


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA

RODRIGO DE CASTRO MORO

AVALIAÇÃO DE PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS OBTIDOS POR UM VEÍCULO
AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT)

CURITIBA
2013

RODRIGO DE CASTRO MORO



AVALIAÇÃO DE PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS OBTIDOS POR UM
VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT)

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado com parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Cartógrafo e Agrimensor
pela Universidade Federal do Paraná

Orientador: Daniel Rodrigues dos
Santos

Co-Orientador: Edson Aparecido
Mitishita

CURITIBA
2013

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a qualidade dos produtos fotogramétricos obtidos por um veículo aéreo não tripulado (Vant). Tal sistema é composto por uma câmera digital de pequeno formato e sensores microeletromecânicos (MEMs) de posicionamento GPS (*Global Positioning System*) e inercial (INS), cuja unidade de medida de integração é conhecida como estratégico, por ser de baixa precisão. Para avaliar a qualidade dos produtos fotogramétricos obtidos pelo sistema Vant foram comparados os produtos (MNE e ortofotos digitais) derivados de dois softwares diferentes, usando como premissa a quantidade de apoio de campo empregado na técnica fotogramétrica conhecida como fototriangulação por ajustamento de feixes de raios, bem como o uso dos dados de integração dos sensores GPS/INS.

Palavras-Chave: MNE, GPS/INS, VANT, fototriangulação de imagens, ortofoto digital.

ÍNDICE DE FIGURAS

IMAGEM 1: VANT modelo SmartBird 260 Empresa SoftMapping	10
IMAGEM 2: Imagem aérea da área de estudo.	10
IMAGEM 3: Traçado da rota de voo para aquisição das imagens Adaptado da Empresa SoftMapping.	11
IMAGEM 4: Área de abrangência das imagens no terreno.	12
IMAGEM 5: Identificação dos pontos de controle rastreados por GPS.	14
IMAGEM 6: Foto identificação do ponto de controle no LPS.	16
IMAGEM 7: Foto identificação do ponto de controle no APS.	16
IMAGEM 8: Representação geométrica dos pontos de controle no LPS.	17
IMAGEM 9: Representação geométrica dos pontos de controle no APS.	17
IMAGEM 10: Representação geométrica dos pontos de ligação no LPS.	18
IMAGEM 11: Representação geométrica dos pontos de controle no APS.	18
IMAGEM 12: Modelo digital de superfície gerado pelo LPS.	19
IMAGEM 13: Modelo digital de superfície gerado pelo APS.	20
IMAGEM 14: Mosaico ortorretificado processado pelo LPS.	21
IMAGEM 15: Mosaico ortorretificado processado pelo APS.	21

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 02: Determinação das coordenadas dos pontos de apoio no sistema WGS84, e altitude elipsoidal.	14
TABELA 2: POE dos sensores da UCV.	22
TABELA 3: POE processados pelo LPS com 5 pontos de apoio.	22
TABELA 4: POE processados pelo LPS com 14 pontos de apoio.	23
TABELA 5: POE processados pelo APS com 5 pontos de apoio.	23
TABELA 6: POE processados pelo APS com 14 pontos de apoio.	23
TABELA 7: Médias dos desvio encontrados em cada componente dos dados processados em relação aos dados originais vindos dos sensores.	23
TABELA 8: Resíduos dos pontos após aerotriangulação nos pontos de apoio e de verificação no software LPS.	24
TABELA 9: Resíduos dos pontos após aerotriangulação nos pontos de apoio e de verificação no software APS.	25
TABELA 10: Coordenadas coletadas nas ortofotos com 5 pontos de controle do LPS e do APS e suas diferenças entre as coordenadas levantadas com o GPS e a média de erro.	26
TABELA 11: Coordenadas coletadas nas ortofotos com 11 pontos de controle do LPS e do APS e suas diferenças entre as coordenadas levantadas com o gps e a média de erro.	26

LISTA DE SIGLAS

VANT - Veículo aéreo não tripulado

MP - MegaPixels

UTM - Universal transversa de Mercator

UFPR - Universidade federal do Paraná

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

CCD - Charge-coupled device

GPS - Global position system

ppm - parte por milhão

RBMC - Rede brasileira de monitoramento contínuo

WGS84 - World Geodetic System

MDT - Modelo digital do terreno

MDS - Modelo digital de superfície

MNE - Modelo numérico de elevação

POE - Parâmetros de orientação exterior

POI - Parâmetros de orientação interior

UCV - Unidade Controladora de voo

RGB - red, green, and blue

APS - Agisoft PhotoScan

LPS - Leica Photogrametry Suite

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.2	OBJETIVOS	8
1.2.1	Objetivo Geral	8
1.2.2	Ojetivo Específicos	8
1.2.3	Justificativa	8
2	METODOLOGIA	9
2.1	PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DO VÔO	9
2.1.1	Equipamentos	9
2.1.2	Área de Estudo	10
2.1.3	Planejamento e Execução	10
2.1.4	Avaliação da qualidade dos produtos	12
2.2	LEVANTAMENTO DOS PONTOS DE APOIO EM CAMPO	13
2.1.1	Identificação dos pontos e planejamento de rastreo	13
2.1.2	Levantamento geodésico dos pontos de apoio	13
2.3	GERAÇÃO DO MDT E DA ORTOFOTO	15
2.3.1	Geração do mosaico	15
2.3.2	Geração modelo digital do terreno	19
2.3.3	Geração da ortofoto	20
3	AValiação E COMPARAÇÃO DOS PRODUTOS	22
3.1	Determinação e comparação dos POE	22
3.2	Comparação entre Pontos de Controle	24
3.3	Avaliação de qualidade das ortoimagens	25
4	CONCLUSÃO	27
	REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

Em busca de soluções econômicas e inteligentes para o gerenciamento de dados geográficos que venham apoiar administradores públicos e privados na tomada de decisão, principalmente em atividades de conservação, gerenciamento, avaliação de condições, criação de portfólios, publicação e pesquisa em relação ao patrimônio arquitetônico, diversos usuários de Cartografia e áreas afins, em âmbito nacional e internacional, tem buscado a tecnologia de veículos aéreos não tripulados (Vant). Além de ser um equipamento leve, flexível e de baixo custo, quando comparados com sistemas convencionais, pode gerar produtos tridimensionais de precisão confiável, desde que se conheça a potencialidade dos sensores de posicionamento e navegação nele integrados. Vale ressaltar que o uso de modelos 3D nas atividades supracitadas apresenta uma gama de vantagens, tais como, o detalhamento com qualidade posicional e de precisão do objeto mapeado, fácil manipulação dos dados, incluindo a riqueza de informação propiciada pela visualização 3D, possibilita a integração com dados derivados de diversas fontes de informação, entre outros.

De um modo geral, técnicas geodésicas, fotogramétricas e cartográficas podem ser empregadas para gerar produtos para apoiar diversas atividades de engenharia. A Fotogrametria e Sensoriamento Remoto é uma técnica consolidada e amplamente empregada na obtenção de medidas tridimensionais de objetos, resultando na determinação de coordenadas de pontos de interesse com diferentes precisões associadas. Suas aplicações vão desde a medição de pequenos objetos, como peças industriais, artefatos arqueológicos, partes do corpo humano, fachadas de edificações, até o mapeamento aéreo e terrestre da superfície física. Vale ressaltar que a Fotogrametria tem a vantagem de propiciar a aquisição de um grande volume de dados por meio de fotografias, possibilitando que qualquer feição da mesma seja medida posteriormente sem a necessidade de se voltar ao local fotografado.

Com a crescente utilização de Vants é necessário discutir a qualidade posicional dos produtos gerados levando em consideração diversos fatores, como por exemplo, por ser leve o veículo a trajetória do veículo é facilmente deslocada em médias e altas rajadas de ventos e os sistema de posicionamento GPS e navegação INS são de baixa qualidade posicional, além de empregar sensores de imageamento de pequeno formato com baixa resolução espacial e sem rigidez geométrica, devido a instabilidade das distorções de lentes.

O presente trabalho apresenta uma análise dos resultados obtidos com quatro grupos diferentes de configurações baseadas no emprego de dados

brutos advindas da integração GPS/INS próprio do sistema Vant e quantidade e distribuição de apoio de campo no processo de fototriangulação de imagens.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade dos produtos fotogramétricos obtidos pelo sistema Vant empregando configurações de apoio de campo favoráveis e desfavoráveis, com emprego ou não dos dados advindos da integração dos sensores GPS/INS, na fototriangulação de imagens a fim de estudar as limitações da sua potencialidade.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos as seguintes metas, a saber:

- Geração de produtos fotogramétricos (MNEs e ortofotos digitais) empregando os dados brutos propiciados pelos sistemas de posicionamento GPS e navegação INS do Vant na fototriangulação de imagens;
- Geração de produtos fotogramétricos não empregando os dados brutos propiciados pelos sistemas de posicionamento GPS e navegação INS do Vant na fototriangulação de imagens;
- Selecionar diversas configurações favoráveis e desfavoráveis do apoio de campo no processo de fototriangulação de imagens valendo-se ou não do uso dos dados GPS/INS;
- Comparar os resultados obtidos a partir dos produtos gerados nas condições acima especificadas.

1.2.3 Justificativa

As principais justificativas e motivações para o desenvolvimento deste projeto são:

- A demanda por técnicas de reconstrução 3D;

- Desconhecimento da precisão dos sistemas de navegação e posicionamento integrados no Vant;
- O desenvolvimento e aquisição do conhecimento da tecnologia Vant;
- A necessidade de uma ferramenta simples, rápida, precisa e flexível para a reconstrução 3D de objetos;
- A necessidade dos órgãos públicos gestores no estudo de atividades que exigem fácil e rápida atualização;
- A demanda por redução do esforço operacional na sistematização do levantamento fotogramétrico;
- As possibilidades de aplicações comerciais e lucrativas do sistema;
- A necessidade de conhecimento do verdadeiro potencial do sistema Vant;
- Necessidade de estudo das possíveis configurações para reduzir o apoio de campo;
- Pela relevância científica comprovada, devido à importância dispensada pela ISPRS aos objetos de estudo deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Determinação de coordenadas usando sistema GPS

O sistema GPS, denominado mais completamente por NAVSTAR GPS (*NAVigation Satellite with Time And Ranging – Global Position System*), é um sistema de navegação por rádio desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (EUA), com a finalidade de ser o principal sistema de navegação das forças armadas norte-americanas, entretanto, a alta precisão proporcionada pelo sistema fez surgir muitas possibilidades de aplicações práticas por seguimentos civis. Com este sistema é possível um usuário dotado de um receptor GPS determinar a posição do receptor em qualquer ponto sobre a superfície da Terra ou próxima a ela, tendo pelo menos 4 satélites, de uma constelação de 24, intervisíveis em relação ao receptor,

desde que não haja obstáculos que provocam desvios na trajetória do sinal advindo dos satélites, em relação ao receptor. Com isso, é possível o posicionamento em tempo real e a qualquer instante, dentro de um intervalo discreto de tempo, sendo o menor intervalo de tempo mais comum nos receptores de 1 em 1 segundo, ou múltiplos inteiros de 1s. Atualmente existem receptores GPS que coletam até 20 pontos por segundo.

O conceito fundamental do GPS se baseia na medida do que é chamado de pseudo-distância entre cada um dos quatro satélites e o receptor. Com essa configuração, apenas 3 satélites seriam suficientes para determinar a posição, pois haveria um sistema linear de 3 equações a 3 incógnitas (X, Y e Z). Mas erros no sincronismo do relógio do receptor em relação aos satélites exigem que uma nova equação seja acrescida ao sistema.

O GPS tem como observáveis fundamentais a pseudo-distância e a fase da onda portadora, e com isso, há dois tipos de receptores, os topográficos, com precisão maior que o centímetro, e que tem disponível apenas a código C/A (onde está modulada a pseudo-distância, e os geodésicos, que contêm tanto o código quanto a fase da onda portadora). Há vários tipos de técnicas de posicionamento GPS: absoluto, relativo e diferencial. Para propiciar coordenadas com precisão da ordem milimétrica ou centimétrica, a técnica de posicionamento deve ser baseada no método relativo, com a utilização de dois receptores, sendo que, para minimizar efeitos relativos à ionosfera e troposfera, há a necessidade de que pelo menos um deles seja de dupla frequência, e de que este esteja fixado sobre um ponto com coordenadas conhecidas. A utilização de um rastreador GPS de dupla frequência para a medição de coordenadas em um procedimento relativo-cinemático tem a vantagem da redução do tempo de rastreamento e da precisão em relação ao se utilizar um rastreador de uma frequência. O processo relativo só tem eficiência na redução dos erros envolvidos nas observáveis GPS quando o receptor da base conhecida tem uma distância máxima de 20 km em relação ao receptor móvel, pois em distâncias maiores, as condições da troposfera e ionosfera são diferentes para os dois receptores. Maiores detalhes em Mônico (2000).

2.2 Navegação INS

Apesar de o GPS ser uma técnica com grande acurácia posicional, podendo chegar a ordens milimétricas, um fator limitante no uso em Fotogrametria, onde a plataforma se move, é o intervalo de aquisição entre as coordenadas. Considerando um receptor atual, com uma taxa de coleta de 20 Hz e um veículo movendo-se na velocidade de uma pista convencional brasileira, de 80 km/h (22,22 m/s), o intervalo entre duas coordenadas poderia equivaler a um deslocamento de 1,2 metros. Qualquer variação do sincronismo

entre a aquisição da coordenada GPS com o disparo da câmara geraria uma incerteza na posição do centro perspectivo da câmara dentro deste intervalo. Outro problema é a perda de sinal do GPS, que quando ocorre não há informações de posição das câmaras durante todo intervalo de tempo que a perda se mantenha, e ou a necessidade de empregar uma técnica de solução da ambiguidade (MONICO, 2008).

Assim, uma solução bastante utilizada atualmente é integrar os receptores GPS com Sistemas de Navegação Inercial (INS – *Inertial Navigation System*). Uma **Unidade de Medida Inercial** (IMU – *Inertial Measurement Unit*) é um dispositivo eletrônico do INS composto por um conjunto de acelerômetros e giroscópios, que medem e informam a velocidade, orientação e forças gravitacionais da própria IMU, do veículo ou instrumento aos quais a IMU pode ser integrada. A grande vantagem da IMU é que ela é um instrumento auto-contido, ou seja, as medições realizadas por ele independem de fatores externos, o que não ocorre com o receptor GPS, que depende do sinal dos satélites, no mínimo 4, para determinar sua posição. Apesar de uma IMU propiciar medidas altamente acuradas em tempo contínuo, uma desvantagem do sistema de navegação inercial é que suas medidas são degradadas ao longo do tempo devido a erros acumulativos dos sensores, cuja medida do erro é exponencial em relação ao tempo de funcionamento do sistema.

Todavia, a integração GPS e INS irá propiciar não apenas alta acurácia no posicionamento, medida de velocidade e atitudes, mas também irá aumentar significativamente a confiança das determinações, pois ambos os sistemas de posicionamento possuem vantagens que são complementares. O INS pode ajudar ao GPS fornecendo a ele uma posição inicial precisa e informação de velocidade após a perda do sinal do satélite. Ele também pode fornecer a informação de trajetória contínua entre cada estação de coordenada GPS. Por outro lado, o GPS pode ajudar o INS com a estimativa acurada do comportamento de suas estatísticas de erro, ajudando em sua compensação. Com essa integração é possível se obter posições e atitudes acuradas em tempo contínuo, sem o problema da perda do sinal do GPS, que é compensada pelo INS, e sem a degradação das posições e atitudes ao longo do tempo, que é compensada de tempos em tempos pelo GP (CRAMER, et al, 2000).

A integração GPS/INS permite o georreferenciamento direto, ou seja, a medida de posição e atitude de sensores de imageamento, aumentando a eficiência e reduzindo os custos de aquisição dos dados com aeronaves e veículos terrestres. Dentre muitas vantagens, tais como: (a) velocidade da aquisição da orientação exterior; (b) limitação do percurso do sensor durante a aquisição; (c) redução dos problemas de correspondência necessários para a fototriangulação automática (CRAMER, et al, 2000); tem-se ainda a possibilidade de eliminação da necessidade medição de pontos de apoio no

terreno. A integração GPS/INS pode propiciar a determinação das posições dos sensores no instante de aquisição de dados ao longo da via a ser levantada. Estes sensores podem ser de imageamento ou outro tipo de sensor que se queira embarcar no veículo, que varia de acordo com o tipo de informação que se quer levantar do terreno. Por exemplo, podem ser utilizados: sistemas *laser scanning*, RADAR, e outros.

A grande dificuldade desta integração de múltiplos sensores é determinar o sincronismo entre eles de modo a se conseguir atribuir ao dado a sua posição em relação ao instante em que ele foi adquirido. Também é a determinação das diferenças entre os parâmetros de orientação entre cada um dos sensores. Para isso são necessários métodos de calibração dos sistemas.

2.3 Sistemas microeletromecânicos (MEMs)

De acordo com Lima (2005) os sensores inerciais baseados em MEMS (em inglês, *Electro-Mechanical Systems*) vêm substituindo alguns dos seus precursores, pois apresentam menor tamanho, menor peso, menor consumo de energia, são de baixo custo e alta confiabilidade de operação, quando comparados aos sensores convencionais. A principal característica que ainda favorece os sensores convencionais é a precisão das medições que ainda supera a precisão obtida com os dispositivos MEMS, no entanto esta diferença vem se tornando cada vez menor.

A partir do início da década de 1990 giroscópios e acelerômetros com tecnologia MEMS passaram a ser amplamente utilizados em aplicações automotivas. Posteriormente, foram iniciados programas relacionados ao desenvolvimento de sensores de alta resolução, sensibilidade, bem como sensores que suportam valores elevados de aceleração, tanto para uso em sismômetros quanto para armamentos e equipamentos militares (GUSTAFSON et al. 1995; DOWDLE et al. 1996; GAI 1998; KOUREPENIS et al. 1998; ANDERSON et al. 2001). Esses dispositivos estão ganhando popularidade em função da gama de aplicações em que se encontram, tais como: na área militar (monitoramento de aeronaves e veículos não controlados); na área da computação (realidade virtual); comercial (navegação pessoal, controle esportivo etc); nas Ciências Geodésicas (posicionamento e navegação); entre outros.

Atualmente, o uso da tecnologia MEMS tem sido bastante difundido nas Ciências Geodésicas, principalmente no que tange as aplicações para unidades de mapeamento móvel para ambientes internos e externos, cujos principais trabalhos divulgados são os que seguem: Shin (2001); Alshawa et al.

(2007); Alshawa et al. (2008); Piras et al. (2008); Alshawa et al. (2009); entre outros.

2.4 Problema de orientação de imagens

O problema da orientação de imagens é fundamental em Fotogrametria, visto que possibilita o georreferenciamento da própria imagem ou de feições cartográficas coletadas sobre a mesma. De acordo com Atkinson (1996) e Mikhail et al. (2001) quando se pretende extrair medidas precisas de objetos contidos na cena por meio da utilização de técnicas fotogramétricas, duas etapas de orientação são necessárias: a orientação interior; e a orientação exterior de imagens.

De acordo com Andrade (1998), a etapa de orientação interior é definida como a recuperação da geometria interna da câmara no instante da sua exposição para a tomada da fotografia, bem como seus respectivos desvios-padrão. No caso do uso de câmaras digitais basta aplicar uma transformação do sistema de coordenadas com origem no centro da imagem para o sistema referencial fotogramétrico, com uma translação dos eixos para o ponto principal câmara, seguido de uma reflexão das coordenadas Y em torno do eixo X e a aplicação de um fator de escala às coordenadas da imagem, correspondente ao tamanho do elemento sensor (GALO, 1993; REISS, 2002).

Os parâmetros de orientação interior da câmara podem ser determinados por meio de um processo conhecido como calibração de câmaras (BROWN, 1966). O conjunto de parâmetros a ser recuperado corresponde: a distância focal calibrada da câmara (f); as coordenadas do ponto principal calibrado (x_0, y_0); os coeficientes de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3); as componentes tangencial e radial da distorção descentrada das lentes (P_1, P_2); a refração fotogramétrica; e – no caso de uso de câmaras digitais de pequeno formato -, os parâmetros de afinidade (A, B). As distorções radial simétrica e descentrada são definidas pelas imperfeições na construção de lentes perfeitamente esféricas e não alinhamento dos eixos óticos das lentes que compõem o sistema de lentes, respectivamente; cujas equações polinomiais e as equações de correções são as que seguem:

$$\partial_r = k_0 r + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots \quad (1)$$

$$\delta x = \frac{(x_i' - x_0) \partial_r}{r}; \delta y = \frac{(y_i' - y_0) \partial_r}{r} \quad (2)$$

Onde, ∂_r é a distorção radial simétrica; k_0, k_1, k_2, k_3 são os coeficientes de distorção radial descentrada; r é a distância radial do ponto principal de melhor

simetria; e x_i', y_i' são coordenadas referenciadas ao sistema de coordenadas com origem no centro da imagem (ver Fig. 1).

$$\begin{aligned}\delta_{dx} &= [P_1(r^2 + 2(x_i' - x_0)^2) + 2P_2(x_i' - x_0)(y_i' - y_0)] \\ \delta_{dy} &= [P_2(r^2 + 2(y_i' - y_0)^2) + 2P_1(x_i' - x_0)(y_i' - y_0)]\end{aligned}\quad (3)$$

Onde, P_1, P_2 são os coeficientes de distorção descentrada. Este modelo é conhecido como modelo de Conrady-Brown.

Na literatura são encontrados, basicamente, dois métodos de calibração: métodos de laboratório; e métodos de campo. De acordo com Andrade (1998) os métodos de campo oferecem soluções mais completas na calibração de câmaras, permitindo a recuperação de todos os parâmetros simultaneamente, contando ainda com uma superabundância de observações que torna possível um controle estatístico do processo. Os métodos de campo são divididos em: campos mistos; e câmaras convergentes.

Em ambos os métodos de campo supracitados, os parâmetros de orientação interior da câmara podem ser determinados com uso de feições pontuais ou lineares, por meio de processos fotogramétricos conhecidos como calibração *on-the-job* e autocalibração. O primeiro consiste de um ajustamento por feixes de raios perspectivos considerando as equações de colinearidade com parâmetros adicionais com uso de apoio de campo (CLARKE e FRYER, 1998). A segunda é tratada como uma extensão do conceito de calibração *on-the-job*; no entanto, não é necessário o uso de apoio de campo para a realização da calibração, sendo somente requerido fixar a posição e orientação de uma das câmaras e uma escala no espaço objeto, o que permite fixar um referencial no espaço objeto. Para maiores detalhes ver (FRAYER e BROWN, 1986; GALO, 1993; FRASER, 1997).

Quando extraídas as fotocoordenadas nas imagens as mesmas devem ser corrigidas dos efeitos sistemáticos de formação da fotografia, com a correção das distorções das lentes. Na Fotogrametria terrestre, os efeitos de refração fotogramétrica e de curvatura terrestre, são desprezados por não ser considerados significativos, dada a curta distância entre os objetos e o sensor imageador.

O processo de determinação dos parâmetros de orientação exterior da câmara pode ser dividido em três tipos básicos, isto é: 1) *Direto* – nesse caso, os parâmetros de orientação são obtidos diretamente usando, por exemplo, a integração de dados derivados de GPS e INS, que permitem, respectivamente, a medida da posição (X^C , Y^C e Z^C), e da atitude (κ , φ e ω) da câmara no instante de tomada da imagem; 2) *Indireto* – nesse caso, um modelo matemático, como o de colinearidade, e informações de apoio de campo

medidas nos espaços-imagem e -objeto, são utilizados para estimar, geralmente pelo MMQ (Método dos Mínimos Quadrados), os parâmetros de orientação exterior da câmera; e 3) *Híbrido* – esse é o caso quando nem todos os parâmetros de orientação exterior são medidos diretamente (por exemplo, só a posição de tomada medida pelo GPS) ou quando todos são medidos com precisão insuficiente, havendo a necessidade de refiná-los, a posteriori, com algumas informações de controle de campo e com uso do segundo tipo de metodologia.

A modelagem da geometria da imagem é necessária para estabelecer as relações entre feições contidas nos espaços imagem e objeto. Vários modelos matemáticos foram propostos para esta finalidade e a equação de colinearidade é o modelo mais conhecido na comunidade fotogramétrica. O modelo de colinearidade direta é definido pela colinearidade entre o CP da câmara, um ponto no espaço imagem e seu correspondente no espaço objeto. A Figura 1 mostra a geometria do modelo de colinearidade direta.

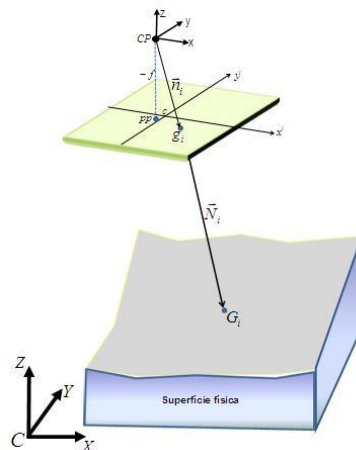


Figura 1 – Geometria do modelo de colinearidade direta

Na Figura 1, CP é o centro perspectivo da câmara; $cx'y'$ é o sistema de coordenadas com origem no centro da imagem; $CPxyz$ origem do sistema referencial fotogramétrico de coordenadas. Os eixos x e y do sistema referencial fotogramétrico são paralelos e de mesmo sentido dos eixos x' e y' ; $CXYZ$ o sistema referencial de coordenadas tridimensionais no espaço-objeto; f é a distância focal calibrada da câmara; g_i' ponto imagem, cujas coordenadas no sistema $cx'y'$ são $x_i' y_i'$; e G_i ponto homólogo no espaço-objeto com coordenadas $[X_G \ Y_G \ Z_G]^T$.

Na Figura 1, o vetor visada imagem (\vec{n}_i) é formado por pp e o ponto imagem g_i' , dado pela expressão que segue:

$$\vec{n}_i = [x_i' - x_0, y_i' - y_0, -f]^T \quad (4)$$

Onde, x_0, y_0 são as coordenadas do ponto principal. O vetor visada no espaço-objeto (\vec{N}_i) é definido por $\overrightarrow{CPG_i}$, como segue:

$$\vec{N}_i = [X_G - X^c, Y_G - Y^c, Z_G - Z^c]^T \quad (5)$$

Sendo, X^c, Y^c, Z^c os parâmetros de translação do CP da câmara. O vetor \vec{n}_i é paralelo ao vetor \vec{N}_i , desde que sejam considerados uma diferença angular e um fator de escala λ . Sendo assim, o modelo matemático básico é definido como segue:

$$\vec{n}_i = \lambda R \vec{N}_i \quad (6)$$

A Equação (6) pode ser escrita na forma matricial, como segue:

$$\begin{bmatrix} x_i' - x_0 \\ y_i' - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_G - X^c \\ Y_G - Y^c \\ Z_G - Z^c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Com as devidas manipulações na Equação 7 tem-se a equação de colinearidade direta, a saber:

$$\begin{aligned} Fx &= x_i' - x_0 - \Delta_x + f \frac{r_{00}(X_G - X^c) + r_{01}(Y_G - Y^c) + r_{02}(Z_G - Z^c)}{r_{20}(X_G - X^c) + r_{21}(Y_G - Y^c) + r_{22}(Z_G - Z^c)} = 0 \\ Fy &= y_i' - y_0 - \Delta_y + f \frac{r_{10}(X_G - X^c) + r_{11}(Y_G - Y^c) + r_{12}(Z_G - Z^c)}{r_{20}(X_G - X^c) + r_{21}(Y_G - Y^c) + r_{22}(Z_G - Z^c)} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

onde Δ_x, Δ_y somatório dos efeitos sistemáticos provenientes das distorções provocadas pelo sistema de lentes e os parâmetros de afinidade para as componentes x e y, respectivamente; r_{ij} são os elementos da matriz de rotação (R) em função dos ângulos de euler, para $i = j = 0 \dots 2$. Maiores detalhes ver Lugnani (1987).

2.4.1 Fototriangulação de imagens

A fototriangulação de imagens é uma técnica fotogramétrica para a determinação de coordenadas de pontos num referencial específico, que tem como maior objetivo fornecer coordenadas precisas para os pontos necessários na orientação absoluta de modelos fotogramétricos para restituição e geração de ortofotos. Estes pontos, por razões geométricas, estão situados em áreas em entorno dos chamados pontos de Gruber (Andrade, 1998).

De acordo com Andrade (1998), os critérios de aceitação nas medições dos pontos na fototriangulação são muito restritos e exigem um forte controle estatístico. Na fototriangulação com pré-refinamento são comuns, na prática, dois procedimentos (Lugnani, 1987):

- (1) formação de modelos independentes, analiticamente e o ajustamento dos modelos em faixas ou ajustamento simultâneo em bloco; e
- (2) o ajustamento simultâneo dos feixes de raios.

Neste trabalho utilizou-se o procedimento do ajustamento das feixes de raios.

De acordo com Lugnani (1987), o tratamento matemático na fototriangulação é feito através da equação de colinearidade (ver item 2.5.1), que possui algumas aplicações, sendo interessante tratar neste trabalho apenas da resseção espacial.

A resseção espacial de uma foto consiste em (Lugnani, 1987):

- a) dadas as fotocoordenadas de n pontos ($n > 3$); as coordenadas dos correspondentes no espaço objeto; a distância focal; e os valores aproximados dos C.P. e da inclinação da câmara;
- b) calcular as correções dos parâmetros de orientação exterior da câmara (C.P. e inclinação da câmara).

Neste caso as equações de colinearidade constituem o modelo que relaciona espaço imagem e espaço objeto.

2.4.2 Apoio Fotogramétrico

Segundo Andrade (1998), a finalidade do apoio terrestre, para o levantamento fotogramétrico, está na materialização do referencial com que se deseja trabalhar. Desta forma, é indispensável determinar uma rede, suficientemente densa de pontos de apoio, ou seja, de pontos facilmente identificáveis nas fotografias e convenientemente distribuídos, dos quais se

conhecem as exatas posições planimétricas no terreno e suas respectivas altitudes (h), para que se possa solucionar o problema de rigidez geométrica. Uma das maneiras para solucionar este problema, é incluir mais controle altimétrico nas áreas de superposição das faixas, uma vez que a menor rigidez geométrica reside na altimetria nessas áreas.

De acordo com Andrade (1998), a fototriangulação exige no mínimo um ponto de controle tridimensional (E, N, h) a cada 3 ou 5 bases, na região periférica dos blocos, e pontos altimétricos distribuídos no centro do bloco, dando suporte para a fototriangulação, onde a propagação de erros é muito forte, necessitando de um adensamento maior dos pontos de controle como mostra a figura 2 (Andrade, 1998).

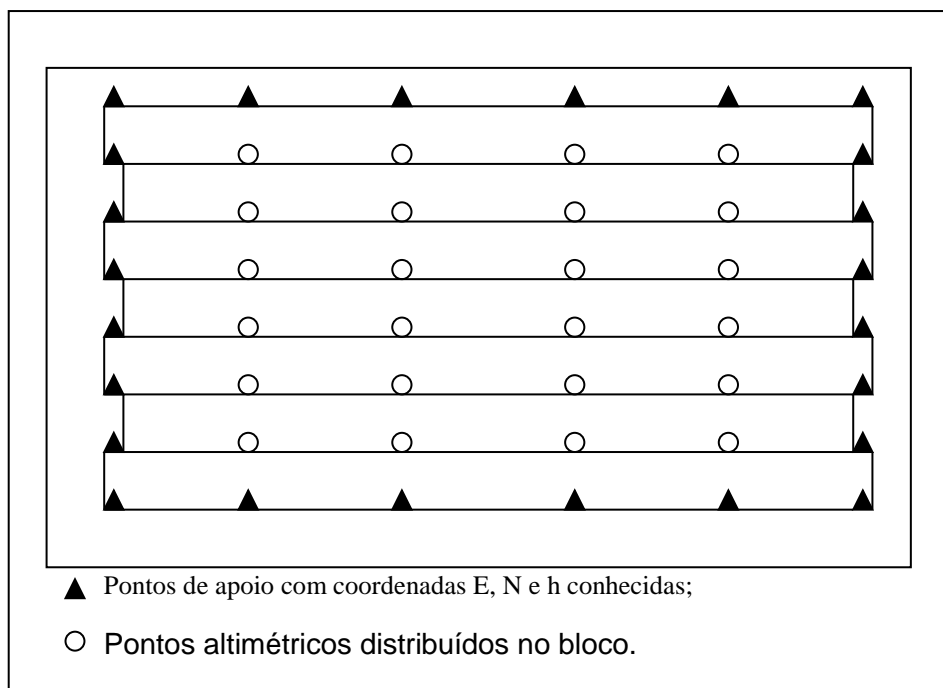


FIGURA 2 – Distribuição do apoio terrestre sobre um bloco.

Um levantamento completo no terreno, de tais pontos de controle, por meio de métodos topográficos convencionais é uma tarefa difícil, de alto custo e demorada. Assim, atualmente são muito utilizados, para o apoio de campo, equipamentos que fazem uso da tecnologia GPS (*Global Positioning System*). No item 2.3 serão descritos sucintamente os métodos utilizados neste trabalho para levantamento de pontos, utilizando a tecnologia GPS.

2.5 Correspondência entre imagens

A identificação e medição de pontos homólogos em pares de imagens conjugadas é um dos procedimentos fundamentais da Fotogrametria. No passado essa atividade era feita exclusivamente por meio de um operador experiente que fazia essa identificação visualmente. Com o avanço computacional, a demanda pela automação dos processos fotogramétricos tem crescido consideravelmente. No entanto, a automação não é uma tarefa simples e têm agregado esforços de várias áreas do conhecimento, principalmente os referentes aos problemas computacionais.

Schenk (1990) classificou em duas classes os problemas computacionais, isto é, Classe A: são problemas complexos de difícil solução operacional, porém de fácil solução computacional, tais como os problemas métricos da Fotogrametria; e Classe B: são problemas de difícil solução computacional, no entanto, são trivialmente realizados pelo operador humano, como por exemplo, a compilação de mapas e cartas topográficas. Nestes problemas os aspectos semânticos são prevaletidos, sendo considerados de difícil formulação algorítmica. Portanto, os problemas da Classe B são focos de preocupação da automação completa dos processos fotogramétricos, cujas técnicas de visão computacional possuem potencial natural para solucionar alguns problemas. As vantagens da automação dos processos fotogramétricos são as que seguem:

- A minimização do tempo gasto para a geração de modelos tridimensionais;
- A redução de erros grosseiros causados pela operação de usuários não experientes, tornando possível a operação dos sistemas fotogramétricos por pessoas com um mínimo de treinamento;
- A redução dos custos com o equipamento restituidor, tornando possível a operação em computadores pessoais; dentre outras.

A correspondência automática estabelece a correspondência entre primitivas extraídas de duas ou mais imagens digitais desde que elas descrevam ao menos parcialmente a mesma cena (SHENK, 1999).

Heipke (1996) classifica os métodos de correspondência em duas categorias: correspondência baseada em áreas, utilizando os tons de cinza de uma subimagem as ser encontrada na outra imagem; correspondência baseada em feições, sendo estas extraídas das imagens. Schenk (1999) descreve três tipos de correspondências: baseada em área; baseada em feições; e baseada em símbolos.

Basicamente, um dos problemas da correspondência é selecionar o tipo de primitiva mais adequada de acordo o tipo de superfície a ser reconstruído, extrair essa primitiva da imagem de referência, e buscar a primitiva correspondente na imagem de busca. Alguns problemas da correspondência baseada em áreas de imagens são discutidos em Schenk (1999), sendo alguns deles:

- Falhas na localização da matriz de referência: nesta situação, a janela de referência pode não ter sido localizada em uma região propícia para uma boa correlação;
- Dimensão da janela de referência: quanto maior a janela de referência, maior a possibilidade de ela ser unívoca, entretanto, maior será também a possibilidade de distorções geométricas;
- Localização e dimensão da janela de pesquisa: uma janela de pesquisa deve ser estabelecida para reduzir o espaço de busca, diminuindo o custo computacional;
- Critérios para a tomada de decisão quanto à similaridade entre as primitivas.

Em situações onde a orientação das imagens é conhecida, como é o caso de estéreo-câmaras, em que a orientação relativa pode ser determinada previamente, é possível calcular a posição tridimensional da primitiva selecionada e utilizar métodos de redução do espaço de busca para a correspondência.

A redução do espaço de busca permite buscar em apenas uma região pré-selecionada. Uma das maneiras mais comuns é selecionar uma janela da imagem de referência e buscar sua correspondência em uma janela um pouco maior da imagem de busca. A melhor escolha para a janela de pesquisa é a menor possível, para evitar o número de cálculos, porém, a janela selecionada pode não conter a correspondência pretendida (SCHENK, 1999).

Um dos métodos mais utilizados na Fotogrametria é a utilização da linha epipolar. Essa geometria estabelece que, se houver a orientação relativa entre as imagens, então haverá um plano epipolar formado pelos CP das estações da câmara, as coordenadas de dois pontos homólogos em ambas as imagens e a projeção do ponto 3D no modelo. A intersecção do plano epipolar com cada uma das fotografias de um par gerará o que é chamado de linhas epipolares conjugadas (Figura 1). Utilizando essa geometria é possível reduzir o espaço de busca para um espaço unidimensional, ao contrário do que ocorreria com a utilização de janelas, em que o espaço é bidimensional. A utilização de

informações altimétricas do terreno pode reduzir ainda mais o espaço de busca da geometria epipolar, sendo possível projetar os limites máximos e mínimos desta linha (SCHENK, 1999).

Outras maneiras de se reduzir o espaço de busca é utilizar mapas de paralaxes, hierarquia de pirâmides de imagens, multi-escala e espaço escala. Maiores detalhes podem ser encontrados em: Schenk (1999) e Costa et al (2007); Klingner (1971); Burt (1981) e Linderberge (1994). Shenk (1999) também aborda outros tipos de correspondência entre imagens, que serão pesquisados a abordados nos desenvolvimento do projeto, bem como baseado em outros autores (ACKERMAN, 1984; GRUEN et al, 1986; JAIN et al, 2000; GONZALEZ e WOODS, 2000; REISS, 2007).

2.6 Geração de Ortofoto Digital

Os procedimentos fotogramétricos são operações que visam transformar a projeção perspectiva central da fotografia em projeção ortogonal. Um tipo de procedimento econômico e viável em fotogrametria é a geração de ortofotos digitais, que é uma retificação da fotografia de maneira diferencial. Para este processo é necessário um MDT do terreno fotografado, bem como o conhecimento da atitude da aeronave (κ , φ , ω), as coordenadas do CP (Centro Perspectivo) no momento da tomada das fotografias e os parâmetros de orientação interior envolvidos.

Os modelos fotogramétricos utilizados para geração de ortofoto digital são as equações de colinearidade na forma direta e inversa. Esses modelos baseiam-se no princípio de colinearidade. O modelo de colinearidade na forma inversa realiza a transformação dos pontos no referencial da imagem para o referencial do Terreno. O modelo na forma direta realiza a transformação dos pontos no referencial do terreno para o referencial da imagem.

2.6.1 Metodologias Existentes para Geração de Ortofoto Digital

2.6.1.1 Método Direto

O método direto consiste inicialmente em projetar os pixels da imagem de entrada para a ortofoto digital aplicando-se as correções de erros

sistemáticos e o modelo fotogramétrico na forma inversa, gerando uma malha irregular no referencial da ortofoto digital. Posteriormente, uma regularização dessa malha é necessária (Dal Poz e Santos, 1998).

Pode-se, então, identificar 3 etapas: a) transformação do referencial da imagem digital para o referencial fotogramétrico; b) transformação do referencial fotogramétrico para o referencial da ortofoto digital; e c) reamostragem da malha da ortofoto digital.

De acordo com Dal Poz e Santos (1998), a primeira etapa deste método refere-se à correção dos erros sistemáticos que afetam a imagem de entrada. Conforme já foi descrito, esta correção é feita através de uma transformação afim no plano, seguida de um deslocamento do ponto principal, correções das lentes e refração fotogramétrica. Para a segunda etapa do método é necessário conhecer os parâmetros de orientação exterior (κ , φ , ω , X_0 , Y_0 , Z_0), a distância focal da câmara e informação altimétrica. A terceira etapa consiste na regularização da malha da ortofoto, pois os pontos gerados na etapa anterior não coincidirão com os pixels da ortofoto digital. A figura 7 representa o princípio do método direto.

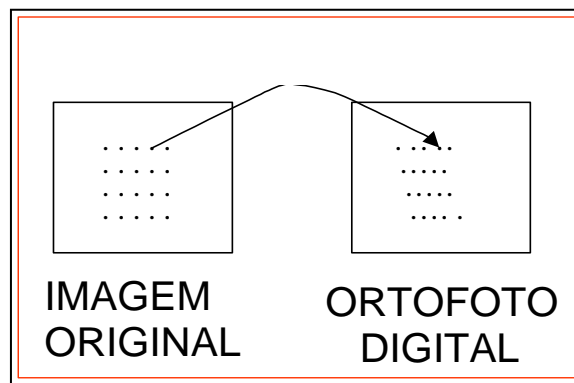


FIGURA 7 – Princípio do método direto para Geração de Ortofoto

2.6.1.2 Método Indireto

O método indireto é o mais usado e consiste em projetar os pixels da ortofoto digital para a imagem digital é um processo “inverso” de correção de erros sistemáticos. Em outras palavras, é necessário introduzir todos os erros sistemáticos para encontrar, na imagem bruta de entrada, a posição correta do ponto projetado. Entretanto, é usual realizar na prática apenas a transformação do referencial fotogramétrico para o fiducial (translação do pp) e deste para o digital (L, C) (transformação afim). Posteriormente é necessário aplicar algum método de interpolação de tom de cinza (Dal Poz e Santos, 1998).

De acordo com Dal Poz e Santos (1998), este método é, portanto, composto por 3 etapas: 1) transformação de pixels do referencial da ortofoto digital para o referencial fotográfico; 2) transformação do referencial fotográfico para o referencial da imagem digital; e 3) reamostragem.

O método indireto realiza, em relação ao método direto, um processo inverso para transferência dos tons de cinza da imagem de entrada para a ortofoto digital. A segunda etapa corresponde à primeira etapa do método direto, só que agora é realizado no sentido “inverso”, permitindo a transformação dos pixels projetados do referencial fotográfico para o referencial da imagem digital. Como mostra a figura 8, o resultado das 2 primeiras etapas é uma malha irregular, a qual não coincide com a malha regular da imagem de entrada. A terceira etapa do método consiste na reamostragem dos pixels da ortofoto digital.

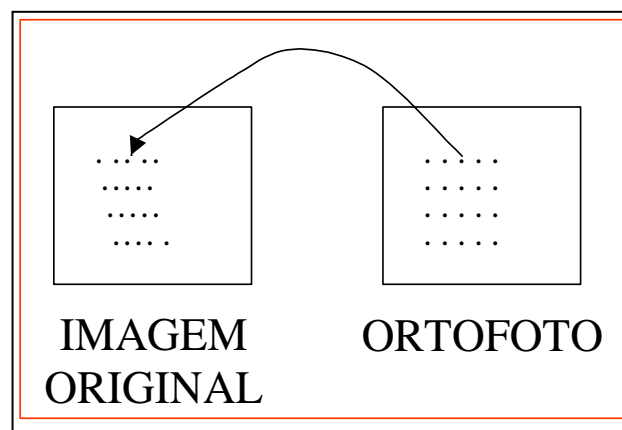


FIGURA 8 – Princípio do método indireto.

2.6.1.3 Métodos de Interpolação

Quando se utiliza os métodos para geração de ortofoto digital, os pixels que são transformados não coincidem com os pixels da imagem original. Por este motivo é necessário a realização de uma reamostragem, que pode ser feita através de uma das técnicas mais usuais para esta finalidade :

- Vizinho mais próximo : exige menor esforço computacional e não altera os números digitais originais presentes na imagem;
- Bilinear : produz aparência homogênea para a imagem, minimizando o efeito de disjunção;
- Convolução cúbica : provoca uma aparência homogênea e menor efeito de disjunção.

Existem dois tipos de malhas a se considerar no MDT, quando se trata de geração de ortofotos:

- malha irregular; e
- malha regular.

No caso deste trabalho utilizou-se a malha regular por se tratar do método indireto e a interpolação bilinear, por ser mais consistente e fornecer poucos ruídos na imagem interpolada.

2.6.1.4 Malha Regular e a Interpolação

Em se tratando do método indireto, o tom de cinza de cada pixel da ortofoto é obtido transformando-o para o referencial da imagem digital de entrada. Entretanto, esse ponto não coincide com um pixel da imagem de entrada, implicando na necessidade de interpolação do tom cinza. A técnica

mais simples é o vizinho mais próximo, o qual consiste em adotar o tom de cinza do pixel mais próximo da imagem de entrada.

Conforme mostra a figura 9, o interpolador bilinear baseia-se nos 4 pixels mais próximos ($g(i, j)$, $g(i, j+1)$, $g(i+1, j)$ e $g(i+1, j+1)$) do ponto $g(i', j')$, onde será interpolado o tom de cinza.

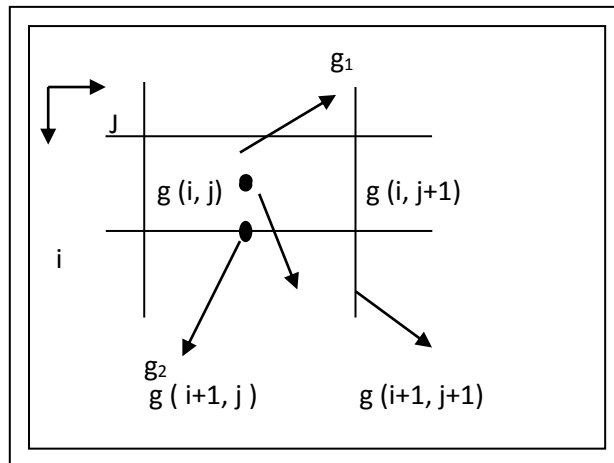


FIGURA 9 – Princípio da interpolação bilinear.

Nesta técnica são seguidos basicamente 2 passos:

1^o) De acordo com Richards (1986), o primeiro passo consiste em encontrar interpoladores para $g_1(i, j')$ e $g_2(i+1, j')$ (tons de cinza).

$$g_1(i, j') = j' * g(i, j+1) + (1 - j') * g(i, j) \quad (07)$$

$$g_2(i+1, j') = j' * g(i+1, j+1) + (1 - j') * g(i+1, j) \quad (08)$$

2^o) O segundo passo consiste em encontrar interpoladores para $g(i', j')$.

$$g(i', j') = (1 - i') * g_1(i', j') + i' * g_2(i'+1, j') \quad (09)$$

2.6.2 Modelo Digital do Terreno

O MDT, é o elemento crítico para a geração da ortoimagem digital no sentido de sua precisão: por ser a informação que representa o terreno. Assim, quando se tem um MDT errado o ponto imagem será projetado na ortoimagem digital na posição errada; esta situação é mostrada na figura 10 abaixo.

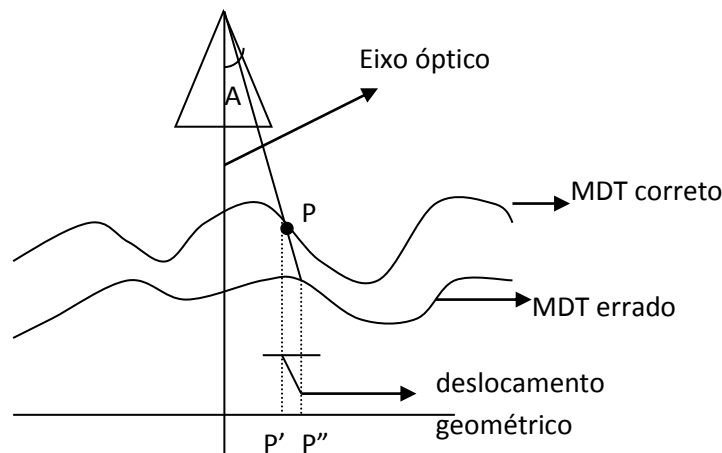


FIGURA 10 – Projeção errada do ponto na ortoimagem digital.

onde,

- P : ponto no terreno;
- P' : ponto projetado na posição correta na ortoimagem digital; e
- P'' : ponto projetado na posição errada na ortoimagem digital.

De acordo com Almeida (1989), o MDT deve-se apresentar como um conjunto de altitudes do terreno, configurado numa malha regular. Para se obter uma ortoimagem digital com boa precisão e resolução é fundamental que se tenha um MDT também de boa qualidade.

De acordo com Brito (1997), a relação posicional do erro em ortoimagens digitais podem ser descritas pela seguinte equação:

$$e_{(o)} = e_{(MDT)} \times \tan A \quad (10)$$

onde,

- $e_{(o)}$: erro posicional na ortoimagem;
- $e_{(MDT)}$: erro vertical no MDT; e
- A : angulo de visão do centro da ortofoto em graus.

Existem vários modos para coleta de MDTs, através de cartas, diretamente no campo e através de perfis. Atualmente, a coleta de MDTs pode ser realizada com grande economia, precisão e rapidez devido a automação da maioria dos processos inseridos nos softwares fotogramétricos digitais, fornecendo uma variedade de métodos para a coleta de informações das altitudes do terreno (Andrade, 1998).

2.7 Controle de qualidade

O controle de qualidade se resume na verificação da consistência entre as observações e o modelo matemático, bem como identificar a presença de erros grosseiros não modelados para que os mesmos sejam eliminados (TEUNISSEN, 1998).

O controle de qualidade está vinculado à execução de testes estatísticos, onde uma determinada condição, denominada hipótese nula (H_0), é estabelecida para os parâmetros a serem examinados. Os testes estatísticos são baseados em testes de hipóteses.

O teste de hipótese pode ser entendido como uma regra de decisão para aceitar ou rejeitar uma suposição, que pode ser verdadeira ou falsa, quanto ao valor de um parâmetro populacional para uma dada probabilidade. Devido à dificuldade de se examinar a população inteira, utiliza-se uma amostra

aleatória. Com isto, formula-se a denominada hipótese nula (H_0) para os parâmetros a serem testados.

A rejeição de H_0 significa a aceitação de uma hipótese alternativa (H_a), que advém da insuficiência de evidências para rejeitar H_0 . Sendo assim, ao se acatar o resultado de um teste de hipóteses, cometem-se dois tipos de erros: o erro α e o erro β , no qual o erro do tipo α , também denominado de nível de significância, é a probabilidade de se rejeitar uma hipótese que na realidade é verdadeira. O erro do tipo β , é a probabilidade de se aceitar uma hipótese que na realidade é falsa (TIBERIUS, 1998).

Geralmente a etapa de detecção de erros é a etapa mais importante no controle de qualidade. Nesta etapa testa-se a hipótese H_0 contra H_a , com a finalidade de verificar a consistência entre o modelo matemático e as observações.

O processo de estimação também fornece o vetor dos resíduos das observações que possuem uma mistura de todos os tipos de erros. Os erros sistemáticos são passíveis de modelagem, enquanto os erros aleatórios são de natureza desconhecida e os erros grosseiros, geralmente, requerem o uso de técnicas de detecção e eliminação aplicada aos resíduos provenientes do processo de estimação.

Por isso, os resíduos das observações ajustadas no processo de estimação devem ser analisados estatisticamente e o processo mais adequado é o uso de alguma técnica de controle de qualidade das observações. As técnicas mais comumente utilizadas para análise de dados paramétricos são: Qui-Quadrado; *t-Student*; *data-snooping*, método *danishing*, entre outras. Algumas das bibliografias mais utilizadas na área são: Baarda (1968); Mikhail e Ackermann (1976); Gemael (1994); Teunissen (1998); Dalmolin (2000).

Segundo Gemael (1994), o teste estatístico Qui-quadrado (χ^2_α) amostral é calculado por:

$$\chi_a^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma^2} r \quad (9)$$

Onde, χ_a^2 é o qui-quadrado amostral, σ^2 é a variância da observação de peso unitário a priori e r é o grau de liberdade no ajustamento ($n - u$).

A estatística Qui-quadrado populacional é obtida em função de r e do nível de significância (α), através de uma tabela de dupla entrada (bimodal). Deste modo os parâmetros ajustados são rejeitados nos testes estatísticos ao nível de confiança α se não cumprir com a condição imposta por:

$$\chi_a^2 < \chi_{(r,\alpha)}^2 \quad (10)$$

Onde, $\chi_{(r,\alpha)}^2$ é o qui-quadrado tabelado (ver tabelas estatísticas).

Se as observações forem rejeitadas neste teste, existem erros grosseiros a serem analisadas ou retiradas do processo de ajustamento.

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1. Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais:

- 01 Microcomputador Pentium II MMX 450 MHZ/256 MB com 9 GB de Winchester;
- 01 sistema APS;
- 01 sistema LPS;
- 01 Vant modelo SMARTBIRD X-260;
- 14 imagens digitais adquiridas em vôo com GSD de 6 cm;
- 01 câmara digital Sony NEX3 de 14 MegaPixels;
- 01 sistema MEMs de integração GPS/INS;
- Dados SRTM (*Shuttle Radar Terrain Mapping*);
- 01 par de receptores GPS Leica 900.

O Vant modelo SMARTBIRD X-260 (Fig. 2) é um sistema estruturalmente fabricado em fibra de carbono e polipropileno que permite a tomada e fotos com alta resolução de forma rápida e precisa. É equipado com câmera digital de 16 MegaPixels, embarcado com sensores INS, GPS e um piloto automático que permite a realização de voos autônomos a partir do lançamento até o pouso (Softmapping, 2012). As principais características do Vant utilizado são:

- Envergadura: 2,60 metros;
- Dimensões: 260 cm x 80 cm x 15 cm;
- Área da asa: 4000 cm²;
- Velocidade de lançamento: 75 km/h;
- Velocidade de cruzeiro: 85 km/h;
- Velocidade máxima: 125 km/h;
- Velocidade de pouso: 60 km/h;
- Altitude máxima de voo: 1000 m;
- Peso: 6 kg;
- Bateria de Lithium: para operação de até 60 minutos;
- Câmera: 14 MP com lente de 16mm;
- Vento: resistência de até 80 km/h;
- Rádio de 2.4Hz para alcance de até 14 km de rádio de operação.

FIGURA 2: VANT modelo SmartBird 260 (Fonte: SoftMapping, 2012)



A câmera acoplada ao Vant é uma Sony NEX3, 14MP, tamanho do sensor 23,4 x 15,6 mm, que gera imagens de tamanho 4592x3056 pixels. A distância focal da lente é de 16 mm. Sistemas de posicionamento e navegação GPS/INS estão acoplados na placa controladora de voo, com precisão nominal na ordem de 10 m e 0.3°, respectivamente.

3.2 Área de Estudo

A área de estudo foi a fazenda do Canguiri da UFPR, compreendida aproximadamente entre as coordenadas leste-oeste = 687967.53 e 688644.80 e norte-sul = 7191192.76 e 7190659.72 no sistema UTM 22S, compreendida no município de Quatro Barras próximo ao parque Castelo Branco.

FIGURA 3: Imagem aérea da área de estudo FONTE: o Autor 2013.



3.3 Método

Para a execução de um projeto fotogramétrico, usualmente, é seguido um fluxograma de etapas. Atualmente, com o uso de câmaras digitais de pequeno, médio e grande formato. O fluxograma é dividido em duas partes, ou seja, um fluxo de etapas baseado no uso de câmaras métricas convencionais e baseado em uso de câmaras digitais. A Figura 4 apresenta o fluxograma para a execução de um projeto fotogramétrico.

FIGURA 4: Fluxograma para um projeto fotogramétrico. (Fonte: Adaptado de Santos et al. 2000)

Também é avaliada a localização para a decolagem e pouso da aeronave, juntamente com possíveis obstruções físicas para a trajetória de vôo. Então é determinado o traçado de vôo (Fig. 5) que deverá ser realizado pelo sistema autônomo do sistema Vant, levando em consideração a velocidade dos disparos das fotografias, e a sobreposição pretendida entre fotografias. Todo este procedimento foi realizado pela empresa Softmapping de Brasília, a qual concedeu o material para a realização deste estudo.

FIGURA 5: Traçado da rota de vôo para aquisição das imagens (Fonte: Adaptado da Empresa SoftMapping 2013).



O planejamento de vôo foi realizado estimando uma escala da foto aproximada de 1:2000, gerando um produto de ortofoto na escala 1:250 com tamanho aproximado do pixel no terreno de 6cm, dados baseados no FHA2008. Desta forma altitude de vôo estimada ficou em aproximadamente 230m.

3.3.2 Levantamento de apoio de campo

Como mostra a Figura 5 foi feita uma identificação das áreas de sobreposição das fotografias e as áreas onde possuía recobrimento por um maior número de fotografias. Dentro das determinadas áreas pontos homólogos foram manualmente identificados em todas as imagens. A partir desta determinação foi gerado um croqui de possíveis pontos de rastreo em campo.

A próxima etapa foi a determinação das coordenadas no terreno com rastreo GPS. Um par de receptores GPS leica 900 foi empregado para o

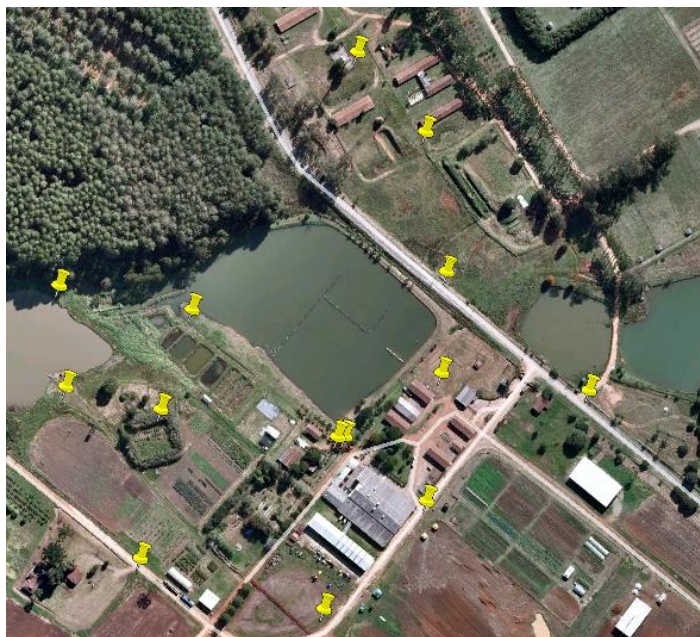
levantamento dos dados sob os pontos de interesse. Como a precisão dos pontos de controle deve ser na ordem subcentimétrica, Monico (2008) comenta que para atingir tal precisão deve-se utilizar a técnica de levantamento geodésico conhecida como relativo estático. Tal técnica utiliza duas estações distintas, designando uma com coordenadas conhecidas nomeada como base, e outra conhecida como *rover* que é onde deve haver posicionamento com um tempo determinado para se determinar a coordenada. Desta forma, com rastreamento simultâneo entre os dois receptores haverá um conjunto de observação de pseudodistâncias entre receptores. O posicionamento relativo estático com linhas de base entre 20 e 50km, deve ter rastreamento com tempo de observação de 2 a 3 horas para obter precisão de 5mm + 1ppm, desta forma é determinada a coordenada precisa da base, assim permite-se que o rastreamento dos *rovers* possa ser entre 05 a 10 minutos para obter coordenadas com precisão de até 10mm + 1ppm sabendo que a linha entre a base da rede brasileira de monitoramento contínuo (RBMC) e a base utilizada para o rastreamento dos pontos na fazenda do Canguiri é menor que 50 km e que a base implantada na fazenda a qual foi determinada as coordenadas conhecidas para o rastreamento dos pontos de apoio fotogramétrico são menores que 5 km o tempo de rastreamento adotado para a determinação das coordenadas devem ser entre 5 e 15 min, levando em conta possíveis obstruções.

4. EXPERIMENTOS

4.1 Levantamento do apoio de campo

Para a execução do levantamento do apoio de campo foi instalada uma base de rastreamento na fazenda Canguiri que foi mantida em rastreamento contínuo enquanto era realizado o rastreamento dos pontos de apoio, foram realizados rastreios com aproximadamente 20 minutos em cada ponto, utilizando o método relativo estático para a determinação das coordenadas, que foram pós processadas utilizando o software leica geo Office. Todas as determinações das coordenadas pós processadas obtiveram suas ambiguidades fixadas e todas as coordenadas foram obtidas com a precisão subcentimétrica. O sucesso se deve ao cuidado durante o planejamento de rastreamento, principalmente ao rastrear um ponto ao lado de um lago, o qual foi tido o cuidado de permanecer por mais tempo em virtude da possibilidade de erros de multicaminho, e foi necessário a realização da filtragem de momentos de perda de sinal para a melhor determinação da coordenada. A Figura 6 mostra a posição dos pontos de apoio e verificação usados no processamento fotogramétrico e controle de qualidade, respectivamente.

FIGURA 6: Identificação dos pontos de controle rastreados por GPS (Fonte: o Autor 2013).



A Tabela 01 mostra as coordenadas geográficas dos pontos de apoio no sistema WGS84.

TABELA 01: Determinação das coordenadas dos pontos de apoio no sistema WGS84, e altitude elipsoidal (Fonte: Autor 2013)

ID	LATITUDE			LONGITUDE			Elipsoidal
	Graus	Minutos	Segundos	Graus	Minutos	Segundos	Altitude
1	-25	23	12,8571	-49	7	36,1949	913,05332
2	-25	23	14,6177	-49	7	39,1862	914,93351
3	-25	23	14,635	-49	7	39,4108	915,01961
4	-25	23	17,9838	-49	7	45,4542	919,46216
5	-25	23	13,2305	-49	7	47,7545	915,31689
6	-25	23	10,4367	-49	7	47,9203	915,04115
7	-25	23	13,8714	-49	7	44,8494	916,70879
8	-25	23	11,0957	-49	7	43,882	912,49465
9	-25	23	10,0375	-49	7	36,0377	911,59932
10	-25	23	4,0049	-49	7	38,7912	922,03761
12	-25	23	6,1633	-49	7	36,6989	916,43222
13	-25	23	13,3491	-49	7	31,6103	910,09894
14	-25	23	16,4224	-49	7	36,6638	915,32907
15	-25	23	19,3861	-49	7	39,8268	918,59012

4.2 Voo fotogramétrico

Um conjunto de 14 imagens e 3 faixas voo identificadas com nome da foto, posição da tomada da fotografia, atitude dos sensores na tomada da fotografia, data e hora do momento da tomada da fotografia foram obtidas pelo sistema Vant.

4.3 Cálculo do GSD

Como as imagens são advindas de uma câmera NEX3 que possui 16 Megapixels e distância focal de 16 mm (f), com altura de voo de aproximadamente 230 m (H_v) foi calculado o tamanho do pixel no terreno (GSD). Sabendo que a resolução da imagem é de 4912 x 3264 pixels e o tamanho do CCD de 23,4 x 15,6 mm (NEX3KB.CEE5 Manual Sony, 2012), o tamanho do pixel (m) pode ser calculado da seguinte forma:

$$Rp = \frac{x}{NTC} = \frac{y}{NTL} \quad (11)$$

Onde,

Rp : Tamanho do pixel;

x, y : Dimensões físicas do CCD;

NTC : Número total de colunas;

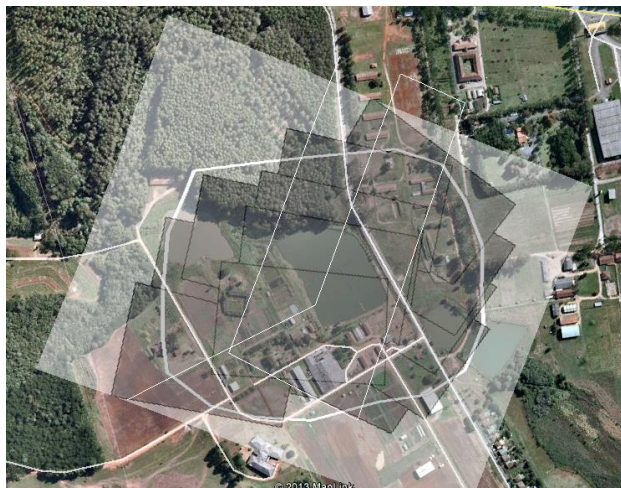
NTL : Número total de linhas.

Neste caso, o tamanho do pixel é de 4,77 micrometros/pixel. Desta forma, o tamanho do pixel no terreno é calculado como segue:

$$GSD = \frac{mH_v}{f} \quad (12)$$

Sendo assim, foi obtido um valor de 6 cm de GSD. Multiplicando pelo tamanho da imagem tem-se o tamanho da área de abrangência de cada imagem no terreno que é de 336 x 223 m. Utilizando-se destes dados juntamente com a orientação e posição das imagens foi realizado uma estimativa prévia e gerado um catálogo fotogramétrico com a sobreposição das imagens com o intuito de planejar a localização dos pontos de apoio como mostra a Figura 7.

FIGURA 7: Área de abrangência das imagens no terreno (Fonte: O Autor 2013).



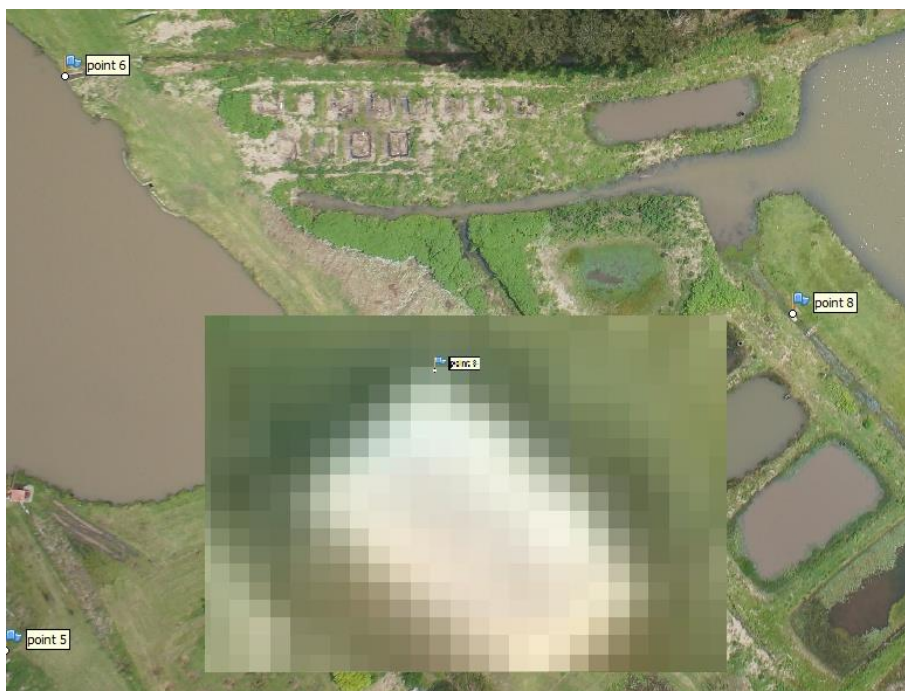
4.4 Geração do mosaico

A geração do mosaico consiste em concatenar as imagens do levantamento aéreo, de forma que toda a área recoberta seja visualizada. Este procedimento foi realizado nos softwares LPS e no APS, as fotocoordenadas dos pontos de apoio devem ser selecionadas nas imagens levando em consideração a capacidade de identificá-la na fotografia. Como as fotografias são derivadas de uma câmera digital de pequeno formato foi adotado um valor de 4 pixels na qualidade da observação das fotocoordenadas. As Figuras 8 e 9 mostram as fotocoordenadas coletadas nos softwares LPS e APS.

FIGURA 8: Foto identificação do ponto de controle no LPS (Fonte: Autor 2013)



FIGURA 9: Foto identificação do ponto de controle no APS (Fonte: Autor 2013)



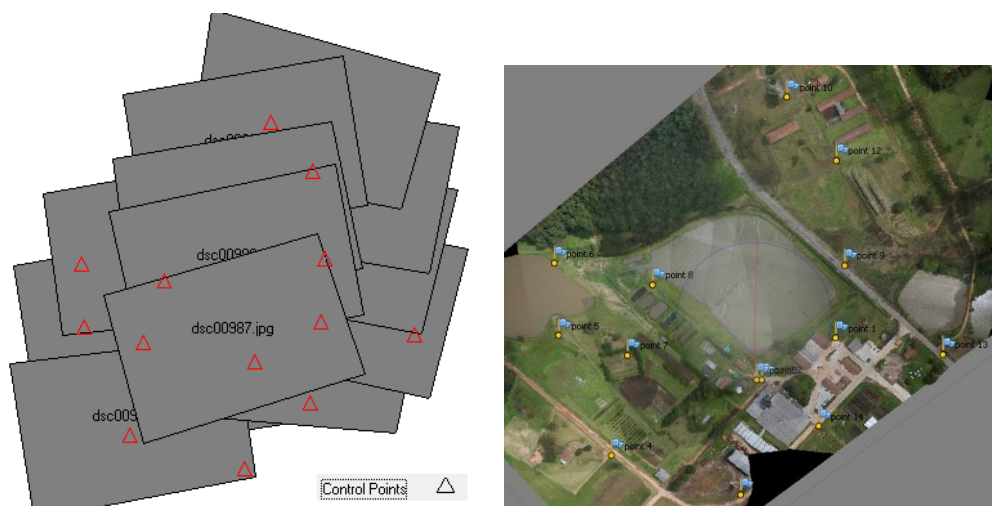
4.4 Geração do modelo digital de elevação (MNE) e ortofoto digital

A realização da confecção dos produtos fotogramétricos foram compilados de forma que se pudesse gerar um comparativo entre diferentes formas de processamento. Ambos os resultados foram gerados empregando 2 softwares de processamento, isto é, o Leica Photogrametry Suite-LPS e o Agisoft PhotoScan-APS. Foram compilados MNEs e ortofotos adotando 4 grupos de configurações, a saber:

- Grupo 1: Com emprego dos dados brutos advindos do GPS/INS;
- Grupo 2: Sem emprego dos dados brutos advindos do GPS/INS;
- Grupo 3: Com emprego de 5 pontos de apoio bem distribuídos;
- Grupo 4: Com emprego de 11 pontos de apoio bem distribuídos.

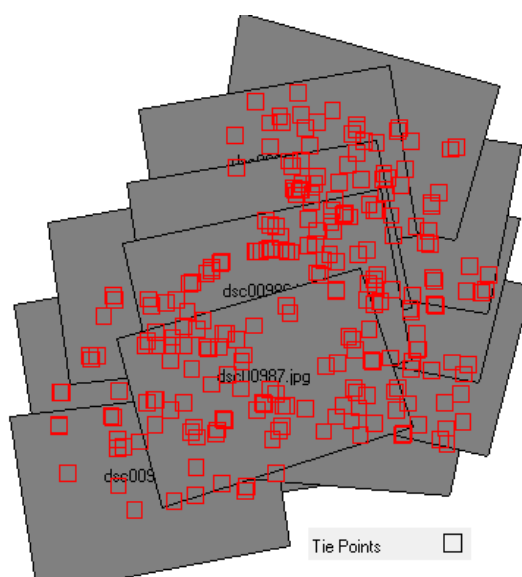
O conjunto dos pontos de apoio levantados em campo, bem como sua distribuição, pode ser visto na Figura 10.

FIGURA 10: Representação geométrica dos pontos de controle no LPS (Fonte: Autor 2013)



A Figura 11 mostra os pontos de ligação usados na fototriangulação de imagens. Este é um processo realizado de forma automática, tanto pelo LPS quanto pelo APS, entretanto vale ressaltar que deve ser feita uma avaliação nos relatórios de processamento em busca de possíveis falsos positivos. O software LPS dispõe de um relatório que fornece os resíduos dos pontos de ligação após o ajustamento, podendo aceitar ou rejeitar os pontos empregados no processo. Entretanto, no aplicativo APS não existe essa possibilidade. O mesmo apenas dispõe de um aplicativo comparativo de quantos pontos foram identificados e rejeitados entre as fotografias. A Figura 11 mostra um exemplo de pontos de ligação usados no processo de fototriangulação no LPS.

FIGURA 11: Representação geométrica dos pontos de ligação no LPS (Fonte: Autor 2013)



A geração do MNE a partir de pares estereoscópicos é realizada basicamente por 3 métodos, isto é, a medição automática dos pontos de ligação, as equações de paralaxe e a intersecção fotogramétrica. As maiores fontes de erros na geração dos MNE são regiões de textura uniformes. Portanto, a qualidade do MNE que é gerado através de intersecção fotogramétrica está intimamente ligada ao número de pontos de ligação que é encontrado entre as fotografias e a qualidade como eles foram correlacionados. O processo de normalização dos pares estereoscópicos ajuda a otimizar os algoritmos dos softwares em busca de melhor qualidade na procura dos pontos de ligação (NUNES, 2008), o APS faz este processo automaticamente, enquanto no LPS este processo deve ser feito manualmente.

O processo de identificação de pontos homólogos nos softwares é feito de forma diferente. No APS foram encontrados aproximadamente 38000 pontos de ligação entre todas as fotografias, enquanto no LPS foram identificados 3600 pontos entre todas as fotografias. Em termos de tempo de processamento, o software APS mostrou-se mais robusto, mais rápido e mais eficiente que o LPS. As Figuras 12 e 13 mostram exemplos de MNEs gerados pelo software APS e LPS.

FIGURA12: Modelo digital de superfície gerado pelo LPS (Fonte: Autor 2013)

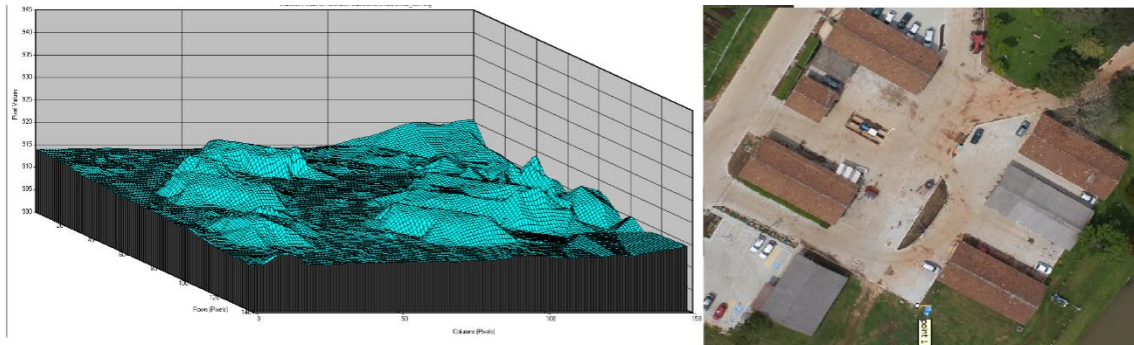
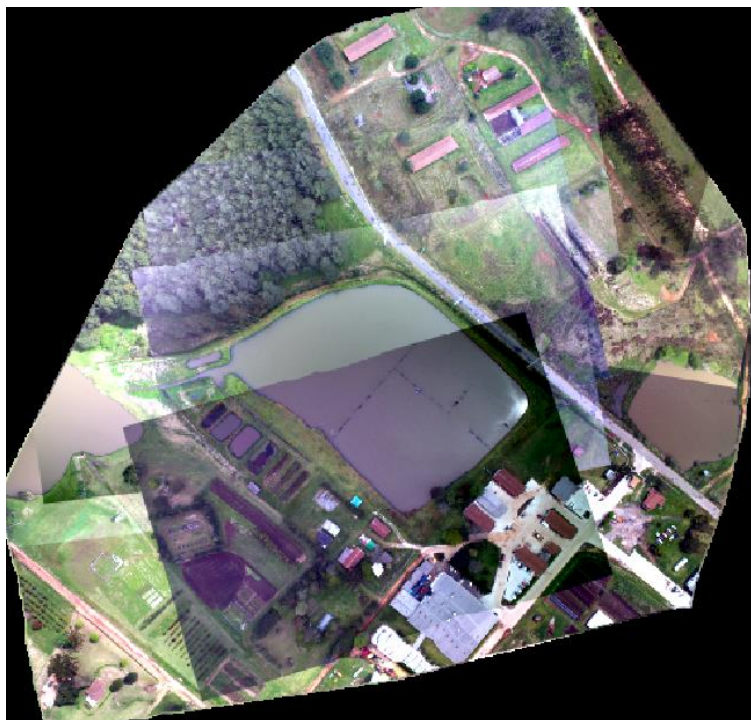


FIGURA 13: Modelo digital de superfície gerado pelo APS (Fonte: Autor 2013)



Gerados os MNEs da região de interesse, o processo de geração de uma ortofoto digital é realizado automaticamente em ambos os aplicativos. O operador deve apenas selecionar a técnica de interpolação para reamostragem das imagens e o tamanho do pixel no terreno, uma vez que é possível gerar produtos em diferentes escalas. As ortofotos digitais geradas pelos softwares são exibidas na Figura 14. Vale ressaltar que o balanceamento radiométrico das imagens é feita de forma automática no APS, enquanto no LPS é realizada de forma semi-automática.

FIGURA 14: Ortofoto digital. (a) Gerada pelo LPS. (b) Gerada pelo APS (Fonte: Autor 2013)



(a)



(b)

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Determinação e comparação dos parâmetros de orientação exterior (POE)

Para avaliar a qualidade A avaliação para a determinação dos parâmetros de orientação exterior se dá devido à falta de qualidade na obtenção desses parâmetros advindos dos sensores da unidade controladora de voo, por isso é feito este comparativo para avaliar a diferença entre os parâmetros que foram determinados pelos ajustamentos da aerotriangulação e os dados advindos diretamente dos sensores.

A tabela 2 representa os dados vindos diretamente dos sensores, a tabela 3 e 4 são os dados processados pelo LPS, dados processados utilizando 4 pontos de apoio e com os 14 pontos de apoio, a tabela 5 e 6 são os POE calculados pelo APS durante o processo de fototriangulação, também respectivamente com 5 pontos de apoio e com 14 pontos de apoio e a tabela 7 é o comparativo entre todas as determinações.

TABELA 2: POE dos sensores da UCV. Fonte: Autor(2013)

ID	E(m)	N(m)	h(m)	om(rad)	fi (rad)	ka(rad)
966	688222	7191235	1127	-0,621	-4,276	8,224
967	688221,6	7191056	1124,5	-3,685	2,074	11,584
968	688220,8	7190977	1126	-0,488	-2,518	9,865

969	688218,6	7190915	1126	0,189	3,613	8,699
971	688426,6	7190733	1128	6,519	8,735	170,537
972	688477,8	7190726	1128	3,072	-1,731	168,060
973	688473,5	7190810	1126	3,577	0,265	168,715
974	688473	7190890	1125	2,680	-1,079	170,789
975	688472,5	7190949	1123,5	5,456	4,200	166,848
984	688341,8	7191272	1126,25	0,071	-1,992	9,225
985	688342,6	7191190	1126,75	-2,836	0,142	10,062
986	688341,8	7191111	1126	1,511	-0,239	11,486
987	688340,5	7191053	1126	-2,638	0,825	16,894

TABELA 3: POE processados pelo LPS com 5 pontos de apoio. Fonte:Autor(2013)

ID	E(m)	N(m)	h(m)	om(rad)	fi (rad)	ka(rad)
966	688223,67	7190991,01	1125,31	-0,5667	-3,8445	8,1512
967	688221,21	7190908,88	1124,73	-3,6199	2,5273	11,5775
968	688224,52	7190828,54	1125,84	-0,6557	-2,0665	9,8479
969	688223,80	7190750,40	1127,28	-0,0935	3,9919	8,6819
971	688470,16	7190824,86	1125,71	6,3439	8,5909	170,521
972	688469,56	7190905,43	1124,63	3,0222	-1,8519	168,0331
973	688469,00	7190984,51	1123,87	3,6253	0,118	168,7115
974	688468,32	7191067,03	1124,71	2,8601	-1,2418	170,7959
975	688466,25	7191143,79	1126,01	5,8174	3,9751	166,8555
984	688343,81	7191123,35	1126,75	0,3766	-1,8356	9,2171
985	688342,21	7191046,70	1126,55	-2,5094	0,2785	10,0585
986	688342,44	7190962,77	1126,30	1,5653	-0,052	11,4794
987	688342,85	7190882,40	1124,90	-2,7673	1,0087	16,8979

TABELA 4: POE processados pelo LPS com 14 pontos de apoio. Fonte: Autor(2013)

ID	E(m)	N(m)	h(m)	om(rad)	fi (rad)	ka(rad)
966	688223,34	7190990,60	1124,92	-0,4498	-3,9057	8,1832
967	688220,97	7190909,07	1124,60	-3,6604	2,4778	11,5388
968	688224,39	7190828,06	1125,59	-0,553	-2,1046	9,8829
969	688223,88	7190749,89	1126,90	0,0357	3,9888	8,7156
971	688469,77	7190824,95	1126,05	6,3132	8,4869	170,5535
972	688469,69	7190905,48	1124,65	3,0013	-1,8138	168,0528
973	688469,42	7190983,96	1124,01	3,7452	0,2312	168,6785
974	688469,09	7191067,23	1124,95	2,8112	-1,0437	170,769
975	688467,37	7191144,26	1126,14	5,7422	4,256	166,8245
984	688344,51	7191123,24	1127,56	0,4407	-1,5803	9,2083
985	688342,07	7191047,32	1126,60	-2,6741	0,2522	10,0646
986	688341,85	7190962,39	1126,45	1,6416	-0,1879	11,4824
987	688342,31	7190882,05	1125,02	-2,6865	0,8802	16,874

TABELA 5: POE processados pelo APS com 5 pontos de apoio. Fonte: Autor(2013)

ID	E(m)	N(m)	h(m)	om(rad)	fi (rad)	ka(rad)
966	688220,89	7190991,73	1133,39	-0,8495	-4,7803	8,2638
967	688219,43	7190909,48	1132,55	-3,7489	1,5560	11,5904
968	688221,80	7190827,23	1133,91	-0,4227	-3,0905	9,8167
969	688222,27	7190747,84	1134,50	0,4278	3,0644	8,5763
971	688471,20	7190822,94	1135,38	6,8264	8,8784	170,4902
972	688468,64	7190905,67	1134,29	3,1209	-1,6481	168,0677
973	688468,29	7190985,72	1133,43	3,4519	0,2987	168,7181
974	688467,17	7191069,46	1133,61	2,4026	-1,1137	170,7817
975	688466,17	7191147,14	1134,31	5,0524	4,1433	166,8410
984	688343,58	7191126,06	1135,02	-0,4281	-2,2535	9,2321
985	688342,74	7191049,04	1135,78	-3,1159	-0,0360	10,0593
986	688342,68	7190962,76	1135,96	1,3838	-0,4215	11,4900
987	688343,60	7190881,88	1134,43	-2,5886	0,6983	16,8900

TABELA 6: POE processados pelo APS com 14 pontos de apoio. Fonte:Autor(2013)

ID	E(m)	N(m)	h(m)	om(rad)	fi (rad)	ka(rad)
966	688221,44	7190991,32	1133,24	-0,675	-4,647	9,095
967	688220,03	7190909,22	1132,31	-3,710	1,671	12,412
968	688222,45	7190827,24	1133,59	-0,373	-2,932	10,631
969	688222,88	7190748,08	1134,22	0,342	3,236	9,389
971	688471,30	7190823,09	1134,59	6,694	9,011	171,301
972	688468,85	7190905,56	1133,54	3,179	-1,569	168,871
973	688468,48	7190985,41	1132,76	3,529	0,385	169,521
974	688467,38	7191068,92	1133,11	2,548	-1,041	171,586
975	688466,31	7191146,42	1133,99	5,169	4,256	167,642
984	688343,95	7191125,39	1134,81	-0,234	-2,148	10,041
985	688343,09	7191048,53	1135,37	-2,997	0,031	10,869
986	688343,05	7190962,54	1135,42	1,456	-0,290	12,295
987	688343,95	7190881,78	1133,83	-2,570	0,771	17,706

O método de ajustamento sem levar em consideração os parâmetros de orientação exterior (POE) das fotografias foram adotados para este estudo pela falta de qualidade da qual são obtidos os POE, como a precisão do GPS da unidade controladora de voo(UCV) é em torno de 10m e a precisão dos acelerômetros que determinam os ângulos de Euler são em torno de 0,3° adotou-se não utiliza-los, entretanto na tabela 07 é demonstrado as diferenças encontradas entre a determinação dos POE pelos softwares e pelas derivadas dos sensores da UCV.

Como resultados do ajustamento por feixes de raios, temos a determinação dos POE de todas as imagens, e os resíduos da diferença encontradas entre os pontos de controle e de verificação, bem como os resíduos encontrados entre as fotocoordenadas dos pontos de ligação, que serão vistos e analisados no controle de qualidade dos produtos.

TABELA 7: Médias dos desvio encontrados em cada componente dos dados processados em relação aos dados originais vindos dos sensores. Fonte:Autor(2013)

	LPS		APS	
	5 GCP	15 GCP	5 GCP	15 GCP
E (m)	-0,6	-0,01	-0,14	-0,49
N (m)	147,06	146,87	146,27	146,72
H (m)	0,2	0,15	-8,43	-7,83
om (°)	-0,05	-0,13	0,13	0,05
fi (°)	-0,16	-0,06	0,18	0,05
kA (°)	0,01	0,02	0	-0,81

3.2 Análise dos resíduos advindos do processo de fototriangulação

Após o processamento da aerotriangulação pelo ajustamento por feixes de raios, os softwares geram relatórios os quais trazem o comparativo entre as coordenadas dos pontos de controle e de verificação que foram impostas ao software como dados fixos, e os valores por ele calculados após o software determinar os parâmetros do ajustamento. Os resíduos encontrados nestas coordenadas são demonstrados nas tabelas 8 e 9, ressalta-se que a média dos resíduos em cada componente E,N,H nos 2 tipos de processamento não foram superior a 2cm.

TABELA 8: Resíduos dos pontos após aerotriangulação nos pontos de apoio e de verificação no software LPS. Fonte: Autor(2013)

coordenadas levantamento GPS				Resíduos processamento 5GCP - LPS			Resíduos processamento 5GCP - APS			
pts	E(m)	N(m)	H(m)	E(m)	N(m)	H(m)	E(m)	N(m)	H(m)	
1	688457,19	7190888,59	913,05					0,07	0,07	-0,38
3	688366,53	7190835,14	915,02	0,19	0,10	-0,12	0,09	0,07	-0,08	
4	688196,17	7190734,46	919,46	-0,19	0,09	0,11	-0,07	0,04	0,03	
5	688133,92	7190881,62	915,32				-0,12	-0,02	0,62	
6	688130,49	7190967,65	912,53	-0,18	-0,14	-0,30	-0,02	-0,07	0,04	
7	688214,84	7190860,76	916,71				-0,11	0,13	-0,14	
8	688243,08	7190945,79	912,49				0,14	-0,07	0,25	
9	688462,80	7190975,28	911,60	0,00	0,03	-0,29	0,00	-0,06	-0,06	
10	688388,43	7191161,98	922,04				0,02	-0,17	-1,07	
12	688445,99	7191094,75	916,43	0,00	-0,07	0,19	-0,01	0,00	0,02	

TABELA 9: Resíduos dos pontos após aerotriangulação nos pontos de apoio e de verificação no software APS. Fonte: Autor(2013)

coordenadas levantamento GPS				Resíduos Processamento 11GCP - LPS			Resíduos Processamento 11GCP - APS				
	E(m)	N(m)	H(m)		E(m)	N(m)	H(m)		E(m)	N(m)	H(m)
1	688457,19	7190888,59	913,05	check	0,09	0,07	0,05	control	0,15	0,03	0,11
3	688366,53	7190835,14	915,02	control	0,29	0,22	0,01	control	0,40	0,25	0,07
4	688196,17	7190734,46	919,46	control	1,81	-0,52	0,03	control	1,31	-0,40	0,09
5	688133,92	7190881,62	915,32	check	1,32	-0,10	0,08	control	0,66	-0,02	0,07
6	688130,49	7190967,65	912,53	control	0,96	-0,50	-0,39	control	0,71	-0,29	-0,46
7	688214,84	7190860,76	916,71	check	0,77	-0,23	-0,07	control	0,40	-0,19	0,05
8	688243,08	7190945,79	912,50	check	0,55	-0,10	-0,07	control	0,15	-0,05	-0,05
9	688462,80	7190975,28	911,60	check	0,14	0,07	0,01	control	0,22	0,04	0,03
10	688388,43	7191161,98	922,04	check	1,52	-0,05	0,10	control	0,94	-0,05	0,01
12	688445,99	7191094,75	916,43	control	0,19	0,06	0,04	control	0,01	0,01	0,00
13	688585,12	7190871,65	910,10	control	0,64	0,23	-0,02	control	0,19	-0,02	0,12
14	688442,54	7190779,06	915,33	none				control	0,15	-0,05	0,09
15	688352,85	7190689,11	918,59	none				control	0,59	-0,31	-0,48
				média	0,641	-0,051	0,01	média	0,4	-0,046	0,051

TABELA 9: Resíduos dos pontos após fototriangulação nos pontos de apoio e de verificação no software APS usando POEs advindos do GPS/INS (Fonte: Autor, 2013)

3.3 Avaliação de qualidade das ortoimagens

Existem alguns processos para avaliação da qualidade de uma ortoimagem, os mais precisos deles são os que possam ser comparados feições do terreno com feições na orto imagem, eles ganham mais escopo em qualidade geométrica quando se tem uma carta topográfica de alta precisão ou então um bom levantamento topográfico de feições de destaque para realizar uma comparação. Para este caso como não tem material que contenha com alto rigor geométrico nenhuma feição geométrica como linhas ou áreas para fazer a avaliação, foi usado os pontos de controle para a verificação, desta forma as coordenadas dos pontos de controle são lidas na ortoimagem e comparadas com as coordenadas advindas do levantamento GPS, tendo em mente que a qualidade do rastreo GPS é +- 3cm, e o tamanho do pixel é 6cm, medidas de até 12cm não podem ser considerados erros, as tabelas 10 e 11, demonstram as coordenadas lidas nas ortoimagens, com seus respectivos erros em relação a coordenada do rastreo GPS.

TABELA 10: Coordenadas coletadas nas ortofotos com 5 pontos de controle do LPS e do APS e suas diferenças entre as coordenadas levantadas com o GPS e a média de erro Fonte: Autor(2013)

ORTOFOTO LPS 5GCP			ORTOFOTO APS 5GCP		
LPS5	E(m)	N(m)	APS5	E(m)	N(m)
1	688457,31	7190888,68	1	688457,37	7190888,69
3	688366,68	7190835,17	3	688366,81	7190834,95
4	688196,06	7190734,44	4	688195,67	7190734,42
5	688133,77	7190881,63	5	688134,05	7190881,68
6	688130,1	7190967,35	6	688130,15	7190967,22
7	688214,93	7190860,82	7	688214,60	7190860,82
8	688243,07	7190945,78	8	688243,04	7190945,65
9	688462,98	7190975,32	9	688462,91	7190975,39
10	688388,52	7191161,69	10	688388,57	7191161,91
12	688444,32	7191099,05	12	688446,04	7191094,85
13	688585,28	7190871,6	13	688585,84	7190871,51
14	688442,52	7190779,24	14	688442,50	7190779,08
discrepância entre ortofoto e GPS			discrepância entre ortofoto e GPS		
erro	E(m)	N(m)		E(m)	N(m)
1	-0,12	-0,09		-0,18	-0,10
3	-0,15	-0,03		-0,28	0,19
4	0,11	0,02		0,50	0,04
5	0,15	-0,01		-0,13	-0,06
6	0,39	0,30		0,34	0,43
7	-0,09	-0,06		0,24	-0,06
8	0,01	0,01		0,04	0,14
9	-0,18	-0,04		-0,11	-0,11
10	-0,09	0,29		-0,14	0,07
13	-0,16	0,05		-0,72	0,14
14	0,02	-0,18		0,04	-0,02
média	-0,09	-0,01		-0,11	0,04

TABELA 11: Coordenadas coletadas nas ortofotos com 11 pontos de controle do LPS e do APS e suas diferenças entre as coordenadas levantadas com o gps e a média de erro Fonte: Autor(2013)

ORTOFOTO LPS 11GCP			ORTOFOTO APS 11GCP		
LPS11	E(m)	N(m)	APS11	E(m)	N(m)
1	688457,31	7190888,50	1	688457,40	7190888,63
3	688366,66	7190835,05	3	688366,86	7190835,22
4	688196,19	7190734,42	4	688195,64	7190734,40
5	688133,79	7190881,68	5	688134,15	7190881,65
6	688130,69	7190967,50	6	688130,15	7190967,16
7	688214,65	7190860,81	7	688214,82	7190860,86

8	688243,03	7190945,74	8	688243,04	7190945,85
9	688462,61	7190975,36	9	688462,96	7190975,37
10	688388,50	7191161,95	10	688388,49	7191161,83
12	688444,29	7191098,99	12	688445,97	7191094,79
13	688584,94	7190871,69	13	688585,74	7190871,58
14	688442,50	7190779,19	14	688442,49	7190779,41
diferença entre ortofoto e GPS			diferença entre ortofoto e GPS		
erro	E(m)	N(m)	erro	E(m)	N(m)
1	-0,12	0,09	1	-0,21	-0,04
3	-0,13	0,09	3	-0,33	-0,08
4	-0,02	0,04	4	0,53	0,06
5	0,13	-0,06	5	-0,23	-0,03
6	-0,20	0,15	6	0,34	0,49
7	0,19	-0,05	7	0,02	-0,10
8	0,05	0,05	8	0,04	-0,06
9	0,19	-0,08	9	-0,16	-0,09
10	-0,07	0,03	10	-0,06	0,15
12	0,18	-0,04	12	-0,62	0,07
13	0,04	-0,13	13	0,05	-0,35
14	0,04	0,03	14	-0,06	-0,04

4.1 Análise dos Resultados da Produção da Ortofotocarta

Para a execução do controle de qualidade da ortofotocarta, foram levantados pontos de checagem utilizando a tecnologia GPS, sendo os mesmos medidos na ortofocarta e calculando-se as discrepâncias entre ambos. A tabela 3 mostra as coordenadas dos pontos levantados para checagem e dos pontos medidos na ortofotocarta.

TABELA 3 – Coordenadas planimétricas dos pontos levantados e extraídos da ortofotocarta.

PONTO	COORDENADAS PLANIMÉTRICAS DE CHECAGEM NO REFERENCIAL DO TERRENO – X_T^i		COORDENADAS PLANIMÉTRICAS OBTIDAS A PARTIR DA ORTOIMAGEM DIGITAL- X_O^i	
	E_T (m)	N_T (m)	E_O (m)	N_O (m)
01	457480,315	7553723,598	457483,000	7553725,500
02	456796,042	7553512,297	456792,200	7553510,900

03	457266,011	7553252,021	457260,200	7553252,500
04	457592,200	7554080,072	457592,200	7554082,500
05	457877,578	7553490,513	457876,000	7553494,300
06	458964,865	7554402,516	458963,000	7554400,900
07	458774,639	7554518,409	458773,800	7554518,900
08	458636,643	7554070,906	458635,000	7554072,100
09	458388,783	7554240,069	458389,200	7554243,500
10	457963,026	7554121,889	457965,400	7554125,100
11	458029,875	7553923,975	458029,938	7553926,611
12	458052,900	7553968,000	458051,925	7553968,108
13	45862,475	7553874,975	458162,273	7553875,505
14	458222,175	7554061,925	458222,872	7554060,574
15	457341,709	7553536,908	457341,579	7553536,908
16	457421,204	7553747,333	457420,734	7553746,505
17	457654,142	7553965,181	457654,742	7553963,381
18	458564,10	7554448,481	458563,507	7554449,450
19	457035,477	7553570,903	457035,677	7553570,302

Para a análise da exatidão cartográfica da ortofotocarta, relacionada ao PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica), utilizou-se o método proposto por Galo & Camargo (1994) baseado na análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas da carta de referência (obtidas a partir dos levantamentos de campo).

- Análise de Tendência planimétrica:

TABELA 4 – Cálculo das Discrepâncias dos Pontos.

PONTO	DISCREPÂNCIA (Ortofotocarta – GPS)	
	ΔE (m)	ΔN (m)
01	2,684	1,902
02	-3,842	-1,397

03	-5,811	0,478
04	-0,002	2,427
05	-1,578	3,786
06	-1,865	-1,615
07	-0,839	0,490
08	-1,643	1,1939
09	0,416	3,4301
10	2,373	3,210
11	0,063	2,636
12	-0,975	0,108
13	-0,202	0,530
14	0,697	-1,351
15	-0,130	0,000
16	-0,470	-0,828
17	0,600	-1,800
18	-0,593	0,969
19	0,200	-0,601

TABELA 5 – Análise de tendência.

Médias amostrais das discrepâncias		Desvios Padrão		t amostral		t Student $t(n-1, \alpha/2)$
ΔE	ΔN	S_E (m)	S_N (m)	t_E	t_N	$t_{(18, 5\%)}$
-0,969	-0,527	1,881	1,921	1,596	-0,886	1,729

- Análise da Precisão planimétrica:

TABELA 6 – PEC para a carta 1:5000.

Classe	PEC (m)	EP (m)	σ (m)
A	2,5	1,5	1,060
B	4,0	2,5	1,767
C	5,0	3,0	2,121

TABELA 7 – Análise da precisão da ortofocarta.

Análise da precisão		χ^2 amostral	
$\chi^2_{(n-1, \alpha)}$			
Classe	$\chi^2_{(18, 10\%)}$	χ^2_E	χ^2_N
A	27,20	29,544	28,316
B	27,20	10,652	10,210
C	27,20	7,070	7,386

Analisando-se a tabela 5, verifica-se que:

- comparando-se t_E e t_N amostral verifica-se que as componentes E e N da ortofotocarta estão livres de tendência, pois t_E e $t_N < t_{(18, 5\%)}$.

Analisando-se as tabelas 6 e 7, verifica-se que:

- A análise não é satisfeita para nenhuma das componentes, considerando a classe A;
- A análise é satisfeita para as duas direções, tanto E quanto N, considerando a classe B, pois χ^2_E e $\chi^2_N < \chi^2_{(n-1, \alpha)}$.

TABELA 8 – Coordenadas altimétricas dos pontos levantados e extraídos do MDT.

PONTO	COORDENADAS ALTIMÉTRICAS DE CHEGAGEM NO REFERENCIAL DO TERRENO	COORDENADAS ALTIMÉTRICAS OBTIDAS A PARTIR DA ORTOFOTOCARTA
	H (m)	H (m)
01	412,440	413,850
02	422,600	423,829
03	435,659	433,957
04	417,207	418,507
05	443,146	444,500
06	421,507	420,607
07	427,464	429,166
08	420,755	418,955
09	401,085	400,185
10	414,714	416,315

- Análise de tendência altimétrica:

TABELA 9 – Cálculo das Discrepâncias dos Pontos.

PONTO	DISCREPÂNCIA
	ΔH (m)
01	1,409
02	1,228
03	-1,701
04	1,300
05	1,353
06	-1,900
07	1,702

08	-1,800
09	2,100
10	1,600

TABELA 10 – Análise de tendência.

Média amostral das discrepâncias	Desvio Padrão	t amostral	t Student
ΔH	S_H (m)	t_H	$t_{(9, 5\%)}$
0,629	0,791	2,508	1,833

- Análise da Precisão altimétrica:

TABELA 11 – PEC para a carta 1:5000 altimétrico.

Classe	PEC (m)	EP (m)
A	½ eq.	1/3 eq.
B	3/5 eq.	2/5 eq.
C	¾ eq.	1/2 eq.

TABELA 12 – Análise da precisão do MDT.

Análise da precisão		χ^2 amostral
Classe	$\chi^2_{(9, 10\%)}$	χ^2_H
A	14,68	12,754

Analisando-se a tabela 10, verifica-se :

- O MDT gerado tem tendência, pois o valor teórico encontrado na tabela, referenciada a distribuição t Student, é maior.

Analisando-se as tabelas 11 e 12, verifica-se que:

- A análise é satisfeita para o MDT, considerando a classe A.

4 CONCLUSÃO

O objetivo proposto por este trabalho que era a realização de modelagem tridimensional de superfícies utilizando como matéria prima as fotografias derivadas de um levantamento utilizando equipamento VANT com câmeras fotográficas de pequeno formato, foram concluídas com êxito, existe um alto índice promissor da utilização destes produtos em virtude da qualidade geométrica em que são gerados, entretanto os estudos aqui realizados são intimamente ligados a um forte apoio de campo com coordenadas conhecidas,

isto porque o produto que se queria extrair deveria atingir um certo rigor geométrico.

A utilização de softwares diferentes para a geração dos produtos foi mais útil para realizar um comparativo entre a facilidade de manuseio e velocidade de processamento ao invés da qualidade do produto final, tendo em vista que as discrepâncias encontradas nos processos de criação dos produtos foram muito similares nos dois softwares, o LPS é um software que necessita de um acompanhamento mais técnico nos procedimentos de confecção, ele é mais passível de encontrar erros inerentes no processo, possui relatórios mais completos de cada processo, e possui configurações adicionais em todas as etapas que envolvem a aerotriangulação, geração do modelo e a ortofoto, já o APS é um software de muito fácil utilização, existem poucas configurações a se fazer, ele é praticamente autônomo, muito intuitivo, entretanto se houver algum erro grosseiro no processo, ele irá diluí-lo dentro de todo o ajustamento, de forma a não ser identificável no produto final, desta maneira se remete a dois pensamentos, caso for realizar um processo mais cauteloso para a geração de um produto em específico é mais vantajoso a utilização do LPS, quando a ideia é geração de produtos em alta velocidade, e dentro de um sistema padronizado e principalmente se for utilizar para processamentos de produtos em série, é mais aconselhável a utilização do APS.

A intenção de se melhorar a qualidade do processamento realizando densificando o apoio de campo com pontos GPS de alta precisão não se mostrou muito eficiente em um modelo com 3 faixas de 4 a 5 fotografias num total de 13 fotografias, as discrepâncias encontradas no processo de aerotriangulação foram diminuídas na geração da ortofoto, portanto as discrepâncias geométricas encontradas entre as ortofotos geradas com 5 ou 11 pontos de apoio foram praticamente similares, a ponto de não ser necessária uma densificação de apoios de campo para um modelo tão pequeno.

Em detrimento desse anseio por um produto com qualidade geométrica confiável, deve-se realizar alguns cuidados adicionais para que o produto possa ter uma qualidade melhor para poder servir de apoio para projetos executivos de engenharia, cuidados como a calibração da câmera em serviço, calibração do sistema fotogramétrico e até mesmo a substituição de sensores de posicionamento e do sistema inercial por outros de maior precisão, podem fazer com que se exista a eliminação de um apoio de campo tão denso.

Este trabalho foi realizado utilizando dados disponibilizados para o autor, entretanto não cumpriu exatamente com o trabalho proposto pelo autor para a realização deste projeto, a intenção era utilizar todas as técnicas possíveis a ponto de operacionalizar um VANT para a realização de projetos fotogramétricos de alto rigor geométrico, desde a preparação do projeto de voo, aerotriangulação com denso apoio de campo e utilizar técnicas de calibração,

entretanto foi muito útil pois assim temos uma ideia para qual utilização podemos utilizar um VANT deste porte dentro destas técnicas utilizadas.

REFERÊNCIAS

Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações. 2ª edição. São Paulo, SP: Editora UNESP, 2000.

FHA. Project Development and Design Manual. Washington-DC: U.S. Department of Transportation. 2008.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações. 2ª Edição. São Paulo, SP: Editora UNESP, 2008.

TOMMASELI, A. M. G., RUY, R. S. Avaliação experimental de uma metodologia automática para a geração de estereomodelos a partir de dados de orientação direta. Revista Brasileira de Cartografia, 2004.

WOLF, P.R., DEWITT, B.A. Elements of Photogrammetry: with Applications in GIS. 3rd ed. McGRAW-HILL, 2000.

SANTOS, D. R.; DAINES, R.; RODRIGUES, Z. J.; TOMMASELLI, A. M.G.; HASEGAWA, J.K.; GALO, M. Aplicação de Câmaras Digitais na produção de Ortofotocarta. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário COBRAC 2000, Florianópolis. Anais eletrônicos – CD-ROM. Florianópolis: COBRAC, 2000.

RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M. HASEGAWA, J. K. MENOSSEI, R. C. Fototriangulação com parâmetros adicionais para câmaras digitais: uma avaliação experimental. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, vol.14, n. 4, Out.-Dez. 2008.

ANDRADE, J. B. Fotogrametria. Curitiba: SBEE, 1998.

Jubanski, J. CÂMERAS AEROFOTOGRAFÉTRICAS DIGITAIS: NOVOS CONCEITOS E NORMAS. Revista Brasileira de Cartografia No 61/01, 2009.