

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO  
REMOTO

Gabriel de Souza

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS  
CONFIGURAÇÕES DOS PONTOS DE APOIO E  
DO VOO NA ACURÁCIA DE  
ORTOFOTOMOSAICOS ELABORADOS A  
PARTIR DE DADOS DE VANT

**Dissertação de Mestrado**

**PORTO ALEGRE**

**2018**

Gabriel de Souza

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONFIGURAÇÕES  
DOS PONTOS DE APOIO E DO VOO NA ACURÁCIA  
DE ORTOFOTOMOSAICOS ELABORADOS A PARTIR  
DE DADOS DE VANT

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da UFRGS, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto. Área de Concentração: Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. Linha de Pesquisa: Sensoriamento Remoto Aplicado.

Orientação: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Rita de Cássia Marques Alves

Coorientação: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andrea Lopes Iescheck

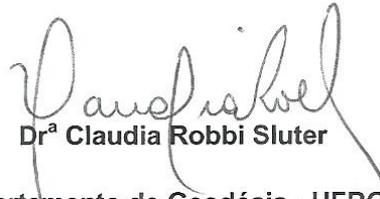
**PORTO ALEGRE**

2018

## **AGRADECIMENTOS**

Às minhas orientadoras: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Rita de Cássia Marques Alves e Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andrea Lopes Iescheck. Ao Bruno Barbosa, Thiago Pereira e Prof. Dr. Mário Reiss pela concessão dos dados aerofotogramétricos. À Manuella Fagundes pelo apoio Técnico. A CAPES pelo auxílio estudantil. E ao PPGSR/UFRGS, seus professores e funcionários, pelo recebimento da proposta de pesquisa e pelos conhecimentos transmitidos.

**BANCA EXAMINADORA**



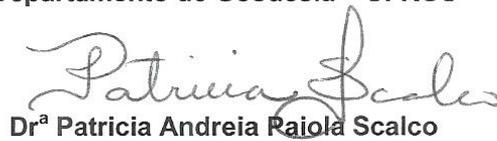
**Dr<sup>a</sup> Claudia Robbi Sluter**

**Departamento de Geodésia - UFRGS**



**Dr. Claudio Wilson Mendes Jr.**

**Departamento de Geodésia - UFRGS**



**Dr<sup>a</sup> Patricia Andreia Rajola Scalco**

**Departamento de Geodésia - UFRGS**

## RESUMO

Recentemente, o uso dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) surgiu como uma ferramenta para a aquisição de dados geoespaciais. Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs), as ortoimagens e os modelos tridimensionais gerados a partir de imagens de VANT são produtos cartográficos de grande utilidade para as mais diversas aplicações. Em vista das limitações dos VANTs e da recentidade desta ferramenta, este estudo visa determinar a correlação da configuração dos pontos de apoio e dos parâmetros do voo com a acurácia de ortofotomosaicos elaborados a partir de dados de VANT. Esta pesquisa utilizou dados de três levantamentos aerofotogramétricos distintos realizados com três aeronaves diferentes e considerou parâmetros relacionados à configuração dos pontos de apoio e à execução do voo. Foram gerados 200 ortofotomosaicos e 200 MDEs. Ao todo foram feitas 4616 observações de pontos de controle. Os resultados mostraram baixa correlação linear entre acurácia planimétrica e altimétrica. Os melhores resultados foram obtidos de forma inversa às alturas de voo. No geral, sob as condições de processamento utilizadas neste trabalho, recomenda-se o uso de 4 a 5 pontos de apoio por km<sup>2</sup>, além do uso de voo cruzado.

**Palavras Chaves:** Ortofoto, VANT, pontos de apoio, alvos artificiais.

## ABSTRACT

Recently, the use of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) emerged as a tool for geospatial data acquisition. Digital Elevation Models (DEMs), orthoimages and three-dimensional models generated from UAV images are cartographic products of great utility for many different applications. Considering the recency and limitations of UAV, this study aims at determining the correlation of ground control points and flight configuration with the accuracy of orthophotomosaics based on UAV data. This research used data from three different aerial surveys, performed with three different aircrafts, and considered parameters related to ground-control points distribution and to flight missions. 200 orthophotomosaics and 200 DEMs were generated and a total of 4616 ground-control points measurements were performed. Results did not show a linear correlation between planimetric and altimetric accuracy. The best correlation results were obtained inversely related to flight height. In general, under the processing conditions used in this work, we recommend the use of 4 control points per km<sup>2</sup> and a cross flight pattern.

**Key-Words:** Ortophoto, UAV, ground control points, artificial targets.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distorções nas bordas das edificações devido à má resolução do MDE ..	23
Figura 2. Sobreposição longitudinal e sobreposição lateral .....	29
Figura 3. Pontos de Von Grüber.....	30
Figura 4. Configurações de pontos de apoio.....	31
Figura 5. Modelos de alvos artificiais .....	33
Figura 6. Ângulos de rotação .....	37
Figura 7. Propagação de erros angulares .....	38
Figura 8. Fluxograma .....	43
Figura 9. Swinglet Cam, Echar e eBee .....	44
Figura 10. Área sobrevoada voo1 .....	46
Figura 11. Área sobrevoada voo2 .....	48
Figura 12. Área sobrevoada voo3 .....	50
Figura 13. Gráficos de erros horizontais e verticais .....	54
Figura 14. Ponto deslocado no gráfico. Possível erro de medição.....	54
Figura 15. Linhas de tendência .....	57
Figura 16. Pontos Retirados do Processo .....	59
Figura 17. Precisões médias dos ortofotomocaios, voo1 .....	65
Figura 18. Precisões médias dos ortofotomocaios, voo2 .....	66
Figura 19. Precisões médias dos ortofotomocaios, voo3 .....	68
Figura 20. Configuração indicada de pontos de apoio .....	70

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1. Parâmetros de duas fotografias sobrepostas .....	39
Quadro 1. Especificações dos voos .....	45
Tabela 2. Média da tendência de estabilidade das precisões. ....	59
Tabela 3. Média dos erros mínimos alcançados .....	61
Tabela 4. Correlações entre os erros planimétrico e altimétrico e a distância ao ponto de apoio mais próximo e a quantidade de pontos de apoio. ....	62
Tabela 5. Porcentagem de pontos correlacionados, voo1. ....	63
Tabela 6. Porcentagem de pontos correlacionados, voo3 .....	63
Tabela 7. Média dos erros em cada ortofotomosaico, maior erro entre 90% dos pontos e desvio padrão. Para a configuração de pontos distribuídos. Voo1 .....	64
Tabela 8. Médias. Desvio padrão e maior erro em 90% dos pontos testados nas configurações de uniformemente distribuídos e uniformemente distribuídos com pontos de ligação. ....	66
Tabela 9. Médias, desvio padrão e maior erro em 90% dos pontos testados nas configurações de uniformemente distribuídos e uniformemente distribuídos com pontos de apoio aerotriangulados. Voo3 .....	67
Tabela 10. Soma entre erro médio e intervalo de confiança e padronização desta soma em número de pixels. Voo1 .....	69
Tabela 11. Soma entre erro médio e intervalo de confiança e padronização desta soma em número de pixels. Voo3 .....	70
Tabela 12. Erro máximo esperado e comparação entre os voos 1 e 3. ....	71

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	11
1.1 Justificativa .....	11
1.2 Objetivo Geral .....	16
1.3 Objetivos Específicos .....	16
1.4 Estrutura do Trabalho .....	17
2 ORTOFOTO .....	18
2.1 Definição .....	18
2.2 Produção .....	20
3 AEROFOTOGRAMETRIA COM VANT .....	24
3.1 Plano de Voo .....	24
3.1.1 Linhas de Voo .....	25
3.1.2 Altura de Voo .....	27
3.1.3 Sobreposição Longitudinal .....	28
3.1.4 Pré-sinalização .....	30
3.2 Processamento dos Dados .....	33
3.2.1 Orientação Interior .....	33
3.2.2 Orientação exterior .....	35
3.3 Structure from Motion (Estrutura do Movimento) .....	40
4 METODOLOGIA .....	43
4.1 Descrições dos Voos .....	44
4.1.1 Voo1 .....	45
4.1.2 Voo2 .....	47
4.1.3 Voo3 .....	49
4.2 Processamento de Dados .....	50
4.3 Organização dos Dados .....	53
4.4 Controle de Qualidade .....	53
4.5 Determinação da Quantidade de Pontos de Apoio .....	55
4.6 Cálculo das Correlações .....	57
5 RESULTADOS .....	58
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	73
REFERÊNCIAS .....	76

ANEXO I.....84

## 1 INTRODUÇÃO

O objeto de estudo desta dissertação são os ortofotomosaicos gerados a partir de fotografias aéreas obtidas com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). Para tanto, este trabalho trata da análise da correlação entre diferentes parâmetros que influenciam na qualidade destes produtos. O problema de pesquisa, portanto, é como analisar a influência da configuração dos pontos de apoio e dos parâmetros do voo na precisão de ortofotomosaicos gerados a partir de fotografias obtidas com VANTs.

### 1.1 Justificativa

A importância das ortoimagens é inestimável. Quando adicionados elementos de mapa tornam-se produtos cartográficos com um mínimo de distorções em escala e não requerem muitos níveis de abstração para retratar as características planimétricas do terreno. Assim, eles dão ao usuário um produto que pode ser facilmente interpretado (LILLESAND *et al.*, 2015).

Ortofotos são usadas como base para a confecção de mapas vetoriais, sendo, então, uma alternativa à restituição fotogramétrica. Em ambos os casos (vetorização ou restituição) o método mais aplicado é o levantamento aerofotogramétrico que tem por requisito a utilização de aeronaves e câmeras específicas, pilotos, corpo técnico especializado, aeroportos, gerando, assim, uma logística complexa e um alto custo financeiro.

O surgimento dos satélites de sensoriamento remoto e da disponibilidade de imagens possibilitaram uso destas para a detecção de mudanças, atualização, confecção de cartas topográficas e outros produtos cartográficos (D'ALGE, 1997). As imagens de satélites passaram a representar uma alternativa importante aos métodos de mapeamento, em razão do menor custo e das elevadas resoluções espacial, temporal e espectral, que têm permitido mapeamentos em escalas grandes e atualizados. Entretanto, o uso de imagens de satélite é limitado dependendo da

escala do produto final. Os custos destas imagens aumentam de acordo com a resolução espacial desejada, que hoje se limita em 30 cm. Ainda, são poucos os satélites que fornecem o recurso da estereoscopia, e, quando disponível, o custo de aquisição das cenas, também, eleva-se consideravelmente. Por se tratar de uma plataforma orbital, as imagens podem sofrer a interferência atmosférica, o que é um entrave em regiões com elevada cobertura de nuvens em certos períodos do ano. Ademais, a resolução temporal é mais um fator limitante quando há necessidade de monitoramento de fenômenos que evoluem rapidamente, como inundações e deslizamentos de terra.

Mais recentemente o uso dos VANTs surgiu como uma ferramenta para o levantamento de dados geográficos. Na última década o uso civil dos VANTs se popularizou com os avanços tecnológicos, como as melhorias e disponibilidade dos Sistemas Globais de Navegação (GNSS) precisos e em miniatura, Unidades de Medição Inercial (IMUs), a disponibilidade de câmeras digitais de qualidade e outros sensores em miniatura (NEBIKERA *et al.*, 2008). Suas vantagens se encontram, principalmente, na facilidade de operação, baixo custo, economia de tempo e da alta resolução espacial. O baixo custo está atrelado tanto na aquisição da aeronave quanto na menor necessidade de corpo técnico especializado como um piloto, além do rápido e fácil planejamento, levantamento e processamento dos dados (BRAZ *et al.*, 2015).

Embora a aplicação dos VANTs para mapeamento remonte da década de 60 (DISPERATI, 1991), o uso deste instrumento se massificou na última década devido aos avanços tecnológicos, tanto na produção destas aeronaves quanto às ferramentas computacionais de processamento. Atualmente, sensores digitais são desenvolvidos ou adaptados especialmente para estes veículos, nas faixas espectrais do visível e do infravermelho, esta última sendo utilizada principalmente para o mapeamento e monitoramento da vegetação e de áreas impermeabilizadas, além do cálculo de temperatura da superfície (JANSSEN; HUURNEMAN, 2001 e BRENNER *et al.* 2017). Além disto, sensores multi e hiperespectrais, laser scanner e radares de abertura sintética, comumente usados apenas em aeronaves e plataformas orbitais, estão sendo embarcados em VANT (TETUKO *et al.*, 2006; KHAN *et al.*, 2017; AHMED *et al.*, 2017; LIU, 2017).

Os VANTs são cada vez mais utilizados como instrumento de fotogrametria aérea e terrestre devido ao baixo custo, versatilidade de aplicação e rapidez na execução e na obtenção dos resultados, além de fornecer uma visão geral rápida de uma situação, bem como documentação detalhada da área. Ainda, possuem a vantagem de poderem ser operados em locais perigosos ou inacessíveis (EISENBEIß, 2009).

O MDE, as ortoimagens e os modelos tridimensionais (3D) texturizados a partir de imagens de VANT ou dados de outros sensores podem ser aplicados a todos os tipos de situações de perigo, catástrofes ou desastres ambientais, além de fornecer documentação 3D do ambiente (EISENBEIß, 2009). Existem diversas pesquisas a respeito da utilização deste instrumento nas mais diversas áreas e aplicações, como para monitoramento de pastagens (LALIBERTE *et al.*, 2010), controle de pragas agrícolas (MEDEIROS, 2008, YUE *et al.*, 2012), monitoramento de deslizamento de terra (YEH, 2016), mapeamento de áreas inacessíveis (OBANAWA; HAYAKAWA, 2015), monitoramento em silvicultura (PANAGIOTIDIS *et al.*, 2016; TORRESAN *et al.* 2016), auxílio à segurança pública (HAZELTON, 2017), integração com a fotogrametria terrestre para fins arquitetônicos e conservação do patrimônio público (RODRIGUES; REDWEIK, 2015), auxílio a engenharia civil (AGOSTINHO, 2012), monitoramento de sítios arqueológicos (BENDEA *et al.*, 2007), apoio à mineração (LEE, CHOI, 2016), sensoriamento remoto ambiental (HARDIN, JENSEN, 2011), análise da qualidade da água (AGUIRRE *et al.* 2017), incêndios florestais (CASBEER *et al.*, 2006), mapeamento de uso e cobertura da terra (IESCHECK *et al.*, 2016) entre outras. Apesar da vasta aplicação, para obter resultados satisfatórios é necessário que se faça um planejamento do levantamento aerofotogramétrico, como a distribuição de pontos de apoio e a altura de voo. Este planejamento depende do tipo de aplicação, das especificidades da área a ser levantada e da qualidade do produto final.

Os VANTs não são equipados com câmeras próprias para fotogrametria e por serem leves sofrem severas inclinações. Além disto, quase sempre são equipados com receptores GNSS de simples frequência que determinam a posição geográfica do centro perspectivo de cada fotografia, e que, por sua vez, tem precisões em torno de 10 metros (MONICO, 2008). Além disto, o método de posicionamento é o

cinemático absoluto, onde a observação é realizada com o receptor em movimento sem o auxílio de outro receptor como base. Sendo assim, quanto menor o tempo de rastreamento (que no caso do aerolevante é ínfimo), menor é a precisão determinada pelo processamento (IBGE, 2017). Nesta pesquisa, entre as aeronaves estudadas, o erro no posicionamento determinado pelo receptor GNSS embarcado, atingiu cerca de 50 metros no pior dos casos e uma média de cerca de 2 metros. Apesar de existir estudos que objetivam a melhoria do posicionamento determinados pelos VANTs no instante da tomada da fotografia com o uso de receptores GNSS diferenciais, os VANTs embarcados com receptores de frequência simples em modo absoluto ainda é o mais utilizado devido ao baixo custo. Estes dados afetam a acurácia dos parâmetros de orientação exterior, sendo que a má resolução destes parâmetros é uma das maiores fontes de erros na geração das ortofotos (COELHO; BRITO, 2007).

Atualmente há estudos que objetivam a melhoria da estimativa inicial dos parâmetros de orientação exterior fornecidos pelo VANT, como a utilização de um filtro complementar para combinar o girômetro e o acelerômetro (EUSTON *et al.*, 2008), a quantidade de pontos de apoio e a precisão dos ortofomosaicos (SKARLATOS *et al.*, 2013; COVENEY; ROBERTS, 2017; TAHAR, 2017), modos de processamento (TURNER *et al.*, 2012), resolução dos parâmetros interiores (BABAPOUR *et al.*, 2017), avaliação do MDE (UYSAL *et al.*, 2015), melhoria das câmeras (JABARI, *et al.*, 2017), melhorias nos dados de GNSS como a utilização do GPS Diferencial (RAGAUSKAS *et al.*, 2017, SUN *et al.*, 2016), correção geométrica de mosaicos (SONG *et al.*, 2017; KIM *et al.*, 2017), entre outros. No entanto, ainda não existem trabalhos que analisem a relação entre diversos fatores e a exatidão planimétrica das ortofotos geradas. O mais comum é avaliar a quantidade de pontos de apoio e sua influência na qualidade do ortofotomosaico gerado.

A precisão de uma ortoimagem digital é função dependente da qualidade das imagens, do controle no terreno, da triangulação fotogramétrica, bem como do MDE usado para criá-la. São fatores da qualidade do MDE a resolução espacial, resolução radiométrica, exatidão planialtimétrica e a ausência de ruídos. Para ortoimagens de grande escala é fundamental que o MDE represente, também, as altitudes acima da superfície do terreno como edificações e vegetação arbustiva.

Jensen (2009) adverte que ortoimagens urbanas derivadas de MDEs inadequados frequentemente apresentam severas distorções das bordas dos edifícios.

Em ortofotos de grande escala sempre haverá, detalhes do objeto, que não estão corretamente mapeados (como árvores, carros, objetos muito pequenos e menos importantes, etc.). Quanto maior a escala, mais objetos devem ser incluídos no MDS e, tornando-se, assim, uma aproximação real tridimensional dos objetos (AMHAR; JANSÁ, 1998).

Estruturas altas somente estarão exatamente sobre suas bases quando o sensor adquire os dados de uma altitude elevada, fazendo que o deslocamento do relevo, dos edifícios ou de outras estruturas causados pela distorção radial se torne insignificante. Quando se utilizam fotografias aéreas de grande escala com deslocamento significativo de relevo em edifícios e árvores, somente as bases dos edifícios ou árvores se encontram na sua correta localização planimétrica em uma ortoimagem. Uma ortofoto digital não corrige a inclinação de edificações causada pela distorção radial, e ainda, a inclinação de edificações ou outras estruturas pode ocultar completamente outra imagem da superfície terrestre a ser mapeada (JENSEN, 2009). Assim, oclusões são feições encobertas por outras mais altas e, por isto, não são detectadas nas fotografias devido às inclinações do sensor. Como efeito, isto pode gerar um erro na correta atribuição do valor do pixel.

Sendo os VANTs plataformas que realizam voos em baixa altitude, efeitos como o deslocamento do terreno podem ser ampliados. Em uma fotografia aérea quase vertical há diferentes escalas. Isto é, a escala menor quando há depressões no terreno e maior quando a imagem se "aproxima" da câmera como uma montanha ou uma edificação elevada. Também, a magnitude de deslocamento do relevo é diretamente proporcional à diferença na elevação, entre determinado objeto e o datum local e inversamente proporcional à altitude da câmera em relação ao datum local (JENSEN, 2009). Oclusões da perspectiva tornam o conteúdo da ortoimagem parcialmente errado e/ou sendo impossível tornam impossível sobrepor dados vetoriais (AMHAR; JANSÁ, 1998).

Já a escolha da configuração dos pontos de apoio é antes de tudo uma questão econômica, uma vez que o custo para estabelecimento destes pontos está

entre 20% e 50% do custo total do mapeamento (WARNER *et al.*,1996). É comum que os VANTs sejam embarcados com um sistema de navegação que define, de forma aproximada, as coordenadas do centro das fotografias. Porém, o não uso de pontos de apoio, ainda que útil para certas aplicações, como o auxílio a desastres, é inviável para outras que exigem acurácia, a precisão deve ser melhorada com intervenção manual, para definir pontos de apoio em trabalho de campo, com receptores GNSS de alta precisão, a partir da implantação de alvos facilmente identificados durante o processamento das imagens. (TSAI, 2015; ROBERTO 2013). Em processos de aerotriangulação é grande a propagação de erros, e isto exige um adensamento adequado de pontos de apoio Andrade (1998).

Quanto maior o número de pontos de apoio, melhores são os resultados finais, porém, convém verificar até onde é economicamente viável a obtenção de tantos pontos de apoio. Devido a isto, alguns processos, como o de fototriangulação, foram desenvolvidos de forma que a partir de apenas alguns pontos de apoio, possa ser gerada uma infinidade de outros, com precisões aceitáveis para que sejam utilizados como se de apoio fossem (COELHO & BRITO, 2007). Há uma quantidade ótima de pontos de apoio que oferece o máximo benefício econômico e, ao mesmo tempo, mantém uma precisão satisfatória (Wolf *et al.*, 2014).

## **1.2 Objetivo Geral**

Em vista das limitações dos VANTs e da recentidade desta ferramenta o objetivo geral desta dissertação é analisar como fatores da distribuição dos pontos de apoio influenciam na exatidão planimétrica de ortofotomosaicos e na exatidão dos MDEs gerados a partir de dados oriundos de VANTs.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Para que o objetivo geral seja alcançado deverão ser realizadas análises de correlação entre fatores da configuração de pontos de controle e exatidão do MDE.

Sendo assim, os objetivos específicos tratam de determinar a correlação entre a qualidade dos ortofotomosaicos gerados e os seguintes fatores:

- a) Números de pontos de apoio;
- b) Distância do ponto de controle estudado a um ponto de apoio;
- c) Distribuição dos pontos de apoio;
- d) Utilização de apoios aerotriangulados;
- e) Exatidão do MDE.
- f) Exatidão planimétrica de um determinado ponto no ortofotomosaico.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos. Capítulo introdutório, no qual se apresenta o estado da arte relacionado ao tema, o problema de pesquisa e os objetivos propostos. Os capítulos 2 e 3 apresentam o referencial teórico que embasa este trabalho, sendo que o primeiro trata de ortofotos e o segundo de aerofotogrametria, os dois capítulos dissertados sob a ótica atual e a utilização do VANT. No capítulo 4, apresenta-se a metodologia utilizada para análise da qualidade dos ortofotomosaicos em função dos diversos fatores considerados. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e a análise destes resultados. E, no capítulo 6, apresentam-se as conclusões e recomendações.

## 2 ORTOFOTO

### 2.1 Definição

Ortofotos são fotografias do terreno corrigidas de tal forma que o aspecto perspectivo da fotografia foi removido. Uma ortofoto é uma fotografia que mostra imagens de objetos em suas verdadeiras posições ortográficas (WOLF *et al.*, 2014), por isso, ortofotos podem ser usadas para a confecção de mapas planimétricos, e topográfico quando sobrepostas por curvas de nível (MIKHAIL *et al.*, 2001).

Uma ortoimagem tem precisão de mapa vetorial, isto faz com que ortoimagens possam ser usadas como mapas para a realização de medições de localização geográfica, distâncias, ângulos e área. Em imagens não retificadas, essas medições só podem ser feitas de maneira aproximada, em função do deslocamento da imagem e da mudança de escala dada por variações do relevo e pelas inclinações das fotografias aéreas (JENSEN, 2009).

Hoje, muitos usos de produtos geoespaciais requerem dados de feições planimétricas atualizados. Análises e projetos a partir de dados geoespaciais geralmente requerem um posicionamento acurado das feições. A coleta e a atualização de feições planimétricas podem ser custosas. Muitos usuários finais também, não estão acostumados a visualizar e analisar mapas baseados em vetores. Estes preferem visualizar feições planimétricas como uma fotografia. Os custos podem, algumas vezes, ser minimizados pela produção de um conjunto de mapas digitais baseados em fotografias que são uniformemente acurados (FALKNER; MORGAN, 2001).

Uma ortoimagem é uma imagem baseada em uma projeção ortográfica. Na projeção ortográfica os raios de luz são perpendiculares ao plano de referência horizontal, e, portanto, nunca se encontram. Sendo assim, os efeitos de distorção de escala, devido a obliquidade da fotografia são corrigidos. Quando complementada por símbolos, linhas e georreferenciada, com ou sem legenda, podendo conter informações planimétricas são denominadas ortofotocartas (IBGE, 2017).

De acordo com Andrade (1998), um mosaico de duas ou mais ortofotos digitais denomina-se ortofotocarta. Já segundo Mikhail *et al.* (2001), ortofotomosaicos são produtos onde uma série de ortofotos individuais conjugadas são apresentadas juntas em uma imagem contínua, também tem escala uniforme e também pode ser usada como mapa.

Pode-se, ainda, distinguir os termos "ortofoto" e "ortoimagem". Ortofoto se refere à retificação de imagens analógicas por meio de projeções analíticas (projeção fotomecânica) e analíticas. Já ortoimagem, se preocupa com as técnicas fotogramétricas digitais (BRITO, 1997).

Ainda há o termo "*true orthophoto*" (ortofoto verdadeira), ou seja, a foto verdadeira e correta. Este termo é usado para uma ortofoto onde elementos de superfície que não estão incluídos no MDT (Modelo Digital do Terreno) também são corrigidos, gerando assim, um MDS (Modelo Digital de Superfície). Estes elementos geralmente são edifícios e pontes (AMHAR; JANSÁ, 1998).

Imagens adquiridas por sensores remoto encontram-se em perspectiva central, todos os raios de luz de diferentes objetos passam por um só ponto localizado no centro óptico do instrumento. O conjunto destes raios é chamado feixe perspectivo. Uma imagem em perspectiva central não pode ser tomada como fonte de informação métrica segura, uma vez que possui erros devido à rotação do sensor e deslocamento devido ao relevo, inerentes à perspectiva cônica (COELHO; BRITO, 2007). Já em uma ortofoto a geometria de uma fotografia digital altera-se de um feixe cônico de raios para uma geometria de raios paralelos ortogonais entre o solo e a imagem. Assim, a perspectiva de visualização é modelada como sendo de distância infinita ao solo. Por conseguinte, os efeitos de deslocamento do relevo e de variações na altitude da câmera são removidos, assim, o resultado é uma imagem corrigida planimetricamente (JENSEN, 2009).

Segundo Fritz (1996) a disponibilidade comercial e a alta resolução dos sensores em um futuro próximo não só aumentariam o uso de ortoimagens, mas, também, levaria a melhorias em sua qualidade geométrica e a redução do custo. Sabemos que realmente, houve um considerável aumento no uso de ortofotos digitais e MDEs em muitas aplicações, principalmente devido aos avanços

computacionais tanto em hardware quanto em software que tornaram as ortoimagens digitais e produtos relacionados cada vez mais populares e acessíveis a qualquer usuário, com muito ou pouco conhecimento em geociências. Ortofotos são amplamente usadas em conjunto ao SIG (Sistema de Informação Geográfica) como base planimétrica de referência para realizar análises, e são, também, usadas para gerar camadas de informação para banco de dados (WOLF *et al.*, 2014). Os *softwares* atuais permitem combinar ortofotos com informações vetoriais e dados tabulares, com os quais é possível melhorar o procedimento de interpretação (NIETO; LEON, 2007). Atualmente, leigos, planejadores, profissionais usuários de SIG, cartógrafos e a mídia usam ortoimagens como fundo sobre o qual se sobrepõe informação temática. A produção deste produto se sofisticou de tal forma que já é possível que qualquer usuário utilize sistemas de fotogrametria digital em seus computadores pessoais para gerar seus MDEs e Ortofotos (JENSEN, 2009).

## 2.2 Produção

Ortoimagens são criadas a partir de imagens de sensoriamento remoto. Para casos de maior detalhamento e precisão, fotografias aéreas estereoscópicas de alta qualidade são necessárias para a produção de MDEs e ortofotos com precisão, bem como para a extração de detalhes planimétricos. Sistemas comerciais de engenharia fotogramétrica adquiriam a maior parte das fotografias aéreas métricas de grande escala, pois estes utilizam sistemas sensores elaborados especialmente para este fim, e que, por isto, fornecem melhor resolução geométrica e radiométrica. A maior parte destes sistemas atualmente está equipada com GPS e sistemas de navegação inercial. MDEs, ortofotos e detalhes de atributos planimétricos de alta e muito alta resolução espacial podem ser derivados dessas imagens (JENSEN, 2009). Contudo este sistema fotogramétrico vem perdendo espaço devido ao seu alto custo. O surgimento de VANT acabou por substituir estes sistemas quando a área a ser levantada não é demasiadamente grande. Isto se deve principalmente ao seu baixo custo, se comparado com aeronaves embarcadas, e as evoluções computacionais que oferecem produtos finais com qualidades equivalentes aos citados. Para se

obter ortofotos digitais e seus produtos derivados através de métodos aerofotogramétricos. deve-se seguir as seguintes etapas:

- a) Coleta de pontos de controle no terreno;
- b) Aquisição de fotogrametria aérea estereoscópica e outros dados de sensores remotos;
- c) Aerotriangulação;
- d) Extração de dados altimétricos e modelos digitais de elevação;
- e) Criação de ortoimagens digitais;
- f) Controle de qualidade; e
- g) Extração de atributos temáticos de interesse.

Anteriormente a ortofoto era produzida por aparelhos óptico-mecânicos chamados ortoprojetores, que possuíam a capacidade de aproximar ou afastar a fotografia de acordo com a posição de uma marca flutuante visualizada no aparelho em relação ao terreno construído. O procedimento era realizado em pequenos trechos de fotografia e a junção dos trechos formava a ortofoto. Era um processo muito demorado e muito caro, e, portanto, era realizado apenas em casos de extrema necessidade (JENSEN, 2009).

Ainda segundo Jensen (2009), um dos eventos mais importantes na história do sensoriamento remoto e da fotogrametria foi o desenvolvimento da fotogrametria digital. O termo “*soft-copy*” significa que uma versão digital da fotografia aérea estereoscópica é analisada em vez de uma impressão material da fotografia. James Case concebeu o primeiro sistema de fotogrametria digital no início da década de 1980. Este processo requeria a digitalização das fotografias por mesas digitalizadoras, etapa que contribuía para as distorções dos dados de entrada. Sistemas atuais de fotogrametria permitem ao analista processar imagens digitais em um computador pessoal, visualizar o sistema estéreo em três dimensões na tela do computador, derivar os MDEs, extrair curvas de nível, produzir ortofotos, além de extrair detalhes de atributos planimétricos.

Brito, 1997, cita que uma das fontes de erro das ortoimagens são a digitalização e a compressão das imagens. Hoje, na grande maioria das vezes, ortoimagens são produzidas a partir de fotografias ou imagens totalmente digitais

desde a origem, que reduz etapas de degradação dos dados. Pode-se considerar com sinônimos os termos imagem e fotografia digital. Embora toda fotografia seja uma imagem e que uma imagem seja uma matriz de pixels (COELHO; BRITO, 2007), comumente a literatura atual tem separado o termo imagem para dados de sensores orbitais e fotografias digitais para imagens obtidas por câmeras fotográficas.

Durante o processo de ortorretificação, os efeitos da elevação sobre a perspectiva da imagem são removidos, para a produção de um conjunto de dados geocodificados, com um espaçamento regular entre pixels no espaço do mapa. Para cada pixel da ortoimagem com latitude e longitude conhecidas, o algoritmo usa inicialmente o MDE para determinar a altura do ponto. As funções de colinearidade são então usadas para determinar o pixel na imagem triangulada que corresponde ao ponto sobre o terreno no mundo real. A intensidade deste (reamostrado com base nos seus vizinhos usando um esquema de interpolação bipolar) é então atribuída ao pixel de saída na ortoimagem. O resultado é uma ortoimagem com correção do terreno que pode ser usada como um mapa topográfico (JENSEN, 2009).

Uma ortofoto digital não corrige a inclinação de edificações causada pela distorção radial, e ainda, a inclinação de edificações ou outras estruturas pode ocultar completamente outra imagem da superfície terrestre a ser mapeada (JENSEN, 2009). Assim, ocorrem oclusões, que são feições encobertas por outras mais altas e, por isto, não são detectadas nas fotografias devido às inclinações do sensor. Como efeito, isto pode gerar um erro na correta atribuição do valor do pixel.

Uma ortoimagem pode ser produzida, a partir de um MDS ou de um MDT que é um MDE removidas as feições naturais e artificiais como árvores e edificações. Um MDE produzido a partir de pontos levantados em campo ou até mesmo a partir de curvas de nível digitalizadas também pode ser usado para criar a ortoimagem, desde que a resolução espacial seja pequena e/ou que o terreno seja livre das feições citadas. Portanto, ao criar uma ortofoto deve-se saber como foi gerado o MDE, para se assegurar que apenas dados apropriados serão utilizados na criação de ortoimagens (JENSEN, 2009).

Sempre haverá detalhes do objeto, que não estão corretamente mapeados (como árvores, carros, objetos muito pequenos e menos importantes, etc.). Quanto maior a escala, mais objetos devem ser incluídos no MDE e, tornando-se, assim, uma aproximação real tridimensional dos objetos (AMHAR; JANSÁ, 1998). A figura 1 apresenta distorções em edificações devido à má resolução do MDE utilizado.



Figura 1. Distorções nas bordas das edificações em um ortofotomosaico devido à má resolução do MDE.

### 3 AEROFOTOGRAMETRIA COM VANT

Os VANTs podem ser descritos como uma nova plataforma de medição fotogramétrica, que operam de forma remota, semiautomática ou autônoma, sem um piloto sentado no veículo (EISENBEIß, 2009). E podem ser classificados pelo tipo de asa, sendo rotatória ou fixa. VANTs de asa rotatória foram popularmente associados ao termo “*Drone*” (Zangão). A ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) utiliza a nomenclatura Aeromodelo quando a aeronave não tripulada tem fins recreativos e RPA (Aeronave Remotamente Pilotada) quando o mesmo equipamento tem qualquer outro fim, como científico ou comercial.

Neste capítulo serão descritas as etapas para a elaboração de ortofotos a partir de dados de aerofotogrametria. O texto se concentra nas etapas de planejamento, pois as etapas como a aerotriangulação e geração do MDE são executadas, frequentemente, em *softwares* de processamento semiautomático, isto faz com que o usuário perca parcialmente o controle do processo. Observações a respeito das limitações e melhorias propiciadas pelos VANTs são descritas ao longo do texto. Revisões mais detalhadas a cerca de VANTs podem ser encontradas em Nex & Remondino (2013), Eisenbeiß (2009), Gustafsson & Zuna (2017) e Longhitano (2010).

#### 3.1 Plano de Voo

A finalidade do plano de voo é selecionar e calcular os elementos para a elaboração do aerolevante visando a qualidade do produto final. Todos os elementos a serem determinados dependem da resolução espacial da ortofoto, assim como da exatidão planimétrica a ser alcançada.

Os itens a serem pré-determinados são as linhas de voo, sobreposição longitudinal, altitude de voo e pré-sinalização. Atualmente existem *softwares* que realizam o planejamento aerofotogramétrico de forma semiautomática, onde é preciso informar apenas a resolução espacial desejada, a área do levantamento e a

câmera a ser utilizada e conseqüentemente a distância focal. Normalmente os VANTs são acompanhados destes softwares juntamente com sua aquisição. Exemplos destes são o *Emotion* (SenseFly) e *Mission Planer* (Xmrobots).

### 3.1.1 Linhas de Voo

Linhas de voo são os trajetos em linha reta dos quais a aeronave deverá percorrer para recobrir a área de interesse. A maior parte dos levantamentos por fotografia aérea requer múltiplas linhas de voo para mapear todo o terreno a ser levantado. Normalmente as linhas de voo se sobrepõem entre si em cerca de 20% e 30%, o que é conhecido como sobreposição lateral (figura 2), sendo a sobreposição mais usual de 30%. Múltiplas linhas de voo sobrepostas formam um bloco de fotografias aéreas.

A sobreposição lateral é utilizada ao unir duas linhas de voo durante o processo de aerotriangulação realizado por faixas independentes, ou no processo de mosaicagem. Estas faixas fotogramétricas são unidas através de pontos de apoio aerotriangulados, que são feições homólogas localizados nessa região sobreposta (LUGNANI, 1987). Atualmente os *softwares* de processamento de dados de VANT realizam o ajustamento em bloco, isto é, com todas as fotografias ao mesmo tempo, ainda que se tenha a opção de se dividir o processamento em pequenas partes. Isto faz com que a sobreposição lateral não desempenhe a função de ligar faixas fotogramétricas, mas, ainda colabora para um maior número de sobreposições sobre um ponto e que o recobrimento seja feito sem falhas.

Os VANTs são veículos extremamente leves e muito suscetíveis a intempéries. Isto faz com que a aeronave constantemente saia de sua linha de voo programada durante a execução do levantamento aéreo. Uma sobreposição lateral maior que 30% poderá assegurar que não haverá trechos não fotografados, além de evitar oclusões. E, também, como o processamento é realizado em bloco, uma sobreposição lateral maior que 30% aumentará o número de fotografias sobrepostas sobre o mesmo ponto no terreno, obtendo-se assim uma redundância maior no processo de ajustamento.

Como efeito negativo quanto maior a sobreposição lateral maior será o número de linhas de voo e, conseqüentemente, maior o tempo de voo e o número de fotografias. Normalmente um VANT tem poucos minutos de autonomia de voo, na maior parte dos casos entre 20 e 50 minutos, fazendo-se necessários vários revoos para a troca das baterias, aumentando o tempo de levantamento, até mesmo em dias, onerando o custo do projeto. O número de fotografias também deverá ser levado em conta, pois quanto mais fotografias, maior será o custo computacional, e dependendo do equipamento disponível o processamento pode se tornar inviável. Outro fator importante seria o armazenamento das fotografias, porém este tema se encontra atualmente superado com o emprego de cartões de memória *flash* e discos rígidos (HD) de alta capacidade.

Antes empregadas em apenas um sentido (norte-sul ou leste-oeste), hoje grande parte dos trabalhos de aerolevanteamento com VANT é realizada nos dois sentidos configurando, assim, o chamado “voo cruzado” (SOUZA, 2015; BARBOSA; PEREIRA, 2017; JAMES *et al.*, 2017). Este procedimento pode ser realizado devido à praticidade e velocidade do levantamento com VANT, evita o aparecimento de “buracos” no aerolevanteamento e aumenta o número de sobreposições, sendo mais indicado para pequenas áreas.

Resumindo o planejador do aerolevanteamento deverá levar em conta o tempo para execução do voo e seus custos; e, também, refletir se compensa aumentar o número de fotografias aumentando a sobreposição lateral e/ou realizando voo cruzado. O cálculo do número de fotografia dependerá, também, do quadro da fotografia no terreno e da sobreposição longitudinal, e pode ser calculado pelas equações 1 e 2.

Sendo a escala da fotografia dado por:

$$\frac{1}{E} = \frac{f}{h}$$

(1)

Onde  $h$  é a altura de voo,  $E$  o denominador da escala e  $f$  a distância focal.

Cada fotografia recobrirá longitudinalmente:

$$\text{recobrimento longitudinal} = \left(1 - \frac{\text{long}}{100}\right) * d * q * E \quad (2)$$

Onde *long* é a sobreposição longitudinal, *d* a dimensão do pixel, *q* a quantidade de pixels e *E* denominador da escala.

A quantidade de fotografias em uma faixa fotogramétrica será o comprimento da área a ser mapeada dividida pelo recobrimento longitudinal.

O recobrimento lateral pode ser calculado de forma homóloga ao longitudinal. Apenas substituindo a sobreposição longitudinal pela lateral. E tomando cuidado às dimensões do sensor. Assim pode-se calcular a quantidade de faixas fotogramétricas necessárias, dividindo a largura da área a ser mapeada pelo recobrimento lateral.

O total de fotografias será a quantidade de fotografias em uma faixa fotogramétrica multiplicada pelo número de faixas fotogramétricas. É indicado, sempre, que a primeira e a última faixa fotogramétrica assim como os limites destas faixas estejam fora dos limites das áreas a ser levantada.

### 3.1.2 Altura de Voo

Segundo Eisenbeiß (2009), uma classificação clássica para VANTs é, principalmente, relacionada com a altura máxima e a resistência de voo. Através da altura de voo será determinada a escala da fotografia, isto é, a resolução espacial. A partir da equação 3 é possível perceber a relação direta entre a altura de voo e a distância focal, assim para manter a resolução espacial e ao mesmo tempo aumentar a altura de voo, basta aumentar a distância focal na mesma proporção.

A resolução espacial pode ser calculada pela equação 3, onde *h* é a altura da aeronave no momento da tomada da fotografia e *f* a distância focal.:

$$\frac{\text{resolução espacial}}{\text{dimensão de 1 pixel no sensor}} = \frac{h}{f} \quad (3)$$

A altura de voo é mais um fator determinante na quantidade de fotografias. Sabe-se que a qualidade do MDE e da ortofoto depende principalmente da resolução da câmera, altura do voo e exatidão dos pontos de apoio (BERTEŠKA; RUZGIENĖ, 2013).

Uma maior altura de voo aumenta o quadro fotogramétrico, e então, se faz necessário um número menor de fotografias para cobrir o terreno. Há uma relação simples entre escala e cobertura. Se a escala é reduzida por um fator  $x$  a cobertura é aumentada por um fator  $x^2$  (MIKHAIL *et al.*, 2001).

Uma maior altura de voo requererá que os parâmetros de orientação exterior sejam mais precisos para uma correta determinação das coordenadas geográficas no terreno. Isto implica em uma quantidade maior de pontos de apoio ou de sobreposições entre as fotografias para o aumento da redundância durante o processo de ajustamento que determina estes parâmetros.

A limitação quanto à altura de voo depende de alguns fatores, como sua estrutura aerodinâmica que não permite voo a alturas muito elevadas, na maioria dos casos, ainda que haja VANTs projetados para alcançarem maiores distâncias altimétricas. VANTs de asa rotatória são altamente dependentes das condições do vento e a altura absoluta de voo será limitada. Além disto, a maioria destes sistemas só pode voar no manual ou modo de voo assistido (EISENBEIß, 2009). Outro fator limitante é o alcance da antena da central de controle que emite e recebe informações para o VANT. Com a popularização destas aeronaves agências governamentais de cada país estão criando regulamentos para o uso desta ferramenta. Estes regulamentos são criados principalmente para evitar acidentes aéreos com outras aeronaves e em solo com civis. No Brasil, a ANAC limita os voos dos VANTs leves (abaixo de 25 kg) a uma altura de 120 metros (ANAC, 2017).

### 3.1.3 Sobreposição Longitudinal

Sobreposição longitudinal (figura 2) é o recobrimento que uma fotografia tem sobre a seguinte em uma mesma linha de voo. Normalmente, a sobreposição longitudinal tem o valor de aproximadamente 60%. Um valor maior que 50% é importante, pois garante que todos os pontos do terreno levantado terão pelo menos duas fotografias sobrepostas. Para a estereoscopia é importante que se tenha duas observações de ângulos diferentes sobre o mesmo objeto, para que se possam determinar suas coordenadas tridimensionais. Por isto, a sobreposição longitudinal, também, é chamada de sobreposição estereoscópica. Uma sobreposição longitudinal maior que 50% garante, também, que a configuração de Von Grüber (figura 3) seja possível para a marcação de pontos de ligação.

Quanto maior a sobreposição longitudinal, mais fotografias sobre o mesmo objeto haverá. Em alguns casos, como para terrenos montanhosos, é indicado que as fotografias sejam adquiridas com sobreposições maiores que 80% (KONECNY, 2003). Mikhail *et al.* (2001) indicam que para casos onde o produto final sejam tais que necessitem de deslocamento do relevo reduzido, como ortofotos e mosaicos, a sobreposição longitudinal deve ser de 80%, e a sobreposição lateral deve ser de 60%. Para VANTs, também, é indicado uma sobreposição longitudinal maior que 60%, pois, como visto anteriormente, VANTs adquirem fotografias do terreno à baixa altitude. Esta baixa altitude amplia os efeitos de deslocamento do relevo, e uma sobreposição maior aumenta o grau de liberdade no processo de ajustamento da aerotriangulação. Ainda, os VANTs por serem leves sofrem facilmente os efeitos causados pelo vento obtendo assim grandes ângulos de guinada (figura 6) e conseqüentemente diminui a sobreposição planejada.

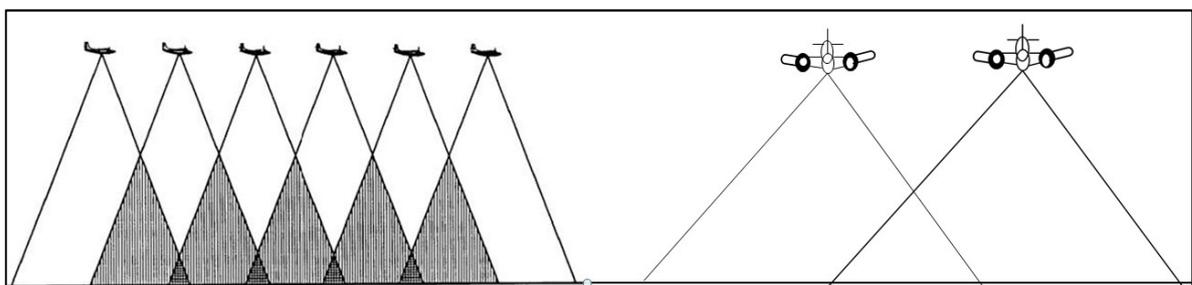


Figura 2. Sobreposição longitudinal e sobreposição lateral respectivamente.

Fonte: [https://dronemapper.com/uas\\_photogrammetry\\_processing/](https://dronemapper.com/uas_photogrammetry_processing/)

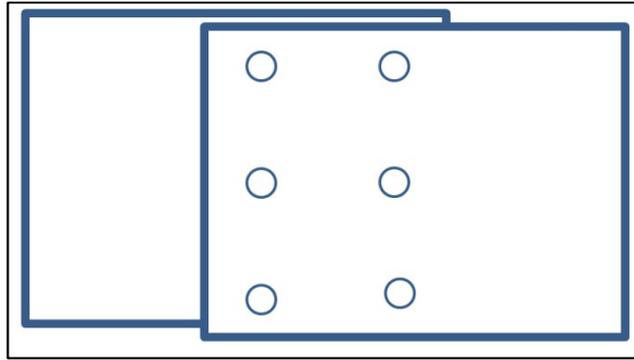


Figura 3. Pontos de Von Grüber.

Fonte: Adaptado de Andrade (1998).

#### 3.1.4 Pré-sinalização

O planejamento da pré-sinalização constitui em importante fator de economia de tempo e custos, além de garantir a exatidão desejada. Andrade (1998) recomenda que deva haver um ponto de apoio tridimensional de 3 a cada 5 bases, e pontos altimétricos no centro do bloco que devem estar alinhados com os pontos da periferia (figura 4.a). A configuração indicada por Andrade (1998) pode se tornar inviável para câmeras de pequeno formato, devido a seu quadro diminuto. Para uma câmera de 12 megapixels (4000 x 3000). Em um aerolevante com resolução espacial de 10 cm e sobreposição longitudinal de 60%, em uma área de 2 km<sup>2</sup> seriam necessários cerca de 50 pontos de apoio, para satisfazer o modelo proposto pelo autor.

Wolf *et al.* (2014) descrevem algumas quantidades mínimas de pontos de apoio necessárias para a solução de problemas matemáticos como a determinação da altura de voo, resseção espacial e colinearidade. Também recomenda que o fotogrametrista obtenha mais pontos de apoio que o mínimo para que se tenha redundância. E ainda indica que há uma quantidade ótima de pontos de apoio que oferece o máximo benefício econômico e, ao mesmo tempo, mantém uma precisão satisfatória. Em média, cerca de dois pontos horizontais e três ou quatro pontos verticais devem aparecer em, aproximadamente, cada quinto estereomodelo ao

longo da tira (figura 4.b). Por fim, também, relata que a experiência acaba estabelecendo a configuração adotada.

Estudos recentes referentes à VANTs e distribuição de pontos de apoio fazem comparações entre diferentes configurações de distribuição de pontos de apoio e mostram que o aumento do número de pontos de apoio melhora a exatidão planimétrica até que haja estabilidade e a adição de pontos de apoio passa a ser irrelevante. É o caso de Alves Júnior *et al.* (2015), Marotta *et al.* (2014), Mitishita *et al.* (2014), Tahar (2013) entre outros.

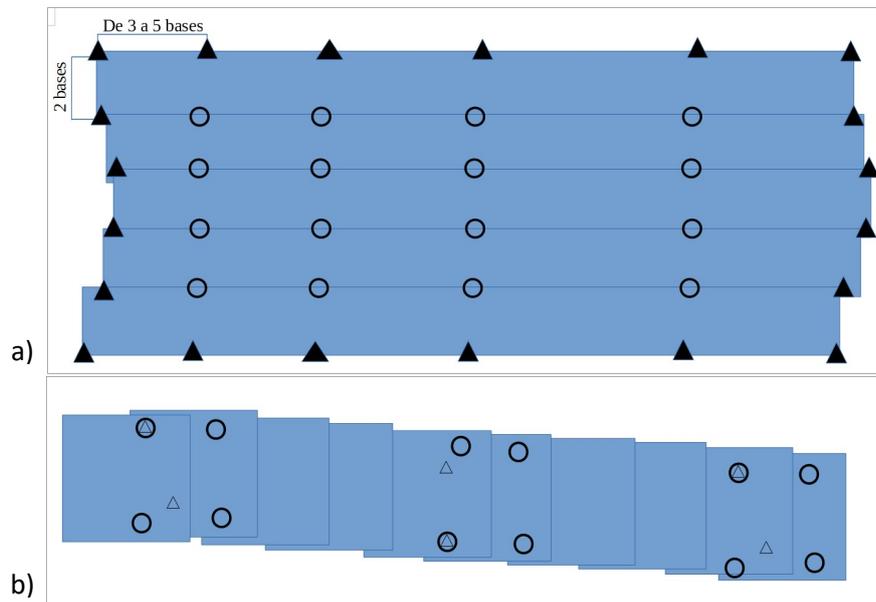


Figura 4. a) Configuração da distribuição de pontos de apoio proposta por: a) Andrade (1988) b) Wolf et al. (2014).

A distribuição dos pontos de apoio é realizada antes do levantamento aerofotogramétrico e através da distribuição de alvos artificiais uniformemente em toda a área do levantamento. Ou ainda da medição das coordenadas geográficas de feições bem reconhecíveis. Os alvos artificiais, também, devem ser medidos em pontos bem definidos e inequívocos, e, se possível ser visto em todas as fotografias passantes por eles, para que possam ser marcados no processo de aerotriangulação. Um modelo muito utilizado é proposto por Wolf *et al.* (2001) (figura 5.a), utilizado, por exemplo, por Costa & Silva (2012) e Almeida *et al.* (2016)

Para esta pesquisa dois modelos de alvos estiveram presentes: figura 5.b e figura 5.c. Souza (2015) e Fagundes (2016) utilizaram o modelo apresentado na figura 5.b. Este alvo artificial contendo um círculo branco de 30 cm de diâmetro em fundo negro, foi elaborado a partir da teoria de contrastes, o princípio do funcionamento do filtro de Bayer contido nas câmeras e através de testes de processamento digital de imagens (PDI). Através destes testes se constatou que o pixel central era o menos afetado pelo seu entorno, quando o sensor define o valor do pixel, sendo assim o pixel central seria distinto e logo de fácil identificação. Modelos semelhantes foram usados por Bendea *et al.* (2007) e James *et al.* (2017). Já Barbosa & Pereira (2017) utilizaram um modelo de alvo artificial quadriculado de um metro quadrado (figura 5.c), modelos semelhantes foram utilizados por Matias *et al.* (2015). A funcionalidade destes alvos é descrita no capítulo 6.

Atualmente *softwares* de processamento de dados de fotogrametria, como o Agisoft PhotoScan, oferecem alvos codificados (figura 5.d) para serem impressos e que podem ser colocados na área a ser levantada antes da tomada das fotografias. Estes alvos codificados são reconhecidos automaticamente pelo *software* e pode ser usado como pontos de referência para o sistema de coordenadas e definição de escala ou, ainda, como correspondências entre as imagens para ajudar no procedimento de alinhamento das fotografias. Um estudo sobre o assunto pode ser visto em Silva *et al.* (2014a).

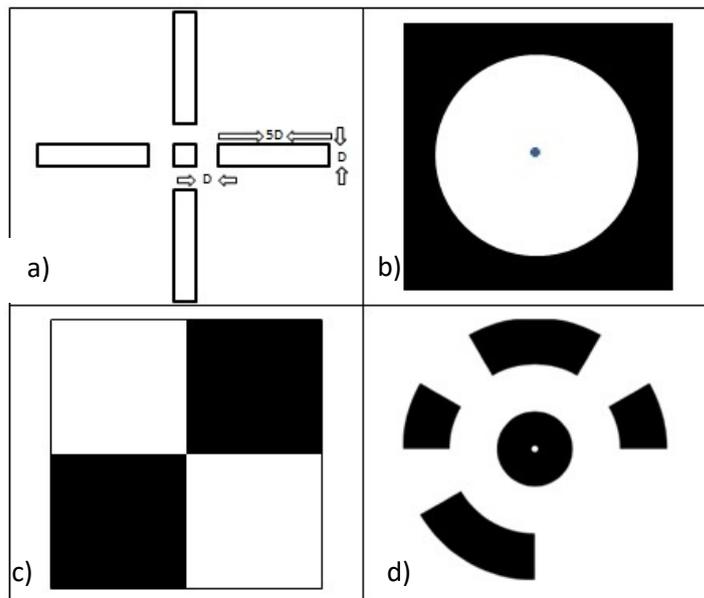


Figura 5. Modelos de alvos artificiais propostos por: a) Wolf *et al.* (2014), onde D é metade da resolução espacial. b) Souza (2015), onde o diâmetro do círculo é 3 vezes a resolução espacial. c) Barbosa & Pereira (2017). d) Alvo artificializado codificado (Agisoft PhotoScan).

## 3.2 Processamento dos Dados

### 3.2.1 Orientação Interior

Antes que as fotografias possam ser usadas como base para medidas de precisão é preciso reconstruir o sistema interno da câmera correspondente ao momento em que as fotografias foram obtidas (COELHO, 2007), além de corrigir distorções físicas ocasionadas por diversos fatores como erros cometidos devido às condições atmosféricas e distorções da lente. A orientação interior permite a reconstrução do feixe perspectivo que gerou as fotografias.

Anteriormente marcas fiduciais com suas coordenadas fornecidas pelo fabricante eram fundamentais para a realização de tal tarefa. As câmeras de pequeno formato, utilizadas em VANT, não possuem estas marcas. Porém, câmeras digitais geram imagens bidimensionais ordenados em forma matricial, possibilitando

a transformação de sistema sem a necessidade destas marcas. As coordenadas do sistema fiducial (fotogramétrico) podem ser obtidas transformando-se diretamente as coordenadas da tela, tendo como base às dimensões dos pixels.

Quando conhecidos os parâmetros de calibração das câmeras, ou seja, as coordenadas do ponto principal, a distância focal e os parâmetros de distorções simétricas e descentrada, estes podem ser inseridos no software que realizará as transformações. Contudo podem não ser confiáveis, pois os parâmetros de calibração podem se alterar com o uso da câmera, podendo ser recalculados com métodos e em laboratórios específicos. Ainda, os parâmetros de orientação interior podem ser determinados juntamente ao o processo de orientação exterior.

*Softwares* atuais de aerofotogrametria calculam os parâmetros de calibração da câmera automaticamente ao mesmo tempo em que realizam a correlação entre as fotografias e com o auxílio de arquivos *Exchangeable Image File Format* (EXIF), gravados juntamente com as fotografias no ato da tomada destas, que fornecem o tamanho do pixel e a distância focal. Estes parâmetros, ainda, podem ser otimizados com a adição de pontos de apoio.

Um método de calibração de câmera consiste em realizar o aerolevanteamento sobre uma superfície de desníveis acentuados, fazendo que haja uma quebra de correlação entre os parâmetros. Este método chama-se Método dos Campos Misturados, formulado por Merchant em 1972 (MERCHANT, 2017). Marotta *et al.* (2014), compararam aerolevanteamentos com VANT em duas áreas distintas, sendo a primeira plana e com uma densidade de pontos de apoio de 2 pontos por hectare, e outra com variações altimétricas de 200 metros e densidade de 0,15 pontos por hectare. Como resultado o levantamento da segunda área se mostrou mais preciso, devido às variações altimétricas que contribuíram para a determinação precisa dos parâmetros de orientação interior.

### 3.2.2 Orientação exterior

A orientação exterior define as coordenadas geográficas tridimensionais do centro de cada fotografia, bem com as rotações da aeronave no momento da tomada da imagem. Há três tipos de rotações (figura 6), guinada ( $\kappa$ ), arfagem ( $\varphi$ ) e rolamento ( $\omega$ ) e, também, são conhecidos como ângulos de Euler. Sendo assim, são seis parâmetros em cada fotografia que devem ser determinados.

Em fotogrametria analítica era habitual que se realizasse a orientação exterior em duas etapas: orientação relativa e orientação absoluta. A primeira etapa orientava todas as fotografias em relação à outra gerando assim um plano arbitrário; a segunda orientava este plano ao espaço-objeto, a partir de coordenadas conhecidas no terreno (pontos de apoio). Em fotogrametria digital, estes processos são realizados conjuntamente (COELHO; BRITO 2007). Em *softwares* atuais se pode realizar este processo em uma ou duas etapas. Em softwares como o *Agisoft PhotoScan* se realiza o processo de alinhamento, onde se orientam as fotografias a um espaço arbitrário, relacionando a semelhança entre os pixels sem a necessidade de pontos de apoio, assim, portanto o processo de alinhamento se compara à orientação relativa. Há casos como restituições de pequenos objetos, monumentos e outros que não há necessidade de se obter coordenadas geográficas precisas ao final do processo. O processo de otimização se compara à etapa de orientação absoluta, onde é possível refinar ou estabelecer os parâmetros de orientação exterior com a adição de pontos de apoio, transferindo, assim, o projeto de um referencial arbitrário ao referencial adotado, ou ainda melhorando os parâmetros estimados.

Pode-se classificar como método direto quando os parâmetros são determinados no momento da aquisição das fotografias por instrumentos embarcados na aeronave. E método indireto quando a obtenção dos parâmetros se obtidos por algum tipo de processamento. Na prática, são realizados os dois métodos, pois os parâmetros determinados pelos VANTs não são suficientes para medições com precisão. Normalmente para realizar a orientação exterior se utilizam as equações de colinearidade (equação 4) para cada par de fotografias sobrepostas.

Ao todo são 12 parâmetros a serem conhecidos, 4 equações para cada ponto homólogo, isto faz com que sejam medidos, ao menos, 3 pontos homólogos chamados de pontos de ligação. Este sistema de equações normalmente é resolvido por ajustamento de mínimos quadrados (MMQ) pelo método paramétrico (equação 5).

As equações de colinearidade são definidas por:

$$x = x_0 - f \left( \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \right) \quad (4)$$

$$y = y_0 - f \left( \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \right)$$

Onde  $x$ ,  $x_0$ ,  $y$  e  $y_0$  são coordenadas fotogramétricas.  $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$  são coordenadas geográficas do centro da fotografia no momento da tomada da fotografia.  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  são coordenadas da feição.  $f$  a distância focal e  $m_n$  são elementos da matriz de rotação.

O ajustamento paramétrico por mínimos quadrados é dado por:

$$(A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (5)$$

Onde  $A$  é a matriz das derivadas das equações.  $A^T$  é a matriz transposta de  $A$ .  $P$  a matriz peso das observações e  $L$  a matriz das observações.

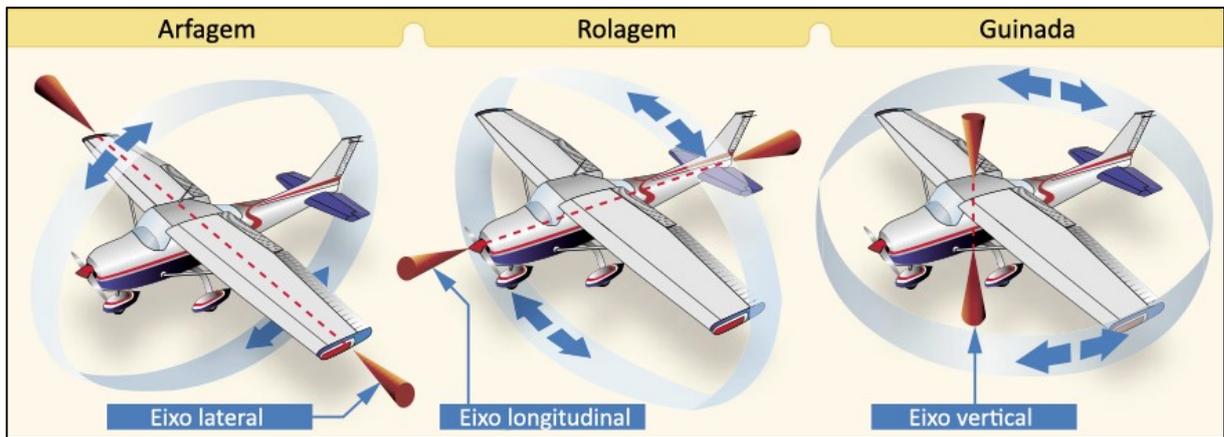


Figura 6. Ângulos de rotação.

Fonte: Adaptado de: <http://www.flightlearnings.com/2009/08/19/axes-of-an-aircraft/>

Os parâmetros de orientação exterior são importantes, pois apenas com estes precisamente estabelecidos será possível determinar as coordenadas no terreno. Uma das maneiras possíveis se faz com o processo de intersecção espacial, que nada mais é do que as equações de colinearidade, isolados, agora, os parâmetros de interesse: X, Y e Z. A precisão mínima dos parâmetros de orientação exterior a ser alcançada para este fim depende de diversos fatores como a altura de voo, o número de sobreposições das fotografias sobre um determinado ponto. Sendo Z a altura do triângulo (figura 7) e o feixe perspectivo a hipotenusa deste triângulo retângulo é fácil concluir que um erro no ângulo “ $\alpha$ ” irá deslocar o ponto A que, neste caso, representa o ponto no terreno. Também, pode-se notar que o mesmo erro a uma altura maior irá provocar um deslocamento ainda maior em A.

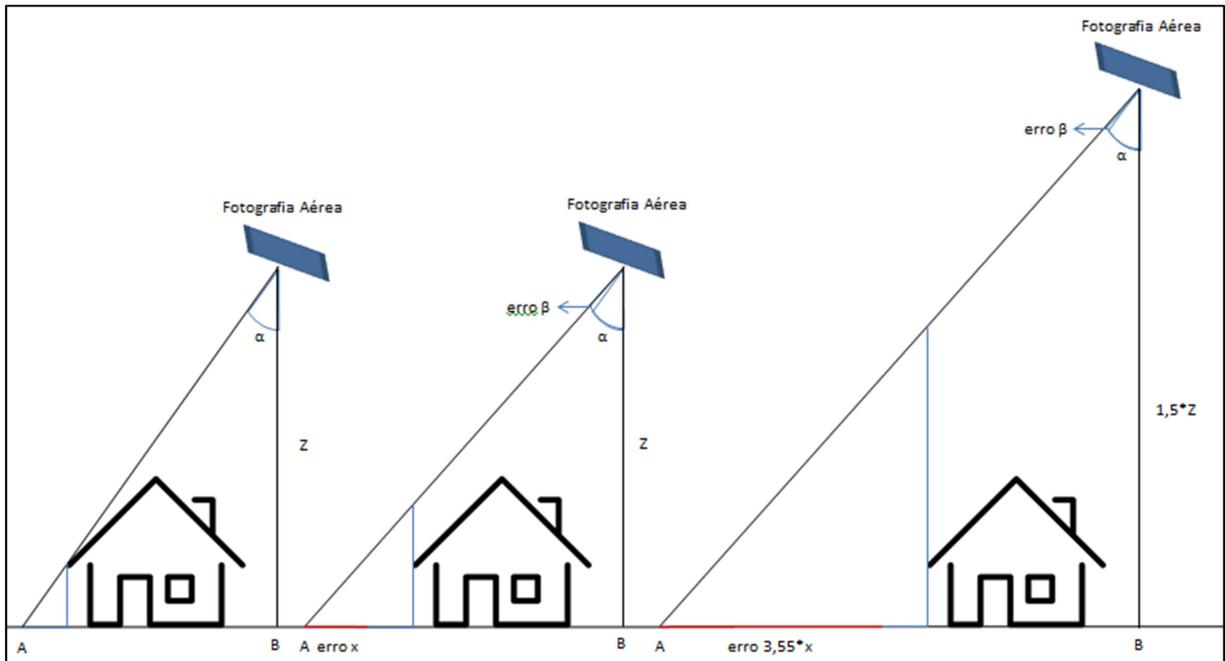


Figura 7. Propagação de erros angulares.

Sabendo que a distância AB será proporcional a altura Z segundo a lei de semelhança de triângulos e que a reta AB é composta pela distância entre a feição medida ao centro da fotografia (a) somado com o erro (b), então:

$$\frac{Z}{xZ} = \frac{a+b}{a+yb}$$

Pois, se (a) é fixo somente multiplicando (b) por algum fator (y) se poderá manter a proporcionalidade do triângulo. Assim:

$$a + yb = x(a + b)$$

$$y = \frac{x(a + b) - a}{b} \tag{1}$$

Sendo: (y) o fator multiplicador do erro; (a) a distância entre o centro da fotografia e o ponto medido; e (b) o erro inicial.

Com isto, é possível notar que quanto mais distante do centro da fotografia maior o erro, e que o erro só manterá a mesma proporção com a altura se o objeto a ser medido estiver exatamente no centro da fotografia. Felizmente o número de

fotografias associadas com o ajustamento por mínimos quadrados tende a reduzir este erro devido às diversas observações em posições diferentes. Erros aleatórios em direções distintas tende a uma média final zero. Entretanto, a maior dificuldade se encontra na resolução da coordenada altimétrica por não haver variações nesta no momento do voo. Alguns experimentos com levantamentos aerofotogramétricos com VANT onde a altitude é variada podem ser encontrados em Palermo & Leite (2013) e em Panagiotidis et al. (2016).

O exemplo a seguir mostra a propagação dos erros nas orientações exteriores das fotografias nas coordenadas do terreno.

Suponha-se duas fotografias aéreas corrigidas dos erros de orientação interior e com os parâmetros de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1. Parâmetros de duas fotografias sobrepostas para a determinação de coordenadas tridimensionais de um ponto de interesse.

Parâmetros (m)	Fotografia 1	Fotografia 2
$\Phi$	-1,065	-0,772
$\omega$	80,811	85,51
$\kappa$	4,848	9,418
$X_c$	434854,413	434760,118
$Y_c$	6671308,022	6671308,510
$Z_c$	305,535	307,767
$x$	-0,00737304	-0,000018
$y$	-0,02731053	-0,05797851
$f$		0,0043

Aplicando os dados acima nas equações de colinearidade e isolando X, Y e Z tem-se:

$$0,59961X + 0,984205Y - 0,110863Z = 6826641,101$$

$$0,005283X + 1,012294Y - 0,004794Z = 6755617,722$$

Para a fotografia 1; e

$$233,790744X + 0,892356Y + 38,624166Z = 107607959,830702$$

$$0,001339X + 1,002731Y - 0,005337Z = 6690110,264375$$

Para a fotografia 2.

Assim se tem a matriz A das derivadas das equações e a matriz L das observações:

$$A = \begin{bmatrix} 0,59960 & 0,984205 & -0,110862 \\ 0,005283 & 1,012294 & 0,004794 \\ 233,790744 & 0,892356 & 38,624166 \\ 0,001339 & 1,002731 & -0,005337 \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} 6826641,954957 \\ 6755617,722103 \\ 107607960,026233 \\ 6690110,264375 \end{bmatrix}$$

Fazendo:  $X = (A^T A)^{-1} (A^T L)$  temos as coordenadas:

$$\begin{aligned} X &= 434805,634 \\ Y &= 6671306,315 \\ Z &= 32,28433228 \end{aligned}$$

Somando 0,2 graus em cada parâmetro de rotação nas duas fotografias e aplicando as equações anteriores temos as coordenadas:

$$\begin{aligned} X &= 434807,3995 \\ Y &= 6671308,031 \\ Z &= 27,7331 \end{aligned}$$

Como resultado, nota-se que uma pequena variação angular causa um grande erro nas coordenadas planimétricas (2,462 metros) e um erro ainda maior na coordenada altimétrica (4,551 metros).

### 3.3 Structure from Motion (Estrutura do Movimento)

*Structure from Motion* (SfM) é uma técnica que permite a extração de informações tridimensionais a partir de imagens estáticas capturadas em 2D e consiste na tomada de diversas fotografias de uma cena a partir de pontos de vista diferentes. Ou seja, a partir de um conjunto de fotografias de uma determinada cena, processadas por um software, cria-se uma estrutura 3D semelhante ao objeto de estudo. (PAOLI; TRINDADE, 2015). O uso da técnica SfM se tornou popular por sua simplicidade de operação e ao baixo custo dos equipamentos utilizados, quando comparado com outros métodos, como o LIDAR. A qualidade das nuvens de pontos geradas por LIDAR e SFM já foi comparada, por exemplo, por Serifoglu & Gungor

(2016), Eisenbeiss & Zhang (2006), Thiel & Schmallius (2017), Bi et al. (2017) entre outros.

Segundo Paoli & Trindade (2015), a reconstrução 3D por meio da técnica de SfM pode ser dividida em: determinação das feições características em cada imagem, determinação de uma estimativa inicial da estrutura da cena e a movimentação relativa da câmera, otimização das estimativas, calibração da câmera, adensamento da nuvem de pontos, e geração do modelo tridimensional por meio de rede triangular. A técnica SfM pressupõe o cumprimento de determinadas especificações e procedimentos para a geração de um modelo preciso. SfM funciona por meio de técnicas de fotogrametria e como tal para a criação do modelo 3D a partir de fotografias em 2D, é necessário que haja pontos homólogos em no mínimo duas fotografias tomadas de um mesmo objeto em pontos de vista diferentes. Quanto maior o número de pontos identificados, melhores serão os resultados.

Os levantamentos aéreos realizados por VANT estão atualmente em rápida expansão, não somente devido ao desenvolvimento de novas aeronaves e sensores mais baratos e eficazes, e a melhoria dos sistemas automáticos para o planejamento e controle de voo, mas, também, pela facilidade e rapidez no processamento dos dados. As imagens digitais dos VANTs podem ser processadas usando o método SfM ou software fotogramétrico tradicional. Para o segundo caso, se tem um maior rigor e controle das operações executadas. Por outro lado, ao usar o software baseado em SfM, o processamento de uma grande quantidade de imagens geralmente é mais rápido e mais fácil. Modelos digitais dos objetos e ortoimagens são produzidos com controle menor em algumas etapas de processamento como georreferenciamento e formação de blocos (GINI *et al.*, 2013).

Atualmente, existem diversos softwares baseados na técnica SfM capazes de processar dados de VANT, a citar: Photomodeler, PhotoScan, Pix4D, MicMac, VisualSFM, Menci, entre outros. Devido às diversas opções existentes, alguns trabalhos se propuseram analisar e comparar a efetividade e a qualidade dos produtos gerados por estes *softwares* como Mendes et. al. (2015), Silva et. al. (2014b), Vallet *et al.* (2011), Gini *et al.* (2013), entre outros. Sempre que o PhotoScan foi verificado nos trabalhos citados este apresentou os melhores

resultados. Ainda, para uma maior profundidade no assunto pode-se consultar Micheletti *al.* (2015), Westoby *et al.* (2012) e Fonstad *et al.* (2013).

## 4 METODOLOGIA

A metodologia adotada para análise da correlação entre a exatidão planimétrica dos ortofotomosaicos gerados a partir de fotografias aéreas obtidas com VANTs e os parâmetros referentes à configuração dos pontos de apoio e do voo é apresentada no fluxograma da figura 8.

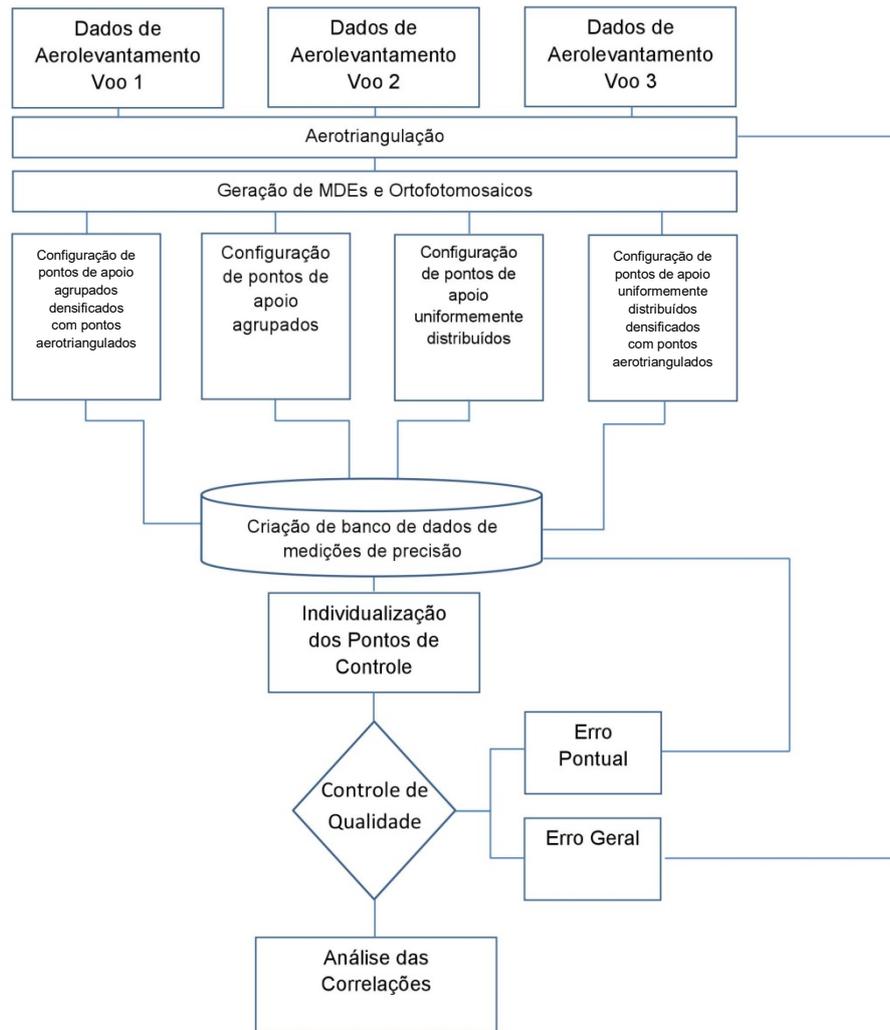


Figura 8. Fluxograma de processamento e análise dos dados fotogramétricos.

Para esta pesquisa foram selecionados voos em três áreas distintas e com diferentes aeronaves e resoluções espaciais. A partir destes dados, e para cada voo individualmente, procedeu-se à marcação dos pontos de apoio; à fototriangulação; à geração dos ortofotomosaicos e dos MDEs; e à obtenção dos parâmetros de orientação exterior das fotografias. Os resultados destes procedimentos foram organizados em um banco de dados, de forma a subsidiar as análises destes dados e das suas correlações. Ao todo foram gerados e analisados 200 ortofotomosaicos, 200 MDEs e um banco de dados com 4616 observações.

#### 4.1 Descrições dos Voos

Os aerolevantamentos foram realizados com três modelos de aeronaves, em três áreas de estudo e com três resoluções espaciais distintas. Os modelos de VANTs utilizados nos voos foram Swinglet CAM, ECHAR 20A e eBee (figura 9). As especificações dos aerolevantamentos são mostradas no quadro 1.

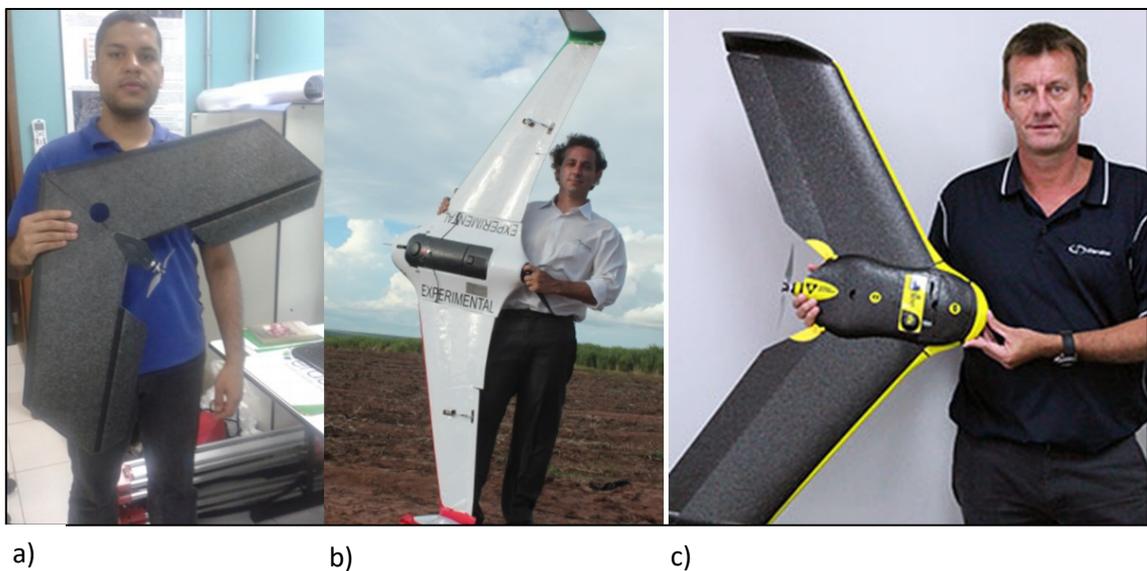


Figura 9. Modelos de VANT utilizados nesta pesquisa. a) Swinglet Cam. b) Echar. 20A c) eBee.

	voo1	voo2	voo3
VANT	Swinglet Cam	Echar 20A	eBee
Envergadura	80 cm	2,13 m	0,96 m
Resolução da Câmera	12 MP	36 MP	16 MP
Distância Focal	4,3 mm	32 mm	4,37 mm
Altura de Voo	300 m	605 m	207 m
Resolução Espacial	10 cm	9 cm	6 cm
Quantidade de Fotografias	274	605	434
Pontos de Apoio	31	8	17

Quadro 1. Especificações dos voos.

#### 4.1.1 Voo1

O primeiro voo foi executado com o VANT Swinglet CAM. Seu peso é de 7,5 kg e possui 80 cm de envergadura. A câmera embarcada é o modelo Canon IXUS 220HS RGB, com resolução de 12 megapixels (4000 x 3000), distância focal de 4,3 mm e pixels de 1,54 micrômetros (CANON, 2011). O levantamento foi executado em 29 de novembro de 2014, e utilizado por Souza (2015) e Ilescheck *et al.* (2016). Neste levantamento foram realizados quatro voos sobre a região de interesse, programados em função da capacidade das baterias que é de aproximadamente 30 minutos. Foram executados três voos no sentido leste-oeste e um no sentido norte-sul, configurando um voo cruzado. A resolução requerida para este aerolevanteamento foi de 10 cm, e, conseqüentemente, a altura de voo foi de aproximadamente 300 m. No total foram adquiridas 274 fotografias. Ainda para este trabalho, foram distribuídos 31 pontos de apoio. A área mapeada possui, aproximadamente, 1 km<sup>2</sup> e está na Estação Experimental Agrônômica da UFRGS, localizada no município de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul (figura 10). Por se tratar-se de uma área de dimensões reduzidas, a maior parte das informações foi obtida em trabalho de campo, pela inspeção in loco. O relevo na região é de baixa altitude, variando de ondulado a ondulado suave, típico da Unidade Geomorfológica Depressão Central (SEPLAG, 2002). As altitudes da área de estudo variam entre 25 e 54 metros. Nos limites da Estação Agrônômica observou-se, em campo, a existência de coxilhas separadas por depressões suaves. A vegetação é composta

basicamente por campos nativos e mistos e, em menor parte, por vegetação arbustiva na forma de capões isolados de mirtáceas. Foram observados, também, capões de pinus e eucalipto, cultivo de forrageiras e milho (SOUZA, 2015; IESCHECK *et al.*, 2016).

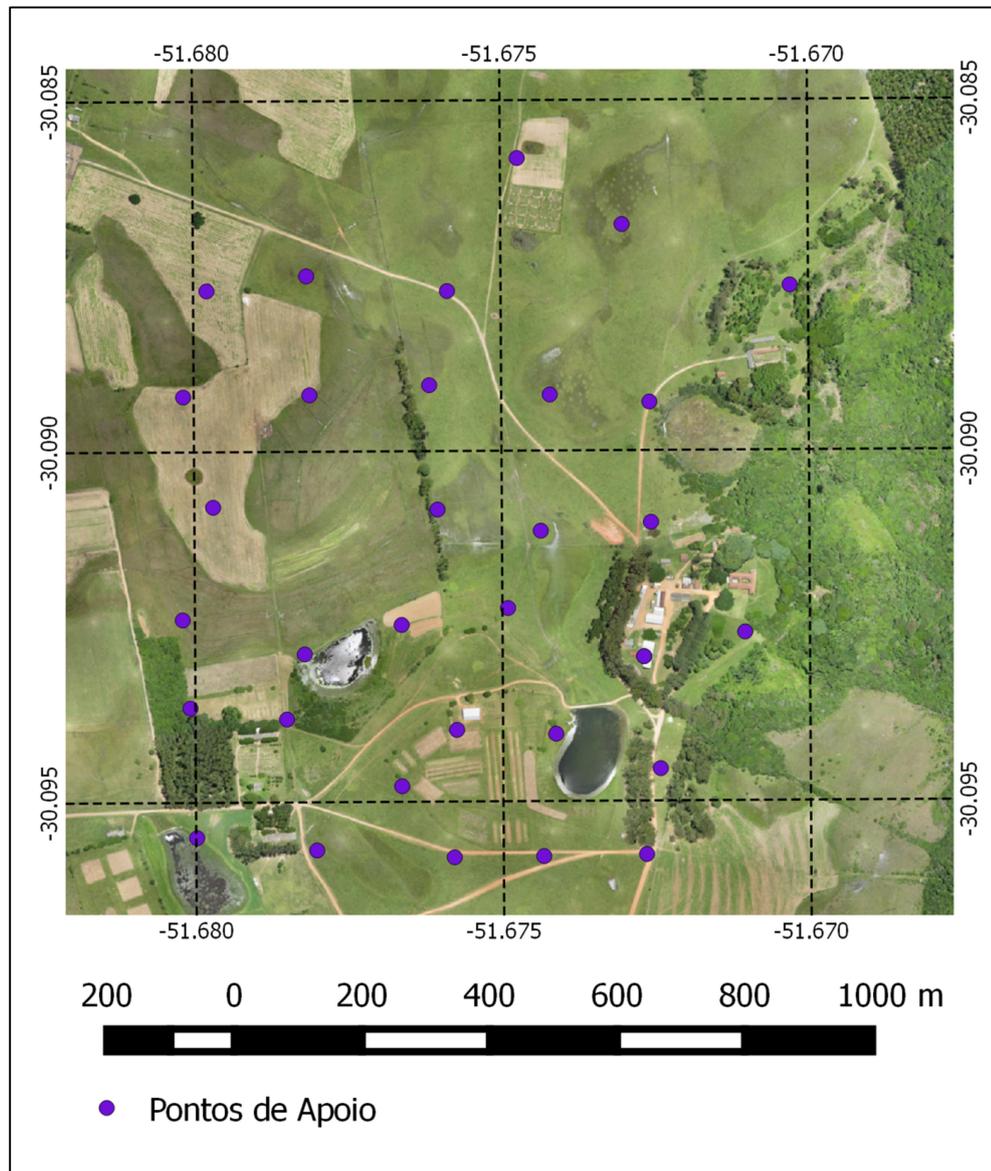


Figura 10. Área sobrevoada no voo1 com pontos de apoio sobrepostos.  
Fonte: Adaptado de: Souza (2015).

#### 4.1.2 Voo2

O segundo voo foi executado com o VANT ECHAR 20A. Seu peso é de aproximadamente 7 kg, e possui uma envergadura de 2,13 m. A câmera embarcada é o modelo Sony ILCE-7R de 36MP (7360 x 4912) com um filtro infravermelho próximo adaptado em substituição ao filtro vermelho (NIR-G-B), distância focal de 32 mm e pixels de 4,889 micrômetros (XMOBTS).

O levantamento foi realizado em agosto de 2015, como parte de um projeto de meteorologia. Estes dados, também, foram usados no trabalho de conclusão de curso “Geração de base cartográfica tridimensional com o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT)” (FAGUNDES, 2016). Neste trabalho pôde ser realizado apenas um voo sobre a região de interesse, devido à autonomia das baterias que é de cerca de uma hora. O voo foi realizado no sentido leste-oeste, e uma pequena parte no sentido norte-sul, portanto, não pode ser considerado como voo cruzado. A altura de voo foi de aproximadamente 605 m e a resolução espacial de cerca de 9 cm. No total foram adquiridas 614 fotografias e foram utilizados 8 pontos de apoio.

A área de desenvolvimento do trabalho tem aproximadamente 8 Km<sup>2</sup> e abrange o complexo termelétrico de Candiota e região de entorno, localizado no município de Candiota, no estado do Rio Grande do Sul (figura 11). De acordo com Fagundes (2016), no conjunto da usina deve-se evidenciar a torre de resfriamento, cuja estrutura em casca de concreto tem 124 metros de diâmetro e 133 metros de altura. O objetivo desta torre é resfriar a água utilizada para trocar calor no condensador. Outra parte que se destaca é a chaminé de exaustão, com 150 metros de altura. Entre as áreas estudadas, esta é a que possui as maiores edificações e as maiores variações altimétricas, com altitudes no terreno variando cerca de 140 metros.

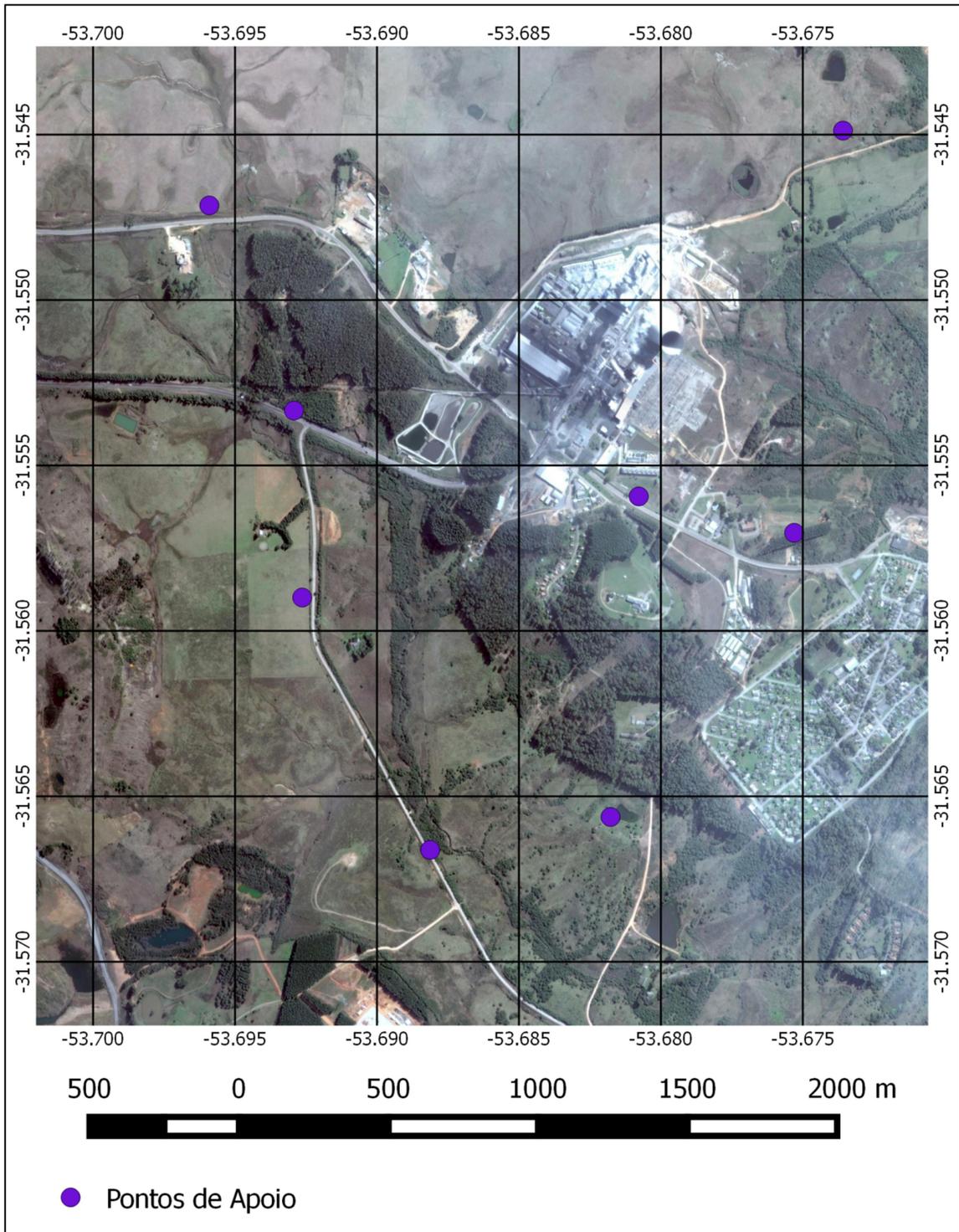


Figura 11. Área sobrevoada no voo2 com pontos de apoio sobrepostos.

Fonte: Adaptado de: Fagundes (2015)

#### 4.1.3 Voo3

Já o terceiro levantamento foi realizado com o VANT eBee que possui envergadura de 96 cm, peso de 0,63 kg e é embarcado com a câmera modelo Canon PowerShot ELPH 110 HS RGB de 16 MP (4608 x 3456 pixels). A câmera possui uma distância focal de 4,37 mm e um tamanho de pixel no sensor de 1,339  $\mu\text{m}$ .

Estes dados fizeram parte do trabalho de conclusão de curso “Geração de base cartográfica para área de interesse histórico/cultural por meio de levantamento fotogramétrico adquirido com VANT” (BARBOSA; PEREIRA, 2017). A altura de voo foi 207 m e a resolução espacial para este levantamento foi de aproximadamente 6 cm. Ao total foram tomadas 434 fotografias e foram utilizados 17 pontos de apoio. A área de estudo tem aproximadamente 0,75 km<sup>2</sup> e localiza-se no segundo distrito do Município de General Câmara no Rio Grande do Sul que é constituído pela Vila de Santo Amaro do Sul, às margens do rio Jacuí (figura 12). É a área mais plana das três aqui estudadas, com variação de 15 metros entre o ponto mais alto e o mais baixo.



Figura 12. Área sobrevoada voo3, com pontos de apoio sobrepostos.

Fonte: Adaptado de Barbosa & Pereira (2017).

## 4.2 Processamento de Dados

A fototriangulação, o MDE e a geração do ortofotomosaico foram realizadas com o software Agisoft PhotoScan. Este software foi escolhido por apresentar os melhores resultados quando testado nos trabalhos já mencionados. Não se sabe ao certo, por que este software apresenta desempenho superior em relação a outros

programas de computador similares, porém esta pesquisa não se propõe a investigar códigos de técnica *Structure for Motion*. Pode-se dizer que qualquer um dos softwares mencionados poderia ser utilizado, pois este trabalho centra-se em determinar a evolução das exatidões em função dos parâmetros mencionados na seção 1.3, e não a exatidão em si. O mais importante no uso deste software nesta metodologia, é que sejam empregadas as mesmas definições no software, para todos os ortofotomosaicos.

Para o software PhotoScan na primeira etapa é realizada a importação das fotografias e logo após o alinhamento. No processo de alinhamento, o programa procura por pixels homólogos para então determinar os parâmetros de orientação exterior e os parâmetros de calibração das fotografias. Assim, também, é gerada uma nuvem de pontos com suas posições tridimensionais e suas tonalidades correspondentes. Nesta primeira etapa do processamento têm-se as opções de acurácia (*highest* (mais alta), *high* (alta), *médium* (média), *low* (baixa) e *lowest* (mais baixa), opções de pré-seleção *generic* (genérica) e *reference* (referência) e ainda a quantidade máxima de pontos da nuvem de pontos. Para a acurácia foi escolhida a opção *high*, pois os computadores utilizados neste trabalho não suportaram a opção mais avançada para todos os voos. A pré-seleção foi feita pela opção *reference*, pois esta opção otimiza o processo quando as fotografias são previamente georreferenciadas. E ainda, para a opção de número de pontos na nuvem de pontos, foi selecionado um número extremamente alto (400.000.000) para que o *software* elaborasse a maior quantidade de pontos possível, pois posteriormente não seria realizada a etapa de densificação. Com isto, o voo1 obteve uma nuvem de pontos tridimensionais de 2.360.646 pontos, 8.452.802 pontos para o voo2, e 2.860.513 pontos para o voo3.

A marcação dos pontos de apoio foi realizada de maneira gradual, adicionando um ponto para cada geração de MDE e de Ortofotomosaico. Isto foi feito 4 vezes para cada voo, uma para cada tipo de configuração, conforme exposto:

1. Pontos de apoio agrupados, isto é, a seleção de pontos mais próximos uns dos outros;
2. Pontos de apoio distribuídos uniformemente;

3. Pontos de apoio agrupados densificados com pontos de apoio aerotriangulados; e
4. Pontos de apoio distribuídos uniformemente densificados com pontos de apoio aerotriangulados.

Os pontos de apoio aerotriangulados foram definidos a partir de pontos de ligação marcados em feições bem identificadas e definidas nas imagens, como vértices de edificações. Este procedimento foi realizado com apenas três pontos de apoio na configuração de pontos agrupados. Conseqüentemente, foram estimadas as coordenadas tridimensionais destes pontos pelo princípio da intersecção espacial. Estas coordenadas foram exportadas e importadas novamente como se fossem pontos de apoio e marcadas novamente. Para obter uma estimativa da exatidão destes pontos de apoio aerotriangulados foram marcados pontos de ligação nos alvos artificiais para a comparação entre as coordenadas estimadas com as coordenadas conhecidas. Os erros planimétricos médios aferidos dos pontos de passagens foram 0,027 m para o voo3, 1,675 m para o voo2 e 0,438 m para o voo1. As exatidões foram 1,000 m para o voo1, 0,725 m para o voo2 e 0,016 para o voo3. Devido ao erro elevado na estimativa das coordenadas planimétricas dos pontos de apoio aerotriangulados no voo2, estes foram utilizados apenas como ponto de ligação e foi analisado se este tipo de marcação provoca alguma melhoria nas ortofotos geradas. Os erros elevados no voo2 são provavelmente causados pela pouca densificação dos pontos de apoio juntamente com a altura de voo cerca de 2 vezes maior em comparação ao voo1 e 3 vezes se comparado ao voo3. A distribuição dos pontos de apoio aerotriangulados foi realizada de forma mais uniforme possível. Porém, cabe ressaltar que a marcação destes pontos quase sempre se limita às áreas edificadas e dependem de feições bem reconhecíveis a um nível de poucos pixels.

Os primeiros ortofotomosaicos e MDEs de cada voo foram gerados com 3 pontos de apoio. Em seguida foram gerados um ortofotomosaico e um MDE para cada adição de ponto de apoio. Cabe ressaltar que devido à praticidade e economia de tempo nesta etapa foram ignoradas as etapas de densificação dos pontos homólogos, de construção da rede de triangulação e de construção da textura, indicadas pelo software Agisoft PhotoScan. O uso destas etapas pode gerar

melhores resultados. Todos os ortofotomosaicos foram gerados com resolução espacial de 10 cm. Os MDEs foram gerados com resolução de 70 cm para o voo1, 90 cm para o voo2 e de 45 cm para o voo3, respectivamente.

Gerados os ortofotomosaicos, para cada ponto de controle em cada ortofotomosaico foram feitas as seguintes medições:

- a) Distância até o ponto mais próximo que fora utilizado no processo de aerotriangulação;
- b) Erro planimétrico, determinado pela distância entre o alvo artificial no ortofotomosaico e sua coordenada correspondente medida no terreno;
- c) Erro altimétrico, determinado pela diferença entre o valor do MDE no local de um alvo artificial e sua coordenada correspondente no terreno;

### **4.3 Organização dos Dados**

Os cálculos e as medições realizadas na etapa de processamento de dados foram organizados em uma tabela, com observações de mais de 4000 pontos nas mais diversas condições de distância a um ponto de apoio, de distribuição destes pontos, de número de pontos de apoio e de precisão do MDE. O gerenciamento desta tabela foi realizado com o auxílio do *software* Postgre SQL, o qual possibilitou a criação de tabelas individuais para cada ponto analisado. O PostgreSQL é um software de criação e gerenciamento de banco de dados livre e de código aberto que permite a utilização da linguagem SQL (*Structured Query Language*).

### **4.4 Controle de Qualidade**

Com a individualização das medições de cada ponto foram elaborados gráficos de exatidões planimétrica e altimétrica em função da quantidade de pontos de apoio e da distância ao ponto de apoio mais próximo (figura 13). Assim, foi

possível detectar erros nas medições quando um ponto se deslocava de sua curva padrão (figura 14). Caso encontrado um ponto com comportamento distinto dos demais este ponto era medido novamente, se o erro fosse confirmado, a medição seria corrigida. Ainda, se muitas tabelas apresentassem erros, todo o processamento seria refeito.

A figura 13.a mostra um gráfico que representa os erros horizontais em metros de um determinado ponto de controle medidas sobre os ortofotomosaicos, em função do número de pontos de apoio usado no processo de aerotriangulação. As barras verticais representam a distância do ponto de controle ao ponto de apoio mais próximo. Quando a distância é zero significa que o ponto de controle foi usado no processamento, tornando-se um ponto de apoio. Já a figura 13.b mostra um gráfico que representa os erros verticais em metros de um determinado ponto de controle medidas sobre o MDE em função do número de pontos de apoio usado no processo de aerotriangulação.

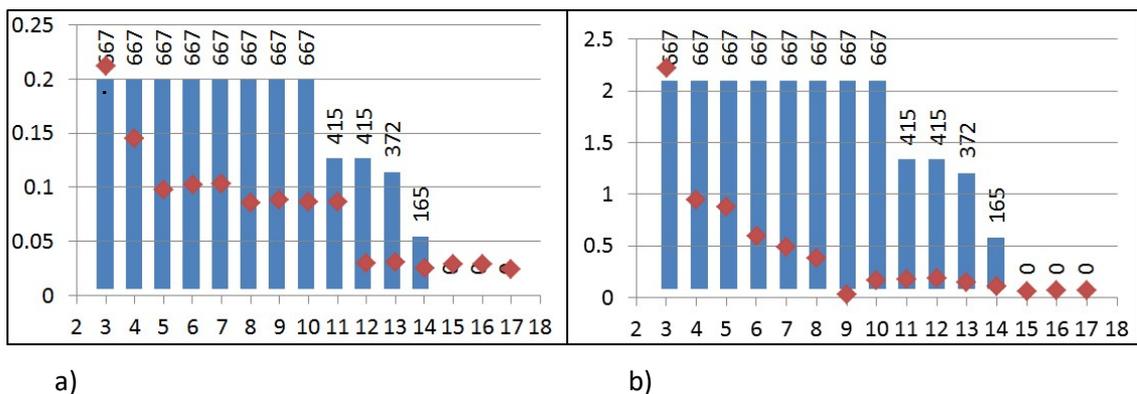


Figura 13. Exemplo de gráfico de erros: a) horizontais b) verticais.

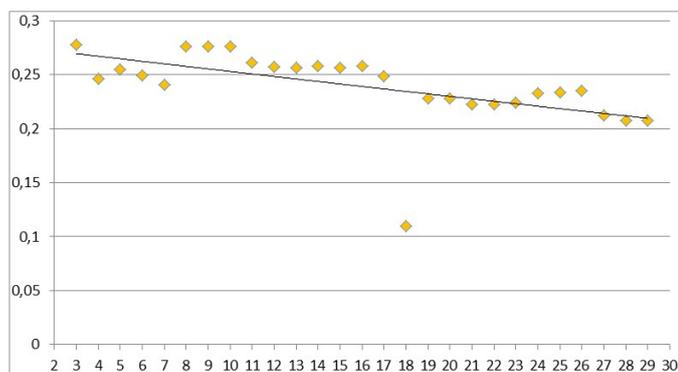


Figura 14. Ponto deslocado no gráfico. Possível erro de medição.

#### 4.5 Determinação da Quantidade de Pontos de Apoio

Esta etapa da metodologia diz respeito à determinação da quantidade mínima de pontos de apoio necessária para garantir a qualidade dos ortofotomosaicos, para tanto, foram consideradas diversas abordagens. Na primeira foram adicionadas linhas de tendência aos gráficos de exatidão planimétrica e altimétrica (figura 15). Estas linhas indicam o quanto a adição de um ponto de apoio é relevante para a melhora da exatidão planimétrica e a partir de qual número de pontos esta exatidão estabiliza e sua utilização passa a ser irrelevante.

Aqui se escolheu a curva polinomial, pois, foi o modelo matemático que obteve os maiores valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O  $R^2$  é auxiliar ao resultado da análise da regressão, como uma maneira de se verificar se o modelo matemático proposto é adequado ou não para descrever determinado fenômeno (PETERNELLI, 2018). O valor entre 0 e 1 indica o quanto o este modelo consegue explicar os valores observados, sendo assim, quanto maior o  $R^2$ , mais eficiente é o modelo e melhor ele se ajusta à amostra.

Dentre os polinômios se escolheu os de segundo grau, por este apresentar apenas um ponto de inflexão, o que facilitaria as análises. Quando a adição de pontos de apoio é significativa, a inclinação negativa da curva possui valores negativos maiores do que quando a adição dos pontos passa a ser desnecessária. Quando os erros estabilizam a curva tende a ser próxima a horizontal e a inclinação desta passa a ter valores próximos à zero. Portanto, a equação da curva de tendência foi derivada. A derivada representa a inclinação de uma reta tangente em um determinado ponto da curva. Conseqüentemente, para determinar a inclinação da curva em determinado ponto a equação 6 foi aplicada.

Como critério, adotou-se o valor de inclinação de -0,004, que representa uma melhora de 10 cm (1 pixel) depois de 25 pontos adicionados. Isto significa que se as inclinações obtiverem valores iguais ou menores ao citado, a adição de pontos de apoio foi significativa. Curvas de polinômios de 2° grau são conhecidas como parábolas. Parábolas podem ser côncavas ou convexas, assim a equação  $ax^2 + bx + c$  tem sinal positivo em “a” para as primeiras e sinal negativo para as

segundas. Portanto quando a curva da linha de tendência tem sinal positivo a adição dos pontos é significativa até determinado momento, já se o sinal for negativo, significa que passou a ser significativa depois de certo momento. Sendo assim, se a curva tiver valor “a” (equação 6) negativo o número de pontos que determina a estabilidade na exatidão, determinado pela equação 7, é adicionado por 10.

Sendo  $f(x) = ax^2 + bx + c$  um polinômio de segundo grau, a inclinação deste em um determinado ponto (x) é:

$$\frac{df}{dx} = 2ax + b. \quad (6)$$

Sendo assim, a adição de um ponto de apoio é significativa quando:

$$2ax + b \leq n$$

Onde a, b e c são os coeficientes da curva de tendência; x é o número de pontos de apoio utilizados na geração do ortofotomosaico, e n é declinação significativa mínima igual a 0,004 m/ponto.

Portanto o número de ponto que gera a estabilidade é dado por:

$$x = \frac{n-b}{2a} \text{ em caso de } a, \text{ ou} \quad (7)$$

$$x = \frac{n-b}{2a} + 10 \text{ em caso de } -a.$$

A figura 15.a mostra a linha de tendência aplicada ao gráfico de exatidão planimétrica, aplicando os parâmetros do polinômio apresentado na figura, resulta que a curva tende a estabilizar sua inclinação com aproximadamente 15 pontos de apoio, isto é, o resultado passa a ser maior que -0,004 m por ponto. A figura 14.b mostra a linha de tendência aplicada ao gráfico de exatidão altimétrica, onde aplicando-se os parâmetros do polinômio apresentado na equação (6), verifica-se que a curva tende a estabilizar sua inclinação com aproximadamente 13 pontos de apoio, isto é o resultado passa a ser maior que -0,004 m por ponto.

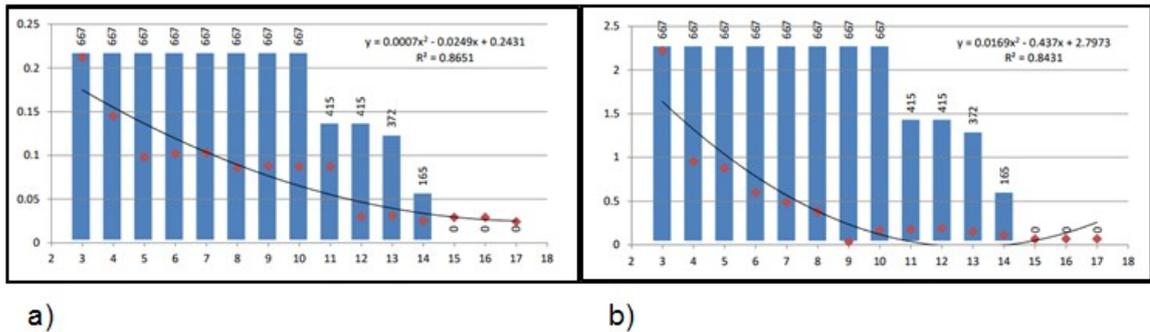


Figura 15. Tendências de estabilidade. a) planimétrica. b) altimétrica.

Além da tendência de estabilização das exatidões planimétrica e altimétrica foi aferido o menor erro de cada ponto e determinado com quantos pontos isto ocorre, a média dos erros em cada ortofoto e a adequação a PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica). E ainda foram comparados os erros normalizados em tamanho de pixel e densidade de pontos de apoio na área levantada.

#### 4.6 Cálculo das Correlações

Nesta etapa foi determinada a presença de correlação entre as seguintes variáveis:

- Exatidão planimétrica e exatidão altimétrica;
- Exatidão planimétrica e número de pontos de apoio;
- Exatidão altimétrica e número de pontos de apoio;
- Exatidão planimétrica e distância ao um ponto de apoio mais próximo;
- Exatidão altimétrica e a distância ao um ponto de apoio mais próximo;
- Tendência de estabilização da exatidão planimétrica e o número de fotografias sobrepostas a um determinado ponto;

- g) Tendência de estabilização da exatidão planimétrica e o número de fotografias sobrepostas a um determinado ponto;
- h) Tendência de estabilização da exatidão altimétrica e a tendência de estabilização planimétrica;
- i) Erro mínimo planimétrico alcançado e a sobreposição a um determinado ponto;
- j) Erro mínimo altimétrico alcançado e a sobreposição a um determinado ponto;

Todas as correlações foram calculadas de forma linear com auxílio do *software* Excel. Foram considerados correlacionados os valores acima de 0,5. A correlação demonstra a dependência entre duas variáveis, representadas por um coeficiente de 0 a 1, onde 0 significa totalmente não correlacionado e 1 totalmente correlacionado. Assim, valores acima de 0,5 representam que as variáveis estão mais próximas de serem totalmente correlacionadas.

## 5 RESULTADOS

Quando realizado o controle de qualidade, notou-se que sempre que dois pontos específicos entravam no processamento do voo1 os erros aumentavam consideravelmente. É provável que estes dois pontos tiveram suas coordenadas, determinadas pelo receptor GNSS, mal resolvidas. Pode-se notar que um desses pontos estava localizado próximo a corpo d'água, então é possível que este corpo d'água tenha causado o efeito de multicaminhamento. Já no segundo ponto o multicaminhamento pode ter sido causado pela vegetação arbustiva alta. Aqui, estes fatores levantados que teriam gerado erros na determinação das coordenadas são apenas hipóteses e não puderam ser confirmadas. Estes dois pontos foram retirados do processo e todo o procedimento foi refeito. A localização destes pontos pode ser vista na figura 16. Portanto, o voo1 contou ao todo com 29 pontos de apoio e gerou 108 ortofotomosaicos.

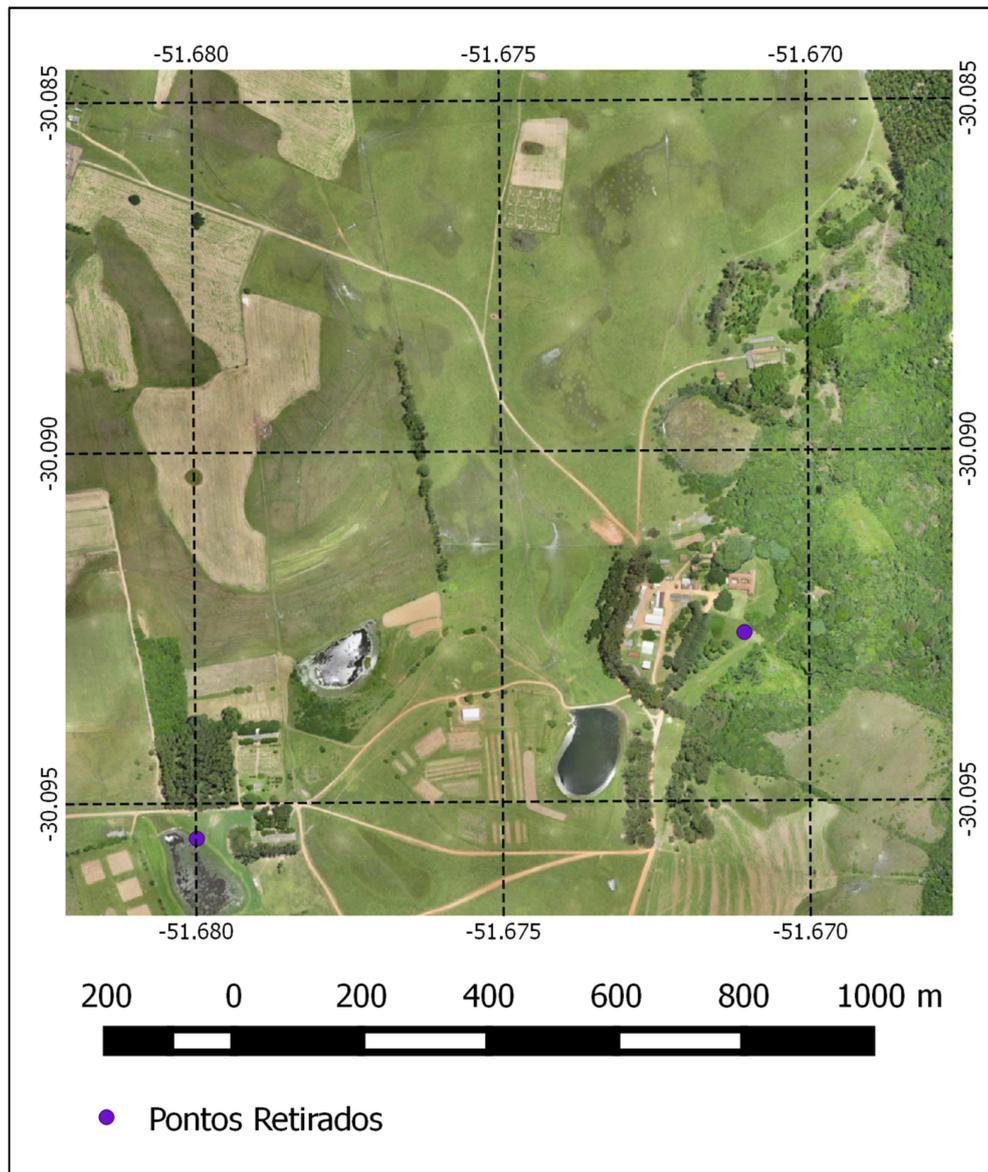


Figura 16. Pontos Retirados do Processo.

Determinadas as tendências de estabilidade para cada ponto, foram aferidas as médias destas tendências planimétricas e altimétricas para cada voo e para cada configuração. A tabela 2 apresenta com quantos pontos de apoio, em média, os pontos de controle tendem a estabilizar seu erro (ou sua exatidão). Nesta tabela, a, aa, u e ua significam agrupados, agrupados com pontos de apoio aerotriangulados, uniforme e uniforme com pontos de passagens, respectivamente, sendo que para o voo2, não foram utilizados pontos de apoio aerotriangulados, e sim pontos de ligação.

Tabela 2. Média da tendência de estabilidade dos erros horizontais e verticais.

	Tendência Horizontal			Tendência Vertical		
	Voo1	Voo2	Voo3	Voo1	Voo2	Voo3
a	20	18	11	17	10	13
aa	21	15	22	24	15	13
u	23	15	16	23	9	13
ua	22	10	23	25	9	13

Em teoria, a utilização de pontos de apoio aerotriangulados reduziria a necessidade de pontos de apoio. Porém a tabela 2 demonstra que os pontos de apoio aerotriangulados têm pouco efeito sobre a tendência de quantidade de pontos para a estabilidade das exatidões. A Tabela também mostra que os melhores resultados foram obtidos para o voo2, porém os erros, tanto planimétricos quanto altimétricos, são superiores aos demais voos, conforme apresentado na tabela 3. A pequena quantidade de pontos de apoio pode ter influenciado neste resultado. O voo3 tem melhores resultados se comparado com o voo1 por 4 razões possíveis: 1- menor área; 2- Menor distância entre os pontos de apoio; 3- menor altura de voo; e 4- área mais plana. Proporcionalmente, a densidade de pontos de apoio do voo1 e do voo3 se aproximam quando não são utilizados os pontos de apoio aerotriangulados.

Quando testadas as correlações entre as tendências de estabilidade e as sobreposições, considerando bem correlacionados os valores acima de 0,5, estas se mostraram não correlacionadas. Foram aferidos os erros mínimos alcançados e quantos pontos de apoio havia no processamento quando foram alcançados estes erros mínimos. O mesmo foi feito para a quantidade de pontos de apoio. Em média o erro mínimo ocorre conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3. Médias dos erros mínimos alcançados e a média de com quantos pontos de apoio isto ocorre.

	Erro (m)	Quantidade	Erro (m)	Quantidade
a	0.077	16	0.046	17
aa	0.079	16	0.093	17
u	0.069	16	0.054	9
ua	0.075	17	0.124	19
Voo2 Erro Planimétrico		Voo2 Erro Altimétrico		
	Erro (m)	Quantidade	Erro (m)	Quantidade
a	0.439	6	7.000	5
al	0.504	5	6.939	6
u	0.405	6	10.107	5
ul	0.43	5	8.419	4
Voo3 Erro Planimétrico		Voo3 Erro Altimétrico		
	Erro (m)	Quantidade	Erro (m)	Quantidade
a	0.037	13	0.023	12
aa	0.045	11	0.085	13
u	0.042	7	0.032	12
ua	0.047	9	0.090	15

Para o voo1 a média do erro planimétrico mínimo se mantém praticamente constante em todas as configurações, sendo 1 cm mais precisa para a configuração de pontos distribuídos uniformemente se comparado com a configuração de pontos agrupados. A configuração de pontos uniformemente distribuídos, ainda, apresenta a média de erro altimétrico mínimo 8 mm maior que a configuração de pontos agrupados, mas com cerca de metade dos pontos de apoio. Para o voo2 é possível notar que a utilização de pontos de ligação tem muito pouco efeito no processamento. Também pode-se perceber que os erros altimétricos são muito superiores que os outros voos testados nesta pesquisa, estes ficaram em torno de 7 metros. A baixa exatidão altimétrica parece influenciar a exatidão planimétrica, que neste caso ficou em torno de 40 cm. Ainda cabe destacar que os erros foram menores para a configuração de pontos agrupados, mostrando a necessidade da

proximidade dos pontos de apoio. Para o voo3 a configuração de pontos agrupados apresentou o melhor resultado para erro planimétrico mínimo, porém a configuração de pontos uniformemente distribuídos apresenta um erro mínimo apenas 0,5 cm maior com aproximadamente metade dos pontos utilizados na configuração agrupada. A média dos erros altimétricos mínimos para a configuração de pontos agrupados é 0,9 cm maior, quando comparada com a configuração uniforme maior com o mesmo número de pontos de apoio.

Quando testadas as correlações entre os erros mínimos planimétrico e altimétrico e o número de fotografias sobrepostas, estas se mostraram não correlacionadas. O maior valor de correlação entre todos os testes foi de aproximadamente 0,45.

Também foram testadas correlações, individualmente para cada ponto, entre o erro planimétrico e altimétrico e a distância e o número de pontos de apoio. A tabela 4 exemplifica o caso específico de um ponto de controle do voo1 denominado de ponto 12.

Tabela 4. Correlações entre os erros planimétrico e altimétrico e a distância ao ponto de apoio mais próximo e a quantidade de pontos de apoio (Q. Pontos). Ponto 12, voo1.

	Erro Planimétrico		Erro Altimétrico		Erro Planimétrico x Erro Altimétrico
	x		x		
	Distância	Q. Pontos	Distância	Q. Pontos	
a	0.360	0.161	0.598	-0.376	0.193
u	0.62	-0.774	0.704	-0.267	0.479
aa	-0.082	-0.203	0.494	-0.845	-0.075
ua	0.004	-0.397	0.699	-0.962	0.363

As tabelas 5 e 6 apresentam a porcentagem de pontos do voo1 e voo2, respectivamente, que mostraram correlação entre os erros planimétricos e altimétricos e a distância e a quantidade de pontos de apoio utilizados durante o processo de geração dos ortofotomosaicos.

Tabela 5. Porcentagem de pontos correlacionados, voo1.

	Erro Planimétrico		Erro Altimétrico		Erro Planimétrico Erro Altimétrico (%)
	Distância (%)	Quantidade (%)	Distância (%)	Quantidade (%)	
A	60.7	53.6	75	67.9	35.7
Aa	25	28.6	39.3	46.4	14.3
U	35.7	42.9	25	14.3	10.7
Ua	18.5	44.4	33.3	51.9	11.1

Tabela 6. Porcentagem de pontos correlacionados, voo3.

	Erro Planimétrico		Erro Altimétrico		Erro Planimétrico Erro Altimétrico (%)
	Distância (%)	Quantidade (%)	Distância (%)	Quantidade (%)	
A	64.7	70.6	76.5	82.4	58.8
Aa	23.5	29.4	64.7	70.6	11.8
U	17.6	17.6	76.5	88.2	29.4
Ua	17.6	17.6	70.6	82.4	23.5

Para o voo1, quando a configuração é de pontos agrupados, 75% dos pontos apresentaram correlação entre distância e erro altimétrico e 60,7 % dos pontos apresentaram correlação entre distância e o erro planimétrico. Quando utilizados os pontos de apoio aerotriangulados as correlações que envolvem quantidade de pontos de apoio tendem a ser maiores que as correlações com a distância. Pontos agrupados tendem a depender mais da distância e da quantidade de pontos de apoio, quando comparados aos pontos uniformemente distribuídos. Configurações com pontos de apoio aerotriangulados tendem a apresentar aproximadamente metade das correlações que suas configurações sem pontos de apoio aerotriangulados, mostrando-se mais estáveis. A exatidão planimétrica esteve poucas vezes correlacionada com a precisão exatidão, sendo que a maior parte dos casos ocorre na configuração agrupada.

Para o voo3 todas as configurações apresentaram a maior parte dos pontos com correlação entre o erro altimétrico e a distância, assim como o erro altimétrico e a quantidade de pontos de apoio, com porcentagem maior de pontos

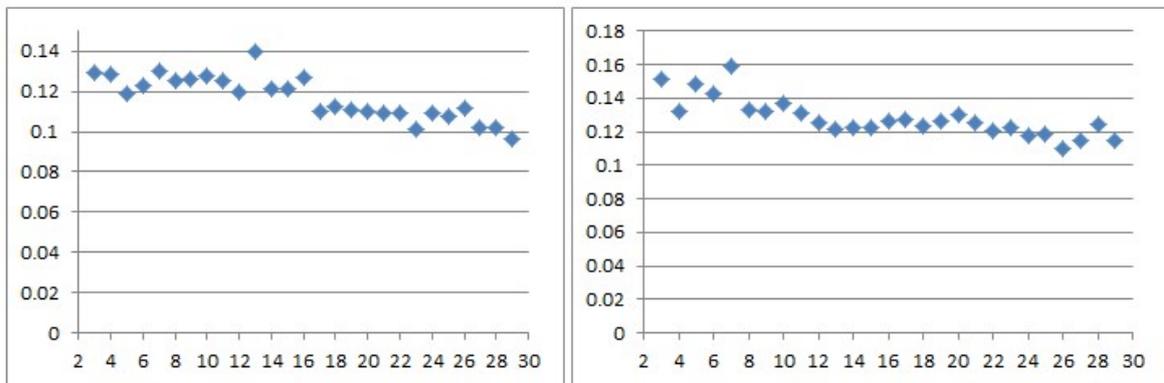
correlacionados na configuração de pontos uniformemente distribuídos. Como para o voo1 poucos pontos em qualquer configuração apresentaram correlação entre o erro altimétrico e o planimétrico. Por possuir poucos pontos de apoio o voo2 não foi testado.

Também, foram testados os ortofotomosaicos como um todo. Calcularam-se as médias dos erros em cada ortofotomosaico gerado. A PEC (BRASIL,1994) não utiliza as médias dos produtos cartográficos, e sim, considera que os produtos cartográficos com o mais alto índice de qualidade devem ter 90% dos pontos testados com erro menor que 0,5 mm vezes a escala da carta e 0,3 mm vezes a escala da carta o erro padrão. Hoje, assume-se que o erro padrão referenciado pela PEC é equivalente a desvio padrão, os baixos valores gerados pelo erro padrão que, leva a intuir um erro conceitual da lei de 1994. Pa este trabalho, foram calculadas as médias e os padrões da PEC, conforme as tabelas 7, 8 e 9. Nesta etapa não foram utilizadas as configurações de pontos agrupados, visto que os diferentes números de pontos de apoio entre os voos inviabilizariam uma comparação. Para a definição da escala foram consideradas as resoluções espaciais das fotografias aéreas e, assim, utilizada a equação 4 (anexo 1). Portanto, as escalas são 1/500 para o voo1, 1/450 para o voo2 e 1/300 para o voo3. Os erros máximos admitidos entre 90% dos pontos, portanto, são 25 cm para o voo1, 22,5 cm para o voo2 e 15 cm para o voo3. Os desvios padrões, portanto, devem ser no máximo, 15 cm, 9 cm, e 13,5 cm para os voos 1, 2 e 3 respectivamente. As figuras 17, 18 e 19 apresentam o comportamento do erro médio dos ortofotomosaicos em função da quantidade de pontos de apoio.

Tabela 7. Média dos erros em cada ortofotomosaico, maior erro entre 90% dos pontos e desvio padrão. Para a configuração de pontos distribuídos. Voo1.

Quantidade de Pontos	Uniformemente Distribuídos			Uniformemente Distribuídos com Pontos de Apoio Aerotriangulados		
	Média (m)	Maior 90%	Desvio Padrão	Média (m)	Maior 90%	Desvio Padrão
3	0.129655	0.24	0.061671	0.151034	0.27	0.07336
4	0.128276	0.21	0.05742	0.131724	0.23	0.07047
5	0.11931	0.21	0.050918	0.148966	0.24	0.070776
6	0.123103	0.21	0.052726	0.142759	0.23	0.056684
7	0.130345	0.23	0.058101	0.158621	0.24	0.067911

8	0.125517	0.19	0.046356	0.133448	0.22	0.059901
9	0.126207	0.26	0.068903	0.131724	0.23	0.06148
10	0.127931	0.26	0.066612	0.136897	0.24	0.05966
11	0.125172	0.23	0.063876	0.131034	0.23	0.060705
12	0.119655	0.2	0.053915	0.125517	0.23	0.063004
13	0.139655	0.25	0.065045	0.121034	0.22	0.064826
14	0.121724	0.2	0.054143	0.122759	0.23	0.061862
15	0.121724	0.22	0.063304	0.122069	0.23	0.062499
16	0.126897	0.25	0.067062	0.126552	0.22	0.061939
17	0.110345	0.19	0.053978	0.127586	0.24	0.066678
18	0.112759	0.22	0.058892	0.123793	0.22	0.058334
19	0.111034	0.19	0.051081	0.126552	0.24	0.062493
20	0.11	0.19	0.051528	0.130345	0.24	0.064245
21	0.108966	0.2	0.059443	0.125517	0.21	0.058167
22	0.108966	0.2	0.053778	0.120345	0.21	0.054677
23	0.101379	0.2	0.052109	0.122759	0.23	0.064749
24	0.108966	0.19	0.057915	0.117586	0.2	0.060095
25	0.107586	0.2	0.056242	0.118345	0.232	0.062606
26	0.111379	0.2	0.057997	0.110345	0.19	0.049583
27	0.102207	0.2	0.051676	0.114828	0.2	0.05969
28	0.101897	0.2	0.058251	0.124483	0.22	0.056176
29	0.096379	0.2	0.055971	0.115172	0.23	0.064894



a)

b)

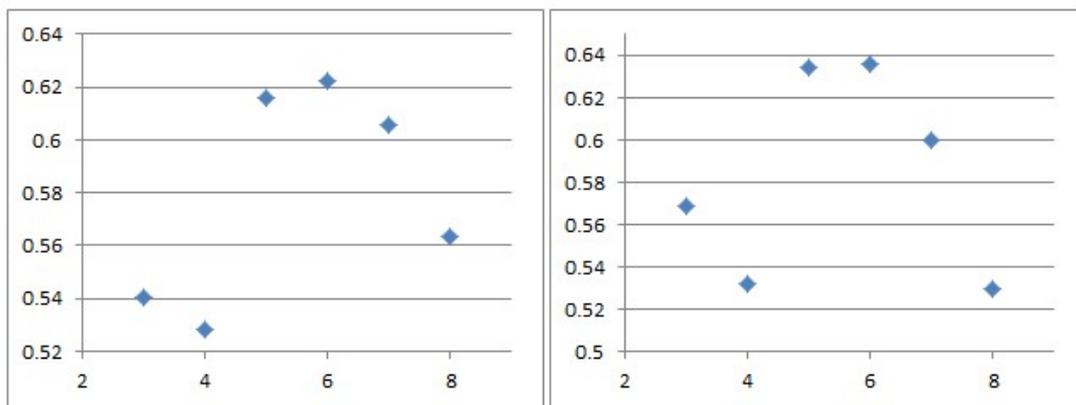
Figura 17. Comportamento das exatidões médias dos ortofotomosaicos do voo1 a) pontos uniformemente distribuídos. b) uniformemente distribuídos pontos de apoio aerotriangulados.

Para o voo1 quase todas os ortofotomosaicos estariam dentro dos padrões exigidos pela PEC, com exceção do dos ortofotomosaicos executados com 9 e 10 pontos de apoio na configuração sem pontos de apoio aerotriangulados e o ortofotomosaico realizada com 3 pontos na configuração com pontos de apoio

aerotriangulados. Em média os ortofotomosaicos da configuração com pontos de apoio aerotriangulados apresentam 1 cm de erro a mais que os ortofotomosaicos elaborados sem pontos de apoio aerotriangulados, contudo quando utilizados pontos de apoio aerotriangulados se tem uma dispersão menor dos erros e, portanto, uma maior certeza.

Tabela 8. Médias. Desvio padrão e maior erro em 90% dos pontos testados nas configurações de uniformemente distribuídos e uniformemente distribuídos com pontos de ligação. Voo2.

Quantidade de Pontos	Uniformemente Distribuídos			Uniformemente Distribuídos com Pontos de Apoio Aerotriangulados		
	Média (m)	Maior 90%	Desvio Padrão	Média (m)	Maior 90%	Desvio Padrão
3	0.54075	1.644	0.47956	0.56862	1.63	0.454889
4	0.52825	1.174	0.31251	0.53187	1.141	0.286956
5	0.615875	1.002	0.29109	0.63412	1.164	0.316636
6	0.622125	0.991	0.26564	0.63575	1.157	0.316271
7	0.605875	1.103	0.26113	0.60025	1.241	0.316154
8	0.5635	0.739	0.15881	0.52937	0.706	0.175605



a)

b)

Figura 18. Comportamento das exatidões médias dos ortofotomosaicos do voo2  
a) pontos uniformemente distribuídos. b) uniformemente distribuídos pontos de apoio aerotriangulados.

Para o voo2, quando utilizados, ou não, os pontos de ligação, os ortofotomosaicos apresentaram o mesmo comportamento de exatidão. Embora a resolução espacial deste voo (9 cm) seja maior que a resolução espacial do voo1 (10 cm), os erros médios, os maiores erros e os desvios padrões se apresentaram extremamente mais altos. Isto pode ter ocorrido devido à altura de voo, à pouca sobreposição, ao tamanho da área e, conseqüentemente, pouca densidade de pontos de apoio e/ou à complexidade do terreno com grandes ondulações no relevo e edificações de alturas elevadas. Já a densidade de pontos de apoio pode ser interpretada pelos testes de correlação com a distância, do qual, também, não houve correlação. Dentre as causas possíveis, é notório que quanto maior a altura de voo maior o erro planimétrico. Porém, este dado não se explica por si só, pois, embora a altura de voo do voo3 (200 m) seja menor que no voo1 (300 m) a resolução espacial, também, é menor, bem como a área e a variação altimétrica. Assim, há diversos fatores que poderiam explicar este mau desempenho do voo2, contudo, nesta pesquisa não foi possível determiná-los.

Tabela 9. Médias, desvio padrão e maior erro em 90% dos pontos testados nas configurações de uniformemente distribuídos e uniformemente distribuídos com pontos de apoio aerotriangulados. Voo3.

	Distribuição Uniforme			Distribuição Uniforme com Pontos de apoio aerotriangulados		
	Média (m)	Maior Entre 90%	Desvio Padrão	Média (m)	Maior entre 90%	Desvio Padrão
3	0.069882	0.133	0.040592	0.062294	0.117	0.035944
4	0.064529	0.12	0.038025	0.065	0.118	0.042541
5	0.064	0.127	0.045492	0.068235	0.117	0.041978
6	0.061824	0.133	0.039383	0.067412	0.119	0.037279
7	0.063118	0.115	0.029165	0.068882	0.117	0.035535
8	0.073882	0.114	0.03238	0.072353	0.13	0.044581
9	0.065294	0.115	0.034702	0.066529	0.13	0.041815
10	0.064059	0.115	0.033685	0.068706	0.117	0.035485
11	0.062765	0.111	0.034224	0.068588	0.12	0.037432
12	0.067588	0.126	0.040217	0.069647	0.12	0.042623
13	0.066353	0.127	0.042482	0.069	0.118	0.043633
14	0.067412	0.127	0.039483	0.067294	0.12	0.043469
15	0.061176	0.109	0.033569	0.069706	0.121	0.043036
16	0.062000	0.111	0.033136	0.069471	0.121	0.042911
17	0.060941	0.111	0.034087	0.069471	0.121	0.042911

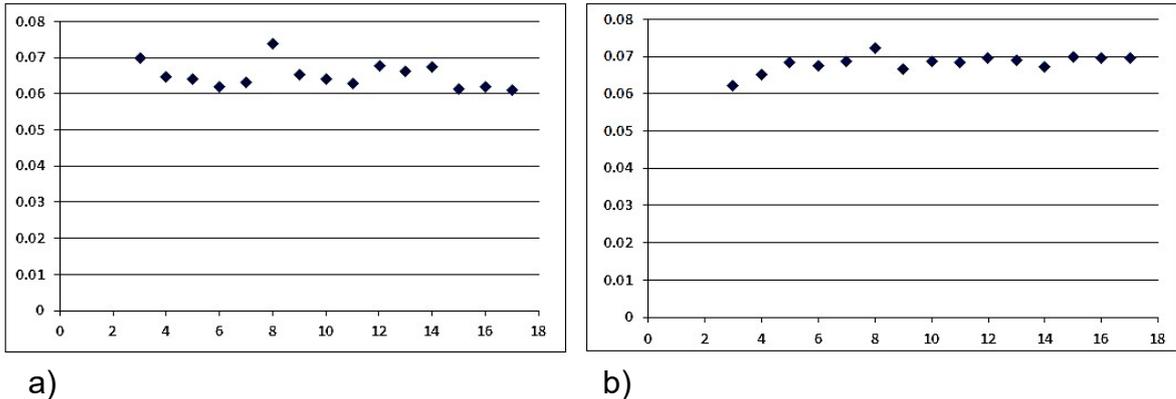


Figura 19. a) Comportamento das exatidões médias dos ortofotomosaicos do voo1 a) pontos uniformemente distribuídos. b) uniformemente distribuídos pontos de apoio aerotriangulados.

Para o voo3 todos os ortofotomosaicos se enquadram nas definições estabelecidas pelo PEC. Sendo que não há pontos, entre 90% dos pontos testados, maiores que 13 cm a partir da sétima adição de ponto de apoio para a configuração de pontos distribuídos uniformemente e, a partir do décimo ponto, para a configuração com pontos de apoio aerotriangulados. Pode-se dizer que a exatidão esperada nas medições dos pontos de controle em um ortofotomosaico é a média das exatidões mais ou menos o intervalo de confiança (equação 8). Sendo assim, o erro máximo esperado com 90% é apresentado nas tabelas 10 e 11, para os voos 1 e 3 respectivamente. Nestas tabelas também foram feitas as padronizações deste erro em número de pixels.

O intervalo de confiança para a média populacional, quando a variância é conhecida é dado por:

$$P\left(\bar{x} - Z \frac{\alpha}{2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + Z \frac{\alpha}{2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha \quad (8)$$

Onde:  $\bar{x}$  é a média.  $Z$  a abscissa da curva normal padrão para uma confiança  $\alpha/2$ .  $\sigma$  o desvio padrão e  $n$  o tamanho amostral.

Tabela 10. Soma entre erro médio e intervalo de confiança e padronização desta soma em número de pixels. Voo1.

	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Intervalo de Confiança (m)	Média + Intervalo de Confiança (m)	Padronização (pixel)
3	0.129655	0.061671	0.022446	0.152101	1.521008
4	0.128276	0.05742	0.020898	0.149174	1.491741
5	0.11931	0.050918	0.018532	0.137842	1.378422
6	0.123103	0.052726	0.01919	0.142293	1.422934
7	0.130345	0.058101	0.021146	0.151491	1.514911
8	0.125517	0.046356	0.016872	0.142389	1.423888
9	0.126207	0.068903	0.025078	0.151285	1.512847
10	0.127931	0.066612	0.024244	0.152175	1.521747
11	0.125172	0.063876	0.023248	0.14842	1.484205
12	0.119655	0.053915	0.019623	0.139278	1.392777
13	0.139655	0.065045	0.023674	0.163329	1.633289
14	0.121724	0.054143	0.019706	0.14143	1.4143
15	0.121724	0.063304	0.02304	0.144764	1.447639
16	0.126897	0.067062	0.024408	0.151304	1.513041
17	0.110345	0.053978	0.019646	0.129991	1.299906
18	0.112759	0.058892	0.021434	0.134193	1.341927
19	0.111034	0.051081	0.018591	0.129626	1.296257
20	0.11	0.051528	0.018754	0.128754	1.287541
21	0.108966	0.059443	0.021634	0.1306	1.306
22	0.108966	0.053778	0.019573	0.128538	1.285382
23	0.101379	0.052109	0.018965	0.120345	1.203447
24	0.108966	0.057915	0.021078	0.130044	1.300439
25	0.107586	0.056242	0.02047	0.128056	1.280558
26	0.111379	0.057997	0.021108	0.132488	1.324876
27	0.102207	0.051676	0.018808	0.121015	1.210146
28	0.101897	0.058251	0.021201	0.123097	1.230974
29	0.096379	0.055971	0.020371	0.11675	1.167504

Tabela 11. Soma entre erro médio e intervalo de confiança e padronização desta soma em número de pixels. Voo3.

	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Intervalo de Confiança (m)	Média + Intervalo de Confiança (m)	Padronização (pixel)
3	0.069882	0.040592	0.019296	0.089178	1.486306
4	0.064529	0.038025	0.018076	0.082605	1.376749
5	0.064	0.045492	0.021625	0.085625	1.427084
6	0.061824	0.039383	0.018721	0.080545	1.342412
7	0.063118	0.029165	0.013864	0.076982	1.283028
8	0.073882	0.03238	0.015392	0.089275	1.487912
9	0.065294	0.034702	0.016496	0.08179	1.363167
10	0.064059	0.033685	0.016013	0.080071	1.334523
11	0.062765	0.034224	0.016269	0.079034	1.317228
12	0.067588	0.040217	0.019117	0.086706	1.445095
13	0.066353	0.042482	0.020194	0.086547	1.442456
14	0.067412	0.039483	0.018769	0.08618	1.436338
15	0.061176	0.033569	0.015958	0.077134	1.285568
16	0.062	0.033136	0.015752	0.077752	1.29586
17	0.060941	0.034087	0.016204	0.077145	1.285748

Com resultados em pixel um pouco melhores no voo3 em relação ao voo1, ainda, pode-se pensar que estes resultados se devem a menor área. Por isto, foram normalizados o número de pontos de apoio para a densidade de pontos de apoio. O voo3, por ter aproximadamente 0,75 km<sup>2</sup>, 3 pontos representam uma densidade de 4/km<sup>2</sup>, por exemplo. O voo1, por ter uma área de aproximadamente 1 km<sup>2</sup>, o número de pontos de apoio é igual à densidade. Assim, tem-se a comparação entre o voo1 e o voo3 com base na densidade de pontos de apoio conforme é apresentado na tabela 12.

Tabela 12. Erro máximo esperado e comparação entre os voos 1 e 3.

Densidade (pixel/km <sup>2</sup> )	Erro máximo esperado com 90% de Confiança. Voo1.	Erro máximo esperado com 90% de Confiança. Voo3.	Diferença
4	1.491741	1.486306	0.005435
5	1.378422	1.376749	0.001673
7	1.514911	1.427084	0.087827
8	1.423888	1.342412	0.081475
9	1.512847	1.283028	0.22982
11	1.484205	1.487912	0.003707
12	1.392777	1.363167	0.02961
13	1.633289	1.334523	0.298766
15	1.447639	1.317228	0.130411
16	1.513041	1.445095	0.067946
17	1.299906	1.442456	0.14255
19	1.296257	1.436338	0.140081
20	1.287541	1.285568	0.001973
21	1.306	1.29586	0.01014
23	1.203447	1.285748	0.082301
média			0.087581

Quando comparados, pela densidade de pontos de apoio no terreno, as exatidões dos dois levantamentos se equivalem, com uma diferença média abaixo de um décimo de pixel. As maiores discrepâncias entre os erros esperados ocorrem com 9 e 13 pontos de apoio por km<sup>2</sup>. No geral pode-se esperar um erro máximo menor que 1,5 pixels quando a densidade é igual ou maior que 4 pontos/km<sup>2</sup>. Quando havia 4 pontos de apoio uniformemente distribuídos, a distribuição destes pontos era assim como é apresentado na figura 20.a. Para uma distribuição mais homogênea, recomenda-se 5 pontos de apoio por km<sup>2</sup> conforme a figura 20.b. Portanto é recomendado a distribuição de pontos de apoio em linhas paralelas distantes 500 m. Os pontos de apoio sobre estas linhas devem estar afastados aproximadamente 1 Km. E a defasagem entre os pontos de apoio de uma linha e outra deve ser de aproximadamente 500m, também. A figura 20.c mostra uma área de 4 km<sup>2</sup> com uma distribuição uniforme de 13 pontos de apoio. Ainda, pode-se estimar a quantidade de pontos de apoio pela equação 9, onde A é a área em km<sup>2</sup>, definida inicialmente com 5 pontos de apoio para 1km<sup>2</sup> e adicionada de 3 pontos de apoio para cada km<sup>2</sup> a mais.

$$5 + (3x(A - 1))$$

(9)

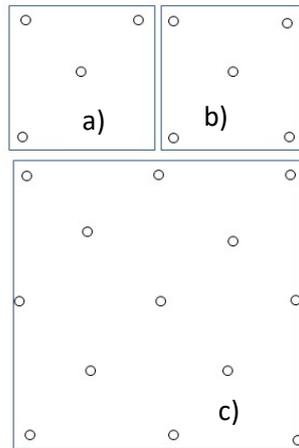


Figura 20 a) Configuração com 4 pontos de apoio uniformemente distribuídos. b) Configuração com 5 pontos de apoio. c) Área de 4 km<sup>2</sup> com 13 pontos de apoio conforme a configuração indicada.

Como resultado final, podem ser vistos os comportamentos das médias das precisões dos parâmetros de orientação exterior em função da quantidade de pontos de apoio dos voos 2 e 3 no anexo 1. Para isto, cada parâmetro de orientação exterior em cada fotografia foi agrupado separadamente com os diferentes números de pontos de controle. Então, foram elaborados gráficos com as médias das precisões de cada parâmetro em função da quantidade de pontos de apoio e adicionadas linhas de tendência, da mesma forma como fora realizado com as exatidões altimétricas e planimétricas dos ortofotomosaicos.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo de verificar como diversos fatores influenciam na exatidão planimétrica de ortofotomosaicos gerados com fotografias obtidas por VANTs foi alcançado a partir da análise da correlação entre a exatidão planimétrica dos ortofotomosaicos gerados e parâmetros relacionados aos pontos de apoio, ao voo e ao relevo. Considerou-se a quantidade, a distância e a distribuição de pontos de apoio; a utilização de pontos de apoio aerotriangulados; e a exatidão do MDE.

Quando as medições do voo1 foram realizadas, em alguns casos, houve dificuldade na definição do centro do alvo artificial. Muitas vezes foi necessário classificar a imagem para que o pixel central fosse destacado. A alta reflexão do centro branco e o borramento, devido à velocidade e às inclinações da aeronave no momento da tomada da fotografia, podem ter contribuído para a má definição do alvo. O centro de alvo melhor definido foi do voo3. Porém, as dimensões deste alvo foram de aproximadamente 17 vezes a resolução espacial da imagem, o que pode ter contribuído na boa definição da imagem. Recomenda-se para o modelo apresentado na figura 5.b a inversão das cores, isto é, que se faça um círculo preto em fundo branco. Também, recomenda-se a utilização do modelo apresentado na figura 5.c.

Não foram encontradas correlações entre o número de sobreposições e as exatidões planimétrica e altimétrica, embora os piores resultados tenham sido encontrados no único voo que não foi realizado de maneira cruzada (voo2). Também não foram encontradas correlações entre as exatidões planimétrica e altimétrica, ainda que os melhores resultados fossem obtidos no terreno mais plano dentre os estudados (voo3). Apenas a configuração de pontos de apoio agrupados sem pontos de apoio aerotriangulados mostrou, na maioria das vezes, correlação dos erros altimétricos e planimétricos com a distância e com o número de pontos. Em trabalhos futuros, recomenda-se o teste de outros tipos de correlação (que não a linear) entre os fatores citados.

Quando o *software* procura por pixels homólogos nas fotografias sobrepostas e após cria uma nuvem de milhões de pontos tridimensionais, esta nuvem de pontos

se equivale aos pontos de ligação da fotogrametria tradicional. Neste trabalho, ficou evidenciado que a marcação de pontos de ligação pouco teve efeito na geração de ortofotomosaicos. Marcar alguns poucos pontos de ligação durante o processo se torna irrelevante visto que já há milhões de pontos que se equivalem a estes.

A marcação de pontos de apoio aerotriangulados, também, não se mostrou efetiva. Estes pontos tornaram a melhora nas exatidões pela adição de pontos de apoio mais lenta e, em alguns casos, os erros planimétricos e altimétricos foram maiores quando tais pontos foram utilizados. Porém, as coordenadas dos pontos de apoio aerotriangulados, nesta pesquisa, foram determinadas no pior dos cenários, isto é, com apenas três pontos de apoio na configuração agrupada. É possível que com mais pontos de apoio a definição dos pontos de apoio aerotriangulados seja mais exata. Faz-se necessário um estudo para determinar com quantos pontos de apoio o procedimento de intersecção espacial se torna confiável, para que os pontos de apoio aerotriangulados possam ser utilizados como se de apoio fossem.

Dentre os quatro tipos de configuração de pontos de apoio, a de pontos agrupados apresentou os menores valores médios para a tendência de estabilidade das exatidões dos pontos. Porém, isto não significa menores valores de exatidão, pois a média pode ter sido influenciada pela área onde se encontravam os pontos de apoio. Mesmo assim, pode-se indicar esta configuração para mapeamentos que tenham parte da área a ser levantada inacessível. As estabilidades planimétricas médias tenderam a ocorrer com 20, 18 e 11 pontos de apoio para os voos 1, 2 e 3, respectivamente. Cerca de 60% das vezes, a tendência de estabilidade da exatidão planimétrica ocorreu depois da altimétrica, e isto indica que a exatidão planimétrica dos ortofotomosaicos não depende somente da exatidão do MDE.

Em média, os melhores resultados dos pontos de controle foram 0,07 m, 0,405 m, 0,042 m para os voos 1, 2 e 3, respectivamente. E isto ocorre em média com 16, 6 e 13 pontos de apoio, respectivamente. No geral, a quantidade de pontos de apoio para os melhores resultados altimétricos coincide com a quantidade de pontos de apoio para os melhores resultados planimétricos.

Para o voo1 nenhum tipo de configuração teve a maioria dos pontos com correlação entre o erro altimétrico e o erro planimétrico. A configuração de pontos

agrupados se mostrou mais dependente da distância entre os pontos para melhores exatidões planimétrica e altimétrica. O voo3 também apresentou maior dependência de distância e número de pontos para a configuração de pontos agrupados. Para outras configurações, apenas as exatidões altimétricas se mostraram dependentes da distância e do número de pontos. Conclui-se, portanto, que o erro altimétrico é mais dependente do número de pontos e da distância ao ponto de apoio.

Não houve correlações significativas entre o erro planimétrico e o erro altimétrico com a altura de voo. Porém, os resultados pioram de acordo com o aumento da altura de voo. É preciso que haja um estudo em condições iguais de terreno e de sobreposições para que se possa avaliar a verdadeira relação entre exatidão e altura de voo.

Por fim, notou-se uma equivalência ao se tratar dos erros médios dos ortofotomosaicos quando medidos em pixels entre os voos 1 e 3. Foi possível estabelecer que o erro máximo esperado é menor que 1,5 pixels com 90% de confiança, quando há 4 pontos de apoio por km<sup>2</sup>. Portanto, recomenda-se planejar o voo aerofotogramétrico com VANT com uma resolução espacial cerca de 1,5 vezes menor que exatidão requerida para as ortofotos. Pode-se estimar a quantidade de pontos de apoio necessária pela equação 4. Ainda, é recomendável a densificação de pontos de apoio em regiões de interesse. Densificações de 20 a 30 pontos/km<sup>2</sup> podem reduzir o erro máximo esperado em 0,2 pixels. As recomendações aqui indicadas têm como base as áreas e o modo de processamento executados neste trabalho. Trabalhos com definições mais rigorosas no software e executados em computadores mais potentes podem gerar resultados melhores. Assim como, áreas mais onduladas podem resultar resultados piores.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, S. L. **Inspeção e Monitoramento de Estruturas em Engenharia Civil- Utilização de UAV na Inspeção de Monitoramento.** Dissertação de Mestrado. Universidade da Madeira, 2012.
- AGUIRRE, G. R.; SALMERÓN, G. O. et al. **Use of Unmanned Aerial Vehicles and Remote Sensors in Urban Lakes Studies in Mexico.** International Journal of Remote Sensing, Vol. 38, 2017.
- AHMED, O. S. SHEMROCK, A. et al. **Hierarchical Land Cover and Vegetation Classification Using Multispectral Data Acquired From an Unmanned Aerial Vehicle.** International Journal of Remote Sensing, Vol. 38, 2017.
- ALMEIDA, I. C.; COSTA, G. C.; SILVA, D. C.; MEDEIROS, J. R. B. **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 da Geoinformação Recife - PE, agosto, 2016.
- ALVES JÚNIOR, L. R.; CÔRTEZ, J. B. R.; SILVA, J. R.; FERREIRA, M. E. **Validação de Ortomosaicos e Modelos Digitais de Terreno Utilizando Fotografias Obtidas Com Câmera Digital Não Métrica Acoplada a Um VANT.** Revista Brasileira de Cartografia, Nº 67/7, p.1453-1466, 2015.
- AMHAR, F.; JANSÁ, C. R. J. **The Generation of True Orthophotos Using a 3d Building Model in Conjunction With a Conventional Dtm IAPRS,** Vol. 32, Part 4 "GIS-Between Visions and Applications", Stuttgart, 1998
- ANAC. **Regras da ANAC Para o Uso de Drones.** Brasília, 2017.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria.** SBEE, Curitiba, 1998.
- BABAPOUR, H.; MOKHTARZADE, M. VALADAN, Z. M. J. **A Novel Post-Calibration Method For Digital Cameras Using Image Linear Features.** International Journal of Remote Sensing, Vol. 38, 2017.
- BARBOSA, B. J. B. L.; PEREIRA, T. S. **Geração De Base Cartográfica Para Área De Interesse Histórico/Cultural Por Meio De Levantamento Fotogramétrico Adquirido Com VANT (RPAS).** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2017.

BENDEA, H.; CHIABRANDO F. et al. **Mapping Of Archaeological Areas Using A Low-Cost Uav The Augusta Bagiennorum Test Site**, XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece, 2007.

BERTEŠKA, T.; RUZGIENĖ, B. **Photogrammetric Mapping Based on UAV Imagery**. Geodesy and Cartography. 2013.

BI, H.; ZHENG, W. et al. **Using An Unmanned Aerial Vehicle For Topography Mapping of The Fault Zone Based On Structure From Motion Photogrammetry**. International Journal of Remote Sensing, Vol. 38, 2017.

BRAZ, A. M., JOSUÉ, P. S. B., et al. **Análise da Aplicação de VANT na Atualização de Cadastro Florestal com Uso de Pontos de Controle**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE, João Pessoa-PB, Brasil, 2015.

BRENNER, C. THIEM, C. E. ET AL. **Estimating Spatially Distributed Turbulent Heat Fluxes From High-Resolution Thermal Imagery Acquired With a UAV System**. International Journal Of Remote Sensing, Vol. 38, 2017.

BRITO, J. L. N. S. **Precision of Digital Orthoimages: Assessment and Application To the Occlusion Detection Problem**. The Ohio State University, 1997.

CANON. **Camera User Guide**. Disponível em: <[http://gdlp01.c-wss.com/gds/6/0300004756/01/PSELPH300HS\\_IXUS220HS\\_CUG\\_EN\\_02.pdf](http://gdlp01.c-wss.com/gds/6/0300004756/01/PSELPH300HS_IXUS220HS_CUG_EN_02.pdf)> Acesso em: 25/02/2018.

CASBEER, D. W.; KINGSTON, D. B. et al. **Cooperative Forest Fire Surveillance Using a Team Of Small Unmanned Air Vehicles**, International Journal of Systems Science, Vol. 37, 2006.

COELHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro, EDUERJ, 2007.

COSTA, G. C.; SILVA, D. C. **Pré-Sinalização de Pontos De Apoio em Aerofotogrametria com câmeras de Pequeno Formato**. IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE Maio, 2012.

COVENEY, S.; ROBERTS, K. **Lightweight UAV Digital Elevation Models And Orthoimagery For Environmental Applications: Data Accuracy Evaluation And Potential For River Flood Risk Modelling**. International Journal of Remote Sensing, Vol. 38, 2017.

D'ALGE, J. C. L. **Atualização Cartográfica Por Imagens De Satélite, Considerações Teóricas e Possibilidades de Implementação**. São José dos Campos: INPE, 1997.

DISPERATI, A. A. **Obtenção e Uso De Fotografias Aéreas de Pequeno Formato**. Curitiba: UFPR: FUPEF, 1991.

EISENBEISS, H. ZHANG, L. **Comparison of Dsms Generated From Mini UAV Imagery And Terrestrial Laser Scanner In A Cultural Heritage Application.** V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology' Volume XXXVI, Part 5, Dresden, Alemanha, 25-27 September 2006.

EISENBEIß. H. **UAV Photogrammetry.** Zürich: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, 2009.

EUSTON, M.; COOTE, P. et al. **A Complementary Filter For Attitude Estimation of a Fixed-Wing UAV.** International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice, France, 2008.

FAGUNDES, M. A. R. **Geração de Base Cartográfica Tridimensional com o Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2016.

FALKNER, E. MORGAN, D. **Aerial Mapping. Methods and Applications.** 2ed. Lewis Publishers, 2001.

FONSTAD, M. A., DIETRICH, J. T., COURVILLE, B. C., JENSEN, J. L., CARBONNEAU, P. E. **Topographic Structure From Motion: Anew Development in Photogrammetric Measurement.** Earth Surface. Processes Landforms, vol. 38, 2013.

GINI, R.; PAGLIARIB, D. et al. **Uav Photogrammetry: Block Triangulation Comparisons.** International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W2. Rostock, Germany, 2013.

GUSTAFSSON, H.; ZUNA, L. **Unmanned Aerial Vehicles for Geographic Data Capture: A Review.** STOCKHOLM, SVERIGE, 2017.

HARDIN, P. J.; JENSEN, R. R. **Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles in Environmental Remote Sensing: Challenges and Opportunities.** GIScience & Remote Sensing. Vol. 48, 2011.

HAZELTON, J. L. **Drone Strikes and Grand Strategy: Toward a Political Understanding of the Uses of Unmanned Aerial Vehicle Attacks in US Security Policy.** The Journal Of Strategic Studies, Vol. 40, 2017.

IBGE. **Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP.** Disponível em <[https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual\\_ppp.pdf](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf)> Acessado em: 23/10/2017.

IBGE. **Noções de Cartografia.** Disponível em: <[https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual\\_nocoos/representacao.htm](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoos/representacao.htm)> Acessado em: 24/11/2017.

- IESCHECK, A. L.; SOUZA, G. ; FARINA, F. C. . **Mapeamento de Cobertura e Uso da Terra Com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)**. VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 2016.
- JABARI, S. FATHOLLAHI, F. et al. **Improving UAV Imaging Quality by Optical Sensor Fusion: An Initial Study**. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 38, 2017.
- JAMES, M. R., ROBSON, S. D'OLEIRE-OLTMANN, S. Niethammer, U. **Optimising UAV Topographic Surveys Processed With Structure-from-Motion: Ground Control Quality, Quantity and Bundle Adjustment** *Geomorphology*, vol. 280, 2017.
- JANSSEN, L. L. F.; HUURNEMAN, G. C. **Principles of Remote Sensing**. 2 ed, Enschede, The Netherlands: ITC Educational Textbook Series, 2001.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.
- KHAN, S.; ARAGÃO, L.; IRIARTE, J.A. **UAV–Lidar System To Map Amazonian Rainforest And Its Ancient Landscape Transformations**. *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, Volume 38, 2017.
- KIM, J. KIM, T. et al. **Fast and robust geometric correction for mosaicking UAV images with narrow overlaps**. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 38, 2017.
- LALIBERTE, A. S.; HERRICK, J. E.; RANGO, A. WINTERS C. **Acquisition, Orthorectification, and Object-based Classification of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Rangeland Monitoring**. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 76, No. 6, June 2010.
- LEE, S.; CHOI, Y. **Reviews of Unmanned Aerial Vehicle (Drone) Technology Trends and Its Applications In The Mining Industry**. *Geosystem Engineering*, Vol.19, 2016.
- LIU, H.; ZHU, H.; WANG, P. **Quantitative Modelling For Leaf Nitrogen Content of Winter Wheat Using UAV-Based Hyperspectral Data**. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 38, 2017.
- LONGHITANO, G. A. **VANTs Para Sensoriamento Remoto: Aplicabilidade Na Avaliação e Monitoramento de Impactos Ambientais Causados Por Acidentes Com Cargas Perigosas**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- LUGNANI, J.B. **Introdução à Fototriangulação**, UFPR, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1987
- MAROTTA, G. S.; FERREIRA, A. M. R.; ROIG, H. L.; ALMEIDA, T. **Avaliação Geométrica de Câmara de Pequeno Formato Transportada por Veículo Aéreo**

**Não Tripulado para Uso em Aerolevantamentos.** Revista Brasileira de Cartografia, Nº 67/3, p. 591-601, 2015.

MATIAS, G. R. S.; GUZATTO, M. P.; SILVEIRA, P. G. **Mapeamento Topográfico Cadastral Por Integração de Imagens Adquiridas com Vant a Técnicas Tradicionais.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

MEDEIROS, F. A.; ALONÇO, A. S. et al. **Utilização De Um Veículo Aéreo Não-Tripulado Em Atividades de Imageamento Georeferenciado.** Ciência Rural, Santa Maria, v.38, n.8, 2008.

MENDES, T.; HENRIQUES, S. et al. **Photogrammetry with UAV's: Quality Assessment of Open-Source Software for Generation of Orthophotos and Digital Surface Models.** VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Lisboa, Portugal, 2015.

MERCHANT, D. **Camera Geometric Calibration.** Current Status. IGTF 2017 – Imaging & Geospatial Technology Forum, 2017 ASPRS Annual Conference Baltimore, Maryland, 2017

MICHELETTI, N.; CHANDLER, J. H.; LANE, S. N. **Structure from Motion (SfM) Photogrammetry.** Geomorphological Techniques, 2015.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry.** New York: John Wiley & Sons, 2001.

MITISHITA, E.; EDUARDO, J.; GRAÇA. N.; CENTENO. J.; MACHADO, A. **O Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) Em Aplicações de Mapeamento Aerofotogramétrico.** Anais - Congresso Brasileiro de Cartografia, Gramado, RS, 2014.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento Pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações.** São Paulo: UNESP, 2008.

NEBIKERA, S.; ANNENA, A. et al. **A Light-Weight Multispectral Sensor For Micro Uav – Opportunities For Very High Resolution Airborne Remote Sensing.** The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing, 2008.

NEX, F.; REMONDINO, F. **UAV For 3D Mapping Applications: A Review.** Appl Geomat, Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia (SIFET) 2013.

NIETO, H. G.; LEÓN, G. M. **Uso de Ortofotos Para Actualizar el Mapa de Uso Del Suelo en Guanajuato,** México. Agric. Téc. Méx, Vol.33, N.3. 2007.

OBANAWA, H. HAYAKAWA, Y. S. **High-Resolutional Topographic Survey Using Small UAV And Sfm-MVS Technologies In Hardly Accessible Area.** The

International Symposium on Cartography in Internet and Ubiquitous Environments, Tokyo, 2015.

PALERMO, R. A.; LEITE, T. C. **Integração de Levantamento Fotogramétrico Aéreo Com o Uso de VANT e Levantamento Fotogramétrico Terrestre Para o Mapeamento Tridimensional das Ruínas de São Miguel das Missões.** 2013. Trabalho de conclusão (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Curso de Engenharia Cartográfica, Porto Alegre, BR-RS, 2013

PANAGIOTIDIS, D. ABDOLLAHNEJAD, A. et al. **Determining Tree Height And Crown Diameter From High-Resolution UAV Imagery.** International Journal of Remote Sensing, 2016.

PAOLI, B. L.; TRINDADE, C. A. **Boas Práticas do Uso da Técnica de Structure From Motion.** Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE João Pessoa-PB, Brasil, 2015.

PETERNELLI, L. A. **Regressão Linear e Correlação.** Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: <<http://www.dpi.ufv.br/~peterneli/inf162.www.16032004/materiais/CAPITULO9.pdf>> .Acessado em: 22/02/2018

RAGASKAS, U. BRUČAS, D. SUŽIEDELYTĖ, V. J. **Research On Precise Point Positioning And Real-Time Kinematics Corrections For Unmanned Aerial Vehicle Global Positioning Systems.** Aviation, Vol. 17, Taylor & Francis, 2017.

ROBERTO, A. J. **Extração de Informação Geográfica A Partir de Fotografias Aéreas Obtidas Com Vants Para Apoio a Um Sig Municipal.** Dissertação de Mestrado em Sistemas De Informação Geográfica. Universidade Do Porto, Portugal, 2013.

RODRIGUES, C. REDWEIK, P. **Extração de Fachadas de Edifícios em Imagens Obtidas com UAV,** VIII Conferência Nacional de Cartografia E Geodésia, Porto, Portugal, 2015.

SELPLAG. **Atlas Socioeconômico Rio Grande do Sul. 2002.** Disponível em: <<http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/>> Acesso em: 20 jun. 2015.

SERIFOGLU YILMAZ, CIGDEM; GUNGOR, OGUZ **Comparison of The Performances Of Ground Filtering Algorithms and DTM Generation From a UAV-Based Point Cloud.** Geocarto International, 2016

SILVA, D. C.; TOONSTRA, G. W. A.; SOUZA, H. L. S.; PEREIRA, T. A. J. **Qualidade de Ortomosaicos de Imagens de VANT Processados com os Softwares Aps, Pix4d e Photoscan.** V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE, 2014b.

- SILVA, S. L. A.; TOMMASELLI, A. M. G.; ARTERO, A. O. **Utilização de Alvos Codificados do Tipo Aruco na Automação do Processo de Calibração de Câmaras.** Boletim de Ciências Geodésicas vol.20, n.3. 2014a.
- SKARLATOS, D. PROCOPIOU E. et al. **Accuracy Assessment Of Minimum Control Points For UAV Photography and Georeferencing.** First International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment. Paphos, Cyprus, 2013.
- SONG, M. JI, Z. et al. **Mosaicking Uav Orthoimages Using Bounded Voronoi Diagrams And Watersheds.** International. Journal of Remote Sensing, 2017.
- SOUZA, D. S. **Análise Da Viabilidade Do Uso De VANT Para Mapeamentos Topográfico E De Cobertura E Uso Da Terra.** Porto Alegre: UFRGS, 2015.
- SUN, H. LI, L. ET AL. **The Precise Multimode GNSS Positioning For UAV and Its Application In Large Scale Photogrammetry.** Geo-Spatial Information Science, Vol. 19 No 3, 2016.
- TAHAR, K.N. **An Evaluation On Different Number Of Ground Control Points In Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetric Block.** International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-2/W2, Istanbul, Turkey, 2013
- TETUKO S. S., J.;KOO, V.C.;LIM, T. S. et al. **Development Of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar On-Board UAV JX-1.** International Journal of Remote Sensing, Taylor & Francis, Volume 38, 2017.
- THIEL, C.; SCHMULLIUS, C. **Comparison of UAV Photograph-Based And Airborne Lidar-Based Point Clouds Over Forest From A Forestry Application Perspective.** International Journal of Remote Sensing, Vol. 38, 2017.
- TORRESAN, C.; BERTON, A. et al. **Forestry Applications Of Uavs In Europe: A Review,** International Journal of Remote Sensing, 2016.
- TSAI, M. L. **The Direct Georeferencing Application and Performance Analysis of UAV Helicopter in GCP-Free Area.** International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, Toronto, Canada, 2015.
- TURNER, D.; LUCIEER A.; WATSON, C. **An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds.** Remote Sensing, 2012.
- UYVAL, M.; TOPRAK, A.S.; POLAT, N. **DEM Generation With UAV Photogrammetry And Accuracy Analysis In Sahitler Hill.** Measurement, Vol. 73, Elsevier, 2015.

VALLET, J.; PANISSOD, F.; STRECHA, C.; TRACOL, M. **Photogrammetric Performance of An Ultra Light Weight Swinglet “UAV”**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich, Switzerland, 2011.

WARNER, W.S. GRAHAW, R.W. **Small Format Aerial Photography**. American Society Photogrammetry and remote sensing, 1996.

WESTOBY. M. J.; BASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. **Structure-From-Motion’ Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool For Geoscience Applications**, Geomorphology 179, 2012.

WOLF, P. R.; DEWITT B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements Of Photogrammetry With Applications In Gis**. 4 ed, Mc Graw Hill, 2014.

YEH, M. L.; CHOU, Y. T. ;YANG,L. S. **The Evaluation of GPS techniques for UAV-Based Photogrammetry in Urban Area**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, XXIII ISPRS Congress, Prague, Czech Republic, 2016.

YUE, J.; LEI, T. et al. **The Application of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing in Quickly Monitoring Crop Pests**. Intelligent Automation & Soft Computing. Vol. 18, 2012.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. Remote Sensing and Image Interpretation. 7th ed. 2015.

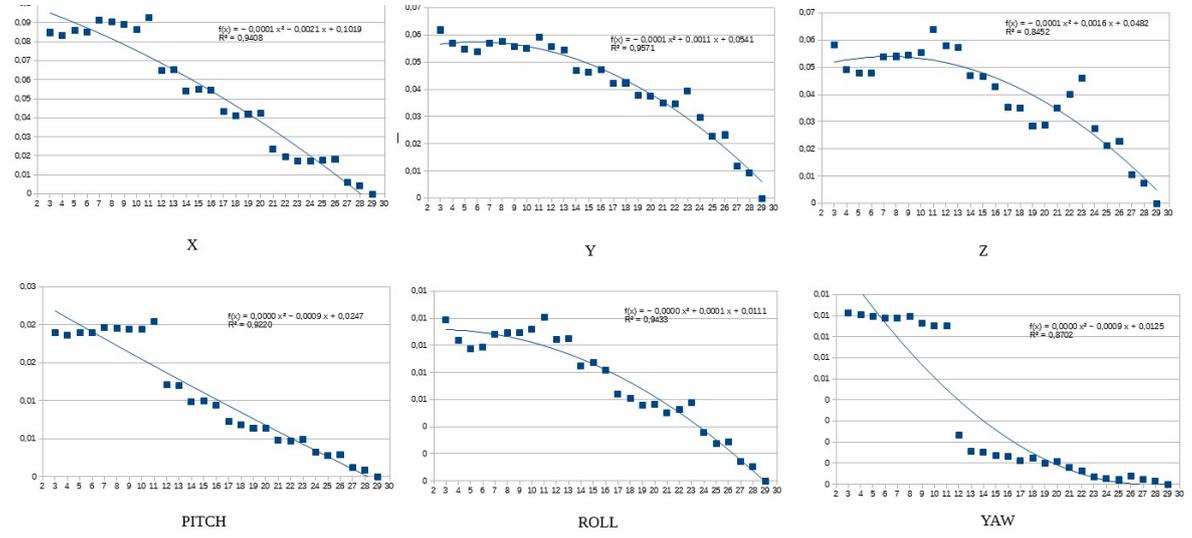
FRITZ, L. W. **The Era of Commercial Earth Observation Satellites**. In **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Volume 62. 1996.

KONECNY, G. **Geoinformation: Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems**. Taylor & Francis, London, 2003.

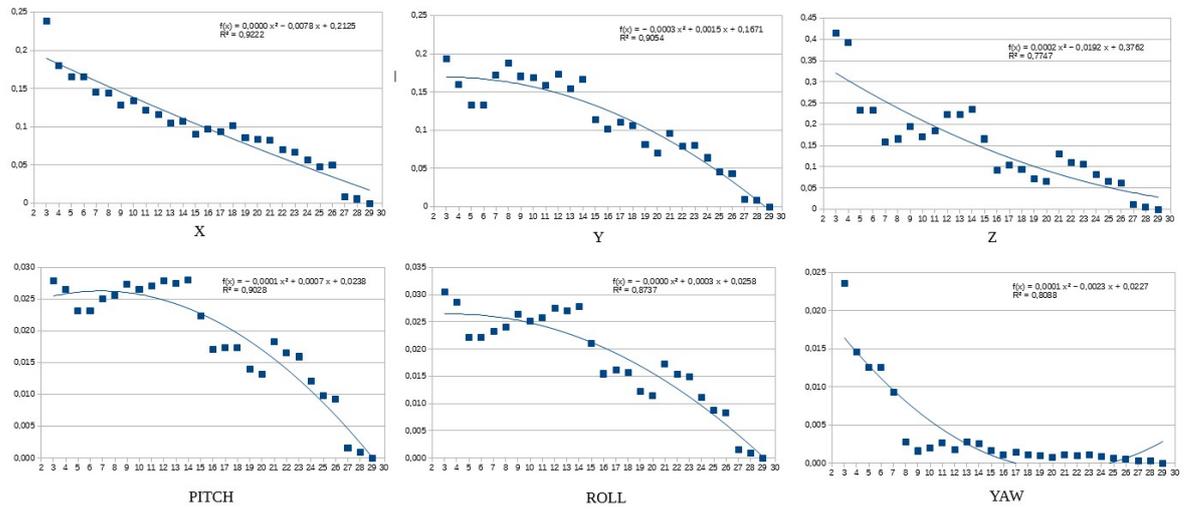
# ANEXO I

## PRECISÕES MÉDIAS DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR

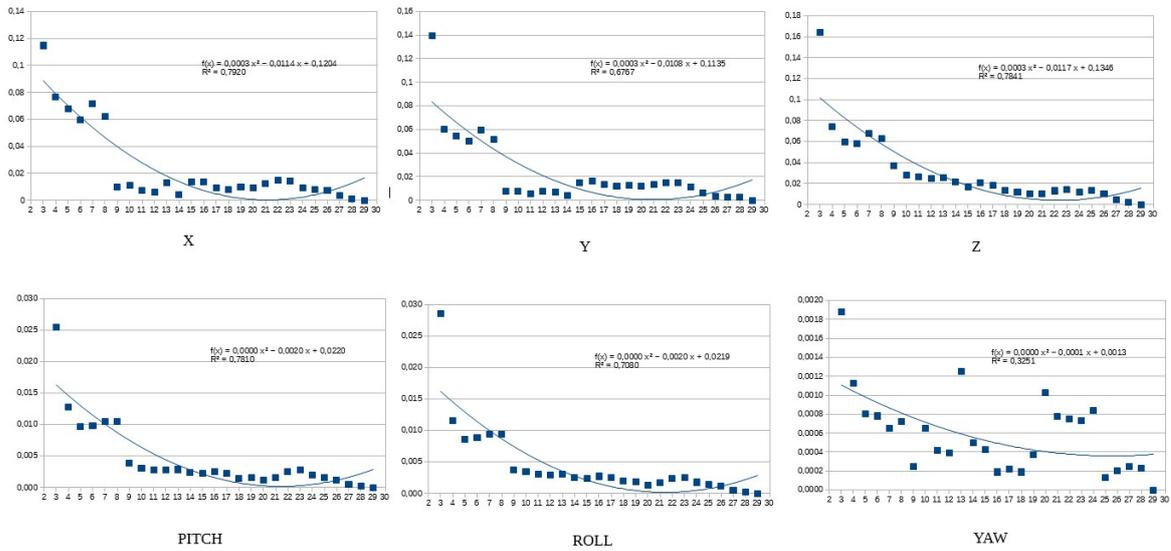
Voo1- Agrupados



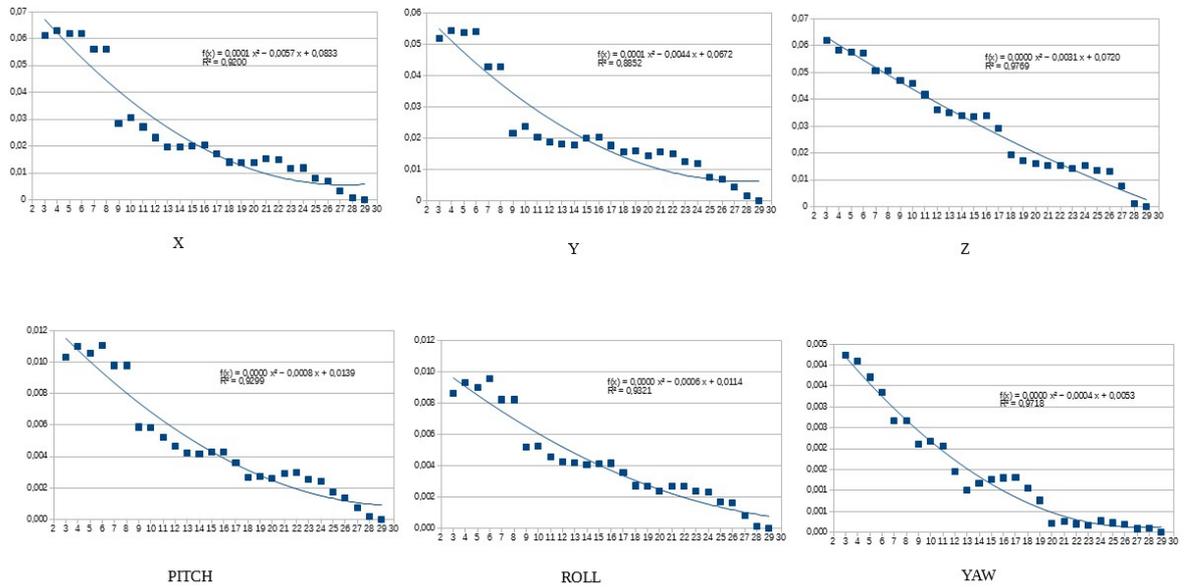
Voo1- Agrupados com Pontos de apoio aerotraingulados



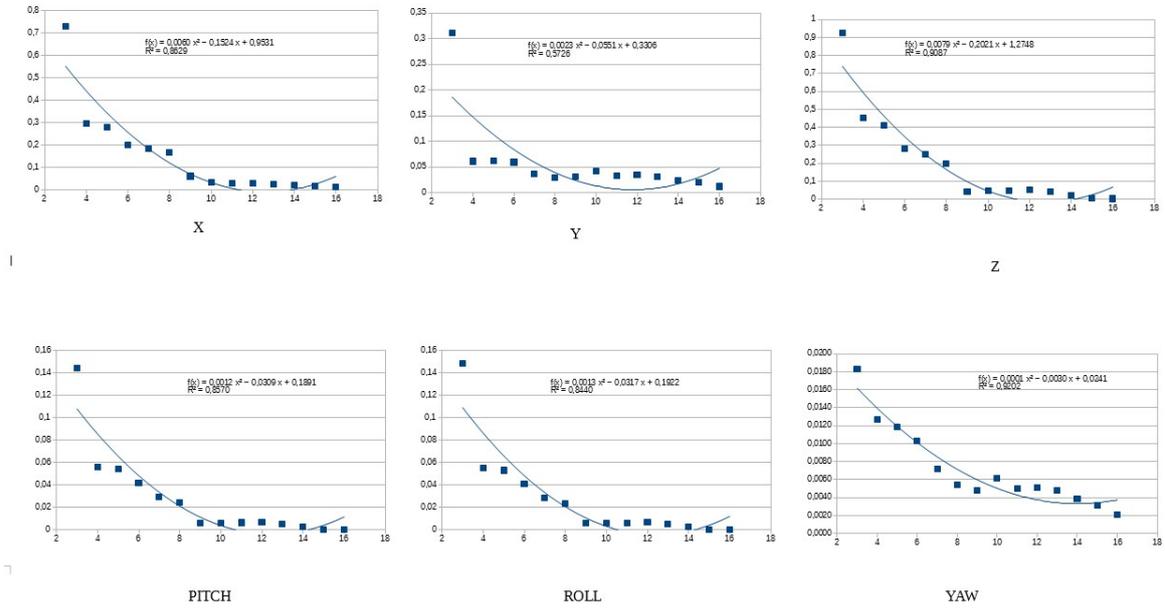
### Voo1- Distribuído



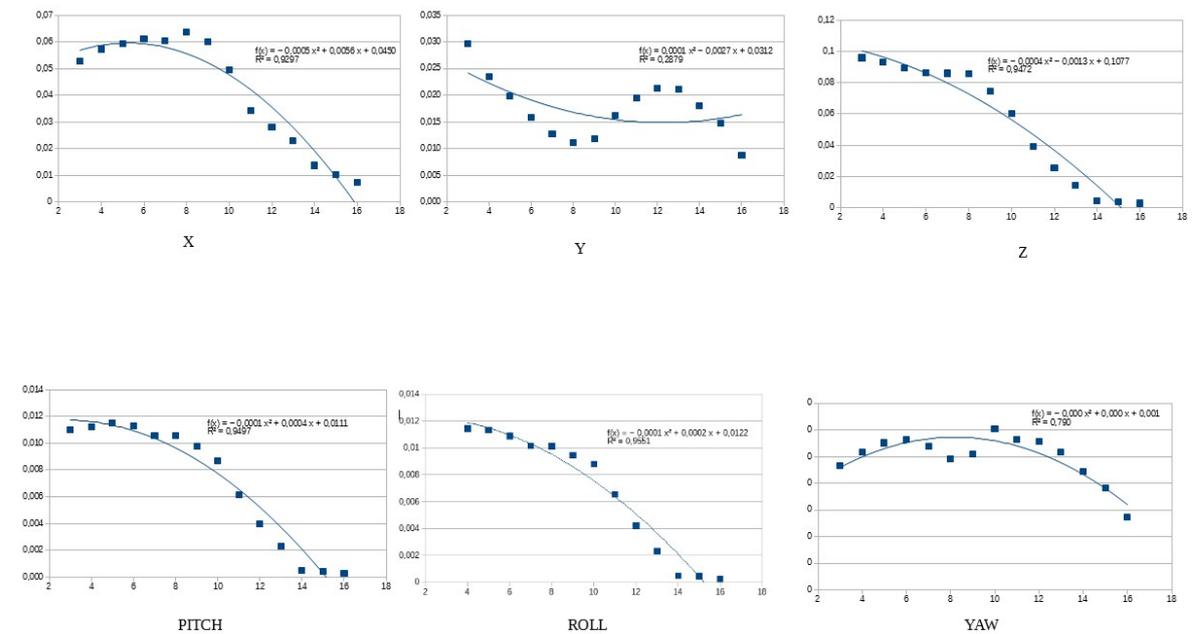
### Voo1- Distribuído com Pontos de apoio aerotraingulados



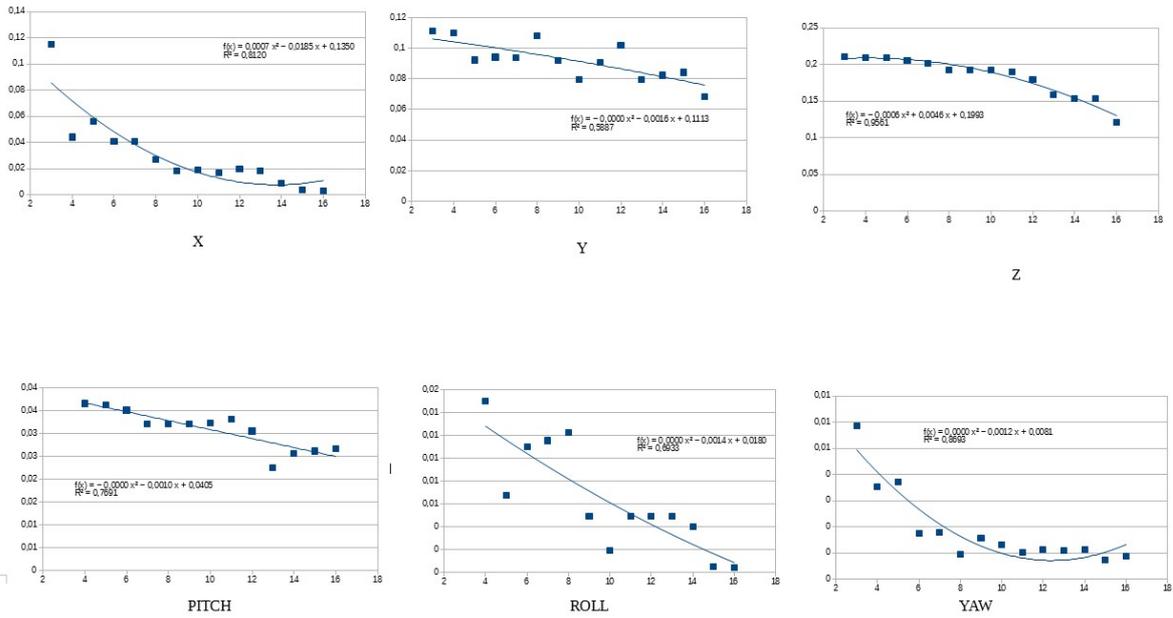
### Voo3- Agrupados



### Voo3- Agrupados com Pontos de apoio aerotraingulados



### Voo3- Distribuído



### Voo3- Distribuído com Pontos de apoio aerotraingulados

