sua aplicação no projeto, gerenciamento e manutenção de estradas para a redução de custos, tempo de trabalho e esforço humano, apontando para limitações quanto a variabilidade de parâmetros de voo e condições climáticas que podem prejudicar os resultados esperados.

Seguindo no avanço computacional, Tilon et al. (2022) apresentaram um sistema de monitoramento RPA que combinou vantagens da computação e do processamento remoto para a obtenção de uma solução de monitoramento que pode ser usada simultaneamente para

objetivos de monitoramento urgentes e não urgentes, destacando o potencial das RPAs no monitoramento rodoviário em tempo real e seus gargalos quanto a transmissão de dados. Já Abidin e Ariff (2023) utilizaram a metodologia na detecção de efeitos nas estradas por meio da comparação de ortofotos e nuvens de pontos realizada no *software CloudCompare*. Apesar do *software* permitir a detecção de anomalias no pavimento, ainda existem limitações a problemas com características de rugosidade, tais como buracos, amontoados, falhas de remendo e presença de água nas cavidades.

A possibilidade de integração de sistemas de aprendizado de máquina, a inteligência artificial, ampliou as capacidades de emprego das RPAs. Fan et al. (2019) utilizaram um algoritmo de visão estereoscópica densa inspeção de estradas em tempo real transformando a perspectiva das imagens, melhorando a precisão da disparidade e reduzindo a complexidade computacional. Hassan et al. (2021) utilizaram uma rede neural convolucional, a YOLOv3, para a detecção em tempo real de buracos em estradas, atingindo uma precisão de 95% na detecção de buracos, rachaduras e faixas amarelas, mostrando eficácia em cenários diurnos, entretanto, exigindo mais aprimoramentos para cenários noturnos. Já Hemamalini et al. (2021), por meio da mesma rede neural, obtiveram uma acurácia de 85% com baixo índice de falso-positivos e falso-negativos, conseguindo detectar até buracos preenchidos com água. Os autores ainda destacam como desafios a diferenciação de buracos e manchas, além da comunicação eficiente com as autoridades.

Seguindo essa linha, Zhu et al. (2022) propuseram uma estrutura de monitoramento de construção de estradas e identificação de fatores de segurança baseado no uso de RPA associado a algoritmos como YOLOv4 e DeepSORT. Os autores demonstraram que a plataforma melhora a gestão de segurança de trabalhadores, máquinas e sinalizações, além de reduzir a necessidade de inspeções manuais, apesar de esbarrar em limitações como autonomia e estabilidade das aeronaves e políticas locais. Já Qureshi et al. (2022) revisaram abordagens que se concentram na detecção de rachaduras em pavimentos por meio de algoritmos de detecção e classificação de objetos. Os autores concluem que a combinação desses vários métodos de inteligência artificial possui potencial principalmente quanto a redução de tempo de trabalho e de custos, comparado a métodos tradicionais, entretanto se deparam com limitações quanto a lacunas nas referências de treinamentos de máquina, em especial, as condições ambientais e climáticas, variações nos tipos de pavimentos, limitações técnicas das aeronaves e regimentos locais.

No panorama europeu, Zeybek e Biçici (2022) investigaram a extração automática de informações geométricas de rodovias a partir de algoritmos de reconhecimento automático de superfícies. Naranjo et al. (2023) demonstraram um sistema de detecção de objetos que permite

identificar e georreferenciar diferentes sinais de trânsito, destacando que sua utilização em diferentes infraestruturas ainda é possível, com eficiência, mesmo enfrentando desafios como a falta de um banco de dados para treinamento do algoritmo. Samadzadegan et al. (2023) também utilizaram redes neurais para reconhecimento automático de rachaduras no pavimento asfáltico por meio da construção de um banco de dados de imagens públicas obtidas por meio de RPAs alcançando métricas que demonstram a eficácia do método, sugerindo ainda a possibilidade de aumento da robustez e generalização do sistema. Silva et al. (2023) fazem uma comparação dos modelos YOLOv4, YOLOv5 e YOLOv7 na detecção de buracos em imagens de RPA, atingindo precisões de até 73,20%. Já Rahnamayiezekavat et al. (2024) utilizaram uma plataforma baseada em RPA, associada a algoritmos de processamento digital dos dados para avaliação dos padrões de qualidade de marcações em pavimentos, destacando desafios quanto a autonomia das aeronaves, políticas de restrições de voo e segurança.

No Egito, Elamin e El-rabbany (2023) combinaram dados do sensor LiDAR e imagens RGB obtidas por RPA com algoritmos de aprendizagem de máquina, mostrando que essa combinação pode gerar melhorias significativas na detecção de rachaduras em pavimentos asfálticos. Já Ibrahim et al. (2024) combinaram pré-processamento de dados, geração de atributos com matrizes de coocorrência de níveis de cinza, classificação por árvores de decisão, suavização pós-classificação e operações morfológicas, como detecção de bordas e fechamento morfológico, obtidos por meio de RPAs, para identificar deformações em pavimentos. Os autores alcançaram um nível de 86% de precisão, que após os processos morfológicos atingiu a marca de 96%, destacando as RPAs equipadas com sensores remotos multiespectrais como ferramentas eficazes na vigilância da qualidade do pavimento asfáltico.

Nos últimos anos o uso de algoritmos como *CrackNet* e versões da rede neural YOLO, associados a imagens obtidas por meio de RPAs têm melhorado significativamente a precisão e a eficiência, viabilizando aplicações em tempo real na detecção de buracos e trincas asfálticas. Na China, Zhao et al. (2023) obtiveram valores de precisão de 0,868 até 0,738 na detecção e classificação de fissuras e trincas asfálticas, por meio da remoção de ruído ambiental e filtragem do leito de estradas, associadas aos algoritmos *CrackNet* e *CrackClassification*. Já Jiang et al. (2023) e Chen et al. (2024), utilizaram as imagens de RPA associadas a algoritmos avançados YOLO e Faster-RCNN para detectar defeitos em pavimentos, atingindo precisões de até 91,5%, apesar de esbarrarem no número relativamente grande de parâmetros e baixa autonomia de bateria das aeronaves, que acaba por limitar a distância de inspeções.

Sendo assim, é possível constatar na bibliografia que o uso de RPA dentro dos procedimentos de tráfego, em especial as inspeções de pavimentos, vem seguindo uma

crescente, muito em decorrência dos grandes avanços tecnológicos dos últimos anos. Apesar disso, a metodologia em questão ainda está em estágio inicial no que se diz respeito a sua aplicação prática em casos reais, acabando por impulsionar o aumento no número de estudos em torno do tema. Ainda é possível constatar que nos últimos anos, a inteligência artificial se tornou uma forte aliada a essa ferramenta, possibilitando a automatização das análises feitas em cima dos dados levantados pelas RPAs.

Entretanto, também é possível observar que devido a variedade de equipamentos no mercado e o leque de possibilidades de combinações de parâmetros de voos acabam por pluralizar os planos de voos. Por conseguinte, torna-se necessário avaliar o impacto de cada parâmetro sobre o produto obtido pelas RPA, para que dessa forma, possam ser traçados paralelos entre escolha de parâmetros, eficiência energética das baterias do equipamento e condições climáticas, levando a um conjunto de especificações ideal para levantamentos.

Deste modo, a realização de novos estudos ainda se faz necessária para o desenvolvimento do método e refinamento dos resultados. A união entre a metodologia tradicional de inspeções *in loco*, associada a ferramentas como RPA e a inteligência artificial podem levar a resultados cada vez mais promissores. Além disso, com a padronização dos parâmetros, torna-se possível a criação de um sistema de regulamentação que consiga fiscalizar e garantir a consistência dos resultados obtidos na prática, dada a carência de trabalhos que estabeleçam diretamente a relação entre os parâmetros de voo e a qualidade dos produtos do levantamento.

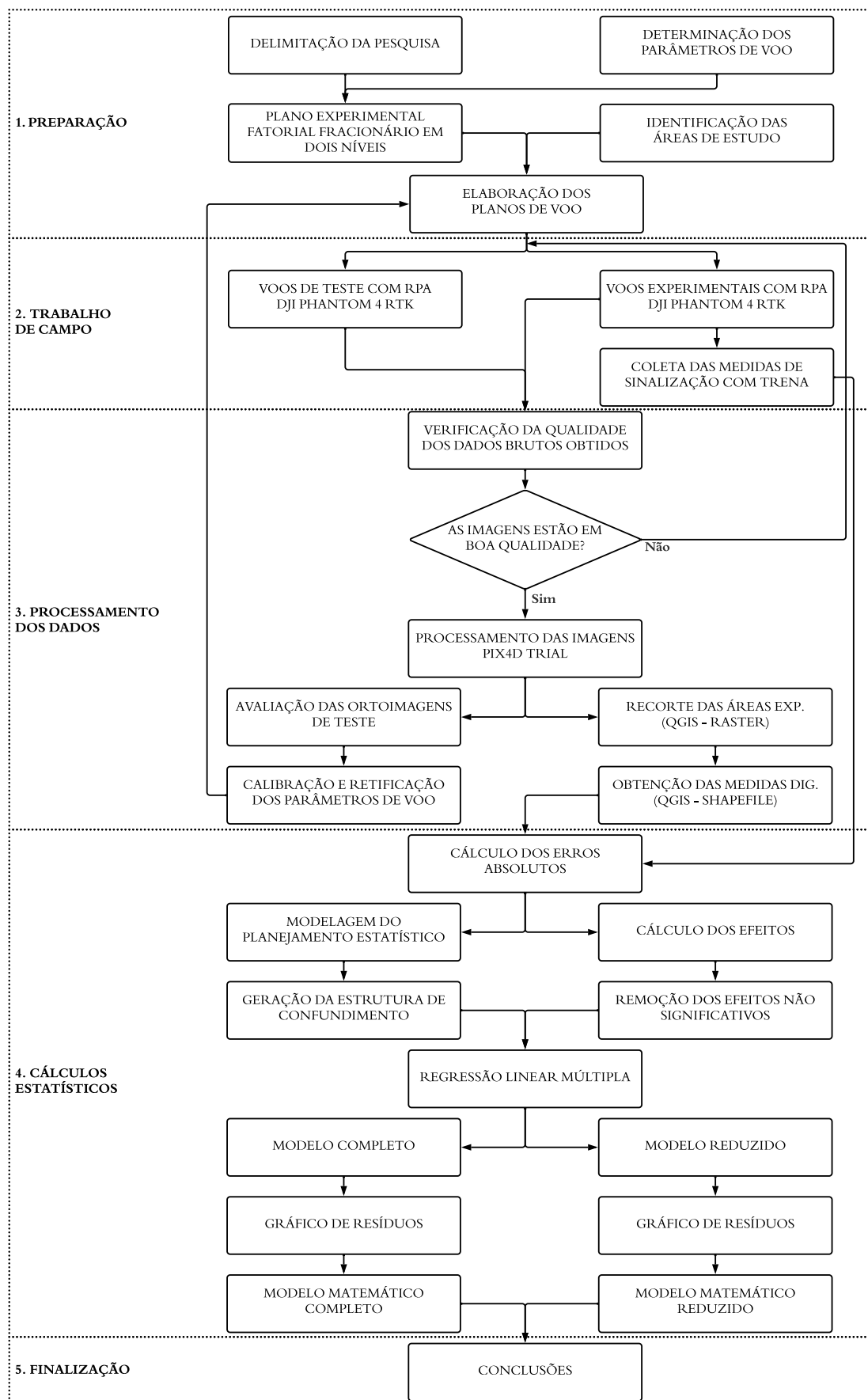
3 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com os objetivos geral e específico, o foco deste trabalho está na avaliação estatística dos parâmetros de voo adotados durante a fase de planejamento de um voo com drone durante um procedimento de uma ISV na detecção de falhas no pavimento, para que essa metodologia possa ser agregada como ferramenta auxiliar nos procedimentos já realizados por meio de avaliação *in loco*. Tendo em vista que o procedimento de uma ISV, como ilustra a Figura 3, de maneira simplificada, envolve 11 etapas entre reuniões de equipe, levantamento de dados e escrita de relatórios, tem-se que este é um procedimento complexo, dada a necessidade de formação de uma equipe qualificada para realizar os levantamentos *in loco*, gerando um processo demorado e oneroso em função do número de pessoas envolvidas.

Conforme expresso na revisão da bibliografia, estudos apontam o uso de drones como importantes ferramentas que podem ser aliadas nestes procedimentos, reduzindo o prazo para realização dos trabalhos bem como o número de pessoas envolvidas e consequentemente, aumentando a segurança dos profissionais. Por outro lado, durante a fase de desenvolvimento do plano de voo a ser seguido pelo drone, existem muitas configurações que podem ser adotadas para as variáveis altura e velocidade de voo, sobreposição frontal e lateral, uso de RTK, dentre outros, e que precisam ser escolhidas de maneira estratégica, para que se obtenha o melhor produto.

Sendo assim, para que sejam determinados os pesos de influência de cada parâmetro sobre o produto de um voo com drone, realizado com a finalidade de aplicação como ferramenta auxiliar em uma ISV com uso focado na determinação do estado de conservação da sinalização horizontal do pavimento, este trabalho seguiu uma metodologia estruturada, detalhada de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma metodológico



Fonte: Autor (2025)

3.1 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

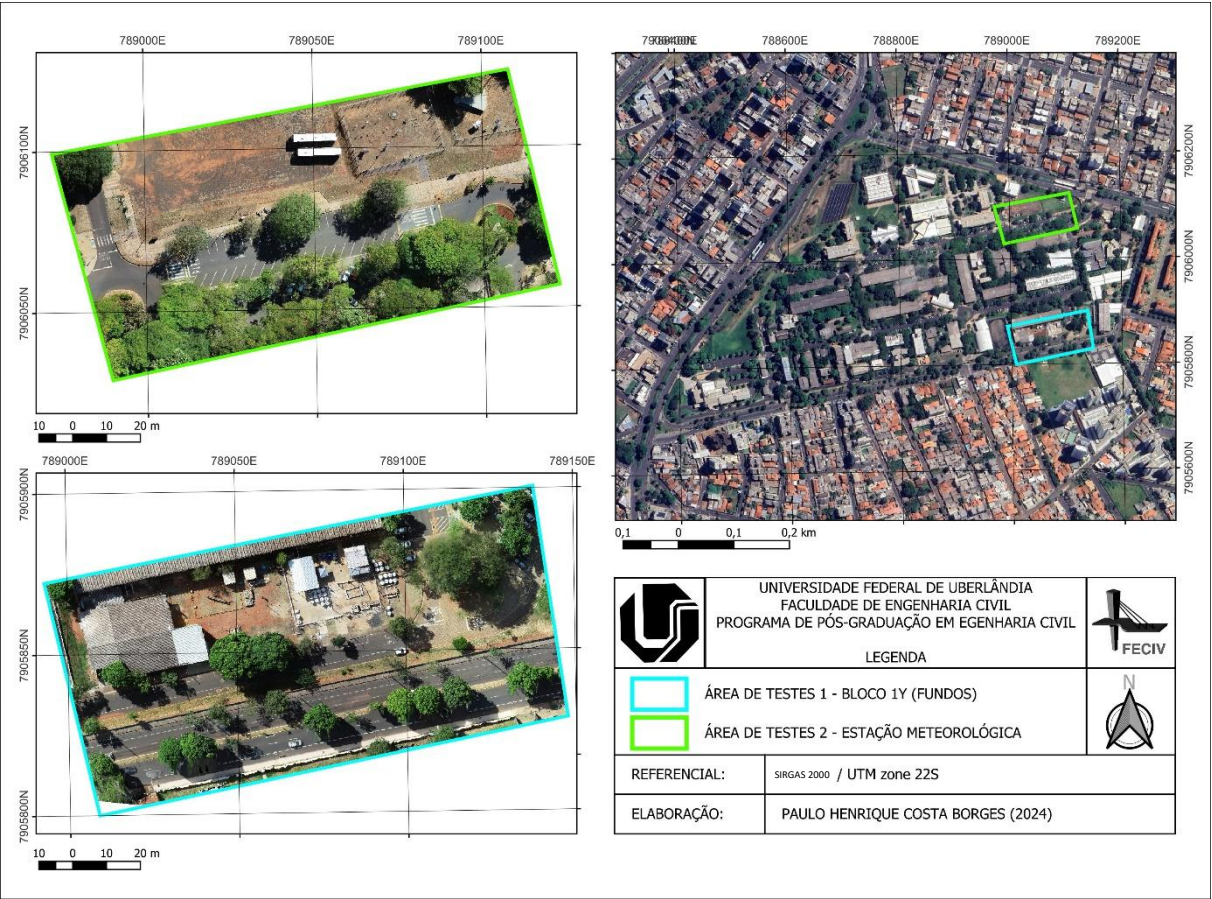
Tomando como base o fluxograma mostrado na Figura 5, o primeiro passo foi por meio da revisão bibliográfica delimitar o problema de estudo a ser considerado neste trabalho. Foram desenvolvidas pesquisas por meio das plataformas *ResearchGate*, *Scopus* e Portal de Periódicos CAPES, por meio das palavras-chave “UAV”, “drones”, “RPA”, “rodovias”, “roads”, “road safety inspection” e “inspeção de segurança viária”. Para filtrar estes resultados, foram considerados trabalhos realizados nos últimos dez anos e a partir daí foi feita uma análise manual dos trabalhos encontrados e considerados os que mais se enquadravam a essa temática.

A partir da revisão da bibliografia, o principal modal de transporte no Brasil responsável pela movimentação de cargas e passageiros é o rodoviário. Esse protagonismo implica na necessidade da adoção de medidas preventivas e corretivas para manter a segurança das rodovias, o que nos leva ao conceito de ISV e da possibilidade da adoção de novas ferramentas dentro de seu processo metodológico que traga melhores resultados. Também é notório o crescimento das aplicações de RPA dentro da engenharia, com trabalhos abordando a associação com mecanismos de inteligência artificial, o que chama a atenção para uma análise em torno do impacto que cada parâmetro de voo tem no seu produto final e consequentemente encontrando formas de refinar esses resultados para que possam ser adotados dentro dos procedimentos de ISV.

A área geral de estudo selecionada são trechos das vias internas do campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, localizada na cidade de Uberlândia/MG. O campus, localizado na zona leste da cidade de Uberlândia, possui uma área de 280.119 m², sendo considerado a sede da universidade, já que nele estão situados os prédios da Reitoria, além de órgãos administrativos e suplementares, como mostra a Figura 8. A Universidade Federal de Uberlândia possui ao todo 7 campi universitários localizados nas cidades de Ituiutaba, Monte Carmelo, Patos de Minas e Uberlândia, a última possuindo 4 campi espalhados pela cidade. De acordo com o site da Pró-Reitoria de Planejamento e Administração da universidade, com base no ano de 2022, somadas todas as modalidades de ensino, estão matriculados cerca de 26.270 estudantes, além do corpo docente e técnico administrativo.

passaram a ser realizados na área entre o Bloco 5V e a estação meteorológica, como mostra a Figura 9. Por se tratar de uma área aberta, possibilitou que todos os testes e calibrações prévias pudessem ser realizados livres de influências nos sinais de comunicação dos aparelhos.

Figura 9 - Delimitação das áreas de teste



Fonte: Autor (2024)

A etapa de testes e calibração foi fundamental para que todo o funcionamento do equipamento fosse compreendido e para que todas as calibrações, tanto de controle, aeronave, câmera e bússola fossem feitas de maneira adequada. Ao todo foram realizados 28 voos, sendo 11 na Área de Testes 1 (Bloco 1Y) e 17 na Área de Testes 2 (Bloco 5V), sendo que houve dois voos sem sucesso na Área de Testes 1, por falha de execução do planejamento de voo, conforme mostra o Quadro 3.

Quadro 3 - Resumo dos voos de teste

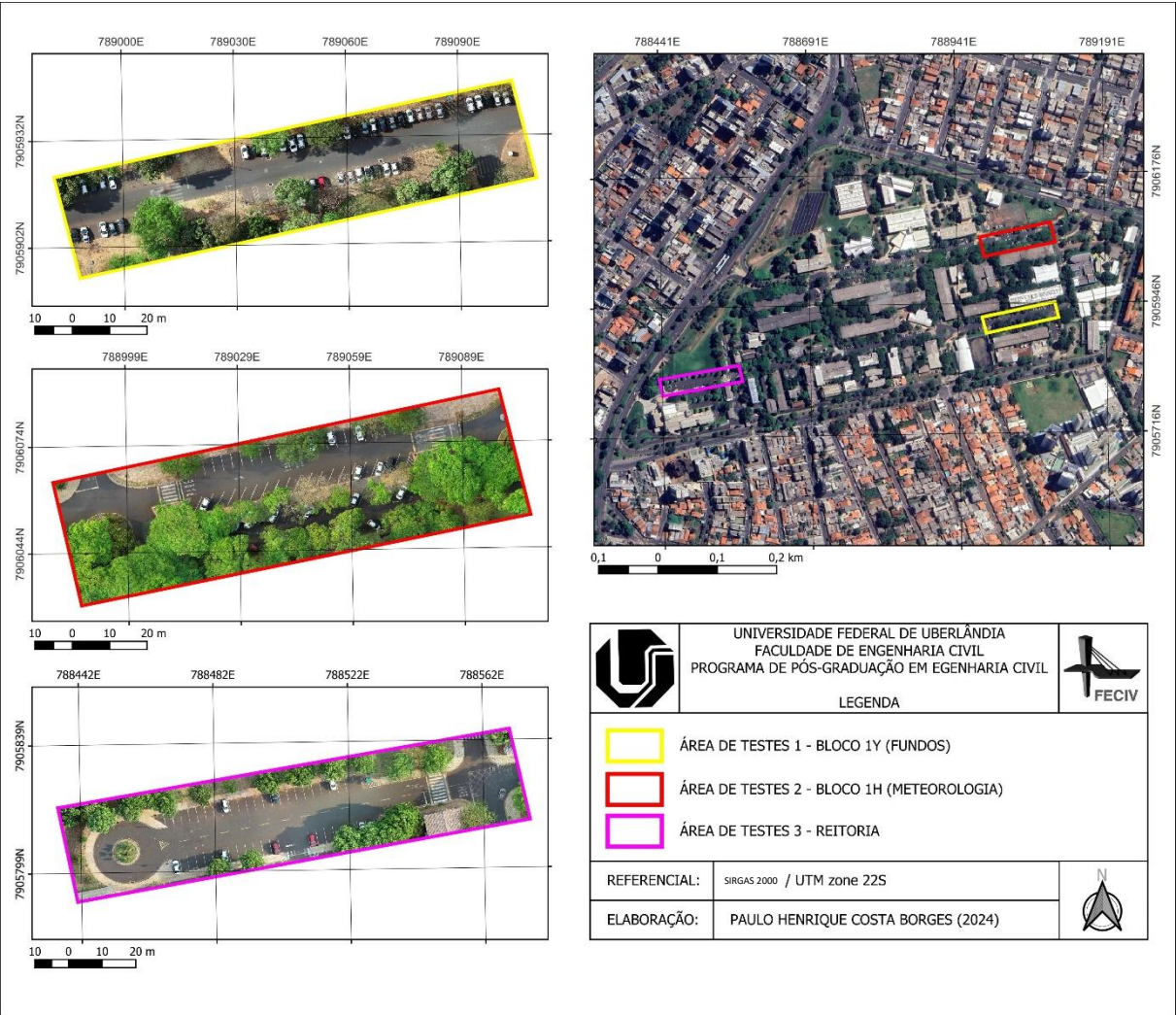
Nº VOO	DATA	HORÁRIO	ÁREA VOO	PLANEJAMENTO	LEVANTAMENTO
01	23/04/2024	15:26:36	Bloco 1Y	Drone Harmony	Top-Down
02	07/05/2024	14:16:42	Bloco 1Y	Drone Harmony	Top-Down
03	07/05/2024	14:47:56	Bloco 1Y	DJI Pilot	Top-Down
04	10/05/2024	10:07:30	Bloco 1Y	Drone Harmony	Top-Down
05	17/06/2024	15:17:35	Bloco 1Y	DJI Pilot	Top-Down
06	17/06/2024	15:49:30	Bloco 1Y	DJI Pilot	Top-Down
07	19/06/2024	-	Bloco 5V	DJI Pilot	-
08	19/06/2024	-	Bloco 5V	DJI Pilot	-
09	20/06/2024	14:25:26	Bloco 5V	DJI Pilot	Top-Down
10	20/06/2024	14:44:38	Bloco 5V	DJI Pilot	Top-Down
11	20/06/2024	14:58:06	Bloco 5V	DJI Pilot	Oblíquo
12	25/06/2024	09:57:49	Bloco 5V	DJI Pilot	Top-Down
13	25/06/2024	10:13:13	Bloco 5V	DJI Pilot	Top-Down
14	25/06/2024	15:33:41	Bloco 5V	DJI Pilot	Top-Down
15	25/06/2024	15:47:27	Bloco 5V	DJI Pilot	Top-Down
16	28/06/2024	10:11:14	Bloco 5V	DJI Pilot	Top-Down
17	28/06/2024	10:24:45	Bloco 5V	DJI Pilot	Top-Down
18	28/06/2024	10:40:25	Bloco 5V	Drone Harmony	Top-Down
19	28/06/2024	15:10:24	Bloco 5V	DJI Pilot	Top-Down
20	28/06/2024	15:24:07	Bloco 5V	DJI Pilot	Top-Down
21	28/06/2024	15:34:21	Bloco 5V	Drone Harmony	Top-Down
22	03/07/2024	14:59:54	Bloco 5V	DJI Pilot	Top-Down
23	03/07/2024	15:25:58	Bloco 5V	DJI Pilot	Top-Down
24	26/07/2024	10:26:26	Bloco 1Y	DJI Pilot	Oblíquo
25	26/07/2024	10:58:45	Bloco 1Y	Drone Harmony	Oblíquo
26	29/07/2024	14:00:20	Bloco 1Y	DJI Pilot	Oblíquo
27	29/07/2024	14:14:41	Bloco 1Y	DJI Pilot	Oblíquo
28	29/07/2024	14:30:19	Bloco 1Y	DJI Pilot	Oblíquo

Fonte: Autor (2024)

Tomando como base os testes iniciais, para a realização dos levantamentos de estudo, foram delimitadas 3 áreas para fins de comparação de resultados. A primeira área trata-se da Alameda das Jabuticabas, no trecho posicionado em frente ao Bloco 1Y. Essa área representa uma situação crítica, já que a área de estudo além de apresentar alta cobertura de árvores, também possui proximidade à grandes estruturas metálicas e à antena da Rádio e TV Universitária. Para a segunda área de estudo, foi delimitado um polígono na Alameda das Amoras, no trecho posicionado em frente ao Bloco 1H, próximo à estação meteorológica. Essa área representa uma situação intermediária, é posicionada próxima à Área de Testes 2, livre de interferências nos sinais de comunicação entre controle, aeronave e estação RTK, entretanto,

possui alta cobertura de árvores. Por fim, a última área selecionada para estudo, foi delimitada na Alameda das Jaboticabas, no trecho posicionado ao lado do Bloco 3P, o bloco da Reitoria. Dentro dos limites do Campus Santa Mônica, esse trecho de via se encontra distante das antenas de transmissão da Rádio e TV Universitária e apresenta uma baixa cobertura por árvores, em comparação aos outros dois trechos, representando então uma situação boa. As 3 áreas de estudo podem ser visualizadas na Figura 10.

Figura 10 - Áreas experimentais



Fonte: Autor (2024)

Nessa última etapa de levantamentos, foram realizadas coletas de dados para as análises finais de influência dos parâmetros de voo e limitações do uso da tecnologia na prática. Foram realizados, ao todo, 24 voos, sendo 8 voos em cada área de estudo definida.

3.2 LEVANTAMENTO DE CAMPO

3.2.1 Critérios de escolha dos parâmetros

Para a realização de um levantamento de imagens com RPA, a determinação de parâmetros como altura e velocidade de voo, uso de RTK e valores de sobreposição lateral e frontal, é essencial na fase de planejamento de voo. Nesta pesquisa, a principal lacuna investigada é a escolha desses parâmetros de tal forma que seja determinado o peso de influência de cada um sobre a qualidade das imagens, sendo assim foi fundamental a investigação de parâmetros previamente utilizados na bibliografia.

Dentre o material de estudo levantado por meio de buscas já realizadas nas plataformas *ResearchGate*, *Scopus* e Portal de Periódicos CAPES, foram selecionados 18 artigos publicados entre os anos de 2019 e 2024 cujo eixo central de pesquisa foi o uso de RPA aplicado em metodologias de detecção de defeitos em pavimentos asfálticos com ou sem a aplicação de algoritmos de inteligência artificial. Desses 18 artigos, apenas 9 mencionavam, parcialmente ou de forma completa, os parâmetros utilizados no levantamento das imagens, o Quadro 4 mostra o resumo dessas informações.

Quadro 4 - Resumo dos parâmetros de acordo com a revisão bibliográfica

ANO	AUTORES	RPA	PARÂMETROS				
			ALTURA (m)	VELOCIDADE (m/s)	RTK	SOBREPOSIÇÃO	
						LATERAL	FRONTAL
2019	DE OLIVEIRA, Dayanne Vieira; BRITO, Jorge Luís Silva.	DJI Phantom 3 Advanced	80	-	-	80%	80%
2020	PROSSER-CONTRERAS, Matías et al.	DJI Phantom 4 Pro+	10	1,5	-	80%	80%
2022	TILON, Sofia et al.	Delta Quad Pro	50~60	-	-	-	-
2022	ZHU, Chendong et al.	DJI Mavic 2	10~15	18~50	-	-	-
2023	ZHAO, Yingxiang et al.	DJI Meridian M300 RTK	60	18	-	70%	80%
2023	SILVA, Luís Augusto et al.	DJI Air 2S	50	-	-	-	-
2023	ELAMIN, Ahmed; EL-RABBANY, Ahmed.	DJI Matrice 600 Pro	25	-	Sim	-	-
2024	IBRAHIM, Heba Basyouni et al.	DJI Phantom 4 RTK	100	-	-	-	-
2024	CHEN, Xinbao et al.	DJI Mini 2	22,5	5	-	75%	75%

Fonte: Autor (2024)

Tomando como base os dados levantados no Quadro 4, é possível observar que os parâmetros utilizados nos levantamentos acabam sendo ofuscados pelo tema central de suas respectivas pesquisas. Tendo posse desses dados bibliográficos, consegue-se identificar os valores que são mais comumente utilizados, permitindo assim estabelecer um intervalo de valores adequado para esta pesquisa. Apesar de maiores alturas representarem maior eficiência de voo e de acordo com a legislação vigente, serem permitidos voos em alturas de até 120 metros, foi adotado um intervalo menor para a variável altura, para a garantia de menores valores de GSD. Outro fator importante para tal escolha, se dá pela proximidade das áreas experimentais ao aeroporto da cidade, estando em área de atenção.

3.2.2 Identificação dos equipamentos utilizados

Antes de iniciar o planejamento experimental foi necessário reconhecer todos os equipamentos a serem utilizados na fase de experimentação. Para a realização dos levantamentos, foi utilizado um RPA modelo Phantom 4 RTK, conforme mostra a Figura 11, equipado com um cartão microSD de 64 GB, que conta com um sensor CMOS de 1" com a capacidade de gravar vídeos em 4K a 60 fps e fotos de 20 MP. Este modelo de RPA ainda conta com sistemas de posicionamento GPS/GLONASS, sensor infravermelho para detecção de obstáculos num intervalo de 0,2 a 7,0 metros, peso total de aproximadamente 1391 gramas (incluindo bateria e hélices), além de uma autonomia de voo de aproximadamente 30 minutos, podendo alcançar uma altura máxima de 500 metros e percorrer até 8 km (DJI, 2024).

Figura 11 - DJI Phantom 4 RTK e rádio controle SDK



Fonte: Autor (2024)

O Phantom 4 RTK ainda possui em sua construção um módulo GNSS RTK integrado que fornece correções em tempo real para dados de posicionamento, garantindo a precisão centimétrica dos levantamentos, também registrando os dados de observação de satélites, possibilitando a aplicação de métodos de pós processamento como o *Post Processed Kinematics* (PPK). Este módulo pode ser conectado diretamente em uma estação base de RTK com envio de correções e observáveis via link de rádio interno/externo, ou via Rede de Transporte de RTMC via Protocolo de Internet (NTRIP) a partir de um ponto de acesso à internet (Rosalen e Amazonas, 2019). Além disso, pode-se ter como estação base, uma estação móvel GNSS.

Em sua construção, este modelo de RPA ainda conta com um gimbal equipado com 3 eixos de estabilização, sendo eles de inclinação, rotação e guinada, com possibilidades de ângulos de -90° a $+30^{\circ}$, que garante que a aeronave se movimente enquanto captura as imagens, sem que haja desfoque do obturador (Gruber, 2019). A aeronave é limitada a uma velocidade máxima de decolagem de 6 m/s, velocidade máxima de pouso de 3 m/s e velocidade máxima de operação de 13,89 m/s (50 km/h), respeitando seus limites de temperatura de 0°C a 40°C (DJI, 2024).

Juntamente com a aeronave, foi utilizado um controle remoto modelo DJI Enterprise Phantom 4 RTK SDK, que de acordo com especificações da fabricante, utiliza o sistema de transmissão DJI OcuSync para receber dados de imagem e vídeo do Phantom 4 RTK a uma distância de até 7 quilômetros. Neste modelo de controle, não existe uma tela ou sistema operacional integrado, possibilitando o uso um sistema Android ou iOS compatível, conectado via USB e utilize aplicativos compatíveis com a aeronave utilizada (DJI, 2024).

Para a correção de posicionamento da aeronave e devido sua grande compatibilidade de tecnologia, também foi utilizada uma estação móvel da DJI modelo D-RTK 2. De acordo com o site da fabricante, a estação móvel D-RTK 2 é um receptor GNSS de alta precisão, com suporte aos principais sistemas globais de navegação por satélite e que fornece correções posicionais em tempo real, gerando dados com precisões em escala centimétrica. A estação pode funcionar em 5 modos de operação, respeitando as limitações para alcance de sinal, de acordo com o Quadro 5.

Quadro 5 - Modos de operação e distância de sinal base D-RTK 2

MODO	FUNÇÃO	MODELO COMPATÍVEL	DISTÂNCIA
Modo 1	Estação base móvel	T20, T16, MG-1P RTK, Phantom 4 RTK, P4 Multispectral	2 km
Modo 2	Estação Base Estacionária	-	2 km
Modo 3	Dispositivo de mapeamento portátil	T20, T16, MG-1P RTK, Phantom 4 RTK, P4 Multispectral	2 km
Modo 4	Estação base móvel	M210 RTK V2	5 km
Modo 5	Estação base móvel	Modo Broadcast, M300 RTK, T40, T20P, T30, T10	6 km

Fonte: Adaptado de DJI (2024)

Além dos equipamentos utilizados para o levantamento das imagens, para o armazenamento, processamento e demais análises das imagens, de forma a assegurar a melhor qualidade e segurança dos dados, também foi utilizado um notebook com processador i9, 32GB de memória RAM e uma placa de vídeo modelo GeForce RTX 4060.

3.2.3 Planejamento de experimentos

Nesta etapa, após identificado os equipamentos a serem utilizados e os parâmetros comumente utilizados em outros trabalhos, partiu-se para a modelagem dos experimentos a serem executados. Considerando a proposta da pesquisa que é determinar a influência da escolha dos parâmetros de voo com a qualidade final do levantamento, foi necessário estabelecer uma relação de conexão entre os parâmetros a serem estudados, sendo estes, variáveis independentes, e uma variável dependente. Uma variável independente seria o Ground Sampling Distance (GSD), que, segundo Rakuasa (2024), é o valor do tamanho do pixel de uma câmera aérea que foi projetada no solo e está intimamente relacionado à câmera utilizada. De acordo com Gonçalves (2006), o GSD pode ser calculado a partir de uma relação entre altura de voo, distância focal da câmera e dimensões físicas do pixel no sensor CCD.

De acordo com a definição de Rakuasa (2024), apesar do GSD ser uma variável que informa o tamanho dos pixels que compõem a foto, ela sozinha não nos permite relacionar diretamente variáveis como velocidade de voo, sobreposição e uso de RTK. Sendo assim,

tornou-se necessário expandir o nível de análise. A qualidade das imagens obtidas por meio de RPA é resultado de vários fatores, podendo eles serem técnicos, provindos das especificações e construção do equipamento, fatores de escolha, vinculados aos parâmetros que são definidos diretamente pelo usuário e fatores climáticos, como incidência de luz solar ou vento.

Dessa forma, considerando que o objetivo final dessa metodologia é obter informações em torno das condições de sinalização de trânsito e seus dados geométricos, foi possível estabelecer uma relação entre medidas geométricas reais, feitas *in loco* e medidas realizadas a partir das imagens processadas obtidas por RPA. Sendo assim, ao invés de considerar os valores de GSD pós-processados, as análises foram realizadas considerando o erro absoluto da medida geométrica de sinalizações presentes nas imagens. O erro absoluto pode ser calculado a partir da diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro. A precisão das medidas realizadas nas imagens obtidas por RPA estão relacionadas à sua qualidade final, sendo assim, depende de todos os parâmetros utilizados durante o planejamento de voo, podendo ser utilizado como um índice para as análises experimentais.

Em vista das variáveis apresentadas, decidiu-se por trabalhar com uma modelagem de estudo seguindo as técnicas de um Planejamento Experimental Fatorial em dois níveis (2^k). Neste tipo de planejamento, o número de experimentos é determinado a partir do número de variáveis a serem consideradas no desenvolvimento da pesquisa. Para o caso em questão, inicialmente foram consideradas 5 variáveis independentes e 1 variável dependente:

Variáveis independentes:

- 1) Altura de voo (h) – metros (m);
- 2) Velocidade de voo (v) – metros por segundo (m/s);
- 3) Sobreposição frontal (sf) – porcentagem (%);
- 4) Sobreposição lateral (sl) – porcentagem (%);
- 5) Uso de RTK (RTK) – variável qualitativa (sim ou não).

Variável dependente:

- 1) Erro absoluto (E).

Através da revisão da bibliografia resumida no Quadro 4, foram determinados os valores a serem considerados para níveis inferior (-) e superior (+) para cada variável conforme mostra o Quadro 6. A determinação desses níveis é fundamental para a montagem do planejamento

experimental, pois é a partir dele que são determinadas quais parâmetros serão utilizados em cada voo.

Quadro 6 - Níveis das variáveis do planejamento

VARIÁVEL	NÍVEL	
	-	+
1. Altura de voo (h) - m	20	40
2. Velocidade de voo (v) - m/s	3	8
3. Sobreposição frontal (sf) - %	70	80
4. Sobreposição lateral (sl) - %	70	80
5. Uso de RTK (RTK)	não	sim

Fonte: Autor (2024)

Para um planejamento fatorial completo em dois níveis (2^k), o número de experimentos necessários é obtido através no número k de variáveis, sendo assim, para as 5 variáveis consideradas, o número de experimentos obtidos foi 32, cada um representando uma combinação diferente dos parâmetros considerados. Na Tabela 1 são mostradas as configurações dos parâmetros de acordo com os níveis para todos os 32 voos experimentais.

Tabela 1 - Planejamento fatorial completo em dois níveis (2^k)

EXPERIMENTO	VARIÁVEL				
	h	v	sf	sl	RTK
1	-	-	-	-	-
2	+	-	-	-	-
3	-	+	-	-	-
4	+	+	-	-	-
5	-	-	+	-	-
6	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-
8	+	+	+	-	-
9	-	-	-	+	-
10	+	-	-	+	-
11	-	+	-	+	-
12	+	+	-	+	-
13	-	-	+	+	-
14	+	-	+	+	-
15	-	+	+	+	-
16	+	+	+	+	-
17	-	-	-	-	+
18	+	-	-	-	+
19	-	+	-	-	+
20	+	+	-	-	+
21	-	-	+	-	+

22	+	-	+	-	+
23	-	+	+	-	+
24	+	+	+	-	+
25	-	-	-	+	+
26	+	-	-	+	+
27	-	+	-	+	+
28	+	+	-	+	+
29	-	-	+	+	+
30	+	-	+	+	+
31	-	+	+	+	+
32	+	+	+	+	+

Fonte: Autor (2024)

Fatores como condições climáticas e autonomia de bateria tanto da nave quanto do controle podem influenciar na qualidade dos levantamentos realizados com RPA, sendo assim, para realizar 32 voos em uma mesma área, acaba sendo um número elevado de experimentos, abrindo margem para a possibilidade desses fatores apresentarem influência significativa sobre os resultados. Para reduzir o número de experimentos, a alternativa encontrada foi realizar o Planejamento Fatorial Fracionário em dois níveis (2^{k-1}), que dessa forma reduziu-se o número de experimentos pela metade, possibilitando ainda que as mesmas análises pudessem ser feitas. A Tabela 2 mostra o design do novo planejamento.

Tabela 2 - Planejamento fatorial fracionário em dois níveis (2^{k-1})

EXPERIMENTO	VARIÁVEL				
	h	v	sf	sl	RTK
1	-	-	-	-	+
2	+	-	-	-	-
3	-	+	-	-	-
4	+	+	-	-	+
5	-	-	+	-	-
6	+	-	+	-	+
7	-	+	+	-	+
8	+	+	+	-	-
9	-	-	-	+	-
10	+	-	-	+	+
11	-	+	-	+	+
12	+	+	-	+	-
13	-	-	+	+	+
14	+	-	+	+	-
15	-	+	+	+	-
16	+	+	+	+	+

Fonte: Autor (2024)

Após serem iniciados os experimentos teste, com a finalidade de eliminação de erros sistemáticos, alguns desafios foram encontrados, dentre eles a limitação da velocidade de voo, que de acordo com o *software* de planejamento utilizado era de 1,8 m/s. Sendo assim, a variável velocidade foi removida, sendo realizados experimentos com 4 variáveis independentes, totalizando 16 experimentos de acordo com os níveis apresentados no Quadro 7.

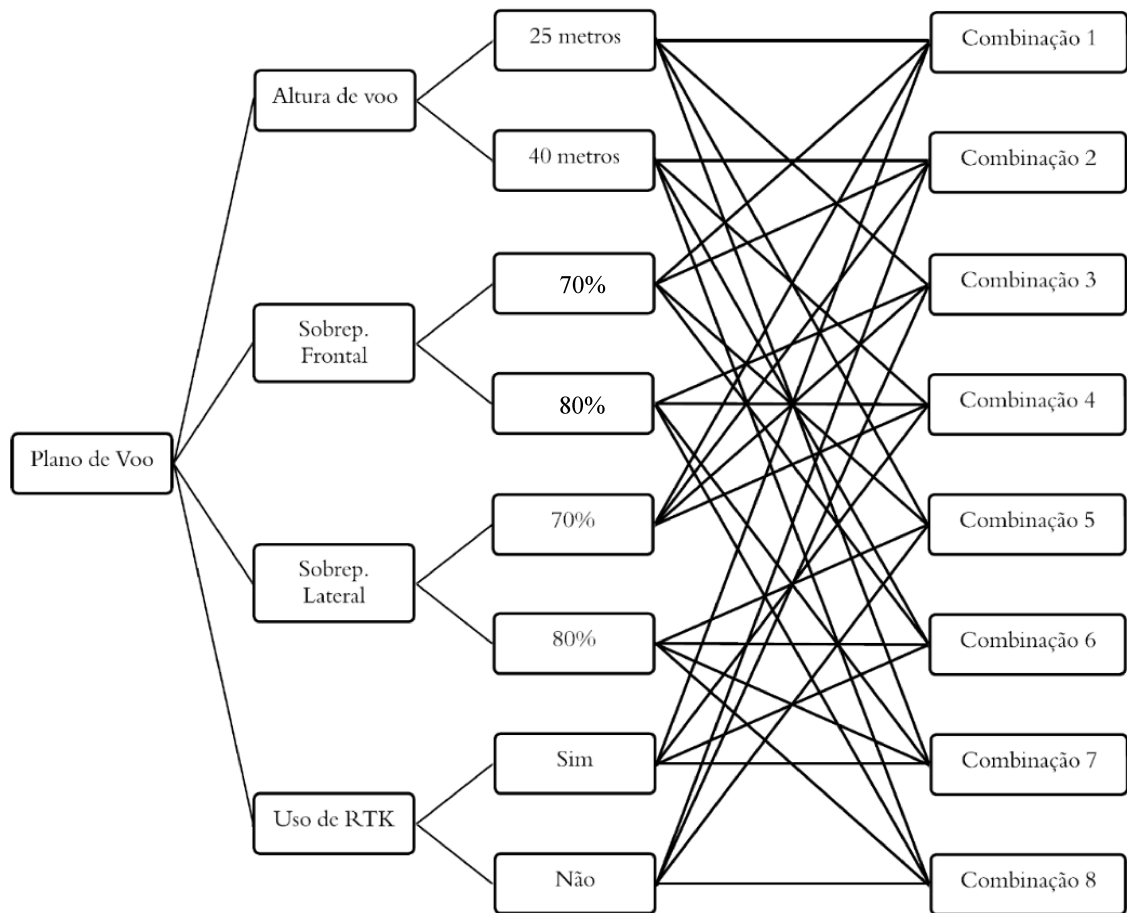
Quadro 7 - Níveis das variáveis do planejamento atualizadas

VARIÁVEL	NÍVEL	
	-	+
1. Altura de voo (h) - m	25	40
2. Sobreposição frontal (sf) - %	70	80
3. Sobreposição lateral (sl) - %	70	80
4. Uso de RTK (RTK)	não	sim

Fonte: Autor (2024)

Ainda durante a fase de testes para a eliminação de erros sistemáticos e devidas calibrações, a presença de obstáculos naturais, como copas de árvores, interferências de sinal, afetando a comunicação entre os equipamentos, também foram desafios encontrados. Levando em conta o novo número de variáveis, a proposta então foi expandir a realização dos mesmos experimentos para condições diferentes e que pudessem de alguma forma representar as principais barreiras que tal metodologia pode esbarrar ao ser levada para condições cotidianas. Para tal, a proposta foi realizar um Planejamento Fatorial Fracionário em dois níveis para três áreas distintas representando ambientes desfavorável, intermediário e favorável, sendo eles respectivamente as áreas de estudo 1, 2 e 3. A Figura 12 ilustra as combinações do novo planejamento desenvolvido.

Figura 12 - Esquema de combinações das variáveis experimentais



Fonte: Autor (2024)

Considerando o planejamento definitivo, fatorial fracionário em dois níveis, foi obtido um total de 8 experimentos, representando diferentes combinações dos parâmetros escolhidos. Adotando, também, a nova divisão de estudos em três áreas distintas, foram estabelecidos um total de 24 experimentos, sendo 8 em cada área. A distribuição dos experimentos é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 - Resumo do planejamento definitivo, fatorial fracionário em dois níveis (2^{k-1})

ÁREA	EXPERIMENTO	VARIÁVEL			
		h	sf	sl	RTK
Bloco 1Y	1	-	-	-	-
	2	+	-	-	+
	3	-	+	-	+
	4	+	+	-	-
	5	-	-	+	+
	6	+	-	+	-
	7	-	+	+	-
	8	+	+	+	+
Bloco 1H	9	-	-	-	-
	10	+	-	-	+
	11	-	+	-	+
	12	+	+	-	-
	13	-	-	+	+
	14	+	-	+	-
	15	-	+	+	-
	16	+	+	+	+
Bloco 3P	17	-	-	-	-
	18	+	-	-	+
	19	-	+	-	+
	20	+	+	-	-
	21	-	-	+	+
	22	+	-	+	-
	23	-	+	+	-
	24	+	+	+	+

Fonte: Autor (2024)

3.2.4 Plano de voo e lançamento das missões

Antes de iniciar o levantamento experimental, foi fundamental a realização de missões de teste para reconhecer os equipamentos e eliminar os possíveis erros sistemáticos, seguindo alguns critérios para familiarização com *softwares*, preparação para lançamento das missões e análises prévias. Esses levantamentos precursores foram realizados primeiramente na área de teste 1 e posteriormente na área de teste 2.

Para o desenvolvimento dos planos de voo teste, foram utilizados dois *softwares*, sendo eles o *DJI Pilot*, *software* próprio para o modelo de RPA utilizado, e o *Drone Harmony Professional License*, *software* terceirizado com alta compatibilidade com aeronaves DJI. Os primeiros desafios foram encontrados ainda em suas respectivas instalações. Para os levantamentos, foi utilizado um aparelho celular com sistema operacional Android versão 14,

entretanto, a última versão compatível com o DJI pilot segundo fóruns da fabricante é a versão Android 12. Para isso, foi necessário a organização de um outro aparelho celular compatível com o *software* desejado.

Outro desafio enfrentado foi em relação à compatibilidade do *Drone Harmony* com todos os equipamentos disponíveis para o estudo. Apesar do *software* apresentar compatibilidade e se conectar normalmente ao DJI *Phantom 4 RTK*, o aplicativo não oferece suporte de conexão com a estação D-RTK 2, sendo assim, a única função RTK disponível passou a ser a NTRIP, o que inviabiliza o uso de tal tecnologia em áreas rurais ou sem conexão com a internet, se limitando a levantamentos sem o uso do módulo RTK.

Na realização dos testes, foram considerados dois tipos diferentes de levantamento. O primeiro levantamento considerado foi o *top-down*. Neste levantamento as imagens são capturadas com a câmera a nadir, ou seja, com ângulo de -90° perpendicular ao solo, onde a trajetória percorrida pelo drone segue um padrão de varredura alternada, em ziguezague, maximizando a cobertura da área de estudo de acordo com os valores de sobreposição adotados.

O segundo levantamento adotado foi o oblíquo. Neste levantamento são realizadas 5 missões utilizando angulaturas diferentes de câmera para a captura das imagens, conforme a Figura 5. A primeira missão é realizada com a câmera a nadir, seguindo um padrão de varredura alternada. Já nas últimas 4 missões, as imagens são capturadas com um ângulo de inclinação da câmera definido pelo usuário, sendo recomendados valores entre -30° e -60° , para os levantamentos teste foram utilizados ângulos de -60° e -45° . O padrão de varredura, segue alternado, ou seja, em uma trajetória ziguezague, entretanto são feitos deslocamentos e mudanças no sentido da trajetória para norte, sul, leste e oeste, possibilitando a captura de fachadas e feições. O levantamento oblíquo é indicado não apenas para a construção de mapas, mas principalmente para modelagens 3D e mapas de elevação.

Para que fossem testadas formas diferentes de planejamento, foram utilizados os dois *softwares* disponíveis com a finalidade de identificar qual se adequaria mais à proposta do trabalho, considerando suas respectivas barreiras. A adoção das variáveis teste foram feitas em conjuntura com os níveis adotados durante a modelagem de experimentos, se adequando às limitações dos *softwares*, conforme mostra os itens e intervalos de valores do Quadro 8.

Quadro 8 - Resumo dos níveis das variáveis de teste

<i>SOFTWARE</i>	TIPO LEVANT.	VARIÁVEIS				
		ALTURA	VELOCIDADE	SOBREPOSIÇÃO		RTK
				FRONTAL	LATERAL	
DJI Pilot	Top-Down	25 m	1,8 m/s	75%	65%	Sim
Drone Harmony	Oblíquo	50 m	5 m/s	90%	80%	Não

Fonte: Autor (2024)

Os primeiros planos de voo foram criados a partir do *Drone Harmony* devido sua praticidade. Nele o plano de voo pode ser todo criado no site da desenvolvedora, a partir do navegador de internet em um computador, podendo ser feito o *upload* dos dados na nuvem e posteriormente baixados no dispositivo móvel com o *software* instalado. Entretanto devido sua incompatibilidade de conexão com a estação D-RTK 2, o *DJI Pilot* foi adotado como padrão experimental, pois mesmo sendo menos prático, devendo o plano ser feito inteiramente pelo dispositivo móvel, apresenta total compatibilidade com o drone e a estação.

Para dar início ao plano de voo, o primeiro passo foi a criação das áreas de estudo dentro do *Google Earth Pro* através da ferramenta polígono. Tendo posse da delimitação das áreas de estudo, ainda no *Google Earth Pro*, os polígonos puderam ser exportados no formato de arquivo kml. O arquivo kml trata-se de um arquivo que armazena informações geoespaciais e que podem ser importados dentro dos *softwares* de planejamento de voos com a finalidade de representarem as áreas de interesse em levantamentos com drones. Para os dois *softwares* utilizados, pode-se desenhar a área de estudo dentro de suas próprias interfaces, entretanto para fins de padronização, as áreas foram importadas a partir dos arquivos kml obtidos.

Os procedimentos para a elaboração de planos de voo seguem, em lógica, o mesmo script, sendo o primeiro passo a importação da área de interesse já criada no formato kml. Em seguida o tipo de levantamento desejado deve ser informado. A partir do *Drone Harmony*, uma série de levantamentos podem ser feitas, dentre elas se destacam as opções destinadas para mapeamento que são *top-down*, onde as imagens são capturadas a nadir e é indicado para a construção de ortofotos, dupla grelha, onde as imagens são capturadas a nadir seguindo duas trajetórias perpendiculares e é indicado para criar modelos 3D de grandes áreas e orbital, onde as imagens são capturadas seguindo uma trajetória de órbitas sobrepostas com ângulo variável, sendo indicada para criação de modelos 3D de áreas construídas. Já o *DJI Pilot*, apresenta levantamentos mais limitados, sendo possível realizar voos em *top-down*, oblíquo, e pontos de passagem.

Após a definição do tipo de levantamento, é necessário determinar os parâmetros de voo e de equipamento. Nesse estágio, são especificados modelo do drone e câmera utilizados, altura de voo, velocidade, percentuais de sobreposição frontal e lateral além do ângulo da câmera. Ambos os *softwares* geram uma rota otimizada, visando o menor percurso da aeronave, entretanto, em caso de demandas específicas, essa rota pode ser personalizada.

Durante essa fase, os voos de teste foram realizados sem um padrão pré-definido de escolha dos parâmetros. Inicialmente, utilizaram-se alturas e velocidades mais elevadas, com menor sobreposição, com o objetivo de reconhecer os equipamentos e se familiarizar com os *softwares* de planejamento. Após esses voos iniciais, os parâmetros foram ajustados para se aproximarem daqueles definidos no planejamento experimental. A Tabela 4 apresenta um resumo dos parâmetros utilizados nos voos de teste.

Tabela 4 - Resumo dos parâmetros utilizados nos voos de teste

Nº VOO	PARÂMETROS				
	ALTURA	VELOCIDADE	SOBREPOSIÇÃO FRONTAL	SOBREPOSIÇÃO LATERAL	RTK
01	50 metros	5,0 m/s	75%	65%	Não
02	50 metros	5,0 m/s	75%	65%	Não
03	50 metros	5,0 m/s	75%	65%	Sim
04	50 metros	5,0 m/s	75%	65%	Não
05	25 metros	5,0m/s	80%	70%	Sim
06	25 metros	3,0 m/s	80%	70%	Sim
07	-	-	-	-	-
08	-	-	-	-	-
09	25 metros	1,8 m/s	80%	70%	Sim
10	40 metros	3,0 m/s	80%	70%	Sim
11	40 metros	3,0 m/s	80%	70%	Sim
12	25 metros	1,8 m/s	80%	70%	Sim
13	40 metros	3,0 m/s	80%	70%	Sim
14	25 metros	1,8 m/s	80%	70%	Sim
15	40 metros	3,0 m/s	80%	70%	Sim
16	25 metros	1,8 m/s	80%	70%	Não
17	40 metros	3,0 m/s	80%	70%	Não
18	40 metros	3,0 m/s	80%	70%	Não
19	25 metros	1,8 m/s	80%	70%	Não
20	40 metros	3,0 m/s	80%	70%	Não
21	40 metros	3,0 m/s	80%	70%	Não
22	40 metros	1,8 m/s	90%	80%	Sim
23	40 metros	3,0 m/s	80%	70%	Sim
24	25 metros	1,8 m/s	80%	70%	Sim
25	40 metros	3,0 m/s	80%	70%	Sim
26	25 metros	1,8 m/s	80%	70%	Sim
27	25 metros	1,8 m/s	80%	70%	Sim
28	25 metros	1,8 m/s	80%	70%	Sim

Fonte: Autor (2024)

Realizados os voos de teste, partiu-se então para a realização dos voos experimentais. Nesse estágio da pesquisa, os planos de voos foram elaborados conforme os dados previamente definidos durante a modelagem experimental de um Planejamento Fatorial Fracionário em dois níveis conforme é apresentado no Quadro 7 e Tabela 3. Os voos foram planejados para serem executados no menor prazo possível para minimizar a influência de outros parâmetros não controláveis como incidência solar e velocidade do vento. A Tabela 5 mostra o resumo das previsões de número de fotos, GSD e tempo de voo de acordo com os planos realizados.

Tabela 5 - Estimativas dos planos de voo experimentais

ÁREA	EXP	ESTIMATIVA		
		Nº FTOS (un)	GSD (cm/px)	TEMPO (min/seg)
Bloco 1Y	1	91	0,68	7m 21s
	2	100	0,68	6m 54s
	3	29	1,10	2m 55s
	4	83	1,10	5m 52s
	5	62	0,68	4m 10s
	6	149	0,68	6m 54s
	7	42	1,10	2m 55s
	8	56	1,10	5m 52s
Bloco 1H	9	122	0,68	5m 29s
	10	120	0,68	8m 07s
	11	41	1,10	4m 24s
	12	79	1,10	5m 46s
	13	83	0,68	5m 29s
	14	179	0,68	8m 07s
	15	61	1,10	4m 24s
	16	52	1,10	5m 46s
Bloco 3P	17	97	0,68	4m 14s
	18	105	0,68	7m 24s
	19	31	1,10	3m 07s
	20	87	1,10	6m 17s
	21	65	0,68	4m 28s
	22	159	0,68	7m 24s
	23	44	1,10	3m 07s
	24	60	1,10	6m 17s

Fonte: Autor (2024)

Inicialmente foram realizados os levantamentos conforme o planejamento, separados de acordo com as áreas de estudo. Apesar de possuir uma bateria reserva, a autonomia de voo da aeronave gira em torno dos 20 minutos, considerando uma reserva de bateria para que a RPA possa retornar para o ponto de decolagem em segurança. Considerando isso, não foi possível

realizar todos os voos de uma área sem a interrupção por falta de bateria, sendo assim, para minimizar a influência dos parâmetros não controláveis tais como velocidade do vento, e incidência solar, os levantamentos foram realizados dentro de uma faixa específica de horário.

Para uma melhor avaliação, também foram coletados dados de velocidade do vento, velocidade de rajada, temperatura, índice de tempestade geomagnética (índice kp), porcentagem de cobertura de nuvens e distância de visibilidade. Foi utilizada a licença “assinatura de valor” do aplicativo UAV Forecast ® que fornece previsões das condições de voos por 24 horas a uma altitude de 150 metros. O aplicativo informa se as condições climáticas no momento do voo estão favoráveis ou não, de todo modo, evitou-se a realização de levantamentos em momentos que houvesse altas velocidades de vento e rajadas, bem como altos valores do índice kp, que pode afetar as operações de satélites. Na Tabela 6 é possível visualizar o resumo dos primeiros voos experimentais realizados.

Tabela 6 - Resumo da execução dos levantamentos experimentais

ÁREA	EXP	DATA	HORA	VENTO (km/h)	RAJADA (km/h)	TEMP. (°C)	kp	NUVEM (%)	VISIB. (km)
Bloco 1Y	1	25/09/2024	15:32	8	22	34	3,70	24	16
	2	25/09/2024	15:41	8	22	34	3,70	29	16
	3	25/09/2024	15:54	8	22	34	3,67	38	16
	4	25/09/2024	16:05	8	22	34	3,70	44	16
	5	25/09/2024	16:15	8	22	34	3,67	50	16
	6	30/09/2024	15:51	13	31	32	1,33	11	16
	7	30/09/2024	16:00	13	30	31	1,67	11	16
	8	30/09/2024	16:05	13	30	31	1,67	12	16
Bloco 1H	9	03/10/2024	17:19	4	12	35	2,67	45	16
	10	03/10/2024	17:34	4	11	34	2,67	39	16
	11	03/10/2024	17:26	4	11	35	2,67	42	16
	12	09/10/2024	17:08	8	18	34	2,00	72	16
	13	02/10/2024	13:15	8	23	35	1,33	6	16
	14	02/10/2024	16:55	3	11	34	1,33	61	16
	15	02/10/2024	17:06	3	10	34	1,33	61	16
	16	02/10/2024	17:12	3	9	34	1,33	62	16
Bloco 3P	17	07/10/2024	8:06	4	26	28	2,67	1	16
	18	07/10/2024	8:12	5	26	28	2,67	1	16
	19	07/10/2024	8:24	6	26	29	2,67	1	16
	20	07/10/2024	8:29	7	27	29	3,00	1	16
	21	03/10/2024	7:21	2	13	26	1,67	77	16
	22	03/10/2024	7:27	2	15	27	1,67	77	16
	23	03/10/2024	7:37	2	17	27	1,67	77	16
	24	03/10/2024	7:45	3	20	27	1,67	77	16

Fonte: Autor (2024)

Feita a primeira série de levantamentos, foram feitas as verificações da qualidade das imagens capturadas e constatou-se um erro aleatório não identificado no equipamento que prejudicou a qualidade de alguns desses levantamentos. Alguns voos apresentaram inicialmente a qualidade desejada das imagens, entretanto, para alguns levantamentos, as imagens obtidas se encontraram sem nitidez ou completamente desfocadas. A partir desse momento, fez-se uma classificação das imagens em três níveis, sendo “OK” para os levantamentos onde as imagens apresentaram qualidade adequada para o levantamento, “SEM NITIDEZ” para os levantamentos onde as imagens apresentaram alguma alteração que afetasse sua nitidez e “DESFOCADO” para os levantamentos onde as imagens apresentaram qualidade completamente desfocada. Desse modo, foi possível determinar quais levantamentos deveriam ser repetidos para que os resultados não apresentassem nenhuma tendência, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação das imagens dos levantamentos

ÁREA	EXP	RESOLUÇÃO	DEVE REPETIR?
Bloco 1Y	1	OK	NÃO
	2	OK	NÃO
	3	OK	NÃO
	4	DESFOCADO	SIM
	5	SEM NITIDEZ	SIM
	6	OK	NÃO
	7	OK	NÃO
	8	SEM NITIDEZ	SIM
Bloco 1H	9	SEM NITIDEZ	SIM
	10	SEM NITIDEZ	SIM
	11	OK	NÃO
	12	OK	NÃO
	13	DESFOCADO	SIM
	14	DESFOCADO	SIM
	15	DESFOCADO	SIM
	16	OK	NÃO
Bloco 3P	17	DESFOCADO	SIM
	18	OK	NÃO
	19	SEM NITIDEZ	SIM
	20	OK	NÃO
	21	SEM NITIDEZ	SIM
	22	OK	NÃO
	23	SEM NITIDEZ	SIM
	24	OK	NÃO

Fonte: Autor (2024)

Inicialmente, o problema identificado parecia apresentar um padrão recorrente após cada troca de bateria. Para abordar essa questão, optou-se por realizar dois voos consecutivos, configurados de maneira idêntica, com o objetivo de garantir que ao menos um deles atendesse à qualidade necessária das imagens. Caso os resultados ainda não fossem satisfatórios, foi planejado repetir o procedimento até que se obtivesse os dados desejados. A partir disso, foi elaborada uma nova planilha para registrar os dados dos levantamentos repetidos, conforme apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resumo da execução dos levantamentos de repetição

ÁREA	EXP	VOO	DATA	HORA	VENTO (km/h)	RAJADA (km/h)	TEMP. (°C)	kp	NUVEM (%)	VISIB. (km)
Bloco 1Y	4	25	14/10/2024	14:00	15	33	31	1,67	79	16
		26	14/10/2024	14:13	14	32	31	1,67	82	16
		27	14/10/2024	14:26	14	31	31	1,33	85	16
		28	14/10/2024	14:34	13	30	31	1,33	87	16
	5	29	07/10/2024	15:52	8	21	36	4,00	67	16
		30	07/10/2024	15:58	8	21	36	4,67	63	16
	8	31	07/10/2024	16:05	8	21	36	4,67	63	16
		32	07/10/2024	16:14	8	20	36	5,67	62	16
Bloco 1H	9	33	09/10/2024	16:54	8	19	34	2,33	74	16
		34	09/10/2024	17:01	8	19	34	2,33	73	16
	10	35	09/10/2024	17:26	7	16	33	2,00	70	16
	12	36	09/10/2024	17:18	7	17	33	2,33	71	16
	13	37	08/10/2024	15:22	15	33	36	3,67	72	16
		38	08/10/2024	15:29	15	33	36	4,00	72	16
	14	39	08/10/2024	15:36	15	33	36	4,00	73	16
		40	08/10/2024	15:50	15	32	36	4,00	74	16
	15	41	08/10/2024	16:00	15	32	36	4,00	74	16
		42	08/10/2024	16:06	14	31	36	3,67	73	16
Bloco 3P	17	43	08/10/2024	7:25	2	12	27	4,67	100	16
		44	08/10/2024	7:30	3	13	27	5,00	100	16
	19	45	08/10/2024	7:39	3	15	28	5,00	100	16
		46	08/10/2024	7:43	4	16	28	5,00	100	16
	21	47	18/10/2024	13:03	8	22	30	2,67	93	16
		48	18/10/2024	13:09	8	22	30	2,67	91	16
	23	49	18/10/2024	13:17	8	22	30	2,67	88	16
		50	18/10/2024	13:22	8	22	30	2,67	86	16

Fonte: Autor (2024)

Após a repetição dos levantamentos, foi elaborada uma nova planilha de classificação com o objetivo de avaliar a adequação das imagens para o estudo. Nesse processo, as imagens foram transferidas do cartão de memória da aeronave para o computador e analisadas

individualmente quanto à nitidez inicial. Nesta etapa, verificou-se que, em todos os casos, pelo menos um levantamento apresentou resultados satisfatórios, permitindo o prosseguimento para a próxima fase do trabalho. A classificação atualizada, incluindo os dados obtidos, é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Classificação das imagens dos levantamentos de repetição

ÁREA	EXP	VOO	RESOLUÇÃO	DEVE REPETIR?
Bloco 1Y	4	25	DESFOCADO	SIM
		26	DESFOCADO	SIM
		27	OK	NÃO
		28	SEM NITIDEZ	SIM
	5	29	DESFOCADO	SIM
		30	OK	NÃO
	8	31	OK	NÃO
		32	SEM NITIDEZ	SIM
Bloco 1H	9	33	SEM NITIDEZ	SIM
		34	OK	NÃO
	10	35	OK	NÃO
	12	36	OK	NÃO
	13	37	SEM NITIDEZ	SIM
		38	OK	NÃO
	14	39	SEM NITIDEZ	SIM
		40	OK	NÃO
	15	41	OK	NÃO
		42	OK	NÃO
Bloco 3P	17	43	SEM NITIDEZ	SIM
		44	OK	NÃO
	19	45	OK	NÃO
		46	OK	NÃO
	21	47	SEM NITIDEZ	SIM
		48	OK	NÃO
	23	49	DESFOCADO	SIM
		50	OK	NÃO

Fonte: Autor (2024)

Concluída a repetição dos levantamentos e a análise detalhada da nitidez das imagens, constatou-se que, para cada voo definido no planejamento experimental, ao menos um conjunto de dados apresentou qualidade suficiente para atender aos critérios básicos estabelecidos. Essa verificação possibilita a continuidade do estudo com base em dados adequados ao propósito de processamento das imagens.

3.2.5 Processamento dos dados

Posteriormente à realização dos voos, a descarga das imagens no computador e a avaliação da qualidade do banco de dados experimentais, foi iniciado o processamento fotogramétrico. Nesta etapa, utilizou-se o *software* computacional Pix4Dmapper, em sua versão de testes. Através deste *software*, com a entrada dos dados fotográficos com suas respectivas geotags, dos pontos de controle (GCP), quando aplicáveis, e de demais arquivos de geolocalização e nivelamento, são gerados como produtos finais a de nuvem de pontos, modelo digital de terreno (MDT), modelo digital de superfície (MDS) e ortofoto.

Antes do processamento, as imagens são inseridas no *software*, momento este em que são selecionados o sistema de coordenadas e sistema de referência terrestre utilizados, sendo adotados *Universal Transverse Mercator* (UTM) e *World Geodetic System 1984* (WGS 84), respectivamente, conforme padrão do *software*. Nesta etapa, também é possível realizar uma avaliação preliminar das informações associadas às imagens no momento de sua captura, tais como precisão espacial (latitude, longitude, altitude e acurácias horizontal e vertical) e orientação angular (omega, phi e kappa). A qualidade e a precisão desses dados permitem prever a confiabilidade do modelo final processado, uma vez que a ausência ou imprecisão dessas informações indicam o potencial do surgimento de falhas no processamento inicial do projeto.

Em seguida é selecionado o sistema de coordenadas dos dados de saída de processamento, sendo ele o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), por meio de reprojeção de camadas do QGis. Feito isso, o *software* fornece alguns *templates* de processamento, dentre eles o “3D Maps”, que gera um ortomosaico, modelo digital de superfície, nuvem de pontos e um modelo de malha tridimensional. Ao selecionar o *template*, é possível já iniciar o processamento ou ainda verificar as opções de processamento. Ao acessar as opções avançadas, uma gama de parâmetros relacionados às fases do processamento pode ser alterada tais como processamento inicial, obtenção da nuvem de pontos e malha tridimensional, além da obtenção do MDS, ortofoto e demais índices.

Para os processamentos, foram mantidos quase todos os parâmetros definidos pelo *template* utilizado. Foram ajustados apenas a estratégia de combinação, sendo utilizada uma estratégia geometricamente verificada, onde o *software* verifica a combinação dos pontos no momento de união das imagens de acordo com os parâmetros da câmera, de posicionamento e de sobreposição, método de calibração, sendo utilizada geolocalização e orientação precisas para os voos realizados com RTK e densidade da nuvem de pontos, sendo utilizada alta

densidade. Para manter a padronização dos produtos finais, todos os processamentos foram feitos seguindo o mesmo passo a passo de configurações preliminares. Na Tabela 10 é mostrado o tempo de processamento de cada voo e o tamanho final das pastas com os arquivos processados.

Tabela 10 - Resumo dos tempos de processamento

ÁREA	EXP.	VOO	Nº IMAGENS	TEMPO VOO (min)	TEMPO PROSS. (min)
Bloco 1Y	1	1	94	4	24
	2	2	102	8	15
	3	3	28	8	7
	4	27	83	6	16
	5	30	61	4	14
	6	6	153	6	94
	7	7	41	3	24
	8	31	56	5	33
Bloco 1H	9	34	122	6	18
	10	35	121	8	18
	11	11	43	5	8
	12	36	81	15	18
	13	38	82	5	23
	14	40	178	8	64
	15	42	63	5	34
	16	16	54	5	29
Bloco 3P	17	44	100	4	17
	18	18	113	8	19
	19	46	30	3	7
	20	20	86	6	16
	21	48	67	4	35
	22	22	163	7	90
	23	50	43	3	28
	24	24	62	6	44




Fonte: Autor (2024)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio do planejamento de experimentos do tipo fatorial fracionário em dois níveis para quatro variáveis independentes, foram executados os voos experimentais nas três áreas propostas. A partir desses levantamentos, foram selecionados elementos da sinalização de trânsito horizontal para a tomada de medidas em campo e virtualmente, para então serem determinados os erros absolutos e assim, delimitar uma variável dependente para as análises estatísticas.

Durante a fase de realização dos voos, foi constatada uma falha na captura das imagens. Inicialmente acreditou-se ser um padrão do equipamento utilizado, entretanto a ocorrência de tais problemas não seguiam uma regra de repetição. O que acarretou um número maior de repetições dos levantamentos, buscando eliminar os erros sistemáticos. O Quadro 9 mostra um mesmo recorte de um elemento de sinalização para três execuções distintas de um mesmo plano de voo. Foram feitas repetições até se obter o mesmo padrão de imagens para todos os experimentos.

Quadro 9 - Padrão de nitidez das imagens experimentais

IMAGEM DESFOCADA	IMAGEM SEM NITIDEZ	IMAGEM NORMAL
		

Fonte: Autor (2024)

Após avaliar e garantir a qualidade dos dados levantados e processar as imagens, foram tomadas as medidas virtuais, por meio das quais foi calculado o erro absoluto médio. Em uma análise prévia dos resultados, a partir da tabela de erros, é possível reorganizar os experimentos de acordo com os parâmetros de voo, onde é possível prever a principal variável que impacta a qualidade final dos processamentos. A Tabela 11 mostra a planilha de erros absolutos médios

reordenada de forma a refletir os níveis do planejamento experimental adotado, priorizando em sua ordem, os experimentos realizados com o uso da tecnologia RTK.

Tabela 11 - Erros médios reordenados de acordo com o uso do RTK

LOCAL	EXPERIMENTO	ERRO COMPRIMENTO (mm)	ERRO LARGURA (mm)	USO DO RTK
BLOCO 1Y	3	6	9	SIM
	5	8	9	SIM
	2	10	13	SIM
	8	13	17	SIM
	1	90	13	NÃO
	7	66	12	NÃO
	4	176	20	NÃO
	6	159	24	NÃO
BLOCO 1H	11	21	9	SIM
	13	21	12	SIM
	10	20	18	SIM
	16	21	13	SIM
	9	471	29	NÃO
	15	264	17	NÃO
	12	60	15	NÃO
	14	114	14	NÃO
BLOCO 3P	19	13	10	SIM
	21	14	9	SIM
	18	8	21	SIM
	24	9	20	SIM
	17	142	12	NÃO
	23	15	12	NÃO
	20	78	12	NÃO
	22	37	13	NÃO

Fonte: Autor (2024)

Foi possível identificar um padrão entre os levantamentos das três áreas de estudo. Os valores de erro absoluto médio para as medidas de comprimento apresentaram uma grande variação em seus valores, constando erros mais elevados para os levantamentos utilizados sem a tecnologia RTK. Entretanto, o mesmo padrão não foi observado nos erros absolutos referentes à largura dos elementos. Apesar de existirem fatores não controláveis que podem influenciar na rigidez dos resultados, ao investigar os resultados de processamento das imagens, foi possível traçar um paralelo entre o não uso do RTK, o processamento das imagens e os erros obtidos.

A tecnologia RTK corrige em tempo real os dados de posicionamento das imagens, tais como latitude, longitude e altitude. Apesar das aeronaves apresentarem em sua estrutura um mecanismo de posicionamento GPS/GLONASS, o mesmo não possui nível de precisão do RTK equivalente. É recomendado, em levantamentos utilizando RPA, que sejam utilizados os chamados *Ground Control Points* (GCPs), que são pontos de coordenadas conhecidas e que são inseridos durante o processamento. Apesar de sua importância em qualquer tipo de levantamento com RPA, por conta dos parâmetros de orientação interior e refinamento dos valores de parâmetros de orientação exterior, são ainda mais recomendados em levantamentos com dados de posicionamento com navegação (sem RTK). Entretanto, por esse estudo buscar a aplicação dessa metodologia em ISVs, o uso de GCPs representaria um grande desafio, já que para a determinação de suas coordenadas, necessitariam de mais tempo de rastreo, o que poderia ser inviável em aplicações rodoviárias.

Para os voos realizados sem RTK, o uso de GCPs também não foi empregado, como forma de avaliar a forma mais simples de se realizar os levantamentos. Em função disso, algumas falhas são perceptíveis durante o processamento. Para esses voos, houve um processo de distorção chamado efeito domo, que pode ser explicado como a ocorrência de um arqueamento da área processada, conforme mostra a Figura 13.

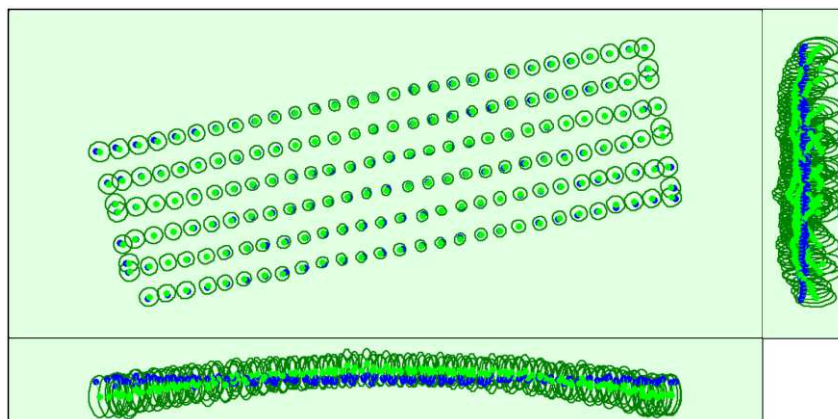
Figura 13 - Efeito domo ocorrido no processamento do Experimento 7 (Bloco 1H)



Fonte: Pix4D (2024)

Esse mesmo efeito pode ser observado através do relatório de processamento fornecido pelo Pix4D. Neste relatório, conforme a Figura 14, é possível visualizar as elipses de erro dos dados de posicionamento das imagens durante o levantamento, assim como é possível visualizar o arqueamento ocorrido (pontos verdes) em comparação ao posicionamento previsto de acordo com o plano de voo (pontos azuis). Apesar de ser visível na modelagem 3D, tais efeitos reverberam para a ortoimagem, que apresenta distorções, mesmo que não tão perceptíveis.

Figura 14 - Relatório posicional dos pontos de amarração (Experimento 7 - Bloco 1H)



Fonte: Pix4D (2024)

Ao se avaliar os processamentos dos experimentos, foi possível identificar a ocorrência do efeito domo em todos os voos realizados sem o emprego da tecnologia RTK (exceto Voo 7). Esses mesmos voos, também apresentaram alto valor de erro absoluto referente ao comprimento das medidas. Também foi possível observar que nas áreas onde havia uma maior cobertura vegetal, pelas copas das árvores, apresentaram distorções ainda mais intensas. Essas distorções podem ser justificadas pelo efeito da imprecisão posicional das imagens e o movimento das folhas, que acabam por gerar confusão ao algoritmo do *software* de processamento no momento de união das imagens. Essa distorção de arqueamento reflete diretamente na precisão das medidas tomadas na imagem processada, em especial a aquelas de maior tamanho (medidas de comprimento), justificando, então, o maior valor de erro absoluto médio referente a comprimento para os voos realizados sem o emprego do RTK.

Em função dessas distorções, optou-se por expandir o nível das análises de efeitos considerando como variável dependente não apenas o erro médio absoluto total, mas também os erros médios absolutos referentes ao comprimento e a largura. De acordo com o nível de significância adotado para análise dos efeitos, foram determinados os efeitos significativos para os três voos experimentais, em função das três variáveis dependentes.

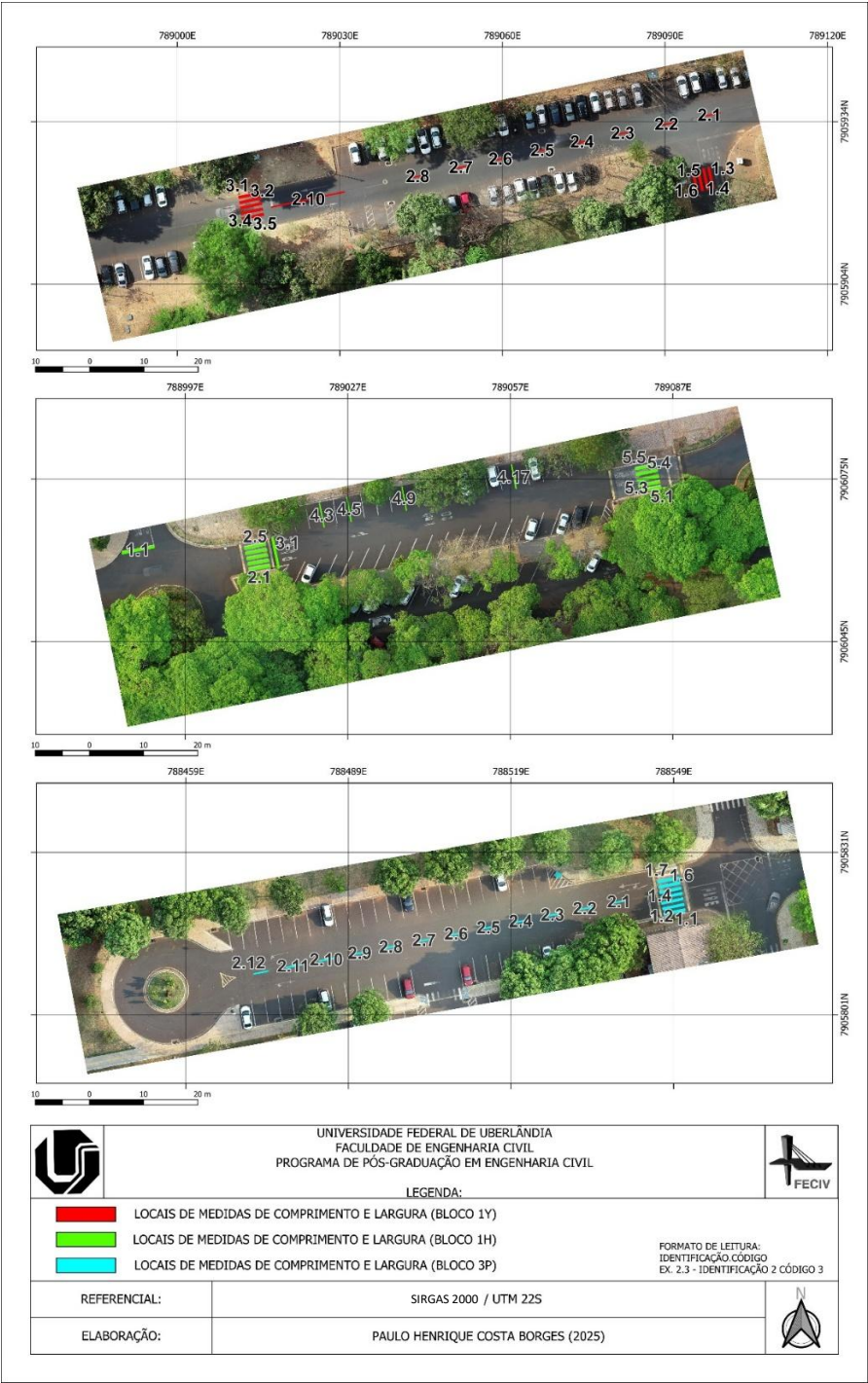
4.1 CÁLCULOS ESTATÍSTICOS E ANÁLISE DE ERROS

4.1.1 Medidas de sinalizações e cálculo dos erros

Assim como definido no planejamento fatorial, foi adotado como variável dependente o erro absoluto médio. Para que esse erro fosse determinado, foram necessários dois tipos de medidas, uma feita *in loco*, com o uso de uma trena de fibra de vidro, e outra realizada

digitalmente por meio das ortoimagens. Antes de tomar as medidas *in loco*, foi realizado um planejamento do trabalho de acordo com as áreas de levantamento. Foram feitas medidas em sinalizações de trânsito horizontais, dentre elas linha de divisão de fluxo, faixas de pedestre, linhas de divisão de estacionamento e linhas de sinalização transversal. Esses elementos foram selecionados do QGis a partir de uma das ortoimagens processadas de cada área de estudo conforme mostra a Figura 15.

Figura 15 - Identificação dos elementos a serem medidos



Fonte: Autor (2024)

Para facilitar o seu registro, os elementos selecionados foram devidamente codificados de acordo com sua localização, adotando os nomes dos blocos como referencial e números como indicativa de sentido. Dessa forma, o Quadro 10 foi construído para fins de locação em campo durante a realização das medidas.

Quadro 10 - Codificação dos elementos a serem medidos

LOCAL	IDENTIFICAÇÃO		DESCRIÇÃO	CÓDIGO
Bloco 1Y	1	Faixa 1	Faixa de pedestre do Bloco 3E para Bloco 1Y	3 ao 6
	2	Linha 1	Linha de divisão de fluxo da faixa de pedestres 1 até a 2	1 ao 10
	3	Faixa 2	Faixa de pedestre do Bloco 1U para Bloco 1Y	1 ao 5
Bloco 1H	1	Pare 1	Pare do Bloco 5O	1
	2	Faixa 1	Faixa de pedestre do Bloco 5V para Bloco 1H	1 ao 5
	3	Pare 2	Pare da faixa de pedestre 1	1
	4	Linha 1	Linhas de estacionamento da faixa 1 até faixa 2	3, 5, 9 e 17
	5	Faixa 2	Faixa de pedestres da estação meteorológica para Bloco 1H	1 ao 5
Bloco 3P	1	Faixa 1	Faixa de pedestres do Bloco 5H para o gramado	1 ao 7
	2	Linha 1	Linha de divisão de fluxo da faixa 1 até rotatória do Bloco 3P	1 ao 12

Fonte: Autor (2024)

A partir dessa codificação, foram tomadas as medidas de campo com uso de trena. Nesta etapa foram feitas medidas de comprimento e largura de cada elemento com a finalidade de se avaliar as possíveis distorções em medidas maiores e menores. Todas as medidas anotadas foram na escala dos milímetros, padrão adotado para todos os cálculos e medidas, de forma que os erros pudessem ser analisados detalhadamente, de forma que as imagens obtivessem maiores níveis de detalhamento. A Tabela 12 mostra o registro dessas medidas.

Tabela 12 - Tabelas de medidas com trena dos elementos de sinalização

BLOCO 1Y				BLOCO 1H				BLOCO 3P			
LOCAL	MEDIDA	COMP. (mm)	LARG. (mm)	LOCAL	MEDIDA	COMP. (mm)	LARG. (mm)	LOCAL	MEDIDA	COMP. (mm)	LARG. (mm)
1	3	4005	398	1	1	6104	412	1	1	4010	400
	4	4004	398	2	1	3992	389		2	4020	385
	5	4003	399		2	3987	408		3	4070	390
	6	4007	400		3	3995	406		4	4020	410
2	1	4136	134		4	3979	405		5	4020	405
	2	4147	131		5	3977	418		6	4015	425
	3	3945	135	3	1	5575	374		7	4010	430
	4	3817	135	4	3	4423	124	2	1	2785	158
	5	3866	134		5	4476	122		2	2805	184
	6	3783	134		9	4459	113		3	2807	186
	7	3969	139		17	4480	125		4	2795	187
	8	3876	132	5	1	4010	363		5	2786	195
	10	13746	136		2	4005	415		6	2778	190
					3	3999	397		7	2783	193
					4	3997	404		8	2810	182
					5	3978	400		9	2809	179
3	1	4005	403						10	2804	185
	2	4006	400						11	2795	174
	3	4001	398						12	2797	165
	4	3998	399								
	5	4007	395								

Fonte: Autor (2024)

As mesmas medidas, obtidas anteriormente com trena, foram realizadas para cada voo experimental, obtidas digitalmente utilizando o QGis, por meio da inserção manual de vetores de linha sobre os elementos analisados. Foi feita uma vetorização das áreas através da criação de uma camada *shapefile* para cada área experimental dentro de cada *geopackage* referente aos voos realizados. Através dessa camada *shapefile* do tipo linha, foram desenhadas todas as medidas a serem obtidas.

Para facilitar este processo, por ser um trabalho manual, foram inseridas linhas de largura em comprimento juntas sobre cada elemento. Feito isso, essas linhas foram separadas em geometrias individuais para que suas respectivas medidas fossem calculadas. Com base nessas geometrias, por meio da tabela de atributos construída durante a inserção das linhas, foi inserida uma nova coluna, onde, utilizando a funcionalidade de análise de comprimento, foram calculadas todas as medidas digitalmente que são apresentadas nas Tabelas 13 a 15.

Tabela 13 - Tabela de medidas digitais de comprimento e largura do Bloco 1Y (por voo)

BLOCO 1Y																	
LOC.	MED.	V.01 (mm)		V.02 (mm)		V.03 (mm)		V.27 (mm)		V.30 (mm)		V.06 (mm)		V.07 (mm)		V.31 (mm)	
		C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.
1	3	4321	422	4011	411	3992	408	4099	414	4019	404	3907	386	4047	378	4014	419
	4	4197	431	4025	394	3993	410	4093	449	4006	419	3906	404	4042	399	4022	417
	5	4200	420	4008	399	3999	408	4113	411	4018	403	3898	397	4036	409	4015	409
	6	4116	430	4002	416	3999	399	4146	392	4013	400	4017	147	4045	406	4026	412
2	1	4156	150	4151	154	4124	140	4287	164	4144	146	4037	147	4179	139	4138	160
	2	4131	144	4162	153	4157	145	4314	160	4152	133	3840	142	4195	143	4166	150
	3	4104	137	3946	147	3943	143	4084	164	3952	134	3734	144	3987	147	3944	155
	4	3903	149	3836	157	3827	143	4004	153	3830	166	3763	125	3857	144	3807	169
	5	3972	145	3873	141	3874	140	3954	165	3866	141	3682	155	4072	140	3875	170
	6	3688	150	3788	142	3783	134	3953	139	3800	155	3854	138	3740	157	3788	148
	7	3887	152	3983	161	3967	142	4144	165	3993	155	3782	147	4018	153	4002	149
	8	3870	146	3873	156	3876	140	4055	147	3879	145	3316	139	3935	154	3890	158
	10	13831	145	13738	137	13747	122	14328	142	13733	135	13345	125	13928	137	13744	130
3	1	4046	405	4020	395	4009	356	4182	412	4006	399	3899	362	4074	401	4026	400
	2	4032	405	4013	413	4014	407	4194	421	4009	410	3908	392	4070	419	4014	411
	3	4034	404	4019	416	4009	404	4195	422	4017	409	3921	392	4069	428	4016	413
	4	4035	402	4017	410	4007	396	4173	410	3998	400	3896	387	4062	412	4021	414
	5	4037	400	4018	413	4014	397	4177	419	4017	411	3905	401	4077	418	4025	409

Fonte: Autor (2024)

Tabela 14 - Tabela de medidas digitais de comprimento e largura do Bloco 1H (por voo)

BLOCO 1H																	
LOC.	MED.	V.34 (mm)		V.35 (mm)		V.11 (mm)		V.36 (mm)		V.38 (mm)		V.40 (mm)		V.42 (mm)		V.08 (mm)	
		C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.
1	1	5349	371	6123	424	6133	416	6022	408	6128	409	5939	413	5685	390	6122	417
2	1	3535	378	4005	429	3989	410	3933	413	3997	429	3875	420	3741	402	3990	414
	2	3530	369	4009	386	3996	391	3939	379	4001	403	3875	375	3723	389	4016	399
	3	3546	349	4010	390	3999	412	3935	407	3994	399	3878	375	3711	378	3993	373
	4	3527	373	3986	432	3989	390	3935	400	3987	423	3863	404	3728	381	3998	421
	5	3512	350	3975	415	3993	431	3889	396	3983	418	3842	411	3723	394	3971	405
3	1	5101	413	5722	396	5714	375	5614	448	5674	391	5552	395	5366	374	5743	382
4	3	3933	124	4421	149	4414	139	4356	140	4467	132	4297	130	4130	142	4411	149
	5	3981	121	4467	131	4463	121	4406	132	4459	136	4342	137	4193	127	4465	125
	9	4006	111	4458	125	4455	120	4410	130	4451	131	4325	129	4187	141	4468	131
	17	4010	120	4475	138	4445	139	4409	126	4456	136	4336	141	4197	147	4484	132
5	1	3597	332	4023	386	4013	366	3953	367	4030	377	3902	355	3787	355	4022	373
	2	3583	370	4033	419	4023	396	3967	402	4032	404	3924	398	3786	370	4019	408
	3	3554	351	3981	424	3978	399	3894	379	3976	404	3884	392	3740	417	3989	385
	4	3562	378	3974	419	4010	411	3941	415	3990	429	3887	422	3742	406	3991	423
	5	3563	369	3983	415	4003	414	3938	400	3993	407	3890	401	3757	404	3996	414

Fonte: Autor (2024)

Tabela 15 - Tabela de medidas digitais de comprimento e largura do Bloco 3P (por voo)

LOC.	MED.	BLOCO 3P															
		V.44 (mm)		V.18 (mm)		V.46 (mm)		V.20 (mm)		V.48 (mm)		V.22 (mm)		V.50 (mm)		V.24 (mm)	
		C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.
1	1	3862	391	4015	406	4001	386	3924	387	4006	395	3983	387	4013	395	4015	414
	2	3869	395	4018	417	4017	400	3927	403	4017	401	3982	395	4010	403	4031	411
	3	3920	379	4076	390	4077	393	3986	378	4076	388	4029	398	4070	403	4079	393
	4	3855	387	4025	395	4011	405	3924	388	4027	413	3971	389	4017	399	4026	400
	5	3821	407	4008	433	3985	409	3923	401	4011	410	3965	405	3980	402	4015	418
	6	3863	379	4027	421	4026	407	3932	408	4029	423	3984	422	4023	424	4022	421
	7	3850	401	4016	409	4002	395	3917	389	-	-	3963	388	3983	379	4013	404
2	1	2662	173	2778	202	2770	171	2736	159	2757	175	2746	183	2755	176	2780	206
	2	2681	186	2801	182	2796	181	2745	163	2797	178	2783	204	2813	173	2811	200
	3	2705	196	2804	207	2790	196	2752	199	2794	208	2777	195	2798	200	2819	201
	4	2683	183	2796	222	2789	197	2741	175	2780	203	2759	194	2781	206	2801	223
	5	2627	186	2765	208	2756	180	2715	195	2758	199	2704	208	2756	208	2760	209
	6	2629	210	2765	218	2755	197	2704	203	2740	211	2732	194	2754	203	2773	233
	7	2651	185	2767	207	2769	200	2705	180	2778	189	2732	175	2776	209	2776	197
	8	2691	190	2803	216	2804	192	2726	198	2791	203	2790	207	2800	190	2815	205
	9	2690	181	2822	208	2800	180	2745	190	2809	195	2796	180	2821	192	2830	213
	10	2647	197	2801	212	2789	196	2703	186	2784	200	2782	191	2780	175	2793	203
	11	2655	189	2783	201	2769	182	2710	180	2774	176	2750	178	2782	175	2782	203
	12	2661	156	2789	189	2786	168	2714	171	2779	166	2775	184	2780	160	2787	173

Fonte: Autor (2024)

Em posse dessas medidas, tanto *in loco* quanto extraídas das imagens digitais, possibilitaram a determinação dos erros absolutos, que por sua vez permitiram a comparação direta entre valores reais, coletados em campo, e os valores extraídos a partir das ortoimagens. As medidas obtidas em campo serviram como referência para avaliar tanto a precisão e o alinhamento dos dados fotogramétricos e ortoimagens. As medidas obtidas por meio das ortofotos possibilitaram a coleta sistemática de dados que refletem sobre o processamento das imagens. Por meio do erro absoluto, foi estabelecida uma métrica clara para identificar as possíveis falhas que por consequência afetam a qualidade geral do produto final.

A partir desses erros, também foi possível a detecção de *outliers* além de uma visão panorâmica para análise prévia da influência de alguns parâmetros sobre o modelo. A identificação de valores discrepantes é indício da ocorrência de falhas pontuais ou limitações no levantamento, assim como possíveis falhas de alinhamento das imagens durante a fase de processamento. As Tabelas 16 a 18 mostram os erros absolutos obtidos.

Tabela 16 - Tabela de erro absoluto de comprimento e largura do Bloco 1Y (por voo)

BLOCO 1Y																	
LOC.	MED.	V.01 (mm)		V.02 (mm)		V.03 (mm)		V.27 (mm)		V.30 (mm)		V.06 (mm)		V.07 (mm)		V.31 (mm)	
		C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.
1	3	316	24	6	13	13	10	94	16	14	6	98	12	42	20	9	21
	4	193	33	21	4	11	12	89	51	2	21	98	6	38	1	18	19
	5	197	21	5	0	4	9	110	12	15	4	105	2	33	10	12	10
	6	109	30	5	16	8	1	139	8	6	0	10	253	38	6	19	12
2	1	20	16	15	20	12	6	151	30	8	12	99	13	43	5	2	26
	2	16	13	15	22	10	14	167	29	5	2	307	11	48	12	19	19
	3	159	2	1	12	2	8	139	29	7	1	211	9	42	12	1	20
	4	86	14	19	22	10	7	187	18	13	31	54	10	40	9	10	34
	5	106	11	7	7	8	6	88	31	0	7	184	21	206	6	9	36
	6	95	16	5	8	0	0	170	5	17	21	71	4	43	23	5	14
	7	82	13	14	22	2	3	175	26	24	16	187	8	49	14	33	10
	8	6	14	3	24	0	8	179	15	3	13	560	7	59	22	14	26
	10	85	9	8	1	1	14	582	6	13	1	401	11	182	1	2	6
3	1	41	2	15	8	4	47	177	9	1	4	106	41	69	2	21	3
	2	26	5	7	13	8	7	188	21	3	10	98	8	64	19	8	11
	3	33	6	18	18	8	6	194	24	16	11	80	6	68	30	15	15
	4	37	3	19	11	9	3	175	11	0	1	102	12	64	13	23	15
	5	30	5	11	18	7	2	170	24	10	16	102	6	70	23	18	14
E (mm)		90,90	13,16	10,72	13,29	6,45	9,06	176,43	20,38	8,65	9,91	159,62	24,38	66,45	12,58	13,23	17,30

Fonte: Autor (2024)

Tabela 17 - Tabela de erro absoluto de comprimento e largura do Bloco 1H (por voo)

BLOCO 1H																	
LOC.	MED.	V.34 (mm)		V.35 (mm)		V.11 (mm)		V.36 (mm)		V.38 (mm)		V.40 (mm)		V.42 (mm)		V.08 (mm)	
		C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.
1	1	755	41	19	12	29	4	82	4	24	3	165	1	419	22	18	5
2	1	457	11	13	40	3	21	59	24	5	40	117	31	251	13	2	25
	2	457	39	22	22	9	17	48	29	14	5	112	33	264	19	29	9
	3	449	57	15	16	4	6	60	1	1	7	117	31	284	28	2	33
	4	452	32	7	27	10	16	44	5	8	18	116	1	251	24	19	16
	5	465	68	2	3	16	13	88	22	6	0	135	7	254	24	6	13
3	1	474	39	147	22	139	1	39	74	99	17	23	21	209	0	168	8
4	3	490	0	2	25	9	15	67	16	44	8	126	6	293	18	12	25
	5	495	1	9	9	13	1	70	10	17	14	134	15	283	5	11	3
	9	453	2	1	12	4	7	49	17	8	18	134	16	272	28	9	18
	17	470	5	5	13	35	14	71	1	24	11	144	16	283	22	4	7
5	1	413	31	13	23	3	3	57	4	20	14	108	8	223	8	12	10
	2	422	45	28	4	18	19	38	13	27	11	81	17	219	45	14	7
	3	445	46	18	27	21	2	105	18	23	7	115	5	259	20	10	12
	4	435	26	23	15	13	7	56	11	7	25	110	18	255	2	6	19
	5	415	31	5	15	25	14	40	0	15	7	88	1	221	4	18	14
E (mm)		471,75	29,60	20,51	18,00	21,95	9,95	60,77	15,57	21,34	12,87	114,05	14,20	264,96	17,60	21,21	13,96

Fonte: Autor (2024)

Tabela 18 - Tabela de erro absoluto de comprimento e largura do Bloco 3P (por voo)

		BLOCO 3P															
LOC.	MED.	V.44 (mm)		V.18 (mm)		V.46 (mm)		V.20 (mm)		V.48 (mm)		V.22 (mm)		V.50 (mm)		V.24 (mm)	
		C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.	C.	L.
1	1	148	9	5	6	9	14	86	13	4	5	27	13	3	5	5	14
	2	151	10	2	32	3	15	94	18	3	16	38	10	10	18	11	26
	3	150	11	6	0	7	3	84	12	6	2	41	8	0	13	9	3
	4	165	23	5	15	9	5	96	22	7	3	49	21	3	11	6	10
	5	199	2	12	28	35	4	97	4	9	5	55	0	40	3	5	13
	6	152	46	12	4	11	18	83	17	14	2	31	3	8	1	7	4
	7	160	29	6	21	8	35	93	41	-	-	47	42	27	51	3	26
2	1	123	15	7	44	15	13	49	1	28	17	39	25	30	18	6	48
	2	124	2	4	3	9	3	60	21	8	6	22	20	8	11	6	16
	3	102	10	3	21	17	10	55	13	13	22	30	9	9	14	12	15
	4	112	4	1	35	6	10	54	12	15	16	36	7	14	19	6	36
	5	159	9	21	13	30	15	71	0	28	4	82	13	30	13	26	14
	6	149	20	13	28	23	7	74	13	38	21	46	4	24	13	5	43
	7	132	8	16	14	14	7	78	14	5	4	51	18	7	16	7	4
	8	119	8	7	34	6	10	84	16	19	21	20	25	10	8	5	23
	9	119	2	13	29	9	1	64	11	0	16	13	1	12	13	21	34
	10	157	12	3	27	15	11	101	1	20	15	22	6	24	10	11	18
	11	140	15	12	27	26	8	85	6	21	2	45	4	13	1	13	29
	12	136	9	8	24	11	3	83	6	18	1	22	19	17	5	10	8
E (mm)		141,64	12,98	8,49	22,02	14,17	9,90	78,07	12,74	14,82	10,13	38,27	13,06	15,83	13,18	9,25	20,47

Fonte: Autor (2024)

Ao se estabelecer uma conexão entre os parâmetros de voos mostrados na Tabela 3 e os erros absolutos e médios obtidos nas Tabelas 16 a 18, observa-se que os maiores erros ocorreram nos levantamentos sem o uso do RTK. Também é possível observar que os maiores erros ocorreram nas medidas de largura, medidas de menor escala. Quanto a área de experimento, é possível identificar que os maiores erros de medidas ocorreram na área próxima ao Bloco 1H, região com alta cobertura de árvores, seguido do Bloco 1Y, e por fim, o Bloco 3P.

4.1.2 Modelo estatístico para Planejamento Fatorial Fracionário

A relação entre as variáveis do planejamento fatorial fracionário em dois níveis foi estabelecida com base no erro médio das medidas dos elementos, permitindo, dessa forma, chegar a um valor para cada ortoimagem. Os dados foram organizados por meio de planilhas e os cálculos dos efeitos das variáveis foram feitos por meio do *software* Statistica (STATSOFT INC, 2005), considerando nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$).

A princípio, seriam realizadas análises apenas do comportamento das variáveis independentes em função dos erros médios absolutos obtidos por voo, entretanto, a partir da análise das Tabelas 16 a 18 novas análises se mostraram necessárias. Dada a grande variação dos erros absolutos obtidos, foram feitas duas análises diferentes. A modelagem seria conduzida levando em consideração o erro absoluto médio total, entretanto, a escala dos erros referentes às medidas de largura, se mostraram menores, apontando para um enviesamento dos dados, sendo assim, optou-se por dividir a análise. Nesse sentido, duas modelagens foram feitas, uma em função dos erros absolutos médios referente ao comprimento e outra dos erros absolutos médios referentes à largura. Tal fato se explica pela geometria das áreas de análise serem mais longitudinais o sentido das medidas tomadas de comprimento, conferindo maior propagação de erro neste sentido.

O *software* STATISTICA oferece ferramentas que permitem desde a geração do plano experimental, até a inserção dos dados da variável dependente. Inicialmente os efeitos principais foram determinados por meio de uma abordagem baseada no planejamento fatorial fracionário em dois níveis conforme o modelo padrão (2^{K-p}). Por meio desse método, é possível analisar os experimentos realizados, identificar as relações existentes entre as variáveis independentes e dependente além de determinar os efeitos significativos do estudo.

A modelagem foi feita para as 3 áreas de estudo com o intuito de comparar e validar os resultados. Em se tratando do planejamento fatorial fracionário, o número de experimentos é reduzido, sendo assim, foram avaliados os efeitos principais, ou seja, aqueles causados apenas pelas variáveis e os efeitos das interações de duas variáveis. O efeito de interação de três variáveis deixaria a modelagem muito complexa em função do número de experimentos e poderia não se ajustar bem aos resultados.

Ao iniciar a análise referente à área de estudo do Bloco 1Y, foram encontrados alguns efeitos confundidos, ou seja, apresentaram a mesma combinação de níveis. De acordo com as variáveis apresentadas no Quadro 6, os efeitos de interação das variáveis (1*2), (1*3) e (1*4) se confundem com as interações (3*4), (2*4) e (2*3) respectivamente. Sendo assim, os efeitos confundidos são eliminados do modelo, possibilitando então a geração da tabela dos efeitos das variáveis principais e das interações (1*2), (1*3) e (1*4) conforme mostra a Tabela 19.

Tabela 19 - Tabela dos efeitos para erro absoluto médio do Bloco 1Y

FATOR	EFEITO	COEF.
MÉDIA	40,781	40,781
(1) h	27,274	13,637
(2) sf	-1,094	-0,547
(3) sl	-3,531	-1,765
(4) RTK	-59,410	-29,705
(1*2)	5,929	2,964
(1*3)	1,959	0,979
(1*4)	-22,155	-11,078

Fonte: Autor (2024)

De acordo com Barrozo (2023), o valor de probabilidade ainda não aparece pela falta de graus de liberdade para que seja calculado, sendo assim, para ajuste, deve ser eliminado um dos efeitos com menor valor em módulo. Dessa forma, a sobreposição frontal (variável 2) apresentou menor efeito. Ao eliminar a variável selecionada, obtém-se a Tabela 20.

Tabela 20 - Tabela dos efeitos (Bloco 1Y) - sem efeito (2)

FATOR	EFEITO	ERRO PADRÃO	t(3)	p	-95% IC	+95% IC	COEF.	ERRO PADRÃO COEF.	-95% IC COEF.	+95% IC COEF.
MÉDIA	40,781	0,547	74,562	0,009	33,831	47,731	40,781	0,547	33,831	47,731
(1) h	27,274	1,094	24,933	0,026	13,375	41,173	13,637	0,547	6,687	20,587
(3) sl	-3,531	1,094	-3,228	0,191	-17,430	10,368	-1,765	0,547	-8,715	5,184
(4) RTK	-59,410	1,094	-54,311	0,012	-73,309	-45,511	-29,705	0,547	-36,655	-22,756
(1*2)	5,929	1,094	5,420	0,116	-7,970	19,828	2,964	0,547	-3,985	9,914
(1*3)	1,959	1,094	1,791	0,324	-11,940	15,858	0,979	0,547	-5,970	7,929
(1*4)	-22,155	1,094	-20,254	0,031	-36,054	-8,256	-11,078	0,547	-18,027	-4,128

Fonte: Autor (2024)

Após a remoção da primeira variável de menor efeito, são eliminados um a um os efeitos de maior p-valor. Considerando que para a análise foi adotado um nível de significância de 5%, os efeitos cujo p-valor é igual ou menor que 0,05 indicam os possíveis efeitos significativos. Sendo assim, foram eliminados um a um, sequencialmente, os efeitos (1*3), (3) e (1*2) e obtido os efeitos significativos, como mostra a Tabela 21.

Tabela 21 - Tabela de efeitos significativos para erro médio total (Bloco 1Y)

FATOR	EFEITO	ERRO PADRÃO	t(3)	p	-95% IC	+95% IC	COEF.	ERRO PADRÃO COEF.	-95% IC COEF.	+95% IC COEF.
MÉDIA	40,781	1,814	22,481	0,000	35,744	45,818	40,781	1,814	35,744	45,818
(1) h	27,274	3,628	7,517	0,00168	17,201	37,347	13,637	1,814	8,600	18,674
(4) RTK	-59,410	3,628	-16,375	0,00008	-69,484	-49,337	-29,705	1,814	-34,742	-24,669
(1*4)	-22,155	3,628	-6,107	0,00364	-32,229	-12,082	-11,078	1,814	-16,114	-6,041

Fonte: Autor (2024)

A partir da determinação dos efeitos significativos, é possível realizar a regressão linear múltipla. Com isso são obtidos os modelos reduzidos, considerando apenas os efeitos significativos, e completo, considerando todos os efeitos. O mesmo procedimento foi feito para as demais áreas de estudo, conforme mostra as Tabelas 22 e 23.

Tabela 22 - Tabela de efeitos significativos para erro médio total (Bloco 1H)

FATOR	EFEITO	ERRO PADRÃO	t(3)	p	-95% IC	+95% IC	COEF.	ERRO PADRÃO COEF.	-95% IC COEF.	+95% IC COEF.
MÉDIA	70,518	14,057	5,017	0,007	31,491	109,545	70,518	14,057	31,491	109,545
(1) h	-71,469	28,113	-2,542	0,06383	-149,524	6,585	-35,735	14,057	-74,762	3,292
(4) RTK	-106,088	28,113	-3,774	0,01954	-184,142	-28,034	-53,044	14,057	-92,071	-14,017
(1*4)	73,362	28,113	2,610	0,05945	-4,692	151,416	36,681	14,057	-2,346	75,708

Fonte: Autor (2024)

Tabela 23 - Tabela de efeitos significativos para erro médio total (Bloco 3P)

FATOR	EFEITO	ERRO PADRÃO	t(3)	p	-95% IC	+95% IC	COEF.	ERRO PADRÃO COEF.	-95% IC COEF.	+95% IC COEF.
MÉDIA	26,955	4,245	6,349	0,003	15,168	38,742	26,955	4,245	15,168	38,742
(3) sl	-20,962	8,491	-2,469	0,06904	-44,536	2,612	-10,481	4,245	-22,268	1,306
(4) RTK	-27,239	8,491	-3,208	0,03265	-50,814	-3,665	-13,620	4,245	-25,407	-1,833
(1*2)	20,903	8,491	2,462	0,06956	-2,671	44,477	10,451	4,245	-1,336	22,239

Fonte: Autor (2024)

Para os Blocos 1H e 3P, houve o mesmo padrão de confusão entre as interações das variáveis, sendo os efeitos confundidos removidos. Para o Bloco 1H, inicialmente, a interação (1*2), efeito de menor valor em módulo, foi removida, para em seguida, os efeitos (3), (1*3) e (2) serem eliminados. Apesar das variáveis (1) e (1*4) apresentarem p-valor acima de 0,05, elas ainda apresentam valor próximo ao limite de significância, justificando sua permanência no

modelo. Já para o Bloco 3P, primeiro foi removida a variável (1) seguida das variáveis (1*4), (1*3) e (2).

Tomando como base a Tabela 18, as medidas de comprimento apresentaram maior discrepância entre as medidas, indicando um possível maior efeito das variáveis. Sendo assim, as mesmas análises foram repetidas, porém considerando apenas o erro absoluto médio para as medidas de comprimento, as Tabelas 24 a 26 mostram os efeitos significativos obtidos.

Tabela 24 - Tabela de efeitos significativos para erro médio de comprimento (Bloco 1Y)

FATOR	EFEITO	ERRO PADRÃO	t(3)	p	-95% IC	+95% IC	COEF.	ERRO PADRÃO COEF.	-95% IC COEF.	+95% IC COEF.
MÉDIA	66,555	0,955	69,691	0,000	62,446	70,664	66,555	0,955	62,446	70,664
(1) h	46,886	1,910	24,548	0,00166	38,668	55,104	23,443	0,955	19,334	27,552
(3) sl	-9,134	1,910	-4,782	0,04105	-17,352	-0,916	-4,567	0,955	-8,676	-0,458
(4) RTK	-113,586	1,910	-59,469	0,00028	-121,804	-105,368	-56,793	0,955	-60,902	-52,684
(1*2)	11,496	1,910	6,019	0,02651	3,277	19,714	5,748	0,955	1,639	9,857
(1*4)	-42,461	1,910	-22,231	0,00202	-50,679	-34,242	-21,230	0,955	-25,339	-17,121

Fonte: Autor (2024)

Tabela 25 - Tabela de efeitos significativos para erro médio de comprimento (Bloco 1H)

FATOR	EFEITO	ERRO PADRÃO	t(3)	p	-95% IC	+95% IC	COEF.	ERRO PADRÃO COEF.	-95% IC COEF.	+95% IC COEF.
MÉDIA	124,569	26,693	4,667	0,010	50,457	198,680	124,569	26,693	50,457	198,680
(1) h	-140,867	53,386	-2,639	0,05766	-289,089	7,356	-70,433	26,693	-144,545	3,678
(4) RTK	-206,628	53,386	-3,870	0,01799	-354,851	-58,405	-103,314	26,693	-177,425	-29,202
(1*4)	140,082	53,386	2,624	0,05856	-8,141	288,305	70,041	26,693	-4,070	144,153

Fonte: Autor (2024)

Tabela 26 - Tabela de efeitos significativos para erro médio de comprimento (Bloco 3P)

FATOR	EFEITO	ERRO PADRÃO	t(3)	p	-95% IC	+95% IC	COEF.	ERRO PADRÃO COEF.	-95% IC COEF.	+95% IC COEF.
MÉDIA	39,848	8,477	4,701	0,009	16,313	63,384	39,848	8,477	16,313	63,384
(3) sl	-41,654	16,953	-2,457	0,06992	-88,725	5,416	-20,827	8,477	-44,362	2,708
(4) RTK	-56,949	16,953	-3,359	0,02833	-104,019	-9,878	-28,474	8,477	-52,010	-4,939
(1*2)	42,186	16,953	2,488	0,06760	-4,884	89,256	21,093	8,477	-2,442	44,628

Fonte: Autor (2024)

Do mesmo modo as análises também foram expandidas considerando o erro absoluto médio para as medidas de largura. Tanto para as análises considerando o erro médio absoluto

para comprimento, quanto para largura, os procedimentos metodológicos foram os mesmos adotados para a análise referente ao erro médio absoluto total. Inicialmente foram detectadas e eliminadas as variáveis que geravam confusão, em seguida foram eliminadas as variáveis de menor efeito. Feito isso, foram eliminadas uma a uma as variáveis de menor p-valor. Variáveis com p-valor próximo ao limite de significância foram mantidas. As Tabelas 27 a 29 mostram os efeitos significativos encontrados.

Tabela 27 - Tabela de efeitos significativos para erro médio de largura (Bloco 1Y)

FATOR	EFEITO	ERRO PADRÃO	t(3)	p	-95% IC	+95% IC	COEF.	ERRO PADRÃO COEF.	-95% IC COEF.	+95% IC COEF.
MÉDIA	15,007	0,180	83,594	0,000	14,234	15,779	15,007	0,180	14,234	15,779
(1) h	7,662	0,359	21,339	0,00219	6,117	9,206	3,831	0,180	3,058	4,603
(3) sl	2,072	0,359	5,772	0,02873	0,527	3,617	1,036	0,180	0,264	1,809
(4) RTK	-5,234	0,359	-14,578	0,00467	-6,779	-3,689	-2,617	0,180	-3,389	-1,845
(1*3)	1,933	0,359	5,382	0,03283	0,388	3,477	0,966	0,180	0,194	1,739
(1*4)	-1,850	0,359	-5,153	0,03566	-3,395	-0,305	-0,925	0,180	-1,697	-0,153

Fonte: Autor (2024)

Tabela 28 - Tabela de efeitos significativos para erro médio de largura (Bloco 1H)

FATOR	EFEITO	ERRO PADRÃO	t(3)	p	-95% IC	+95% IC	COEF.	ERRO PADRÃO COEF.	-95% IC COEF.	+95% IC COEF.
MÉDIA	16,468	1,100	14,966	0,001	12,966	19,970	16,468	1,100	12,966	19,970
(2) sf	-4,399	2,201	-1,999	0,13945	-11,403	2,604	-2,200	1,100	-5,701	1,302
(3) sl	-3,626	2,201	-1,648	0,19801	-10,629	3,378	-1,813	1,100	-5,315	1,689
(4) RTK	-5,548	2,201	-2,521	0,08608	-12,552	1,455	-2,774	1,100	-6,276	0,728
(1*4)	6,642	2,201	3,018	0,05685	-0,362	13,645	3,321	1,100	-0,181	6,823

Fonte: Autor (2024)

Tabela 29 - Tabela de efeitos significativos para erro médio de largura (Bloco 3P)

FATOR	EFEITO	ERRO PADRÃO	t(3)	p	-95% IC	+95% IC	COEF.	ERRO PADRÃO COEF.	-95% IC COEF.	+95% IC COEF.
MÉDIA	14,061	0,139	100,981	0,000	13,675	14,448	14,061	0,139	13,675	14,448
(1) h	5,403	0,278	19,400	0,00004	4,629	6,176	2,701	0,139	2,315	3,088
(4) RTK	2,470	0,278	8,869	0,00089	1,697	3,243	1,235	0,139	0,848	1,622
(1*4)	5,266	0,278	18,908	0,00005	4,493	6,039	2,633	0,139	2,246	3,020

Fonte: Autor (2024)

Após determinar os efeitos principais dos parâmetros de voo sobre os erros absolutos das medidas de sinalização de trânsito horizontais, foi realizado o ajuste dos modelos

estatísticos por meio da regressão linear múltipla, também através do *software* STATISTICA. A partir desses modelos, foi possível relacionar os parâmetros de voo (variáveis independentes), com o erro médio das medidas de sinalização. O Quadro 11 mostra o resumo dos efeitos significativos encontrados, a partir do qual é possível constatar que as variáveis RTK e altura (h) foram mais significativas perante os cálculos realizados.

Quadro 11 - Resumo dos efeitos significativos

	ERRO MÉDIO TOTAL			ERRO MÉDIO COMPRIMENTO			ERRO MÉDIO LARGURA		
BLOCO 1Y	FATOR	EFEITO	p	FATOR	EFEITO	p	FATOR	EFEITO	p
	(4) RTK	-59,410	0,00008	(4) RTK	-113,586	0,00028	(1) h	7,662	0,00219
	(1) h	27,274	0,00168	(1) h	46,886	0,00166	(4) RTK	-5,234	0,00467
	(1*4)	-22,155	0,00364	(1*4)	-42,461	0,00202	(3) sl	2,072	0,02873
				(1*2)	11,496	0,02651	(1*3)	1,933	0,03283
			(3) sl	-9,134	0,04105	(1*4)	-1,850	0,03566	
BLOCO 1H	FATOR	EFEITO	p	FATOR	EFEITO	p	FATOR	EFEITO	p
	(4) RTK	-106,088	0,01954	(4) RTK	-206,628	0,01799	(1*4)	6,642	0,05685
	(1*4)	73,362	0,05945	(1) h	-140,867	0,05766	(4) RTK	-5,548	0,08608
	(1) h	-71,469	0,06383	(1*4)	140,082	0,05856	(2) sf	-4,399	0,13945
							(3) sl	-3,626	0,19801
BLOCO 3P	FATOR	EFEITO	p	FATOR	EFEITO	p	FATOR	EFEITO	p
	(4) RTK	-27,239	0,03265	(4) RTK	-56,949	0,02833	(1) h	5,403	0,00004
	(3) sl	-20,962	0,06904	(1*2)	42,186	0,06760	(1*4)	5,266	0,00005
	(1*2)	20,903	0,06956	(3) sl	-41,654	0,06992	(4) RTK	2,470	0,00089

e sobreposição lateral, a sobreposição lateral teve maior influência, se mostrando mais significativa que a sobreposição frontal.

A maior importância da sobreposição lateral perante a sobreposição frontal se deve ao fato do tipo de levantamento realizado. Em todos os casos de estudo, foi utilizado o levantamento do tipo *top-down* em que houve duas ou mais linhas de passagem da aeronave. Para esses levantamentos, a sobreposição lateral é fator importante durante o processamento das imagens, já que ela permite um maior número de combinações entre cada linha de passagem, evitando possíveis falhas e distorções no processo de união das fotos para geração da ortoimagem.

A adoção desse tipo de levantamento foi feita com o objetivo de se avaliar o comportamento dos parâmetros de voo em relação ao produto do processamento, com o intuito de serem feitas leituras e medidas das sinalizações horizontais de trânsito. Entretanto, para aplicações em rodovias e mapeamentos de longos trechos, recomenda-se a execução de planos de voo lineares, seguindo o eixo da rodovia. Tal escolha se dá pela necessidade de se aproveitar o máximo desempenho de bateria da aeronave para o levantamento do máximo trecho. Para esses casos, a sobreposição lateral pode ser desconsiderada por não haver mais de uma linha de passagem, sendo importante, neste caso, a adoção de valores maiores de sobreposição frontal, para garantir a devida união das imagens ao longo do trecho.

Após serem determinados e analisados os efeitos principais dos parâmetros e suas interações, foram feitas as modelagens de cada situação. Dado os resultados obtidos nas análises dos efeitos significativos, para o devido ajuste do modelo, foi adotado um nível de significância de 10% ($\alpha=0,1$) para que fosse garantida a significância do modelo frente à escala dos levantamentos.

Os Quadros 12 a 14 mostram o resumo estatístico para a regressão múltipla e modelagem referentes às análises de todas as áreas de estudo e todas as variáveis dependentes consideradas. Foram obtidos resumos estatísticos para o modelo completo de regressão, considerando todas as variáveis independentes, e o modelo reduzido, considerando apenas as variáveis significativas.

Analisando os resultados obtidos para o Bloco 1Y nota-se que todos os modelos podem ser considerados significativos, já que seus referidos p-valores se encontram abaixo do nível de significância adotado. Os valores de R e R^2 ajustado também se encontram próximos de 1, indicando uma forte relação linear entre as variáveis dependentes e independentes, além de uma alta capacidade explicativa do modelo, respectivamente.

Quanto aos resultados obtidos para o Bloco 1H, apenas os modelos reduzidos referentes ao erro médio total e erro médio de comprimento demonstram significância em seus modelos, com p-valor menor que o nível de significância. Entretanto seus valores de erro padrão são elevados, indicando uma imprecisão do modelo. De forma semelhante, os resultados para o Bloco 3P apontam para a significância apenas dos modelos reduzidos, entretanto, apesar de apresentarem p-valor e erro padrão semelhantes aos resultados para o Bloco 1Y, seus valores são menos ajustados, já que apresentam p-valores e erros padrão ligeiramente maiores.

Quadro 12 - Resumo estatístico de regressão múltipla para o Bloco 1Y

1Y	MODELO COMPLETO		MODELO REDUZIDO	
Emed TOTAL	R	0,94340	R	0,94190
	R ²	0,89000	R ²	0,88717
	R ² ajustado	0,74334	R ² ajustado	0,84203
	F(4,3)	6,06845	F(4,3)	19,65677
	p	0,08518	p	0,00428
	Erro Padrão (mm)	18,79441	Erro Padrão (mm)	14,74461
Emed COMP,	R	0,94169	R	0,93900
	R ²	0,88678	R ²	0,88171
	R ² ajustado	0,73582	R ² ajustado	0,83440
	F(4,3)	5,87433	F(4,3)	18,63508
	p	0,08877	p	0,00481
	Erro Padrão (mm)	35,95355	Erro Padrão (mm)	28,46595
Emed LARG,	R	0,96202	R	0,93823
	R ²	0,92548	R ²	0,88028
	R ² ajustado	0,82613	R ² ajustado	0,83240
	F(4,3)	9,31481	F(4,3)	18,38282
	p	0,04858	p	0,00496
	Erro Padrão (mm)	2,20428	Erro Padrão (mm)	2,16416

Fonte: Autor (2024)

Quadro 13 - Resumo estatístico de regressão múltipla para o Bloco 1H

1H	MODELO COMPLETO		MODELO REDUZIDO	
Emed TOTAL	R	0,85004	R	0,81054
	R ²	0,72258	R ²	0,65698
	R ² ajustado	0,35268	R ² ajustado	0,51977
	F(4,3)	1,95344	F(4,3)	4,78811
	p	0,30450	p	0,06891
	Erro Padrão (mm)	67,86992	Erro Padrão (mm)	58,45794
Emed COMP,	R	0,85374	R	0,81757
	R ²	0,72887	R ²	0,66842
	R ² ajustado	0,36736	R ² ajustado	0,53579
	F(4,3)	2,01617	F(4,3)	5,03965
	p	0,29553	p	0,06331
	Erro Padrão (mm)	130,04528	Erro Padrão (mm)	111,39699
Emed LARG,	R	0,74449	R	0,64128
	R ²	0,55427	R ²	0,41124
	R ² ajustado	-0,04004	R ² ajustado	0,17573
	F(4,3)	0,93263	F(4,3)	1,74619
	p	0,54500	p	0,26598
	Erro Padrão (mm)	6,01915	Erro Padrão (mm)	5,35852

Fonte: Autor (2024)

Quadro 14 - Resumo estatístico de regressão múltipla para o Bloco 3P

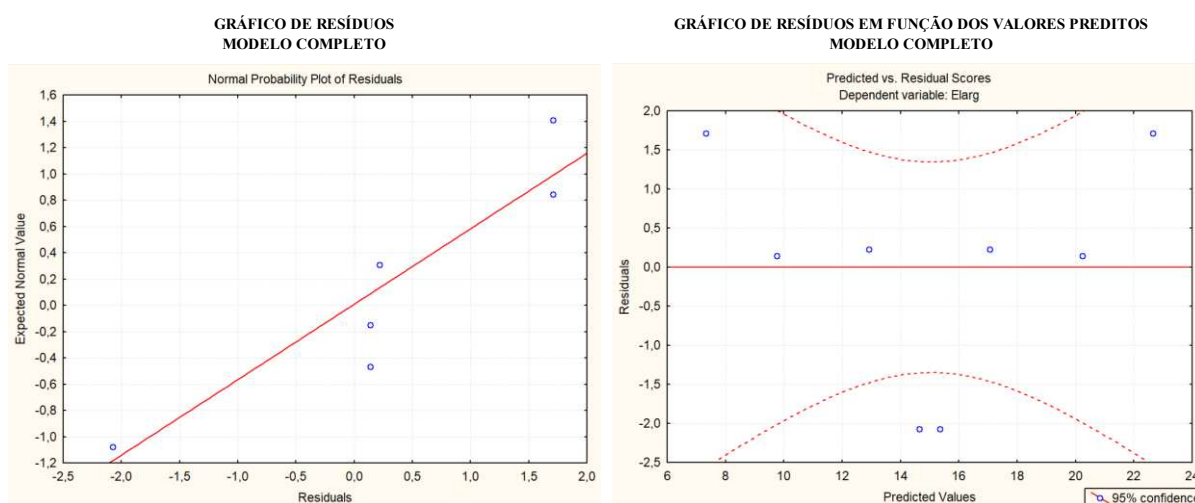
3P	MODELO COMPLETO		MODELO REDUZIDO	
Emed TOTAL	R	0,82992	R	0,78715
	R ²	0,68877	R ²	0,61960
	R ² ajustado	0,27380	R ² ajustado	0,46744
	F(4,3)	1,65979	F(4,3)	4,07205
	p	0,35301	p	0,08925
	Erro Padrão (mm)	19,89004	Erro Padrão (mm)	17,03296
Emed COMP,	R	0,84185	R	0,79344
	R ²	0,70872	R ²	0,62955
	R ² ajustado	0,32034	R ² ajustado	0,48137
	F(4,3)	1,82483	F(4,3)	4,24860
	p	0,32433	p	0,08352
	Erro Padrão (mm)	39,18616	Erro Padrão (mm)	34,23063
Emed LARG,	R	0,74809	R	0,74649
	R ²	0,55964	R ²	0,55724
	R ² ajustado	-0,02750	R ² ajustado	0,38014
	F(4,3)	0,95316	F(4,3)	3,14644
	p	0,53753	p	0,13044
	Erro Padrão (mm)	4,31180	Erro Padrão (mm)	3,34899

Fonte: Autor (2024)

Sendo assim, tomando como base os p-valores obtidos e os valores de erro padrão, os modelos completo e reduzido referentes ao erro absoluto médio para o Bloco 1Y são os melhores ajustados, entretanto, devido a diferença presente entre as medidas de comprimento e largura, podem não refletir a realidade, sendo assim, a modelagem foi feita considerando os dados de erro médio para as medidas de largura. Seus valores de R (0,96202 e 0,93823 respectivamente) se encontram próximos de 1, indicando uma forte correlação entre a variável dependente e as variáveis independentes. Seus valores de R^2 (0,92548 e 0,88028 respectivamente) e R^2 ajustado (0,82613 e 0,83240 respectivamente) também se encontram próximos de 1, assinalando que além da variação observada na variável dependente ser explicada pelas variáveis independentes do modelo, ele ainda é bem ajustado e eficiente mesmo após a correção por possíveis excessos de variáveis. Os p-valores encontrados (0,04858 e 0,00496 respectivamente) são bem menores que o nível de significância adotado ($\alpha=0,1$), indicando que os modelos são estatisticamente significativos e há evidências suficientes para concluir o efetivo impacto das variáveis independentes sobre a variável dependente. Por fim, os valores de erro padrão em milímetros (2,20428 e 2,16416 respectivamente) são relativamente baixos, o que demonstra uma boa precisão preditiva do modelo.

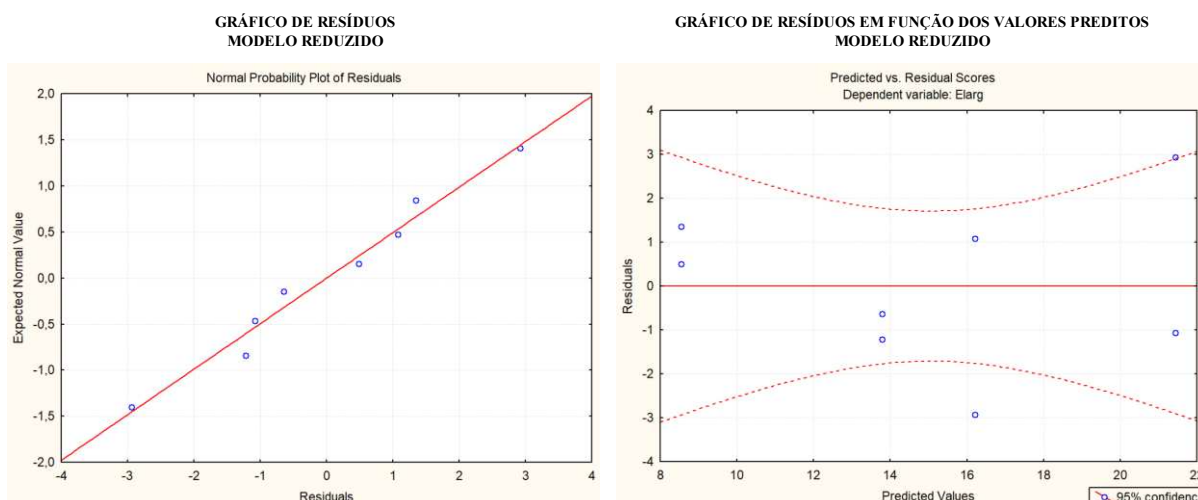
Além da análise dos valores estatísticos calculados, também foi possível verificar a validade dos modelos completo e reduzido por meio da análise dos gráficos de resíduo e dos gráficos de resíduos em função dos valores preditos, conforme mostram os Gráficos 2 e 3.

Gráfico 2 - Gráficos de resíduos do modelo completo referente ao erro médio da largura para o Bloco 1Y



Fonte: Autor (2024)

Gráfico 3 - Gráficos de resíduos do modelo reduzido referente ao erro médio da largura para o Bloco 1Y



Fonte: Autor (2024)

A partir da análise gráfica, foi possível constatar que os modelos podem ser aceitos. Tanto o modelo completo, quanto o reduzido, apresentam resíduos bem distribuídos em relação a normal. Ambos os modelos também apresentam uma boa distribuição, de forma aleatória, dos valores preditos tanto acima quanto abaixo do eixo 0. Ao se comparar os gráficos, o modelo reduzido apresenta uma distribuição dos resíduos ainda mais próximos da distribuição normal e pontos ainda mais dispersos de forma aleatória acima e abaixo do eixo 0, indicando que o modelo não possui viés sistemático, validando, então, o melhor ajuste do modelo.

Dessa forma, os resultados de regressão são obtidos conforme mostram as Tabelas 30 e 31. A partir desses quadros, são obtidos os coeficientes para as equações dos modelos completo e reduzido, além dos desvios padrões e verificação dos p-valores para cada variável.

Tabela 30 - Resultado da regressão para o modelo completo

Emed LARG.	BETA	ERRO PADRÃO DE BETA	B	ERRO PADRÃO DE B	t(3)	p-valor
INTERCEPTO			15,00681	0,77933	19,25604	0,00031
h	0,77471	0,15760	3,83083	0,77933	4,91555	0,01613
sf	-0,03598	0,15760	-0,17792	0,77933	-0,22829	0,83409
sl	0,20953	0,15760	1,03611	0,77933	1,32949	0,27574
RTK	-0,52925	0,15760	-2,61708	0,77933	-3,35812	0,04379

Fonte: Autor (2024)

Tabela 31 - Resultado da regressão para o modelo reduzido

Emed LARG.	BETA	ERRO PADRÃO DE BETA	B	ERRO PADRÃO DE B	t(3)	p-valor
INTERCEPTO			15,00681	0,76515	19,61298	0,00001
h	0,77471	0,15474	3,83083	0,76515	5,00667	0,00408
RTK	-0,52925	0,15474	-2,61708	0,76515	-3,42037	0,01883

Fonte: Autor (2024)

Tomando como base os resultados obtidos, pôde-se perceber, que de forma geral, os desvios padrões são relativamente menores que os valores dos parâmetros, no caso das variáveis significativas, a partir de um nível de significância de 10% ($\alpha=0,1$). Esse comportamento é esperado de variáveis que afetam significativamente o resultado da variável dependente, sendo elas a altura de voo e o uso de RTK. Por tanto, os modelos ajustados podem ser escritos conforme as equações 1 e 2, os modelos padronizados correspondem às equações 3 e 4.

Equação para o modelo completo:

$$\begin{array}{ccccccccccc} \text{Emed LARG.} & = & 15,00681 & + & 3,83083 & h & - & 0,17792 & sf & + & 1,03611 & sl & - & 2,61708 & \text{RTK} & (1) \\ \text{desvios padrões} & & (0,77933) & & (0,77933) & & & (0,77933) & & & (0,77933) & & & (0,77933) & & \end{array}$$

Equação para o modelo reduzido:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Emed LARG.} & = & 15,00681 & + & 3,83083 & h & - & 2,61708 & \text{RTK} & (2) \\ \text{desvios padrões} & & (0,76515) & & (0,76515) & & & (0,76515) & & \end{array}$$

Equação para o modelo completo padronizado:

$$\text{Emed LARG.} = + 0,77471 \quad h \quad - \quad 0,03598 \quad sf \quad + \quad 0,20953 \quad sl \quad - \quad 0,52925 \quad \text{RTK} \quad (3)$$

Equação para o modelo reduzido padronizado:

$$\text{Emed LARG.} = + 0,77471 \quad h \quad - \quad 0,52925 \quad \text{RTK} \quad (4)$$

Como discussões dos resultados obtidos, tem-se que:

1. Dados os modelos padronizados completo e reduzido e os sinais de seus respectivos valores de beta, tem-se que as variáveis altura e uso de RTK apresentam maior impacto sobre a variável dependente, entretanto, essas variáveis possuem uma relação de sinais inversa, haja vista que maiores valores de altura, dado seu sinal positivo, implicam em maiores valores de erro, enquanto a presença de RTK, em função de seu sinal negativo, indica redução nos valores de erro. O mesmo ocorre para as variáveis sobreposição frontal, cuja elevação de valores implicam na

redução do erro, e sobreposição lateral, cuja elevação de valores implicam no aumento do erro.

2. O uso da tecnologia RTK se mostrou o principal fator de impacto sobre os resultados, haja vista que sua correção de dados posicionais em tempo real elevam a precisão dos levantamentos, consequentemente elevando a qualidade do processamento das imagens, gerando modelos digitais mais fiéis à realidade, livres de quaisquer distorções.
3. Assim como o RTK, a altura de voo se mostra como parâmetro significativo quanto a qualidade do produto do processamento das imagens. Enquanto a tecnologia RTK influencia diretamente na precisão dos dados posicionais e redução das distorções de processamento, a altura está diretamente relacionada ao GSD das ortoimagens, impactando no valor de medida de cada pixel presente nas imagens.
4. Na falta de equipamentos com a tecnologia RTK, o produto do processamento das imagens não oferece resultados satisfatórios para levantamentos realizados utilizando apenas o mecanismo GPS/GLONASS presente nas aeronaves. A falta de precisão quanto aos dados posicionais das imagens implica na ocorrência de falhas de processamento, como o efeito domo, que acaba por prejudicar a tomada de medidas nessas imagens. Para esses casos, o uso de GCPs é recomendado, entretanto, para a aplicação em campo, em levantamentos de extensos trechos rodoviários, a metodologia perde sua eficácia, por demandar de novos equipamentos e acréscimo de tempos de rastreamento para esses pontos. Vale destacar que o uso de GCPs também é recomendado para refinar os parâmetros de orientação interior da câmera não fotogramétrica, que se modificam com o tempo.
5. Quanto às sobreposições frontal e lateral, apresentaram efeitos menos significativos. Esses parâmetros interferem na fase de processamento dos dados, principalmente no que se diz respeito ao processo de união das imagens. A escolha desses parâmetros depende do tipo de levantamento realizado. Na ocorrência de duas ou mais linhas de passagem da aeronave, é recomendado valores maiores de sobreposição lateral para evitar efeitos fantasma ou lacunas entre uma linha e outra, entretanto para levantamentos lineares, a mesma pode ser desconsiderada.
6. Ao todo, foram realizadas 9 análises, sendo 3 para cada área de estudo. A partir dessas análises foi possível construir o Quadro 46, que mostra o número de vezes que cada variável, ou interação de variáveis, aparecem como significativas. A variável RTK lidera o número de aparições, sendo significativa nas 9 análises,

seguida da variável (1*4), interação das variáveis altura e RTK, que aparece em 7 análises, variável altura (h) que aparece em 6 análises e a variável sobreposição lateral (sl), que aparece como significativa em 5 análises.

Tabela 32 - Resumo das aparições de cada variável como significativa nas análises

VARIÁVEL	BLOCO 1Y			BLOCO 1H			BLOCO 3P			Nº REPET.
	Emed TOT.	Emed COMP.	Emed LARG.	Emed TOT.	Emed COMP.	Emed LARG.	Emed TOT.	Emed COMP.	Emed LARG.	
(1) h	X	X	X	X	X				X	6
(2) sf						X				1
(3) sl		X	X			X	X	X		5
(4) RTK	X	X	X	X	X	X	X	X	X	9
(1*2)		X					X	X		3
(1*3)			X							1
(1*4)	X	X	X	X	X	X			X	7

Fonte: Autor (2024)

- Considerando a discrepância dos valores de erros para as medidas de comprimento, é possível traçar um paralelo entre o erro relativo para essas medidas e os valores normativos presentes na PEC-PCD, que avalia o padrão de exatidão cartográfica dos produtos cartográficos digitais. As Tabelas 33 e 34 mostram as classificações.

Tabela 33 - Padrão de exatidão cartográfica planimétrica dos produtos cartográficos digitais

PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000	
	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)
A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51
B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00
C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00
D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00

Fonte: Brasil (2016)

Tabela 34 - Classificação PEC-PCD para as medidas de comprimento

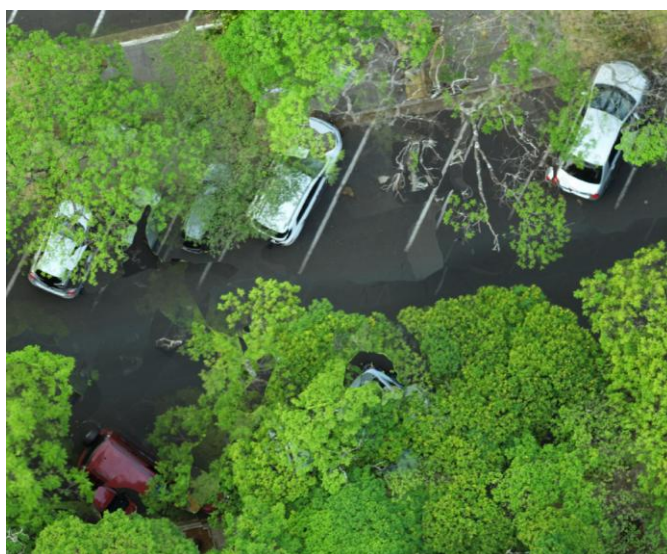
LOCAL	EXPERIMENTO	ERRO MÉDIO ABSOLUTO (mm)	ERRO MÉDIO RELATIVO (%)	PEC-PCD	
				ESCALA	CLASSE
BLOCO 1Y	3	6,45	0,14	1:1.000	A
	5	8,65	0,19	1:1.000	A
	2	10,72	0,24	1:1.000	A
	8	13,23	0,29	1:1.000	B
	1	90,90	2,01	1:5.000	A
	7	66,45	1,47	1:2.000	C
	4	176,43	3,91	1:5.000	C
	6	159,62	3,53	1:5.000	C
BLOCO 1H	11	21,95	0,51	1:1.000	B
	13	21,34	0,49	1:1.000	B
	10	20,51	0,47	1:1.000	B
	16	21,21	0,49	1:1.000	B
	9	471,75	10,87	1:25.000	B
	15	264,96	6,11	1:10.000	C
	12	60,77	1,40	1:2.000	C
	14	114,05	2,63	1:5.000	C
BLOCO 3P	19	13,89	0,43	1:1.000	B
	21	14,24	0,44	1:1.000	B
	18	8,33	0,26	1:1.000	A
	24	9,04	0,28	1:1.000	A
	17	142,00	4,37	1:5.000	D
	23	15,14	0,47	1:1.000	B
	20	78,49	2,42	1:5.000	B
	22	37,66	1,16	1:2.000	C

Fonte: Autor (2024)

8. Tomando como base a Tabela 34, é possível observar que todos os voos realizados com a tecnologia RTK apresentaram erros comparados à escala cartográfica de 1:1.000, variando entre as classes A e B. Já para os voos realizados sem essa variável, os erros se compararam a escala de até 1:25.000. Essas discrepâncias explicam o fato de que mesmo o modelo matemático sendo estatisticamente comprovado, ainda são apresentados alguns pontos de *outliers*.
9. Além da escolha adequada dos parâmetros de voo, a influência de parâmetros externos e não controláveis não podem ser descartadas. O efeito de variáveis climáticas como vento, rajada, temperatura, cobertura de nuvens e distância de visibilidade, podem influenciar os resultados. Para este estudo, buscou-se realizar os levantamentos em condições climáticas semelhantes para a redução de seus efeitos.

10. A presença de vegetação, também representa uma das grandes limitações da metodologia, principalmente copa das árvores. Além de cobrirem as vias e impossibilitar sua devida análise, prejudicam o processo de combinação das imagens pelo fato de as folhas estarem em movimento, o que gera confusão durante a execução dos algoritmos de processamento. Esse efeito fica evidente nos levantamentos realizados próximos ao Bloco 1H, cujos erros absolutos apresentaram maior discrepância. A Figura 16 mostra os efeitos dessa limitação.

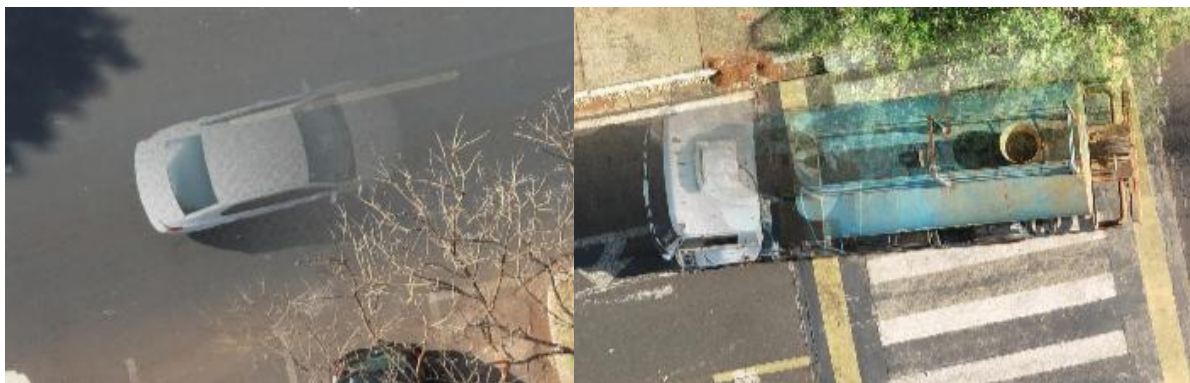
Figura 16 - Efeito da copada das árvores sobre o processamento



Fonte: Autor (2024)

11. Outra limitação que merece destaque é a presença de veículos durante os levantamentos. Por se tratar de levantamentos realizados em vias públicas, a presença de veículos e pedestres acaba sendo inevitável. A menos que sejam realizadas interdições no momento dos levantamentos, a presença desses obstáculos pode acabar prejudicando a qualidade das ortoimagens. No momento de captura das imagens, a presença de veículos pode gerar efeitos fantasmas e até mesmo cobrirem completamente os objetos de estudo. A Figura 17 mostra o efeito da passagem de veículos durante a realização dos levantamentos.

Figura 17 - Passagem de veículos durante a execução dos levantamentos



Fonte: Autor (2024)

12. Por fim, através da execução dos levantamentos desenvolvidos por meio das técnicas de planejamento de experimentos fatorial fracionário em dois níveis, foi possível chegar a um modelo de regressão estatisticamente válido, representando o peso de influência de cada parâmetro considerado durante a elaboração de um plano de voo com RPA.

5 CONCLUSÕES

Com a modernização das tecnologias e a demanda por inovações dentro da engenharia, torna-se inevitável a atualização de metodologias tradicionais, englobando o uso de novas ferramentas. Em um país como o Brasil, onde o modal rodoviário apresenta dominância no transporte de cargas e passageiros, ainda há carência na implementação de práticas preventivas quanto a segurança viária. Sendo assim, os avanços tecnológicos em ferramentas, como as RPAs, somados a metodologias preventivas, como as ISVs, representam a possibilidade de adoção de novas práticas menos subjetivas, ágeis e extensivas. Por outro lado, o emprego dessas ferramentas ainda carece de estudos.

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, foram constatados os desdobramentos da aplicabilidade das RPAs em procedimentos ligados à engenharia urbana. Contudo, percebeu-se a falta de análises mais aprofundadas quanto a escolha dos parâmetros de voo durante a fase de planejamento dos levantamentos. Diante disso, além do reconhecimento das limitações da ferramenta, são fundamentais o aprofundamento científico e a avaliação do impacto de escolha dos parâmetros de voo sobre a qualidade do produto desses levantamentos.

Partindo desse contexto, a pesquisa teve como objetivo principal avaliar a forma como a escolha dos principais parâmetros de voo podem influenciar na qualidade das ortoimagens processadas. Dessa forma, procurou-se avaliar o impacto de variáveis como altura de voo, sobreposições e uso de RTK usando como parâmetro o erro absoluto de medidas extraídas das imagens. Esse erro absoluto foi obtido a partir da medição *in loco* de comprimento e largura de elementos de sinalização horizontal com trena, comparados às mesmas medidas obtidas através do *software* QGis.

Inicialmente foram avaliadas as limitações práticas da ferramenta. Ainda durante a fase de planejamento e execução dos primeiros voos é possível tirar conclusões quanto a variáveis externas como interferência ambiental e desempenho técnico dos equipamentos. Quanto a interferência ambiental a principal limitação diz respeito às condições climáticas, tais como vento, incidência solar e temperatura. Outros fatores como obstáculos naturais e artificiais, tais como copa de árvores, presença de veículos em circulação e proximidade com fontes de interferência magnética, como grandes coberturas metálicas e antenas de comunicação, também representam limitações para a tecnologia. A presença desses obstáculos interfere não apenas na qualidade do processamento das imagens como também geram a problemática de sobreposição ao objeto de estudo, prejudicando sua análise.

Em relação ao desempenho técnico, fatores ligados ao equipamento possuem maior destaque. Tanto a performance das baterias quanto o raio de comunicação entre aeronave e controle, representam fatores limitantes da distância possível de sobrevoo. Também devem ser considerados outros fatores específicos como calibração adequada dos sensores, variedade de aeronaves disponíveis no mercado e alto investimento computacional para processamento de grandes volumes de dados. Tais fatores indicam a necessidade de um grande investimento inicial em equipamentos, capacitação técnica e a importância de diretrizes claras para a adoção da tecnologia de maneira segura e eficaz.

Seguindo o planejamento metodológico do trabalho, a confiabilidade dos resultados foi analisada tomando como base os valores das medidas reais, obtidas em campo, e as medidas extraídas das ortoimagens. Ao calcular os erros absolutos de todas as medidas para todos os experimentos, foi possível constatar valores discrepantes de erros para os levantamentos realizados sem RTK e em áreas de maior cobertura vegetal. A partir dessa constatação e da análise dos resultados dos processamentos das imagens, pode-se concluir que tanto a tecnologia RTK quanto a cobertura vegetal são fortes fatores de impacto sobre a confiabilidade dos resultados. Tal fato pode ser explicado devido a ocorrência de efeito domo, provocado pela falta de precisão dos dados de posicionamento das imagens, que prejudicam sua união durante o processamento, gerando uma curvatura na ortoimagem e consequente imprecisão nas medidas, sobretudo naquelas de maior escala.

Com base nas análises estatísticas conduzidas, foram obtidos modelos de regressão para quantificar o impacto de cada variável sobre os resultados. As variáveis RTK e altura de voo (h) se confirmam como as variáveis independentes mais significativas, assim como a interação entre as duas. Dentre as 18 regressões realizadas, o modelo completo e reduzido, relativos ao erro absoluto médio de largura para a área de estudos próxima ao Bloco 1Y, foram os melhores ajustados. Os modelos obtidos, além de sustentarem a hipótese inicial de interferência dos parâmetros sobre a qualidade dos resultados e a possibilidade dessa interferência ser quantificada, também demonstram forte correlação positiva entre as variáveis e boa capacidade preditiva.

A validade desses modelos foi realizada por meio da análise gráfica dos resíduos, apresentando boa distribuição em relação a normal, indicando sua aceitabilidade. Dessa forma, diante dos resultados estatísticos obtidos, a escolha da altura de voo e o uso de tecnologias de correção em tempo real do posicionamento das imagens se mostraram significativos para a realização de levantamentos com RPA. A partir dos erros absolutos, é evidenciada a precisão milimétrica para levantamentos realizados com o emprego da tecnologia RTK, confirmando o

potencial da ferramenta dentro de procedimentos de ISV, em específico a avaliação de sinalizações horizontais de trânsito.

Além de sua precisão, a ferramenta ainda representa uma metodologia de baixo custo, se considerado um investimento a longo prazo. Apesar de ser uma tecnologia dependente de um alto investimento inicial, tanto para aquisição de equipamentos de voo quanto aquisição de ferramentas para o processamento de seus dados, ao se considerar o retorno em longo prazo, se mostra como uma alternativa econômica frente sua precisão e agilidade quando comparadas às práticas tradicionais. A sua aplicação como ferramenta complementar não apenas é capaz de reduzir o tempo na realização de levantamentos, mas também reduzir a subjetividade das análises de campo, sobretudo quando aliadas a modelos de automação de processos, como as tecnologias de inteligência artificial.

Apesar de seus aspectos positivos, o emprego da ferramenta ainda lida com algumas limitações, dentre as quais se destacam os efeitos climáticos, tais como vento, incidência solar e temperatura, obstáculos naturais e artificiais, tais como copa de árvores e presença de veículos, e desafios técnicos, tais como, desempenho de baterias, calibração dos sensores, variedade de aeronaves no mercado e alto investimento computacional para processamentos de grandes volumes de dados.

Por fim, como recomendações para trabalhos futuros fica a possibilidade de dar ainda mais robustez para os estudos estatísticos desenvolvidos. A execução de um planejamento experimental fatorial completo, podendo considerar outros equipamentos pode levar a resultados ainda mais ajustados, em especial, se considerando novas alturas, emprego de pontos de controle e ampliação das áreas de estudo. O emprego de algoritmos de aprendizado de máquina também se faz uma forte vertente para essa pesquisa, como forma de se desenvolver um conjunto de recomendações de parâmetros para que a aplicação da inteligência artificial seja possível de forma otimizada, buscando resultados cada vez mais precisos, reduzindo a subjetividade das análises por meio da construção de sólidos bancos de dados e consequentemente reduzindo o tempo demandado nos procedimentos tradicionais de segurança viária.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABIDIN, Mohammad Syafiq Zainal; ARIFF, Mohd Farid Mohd. UAV Photogrammetry for Road Defects Mapping. **Journal of Advanced Geospatial Science & Technology**, v. 3, n. 1, p. 1-14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.11113/jagst.v3n1.58>

ALMEIDA, Igor de Carvalho. *et. al.* **Estudo sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários.** VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias de Geoinformação. Recife, Pernambuco, ago. 2016, 10 p.

AQUINO, T. S. de A., NORONHA, F. A. A., SILVA, W. B. C. da, OLIVEIRA, F. H. L. de. **Avaliação funcional e operacional de rodovias federais brasileiras.** 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em transporte da ANPET, p. 1374-1385, Gramado, nov. 2018.

AUSTIN, Reg. **Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment.** John Wiley & Sons, 2011.

AUSTROADS. **Guide to road safety – Part 6: Road Safety Audit.** Austroads/Pub. No. AGRS06-19. 1st Edition, 2019, Sidney, Australia. 49 p.

AUSTROADS. **Road Safety Audit.** Austroads/Pub. No. AP-G30/02. 2nd Edition, 2002, Sidney, Australia. 206 p.

BALDOINO, L. M. S.; PONTES, K. V. **A Implantação e Consolidação do Modal Rodoviário no Brasil.** Revista Historiador, [S. l.], v. 1, n. 14, 2022. Disponível em: <<https://revistahistoriador.com.br/index.php/principal/article/view/253>>. Acesso em: 3 out. 2023. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10578572>

BARROZO, M. A. S. (2023) **Notas de Aula da disciplina Planejamento de Experimentos.** Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

BEHNCK, Lucas Pluceno. **Controle de missão de voo de veículo aéreo não-tripulado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.

BISIO, I.; GARIBOTTO, C.; HALEEM, H.; LAVAGETTO, F.; SCIARRONE, A. **A systematic review of drone based road traffic monitoring system**. IEEE Access, [S.l.], v. 10, p. 101537-101555, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3207282.

BOUABDALLAH, S.; MURRIERI, P.; SIEGWART, R. **Design and control of an indoor micro quadrotor**. In: **Proceedings of International Conference on Robotics and Automation**, 2004. IEEE, 2004. p. 4393-4398. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1302409>

BRASIL. **Normas da Especificação Técnica para Controle da Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)**. Diretoria do Serviço Geográfico. Departamento de Ciências e Tecnologia do Exército Brasileiro. 1ª Edição, Brasília, 2016.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Obter autorização para realizar aerolevantamento (SisCLATEN)**. 2024 Disponível em: <https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/aerolevantamento/obter-autorizacao-para-realizar-aerolevantamento-sisclaten>. Acesso em: 21 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Portaria nº 3.703/GM-MD, de 6 de setembro de 2021. Dispõe sobre a adoção de procedimentos para a atividade de aerolevantamento no território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 set. 2021.

BRASIL. Decreto-Lei nº 1.177, de 21 de junho de 1971. Dispõe sobre o levantamento aerofotogramétrico do território nacional e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 jun. 1971.

BRASIL. Comando DA Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro. **ICA 100-40**. Rio de Janeiro, 2023a.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil. Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil. **RBAC-E nº 94 Emenda nº 03**. 2023b.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil. Tráfego aéreo. **ICA 100-19**. 2016.

CHEN, Xinbao et al. **A Pavement Crack Detection and Evaluation Framework for a UAV Inspection System Based on Deep Learning**. Applied Sciences, v. 14, n. 3, p. 1157, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14031157>

CHOI, Hee-Wook et al. **An overview of drone applications in the construction industry**. Drones, v. 7, n. 8, p. 515, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7080515>

CNT. **Plano CNT de transporte e logística 2018**. v. 1, p. 637, Brasília, 2018.

CNT. **Acidentes rodoviários e a infraestrutura**. v. 1, p. 140, Brasília, 2018.

CNT. **Rodovias que perdoam**. Transporte em foco. v. 1, p. 13, Brasília, mar. 2021.

CNT; SEST; SENAT. Pesquisa CNT de Rodovias 2022. **Pesquisa CNT de rodovias 2022**. v.1. 229 p.

CNT; SEST; SENAT. Pesquisa CNT de Rodovias 2022. **Pesquisa CNT de rodovias 2024**. v.1. 225 p.

DA SILVA, Daniel Carneiro. **Evolução da fotogrametria no Brasil**. Revista Brasileira de Geomática, v. 3, n. 2, p. 81-96, 2015. DOI: 10.3895/rbgeo.v3n2.5467

DJI. Support for Phantom 4 RTK. Disponível em: <https://www.dji.com/br/support/product/phantom-4-rtk>. Acesso em: 13 ago. 2024.

DNIT. **Manual de gerência de pavimentos**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2013.

DNIT. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2006.

EISENBEISS, Henri. **UAV photogrammetry**. 2009. Tese de Doutorado. ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005939264>

ELAMIN, Ahmed; EL-RABBANY, Ahmed. **UAV-Based Image and LiDAR Fusion for Pavement Crack Segmentation**. *Sensors*, v. 23, n. 23, p. 9315, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23239315>

ELMESEIRY, Nourhan; ALSHAER, Nancy; ISMAIL, Tawfik. **A detailed survey and future directions of unmanned aerial vehicles (uavs) with potential applications**. *Aerospace*, v. 8, n. 12, p. 363, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace8120363>

EPL. **Plano nacional de logística PNL 2025**. Relatório executivo, v. 1, p. 140, Brasília, jun. 2018.

FAN, Rui et al. **Real-time dense stereo embedded in a uav for road inspection**. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 2019. p. 0-0.

FURTADO, Ryan de Araujo. **Uso de veículo aéreo não tripulado para monitoramento e auxílio de medições de obras de pavimentação urbana**. Publicação F992u, Monografia de Conclusão de Curso – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Centro de Engenharia. 2021. Mossoró, RN. 51 p.

GOHARI, A. *et. al.* **Drones for road accident management: a systematic review**. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Malaysia, 2017, 12 p. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3321142

GONÇALVES, G. R. **Elementos de Fotogrametria Analítica**. Coimbra: Departamento de Matemática da FCTUC, 2006.

GRANEMANN, Emerson. **Setor de drones apresenta novos números para o Brasil**. DroneShow Robotics. 18 jan. 2019. Disponível em: < <https://droneshowla.com/artigo-setor-de-drones-apresenta-novos-numeros-para-o-brasil/> >. Acesso em: 17 nov. 2023.

GRUBER, Gregory William John. **Review of DJI Phantom 4 RTK for the Surveying Industry**. USQ Project. 2019.

GUEBSI, Ridha; MAMI, Sonia; CHOKMANI, Karem. **Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges**. *Drones*, v. 8, n. 11, p. 686, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8110686>

HASSAN, Syed-Ali; RAHIM, Tariq; SHIN, Soo-Young. **An improved deep convolutional neural network-based autonomous road inspection scheme using unmanned aerial vehicles**. *Electronics*, v. 10, n. 22, p. 2764, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10222764>

HEMAMALINI, B. H. *et. al.* **Detection of potholes on roads using a drone**. EAI Endorsed Transactions on Energy Web. India, 2021, 6 p. DOI: 10.4109/eai.19-10-2021.171546

IBGE. **Frota de veículos**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisas 2022. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120?tipo=grafico>>. Acesso em: 4 set. 2023.

IBRAHIM, Heba Basyouni et al. **Smart monitoring of road pavement deformations from UAV images by using machine learning**. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 9, n. 1, p. 16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01315-2>

INFRA. **Plano da acidentalidade do modo rodoviário no Brasil**. Boletim de logística, v. 1, p. 48, Brasília, 2022.

JIANG, Yutian et al. **Rdd-yolov5: road defect detection algorithm with self-attention based on unmanned aerial vehicle inspection**. *Sensors*, v. 23, n. 19, p. 8241, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23198241>

KEPLER, Marcos Alberto. *et. al.* **O uso de drones como ferramenta de mapeamento para estudos de rodovias - Case do edital de concessão da rodovia de integração do sul, Brasil**. *Brazilian Journal of Technology*, Curitiba, v. 2, n. 1, p. 460-482, jan./mar. 2019. DOI: 10.38152

KHARE, O. M. et al. **YOLOv8-based visual detection of road hazards: potholes, sewer covers, and manholes**. 2023 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon). IEEE, 2023. p. 1-6. DOI: 10.1109/PuneCon58714.2023.10449999

LOPES, Denise Lima, MARTINEZ FILHO, Adauto. **Auditoria de segurança viária (ASV)**. Notas técnicas. Companhia de Engenharia de Tráfego. p. 12, 2010.

MIRANDA, Wesley Isidoro. **Uso de veículo aéreo par monitoramento de obras com ênfase no acompanhamento, planejamento e tomada de ações: um estudo de caso no Condomínio Terras Alpha Caruaru**. Publicação M672. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Pernambuco. Centro Acadêmico do Agreste. 2020, 57 p.

MOREIRA, L. de A., SANTOS, S. F. dos, OLIVEIRA NETO, R. de, & SILVA JUNIOR, L. A. (2019). **Revisão bibliográfica sobre o modal de transporte rodoviário no Brasil**. Research, Society and Development, 8(3), e2283728. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i3.728>

NARANJO, Manuel et al. **Object detection-based system for traffic signs on drone-captured images**. Drones, v. 7, n. 2, p. 112, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7020112>

NODARI, Christine Tessele; LINDAU, Luis Antonio. **Auditoria da segurança viária**. TRANSPORTES, v. 9, n. 2, 2001. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v9i2.170>

OLIVEIRA, Dayanne Vieira de. **Avaliação da acurácia posicional de dados espaciais gerados a partir do uso do RPA**. Publicação O48a 2019, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Geografia. 2019. Uberlândia, MG. 138 p.

PATELLA, Luciana. **Veículos aéreos não tripulados: os novos aliados da engenharia**. Conselho em revista. Revista bimestral do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio Grande do Sul. n. 116, p. 28-31, Porto Alegre, RS, set./out. 2016.

PIARC. **Road safety inspection guidelines for safety checks of existing roads.** PIARC Technical Committee. World Road Association, 2007, Paris, France. 83 p.

PROSSER-CONTRERAS, Matías et al. **Use of unmanned aerial vehicles (Uavs) and photogrammetry to obtain the international roughness index (iri) on roads.** Applied Sciences, v. 10, n. 24, p. 8788, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10248788>

PURCELL, Cameron R. **Remote sensing image performance metrics: Comparing ground sample distance and the national imagery interpretability rating scale.** California State University, Long Beach, 2000.

QURESHI, Waqar S. et al. **An exploration of recent intelligent image analysis techniques for visual pavement surface condition assessment.** Sensors, v. 22, n. 22, p. 9019, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22229019>

RAHNAMAYIEZEKAVAT, Payam et al. **Automated pavement marking integrity assessment using a UAV platform—a test case of public parking.** Journal of Asian Architecture and Building Engineering, p. 1-12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2329358>

RAKUASA, Heinrich. **Review of the use of drones and non-metric cameras for the provision of large-scale geospatial data according to big regulation no. 1 of 2020.** Journal of Data Analytics, Information, and Computer Science, v. 1, n. 2, p. 71-78, 2024. DOI: <https://doi.org/10.59407/jdaics.v1i2.695>

REDWEIK, Paula. **Fotogrametria aérea.** Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa. Pág, v. 3, 2007.

RIBEIRO, Rogério Lemos. **Procedimento para auditoria de segurança viária incluindo avaliações em ambientes virtuais.** Publicação T.TD-006/2019, Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, DF, 201 p.

RIBEIRO, Rogério Lemos; ANDRADE, Michelle. **Uso de ambientes virtuais para vistorias técnicas em auditoria e inspeção de segurança viária: um estudo de caso em trecho rural de rodovia duplicada.** Transportes, v. 29, n. 1, p. 86-102, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v29i1.2216>

ROSALEN, David Luciano; AMAZONAS, Davi Meira. **Mapeamento com aeronave remotamente pilotada de navegação precisa em tempo real.** CONGRESSO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 2019.

SAMADZADEGAN, F. et al. **Automatic Road Crack Recognition Based on Deep Learning Networks from UAV Imagery.** ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 10, p. 685-690, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-685-2023>

SCHNEIDER, Elmir. **História do sistema rodoviário brasileiro.** Revista Escola Detran RS, v. 1, n. 1, p. 45-58, 2021.

SECURIDAD VIAL. **Guía para la realización de Auditorías em Seguridad Vial.** Ministerio de Transporte Presidencia de la Nación. Argentina, 2022, 204 p.

SILVA, Mayara dos Santos; FONTANA, Adriane Monteiro. **Uma breve revisão conceitual sobre Auditoria de Segurança Viária e proposta de Lista de Verificação.** FaSCi-Tech. v. 1, n. 11, p. 06-20, São Caetano do Sul, out. 2016.

SILVA, Luís Augusto et al. **Automated road damage detection using UAV images and deep learning techniques.** IEEE Access, v. 11, p. 62918-62931, 2023. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3287770](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3287770)

SOUZA, Patrícia Verônica Nunes Carvalho Sobral de; SANTOS, Alex Torres. **A inserção dos drones (RPAs) na segurança pública brasileira: uma análise sob a ótica do princípio da eficiência.** Revista Em Tempo. v. 18, p. 133-155, Marília, São Paulo, 2019. ISSN 1984-7858.

STATSOFT INC (2005) **STATISTICA (data analysis software system).** USA. Obtido de www.statsoft.com. Acesso em: 03/12/2024.

TILON, Sofia et al. **Towards improved unmanned aerial vehicle edge intelligence: A road infrastructure monitoring case study**. Remote Sensing, v. 14, n. 16, p. 4008, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14164008>

THEMISTOCLEOUS, Kyriacos. *et. al.* **Damage assessment using advanced non-intrusive inspection methods: Integration of space, UAV, GPR and field spectroscopy**. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. vol. 9229, 5 p. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2069507>

WHO (2023) **Global status report on road safety 2023**. Geneva. Obtido em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517>. Acesso em: 15 ago. 2024.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements of photogrammetry with applications in GIS**. McGraw-Hill Education. ed. 4, 663 p. 2014.

ZANETTI, Juliette. **Influência do número e distribuição de pontos de controle em ortofotos geradas a partir de um levantamento por VANT**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Viçosa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Viçosa, MG, 2017, 96 p.

ZEYBEK, Mustafa; BIÇICI, Serkan. **Automated extraction of road information from UAV-based data**. GIM International. Netherlands, 2022, 29-31 p.

ZHANG, Chunsun. **An UAV-based photogrammetric mapping system for road condition assessment**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. vol. 37, part. B5, p. 627-632. Beijing, 2008.

ZHAO, Yingxiang et al. **Highway crack detection and classification using UAV remote sensing images based on CrackNet and CrackClassification**. Applied Sciences, v. 13, n. 12, p. 7269, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13127269>

ZHU, Chendong et al. **Monitoring and identification of road construction safety factors via UAV**. Sensors, v. 22, n. 22, p. 8797, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228797>

APÊNDICE A – RESUMO GERAL DOS LEVANTAMENTOS EXPERIMENTAIS

ÁREA	EXP	VOO	DATA	HORA	VENTO (km/h)	RAJADA (km/h)	TEMP. (°C)	kp	NUVEM (%)	VISIB. (km)	VARIÁVEIS				ESTIMATIVA				PROCESSAMENTO			ERRO ABSOLUTO	
											ALTURA	VEL.	S.F.	S.L.	RTK	Nº FTOS	GSD	TEMPO	Nº FTOS	T. VOO	T. PROSS.	COMP.	LARG.
Bloco 1Y	1	30	07/10/2024	15:58	8	21	36	4,67	63	16	25 metros	1.8 m/s	70%	70%	Não	62	0.68	4m 10s	61	4	14	90,90	13,16
	2	3	25/09/2024	15:54	8	22	34	3.67	38	16	40 metros	1.8 m/s	70%	70%	Sim	29	1.10	2m 55s	28	8	7	10,72	13,29
	3	1	25/09/2024	15:32	8	22	34	3.70	24	16	25 metros	1.8 m/s	80%	70%	Sim	91	0.68	7m 21s	94	4	24	6,45	9,06
	4	7	30/09/2024	16:00	13	30	31	1.67	11	16	40 metros	1.8 m/s	80%	70%	Não	42	1.10	2m 55s	41	3	24	176,43	20,38
	5	2	25/09/2024	15:41	8	22	34	3.70	29	16	25 metros	1.8 m/s	70%	80%	Sim	100	0.68	6m 54s	102	8	15	8,65	9,91
	6	31	07/10/2024	16:05	8	21	36	4,67	63	16	40 metros	1.8 m/s	70%	80%	Não	56	1.10	5m 52s	56	5	33	159,62	24,38
	7	6	30/09/2024	15:51	13	31	32	1.33	11	16	25 metros	1.8 m/s	80%	80%	Não	149	0.68	6m 54s	153	6	94	66,45	12,58
	8	27	14/10/2024	14:26	14	31	31	1,33	85	16	40 metros	1.8 m/s	80%	80%	Sim	83	1.10	5m 52s	83	6	16	13,23	17,30
Bloco 1H	9	38	08/10/2024	15:29	15	33	36	4,00	72	16	25 metros	1.8 m/s	70%	70%	Não	83	0.68	5m 29s	82	5	23	471,75	29,60
	10	11	03/10/2024	17:26	4	11	35	2.67	42	16	40 metros	1.8 m/s	70%	70%	Sim	41	1.10	4m 24s	43	5	8	20,51	18,00
	11	34	09/10/2024	17:01	8	19	34	2,33	73	16	25 metros	1.8 m/s	80%	70%	Sim	122	0.68	5m 29s	122	6	18	21,95	9,95
	12	42	08/10/2024	16:06	14	31	36	3,67	73	16	40 metros	1.8 m/s	80%	70%	Não	61	1.10	4m 24s	63	5	34	60,77	15,57
	13	35	09/10/2024	17:26	7	16	33	2,00	70	16	25 metros	1.8 m/s	70%	80%	Sim	120	0.68	8m 07s	121	8	18	21,34	12,87
	14	16	02/10/2024	17:12	3	9	34	1.33	62	16	40 metros	1.8 m/s	70%	80%	Não	52	1.10	5m 46s	54	5	29	114,05	14,20
	15	40	08/10/2024	15:50	15	32	36	4,00	74	16	25 metros	1.8 m/s	80%	80%	Não	179	0.68	8m 07s	178	8	64	264,96	17,60
	16	36	09/10/2024	17:18	7	17	33	2,33	71	16	40 metros	1.8 m/s	80%	80%	Sim	79	1.10	5m 46s	81	15	18	21,21	13,96
Bloco 3P	17	48	18/10/2024	13:09	8	22	30	2,67	91	16	25 metros	1.8 m/s	70%	70%	Não	65	0.68	4m 28s	67	4	35	142,00	12,78
	18	46	08/10/2024	07:43	4	16	28	5,00	100	16	40 metros	1.8 m/s	70%	70%	Sim	31	1.10	3m 07s	30	3	7	8,33	21,15
	19	44	08/10/2024	07:30	3	13	27	5,00	100	16	25 metros	1.8 m/s	80%	70%	Sim	97	0.68	4m 14s	100	4	17	13,89	10,09
	20	50	18/10/2024	13:22	8	22	30	2,67	86	16	40 metros	1.8 m/s	80%	70%	Não	44	1.10	3m 07s	43	3	28	78,49	12,76
	21	18	07/10/2024	8:12	5	26	28	2.67	1	16	25 metros	1.8 m/s	70%	80%	Sim	105	0.68	7m 24s	113	8	19	14,24	9,84
	22	24	03/10/2024	7:45	3	20	27	1.67	77	16	40 metros	1.8 m/s	70%	80%	Não	60	1.10	6m 17s	62	6	44	37,66	13,03
	23	22	03/10/2024	7:27	2	15	27	1.67	77	16	25 metros	1.8 m/s	80%	80%	Não	159	0.68	7m 24s	163	7	90	15,14	12,73
	24	20	07/10/2024	8:29	7	27	29	3.00	1	16	40 metros	1.8 m/s	80%	80%	Sim	87	1.10	6m 17s	86	6	16	9,04	20,11

LEGENDA:

EXP Experimento
TEMP. Temperatura
VISIB. Visibilidade
VEL. Velocidade
S.F. Sobreposição Frontal
S.L. Sobreposição Lateral

Nº FTOS. Número de Fotos
T. VOO Tempo de Voo
T. PROSS. Tempo de Processamento
COMP. Comprimento
LARG. Largura