

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NADISSON LUIS PAVAN

**INTEGRAÇÃO DE FOTOGRAMETRIA E LIDAR: UM ESTUDO DE CASO PARA
ORIENTAÇÃO INDIRETA DE FOTOGRAFIAS COM USO DE TELHADOS
ADJACENTES COMO APOIO DE CAMPO**

CURITIBA

2011

NADISSON LUIS PAVAN

**INTEGRAÇÃO DE FOTOGRAMETRIA E LIDAR: UM ESTUDO DE CASO PARA
ORIENTAÇÃO INDIRETA DE FOTOGRAFIAS COM USO DE TELHADOS
ADJACENTES COMO APOIO DE CAMPO**

Dissertação apresentado ao o Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, como requisito final para cumprimento dos créditos em disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos

CURITIBA

2011

TERMO DE APROVAÇÃO

NADISSON LUIS PAVAN


*“INTEGRAÇÃO DE FOTOGRAMETRIA E LIDAR: UM ESTUDO DE CASO PARA
ORIENTAÇÃO INDIRETA DE FOTOGRAFIAS COM USO DE TELHADOS
ADJACENTES COMO APOIO DE CAMPO”*

Dissertação nº 245 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz
Universidade Estadual Paulista, UNESP



Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 22 de agosto de 2011.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais:
Nadir Pavan e Alcídia Pavan

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha família, em especial meus pais pelo apoio e incentivo.

Ao amigo e orientador Professor Dr. Daniel Rodrigues dos Santos, pela orientação, apoio, incentivo, dedicação, compreensão, conselhos e paciência.

Aos membros das bancas do Seminário I e de defesa, Professor Dr. Aluir Porfírio Dal Poz, Professor Dr. Álvaro Muriel Lima Machado, Professor Dr. Edson Aparecido Mitishita e o Professor Dr. Mário Luiz Lopes Reiss pelas sugestões oferecidas.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas em especial aos Professores Dr. Quintino Dalmolin, Dr. Jorge Centeno, Dr. Sílvio R. C. de Freitas, Dr^a.Cláudia Robbi Sluter e Dr^a. Luciene S. Delazari.

Aos meus colegas e amigos Adriano, Alice, Anderson, Andre, Andrey, Anna Cavalheiro, Dalmar, Diuliana, Elizabete, Elizziane, Fabiani, Felipe Marques, Felipe Suci, Gloria, Hecrálito, Henry, João Côrtes, João Junior, Karoline, Lineardo, Márcio, Marcos, Marly, Meire, Nassau, Paula, Raquel, Rodrigo, Rogers, Sebastian, Silvio, Suzana, Sydney, Tiago, Wander, ...

Aos Professores da UNEMAT e amigos em especial aos Professores André, Edgar, Erico e Rodrigo pelo apoio e incentivo.

Aos meus amigos Antonio, Bruno, Daiana, Hermerson, Luiz, Patrícia, Roberta e Thiago.

À Mônica, secretária do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Ao instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), pelo fornecimento dos dados de varredura laser. À Universidade Federal do Paraná, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio concedido no projeto Jovem Pesquisador nº. Processo 570316/2008-1;

EPÍGRAFE

“Não existem métodos fáceis para resolver problemas difíceis”

René Descartes

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo estudar a integração de dados derivados do sistema LiDAR aerotransportado e Fotogrametria. A integração de dados extraídos de diferentes sensores tem sido potencialmente explorada para otimizar diversas tarefas fotogramétricas. Este estudo propiciou o desenvolvimento de um modelo fotogramétrico baseado na intersecção entre planos de telhados adjacentes, cujos parâmetros dos planos serão usados como observações no Método dos Mínimos Quadrados, para estimação da posição e rotação da câmara, no momento da tomada da fotografia. Foram discutidos três pontos principais envolvidos na proposta de trabalho, a saber: o potencial de integração de dados fotogramétricos e do sistema LiDAR; o desenvolvimento do modelo matemático; e o problema da orientação indireta de fotografias. A precisão dos parâmetros de orientação exterior estão associadas às precisões dos dados adquiridos com o sistema LiDAR, a configuração, distribuição, quantidade, tamanho e orientação dos telhados usados como apoio de campo. Foram realizados experimentos com dados simulados e reais e os resultados obtidos foram comparados com os resultados encontrados com o emprego do método convencional de orientação indireta de fotografias. A técnica proposta apresentou sua potencialidade e viabilidade para estimação dos parâmetros de orientação exterior de uma fotografia.

Palavras chave: Integração de dados; sistema de LiDAR aerotransportado; orientação indireta de fotografias; telhados adjacentes; modelo fotogramétrico.

ABSTRACT

This article presents a method for the indirect orientation of the aerial images taken by a frame camera using control gable roof extracted from laser scanning data. The method has potential in low cost and rapid image acquisition campaigns where the available resources do not permit the use of expensive navigation sensors onboard the platform or the collection of ground control points through a field survey. The most important characteristic of the proposed method is the development of a mathematical model based on control gable roof for the indirect orientation of the aerial images. The roof ridge lines are extracted by segmenting roof planes in a laser scanning dataset and intersecting the adjacent roof planes. The orientation parameters are estimated by minimizing the distance between the projection of ridge lines into the image and their corresponding image line. Implementation and testing of the proposed method have employed data from different sensors. The paper describes in detail the derivation of proposed mathematical model and discusses the advantages of this new approach compared to the conventional collinearity model. The results obtained showed that the proposed model is promising.

KEYWORDS: control gable roof, LiDAR dataset, line photogrammetry, indirect orientation of the aerial images.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE.....	10
FIGURA 2 – GEOMETRIA DOS PLANOS EQUIVALENTES	13
FIGURA 3 – GEOMETRIA DO PRIMEIRO MODELO DE HABIB	16
FIGURA 4 – GEOMETRIA DO MODELO ESTENDIDO DE COLINEARIDADE.....	18
FIGURA 5 – GEOMETRIA DO MODELO DE MULAWA e MIKHAIL.....	21
FIGURA 6 – PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS E PONTOS LIDAR.....	22
FIGURA 7 – RELAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS GPS, INS E LASER	24
FIGURA 8 – IMAGEM DE INTENSIDADE DO SVLA	25
FIGURA 9 – DIAGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	31
FIGURA 10 – TELHADOS FORMADOS POR PLANOS ADJACENTES	32
FIGURA 11 – PONTO CONTIDO NA CUMEEIRA DO TELHADO.....	32
FIGURA 12 – PONTOS COLETADOS NA IMAGEM DE INTENSIDADE DO PULSO LASER.....	33
FIGURA 13 – GRÁFICO DOS PONTOS COLETADOS (A) ANTES DA ELIMINAÇÃO DOS PONTOS NÃO PERTENCENTES Á “ÁGUA” DO TELHADO; (B) APÓS A ELIMINAÇÃO DOS PONTOS NÃO PERTENCENTES Á “ÁGUA” DO TELHADO	35
FIGURA 14 – VETORES ORTOGONAIS AOS PLANOS ADJACENTES REPRESENTADOS PELOS TELHADOS DE EDIFICAÇÕES.	37
FIGURA 15 – GEOMETRIA DO MODELO ADAPTADO DE MULAWA E MIKHAIL.....	39
FIGURA 16 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS EM CADA PLANO DOS TELHADOS ADJACENTES.....	43
FIGURA 17 – CONFIGURAÇÕES SIMULADAS – GRUPO 1.....	46
FIGURA 18 – CONFIGURAÇÃO SIMULADA – GRUPO 2	47
FIGURA 19 – DESVIOS PADRÃO DAS ROTAÇÕES (RAD) E POSIÇÃO (M) ESTIMADOS PARA: (A) EXPERIMENTO I; (B) EXPERIMENTO II; EXPERIMENTO III; (D) EXPERIMENTO IV.	48
FIGURA 20 – MÉDIA DOS DESVIOS PADRÃO PARA CADA CONFIGURAÇÃO SIMULADA.	49
FIGURA 21 – DISCREPÂNCIA MÉDIA ENTRE OS PARÂMETROS DE REFERÊNCIA E ESTIMADOS (POSIÇÃO) PELO MÉTODO PROPOSTO.....	49

FIGURA 22 – DISCREPÂNCIAS DOS POEs CALCULADOS REFERENTES À FIGURA 18. (A) EDIFICAÇÕES SIMULADAS COM ALTURAS VARIADAS; (B) EDIFICAÇÕES SIMULADAS COM MESMA ALTURA.	51
FIGURA 23 – IMAGEM 198.	52
FIGURA 20 – EDIFICAÇÕES SELECIONADAS E SEGMENTADAS. (A) EXPERIMENTO I; (B) EXPERIMENTO II; (C) EXPERIMENTO III; (D) EXPERIMENTO IV.	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E EXTERIOR SIMULADOS.	45
PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR.....	45
TABELA 2 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS.	47
TABELA 3 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR CÂMARA DIGITAL SONY DSC-727 717.....	52
TABELA 4 – CARACTERÍSTICA DOS EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS.....	53
TABELA 5 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS DO TIPO I.	55
TABELA 6 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS DO TIPO II	57

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 – VANTAGENS DO SVLA SOBRE A FOTOGRAMETRIA	26
QUADRO 02 – VANTAGENS DA FOTOGRAMETRIA SOBRE O SVLA	26

LISTA DE SIGLAS

ASCII	- American Standard Code for Information Interchange
CCD	- Charge-Coupled Device
CNPq	- Conselho Nacional de Pesquisa
CP	- centro perspectivo da câmara
GPS	- Global Positioning System
INS	- Inertial Navigation System
ISPRS	- International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
LACTEC	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LASER	- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LiDAR	- Light Detection And Ranging
MMQ	- Método dos Mínimos Quadrados
MDS	- Modelo Digital de Superfície
MDT	- Modelo Digital de Terreno
POE	- Parâmetros de Orientação Exterior
POI	- Parâmetros de Orientação Interior
SAD69	- South American Datum (realização 1969)
SVLA	- Sistema de Varredura LiDAR Aerotransportado
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UTM	- Universal Transverse Mercator

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 JUSTIFICATIVA.....	3
1.4 ESTRUTURA E CONTEÚDO DO TRABALHO.....	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 ESTADO DA ARTE	6
2.2 MODELOS MATEMÁTICOS.....	9
2.2.1 Modelo de colinearidade.....	10
2.2.2 Modelo dos planos equivalentes.....	12
2.2.3 Método de fototriangulação de Habib	15
2.2.4 Modelo de colinearidade estendido para feições retas.....	17
2.2.5 Modelo de colinearidade estendido para feições lineares Paramétricas ...	19
2.2.6 Modelo matemático de Mulawa e Mikhail	20
2.2.7 Modelo fotogramétrico com uso de planos segmentados.....	22
2.3 SISTEMA DE VARREDURA LIDAR AEROTRANSPORTADO.....	23
2.4 SISTEMA DE REFERÊNCIA DO ESPAÇO IMAGEM.....	27
3 MATERIAIS E MÉTODO	30
3.1 MATERIAIS.....	30
3.2 MÉTODO	31
3.2.1 Coleta das fotocoordenadas e correção dos erros sistemáticos.....	31
3.2.2 Manuseio dos dados SVLA.....	33
3.2.3 Aquisição de pontos contidos nos telhados	33

3.3 MODELO PROPOSTO	36
3.3.1 Intersecção de planos adjacentes no espaço objeto	36
3.3.2 Modelo de intersecção de planos adjacentes.....	38
3.4 GERAÇÃO DE DADOS SIMULADO.....	43
4 EXPERIMENTOS.....	45
4.1 CARACTERÍSTICA DOS EXPERIMENTOS COM DADOS SIMULADOS.....	45
4.3.1 Discussão dos resultados obtidos com dados simulados	47
4.2 CARACTERÍSTICA DOS EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS	51
4.2.1 Discussão dos resultados do experimento do Tipo I.....	54
4.2.2 Discussão dos resultados do experimento do Tipo II.....	57
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS.....	59
5.1 CONCLUSÃO	59
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXO.....	65
APÊNDICE	69

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A integração de dados derivados de Fotogrametria e sistema de varredura LiDAR (em inglês, *light detection and ranging*) aerotransportado (SVLA) apresenta propriedades sinérgicas que vêm inovando a forma de execução das diferentes tarefas de mapeamento fotogramétrico, tais como: a orientação indireta de fotografias; a geração de modelos digitais de terreno (MDT) e modelos digitais de superfície (MDS); a geração de ortofoto digital e a atualização de informações cartográficas.

A principal característica do SVLA é a aquisição de uma nuvem de pontos tridimensionais sobre a superfície física de forma rápida segura e com precisão. Além disso o perfilamento é aleatório e a densidade dos pontos depende da velocidade, altura de vôo, taxa e ângulo de varredura, entre outros aspectos. Alguns sistemas também propiciam o valor da intensidade do pulso de retorno LASER (em inglês, *light amplification by stimulated emission of radiation*). Essas informações podem ser pós-processadas e empregadas para produzir uma imagem de intensidade do pulso refletido, com potencialidade de favorecer a identificação, detecção e reconhecimento dos objetos presentes na cena. Contudo, Maas (2003) assevera que a complexidade do sistema reflete sobre a qualidade posicional das coordenadas, principalmente a planimetria; cujas principais fontes de erros são: os componentes básicos que integram o sistema (integração GPS/INS e LASER); emprego das transformações entre os sistemas referenciais fixados e adotados; tipo e declividade do terreno perfilado. Enfim, a maior contribuição do SVLA para a Fotogrametria é seu potencial para complementar as informações adquiridas, uma vez que a componente altimétrica é obtida com precisão superior ao que se consegue determinar por meio de técnicas fotogramétricas.

Esta sinergia derivada da integração de dados SVLA e Fotogrametria também pode ser potencialmente explorada como fonte de extração de controle de campo para o processo de orientação de fotografias, cuja precisão de seus produtos depende da qualidade da informação extraída no terreno. A orientação exterior de fotografias é tarefa fundamental em Fotogrametria e consiste em determinar os parâmetros de orientação exterior (posição e rotação) da câmera no momento da

exposição das fotografias. Existem, basicamente, dois métodos de orientação exterior de fotografias, isto é: o método direto e o método indireto. O método direto consiste em determinar a posição e rotação da câmara a partir da integração de sensores GPS/INS (em inglês, *global positioning system and inertial navigation system*), no momento da aquisição da fotografia. O método indireto consiste em determinar os parâmetros de orientação exterior da câmara (POEs) através de um modelo matemático, como o de colinearidade, e um método de ajustamento de observações, tal como o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Geralmente, o sistema referencial requerido para estabelecer a relação entre o espaço imagem e o espaço objeto, depende da geometria do sensor e dos dados disponíveis.

Vários modelos rigorosos têm sido desenvolvidos e empregados no processo de orientação de fotografias, tais como os modelos baseados em: pontos; linhas retas; planos; etc. Convencionalmente, as equações de colinearidade são o modelo matemático mais aplicado, juntamente com pontos de apoio (primitivas pontuais) coletados através de métodos de levantamento geodésico. No entanto, desde que uma nuvem de pontos 3D LiDAR é adquirida de forma aleatória e irregular sobre a superfície física, não pode ser assumida nenhuma correspondência ponto a ponto entre o conjunto de dados fotogramétricos e LiDAR. Além do que, as feições pontuais não são geometricamente bem definidas, não são facilmente identificadas e reconhecidas semanticamente em fotografias digitais, tão pouco em imagens de intensidade do pulso LASER e também são ocorrências isoladas; recaindo sobre o processo de estabelecimento automático de correspondência.

Por outro lado, as feições lineares e os planos segmentados são primitivas geometricamente bem definidas e potencializam o reconhecimento semântico dos objetos, não exigem pré-sinalização de alvos, são facilmente encontradas em áreas urbanas ou com atividades antrópicas e detectadas, quando comparadas com feições pontuais (Kubik, 1988; Tommaselli e Tozzi, 1996; Gahma, 2006).

Dentro deste novo paradigma de integração de dados derivados de diferentes fontes de informações espaciais, este trabalho tem como proposta apresentar um modelo fotogramétrico fundamentado em telhados adjacentes como apoio de campo para a orientação indireta de fotografias digitais. O modelo proposto é baseado no desenvolvimento matemático apresentado por Mulawa e Mikhail (1988). Tal modelo foi adaptado para a inserção dos parâmetros dos planos que definem os telhados adjacentes presentes na imagem de intensidade do pulso LASER.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Essa pesquisa tem como objetivo geral o desenvolvimento e avaliação de um modelo matemático desenvolvido para orientação indireta de fotografias aéreas com uso de planos adjacentes de telhados derivados do sistema SVLA, como apoio de campo.

1.2.2 Objetivos específicos

Em vista do objetivo geral do trabalho, os objetivos específicos são os que seguem:

- Adaptar o modelo supracitado para inserção de observações baseadas nos parâmetros dos planos de telhados adjacentes extraídos da imagem de intensidade do pulso LASER;
- Realizar experimentos com dados simulados e reais; e
- Analisar e discutir os resultados.

1.3 JUSTIFICATIVA

O SVLA é uma tecnologia de medição de alta precisão, e propicia a aquisição de informações tridimensionais sobre a superfície física de forma rápida, segura e em curto período de tempo. Técnicas fotogramétricas também podem ser empregadas para reconstrução tridimensional da superfície e com inexprimível riqueza de informações, no entanto, é um processo moroso e a coordenada altimétrica não pode ser determinada com a mesma precisão obtida com o sistema LASER. Nos últimos anos, a integração de dados derivados do SVLA e Fotogrametria tem sido uma das questões mais discutidas pela comunidade, cuja principal característica é o potencial em complementar a riqueza de informações semânticas advindas dos sensores fotogramétricos de imageamento.

Uma vez que devido a natureza discreta dos pontos perfilados na superfície física, por meio do sistema de varredura LASER, a extração de um ponto na imagem de intensidade do pulso LASER é uma ocorrência isolada, o que inviabiliza o estabelecimento da correspondência direta entre um pulso LASER (*footprint*) e um determinado ponto de interesse medido no espaço imagem. Além disso, milhares de pontos não podem ser medidos diretamente pelo sistema, exigindo a interpolação dos dados; que recai sobre a precisão das coordenadas planialtimétricas. Portanto, devem ser utilizadas representações geométricas que eliminem prováveis singularidades relacionadas com tais representações. Tais feições podem ser representadas por linhas ou planos.

Embora as feições lineares sejam facilmente encontradas e extraídas em ambientes modificados pelo homem, não exigem pré-sinalização de alvos e tão pouco o estabelecimento de correspondências ponto a ponto, representarem descontinuidades em uma única direção entre outras vantagens, quando comparadas com as feições pontuais; também não é abordagem mais adequada para o tratamento na integração de dados derivados do SVLA e Fotogrametria. As principais razões que justificam esta afirmativa são: no caso de extração de feições lineares em imagens de intensidade do pulso LASER, a precisão da primitiva extraída dependerá da qualidade posicional esperada, em função das características do perfilamento da superfície e da resolução espacial da grade interpolada; em fotografias digitais, por exemplo, uma linha reta não é rigorosamente uma reta, por sofrer as distorções das lentes. Ou seja, o paradigma tradicional para orientação indireta de fotografias não é compatível com a natureza de aquisição de ambos os sistemas sensores (LiDAR e fotogramétrico). Por isso, é necessário adotar abordagens inovadoras para compatibilizar a integração dos dados derivados dos sistemas supracitados.

Neste caso, se deve propor o uso de feições geometricamente bem definidas advindas da intersecção entre telhados planos adjacentes derivados do SVLA, o que certamente justifica as pesquisas sobre este problema. Outras razões que justificam o desenvolvimento deste trabalho são: a demanda por desenvolvimento de novas abordagens matemáticas para orientação indireta de fotografias; o desenvolvimento e aquisição do conhecimento de novas tecnologias e sensores, para fins de monitoramento e mapeamento 3D; e a relevância científica comprovada, devido à importância dispensada pela ISPRS *Commission V – Close-Range Sensing: Analysis and Applications*; aos objetos de estudo deste trabalho.

1.4 ESTRUTURA E CONTEÚDO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo são apresentadas as considerações iniciais, os objetivos gerais e específicos e a justificativa do estudo. O segundo capítulo apresenta uma revisão de literatura que fornece embasamento para o desenvolvimento do tema proposto. No terceiro é apresentada a metodologia de desenvolvimento de um modelo fotogramétrico baseado no uso de planos de telhados adjacentes como apoio de campo, derivados do sistema SVLA. No quarto capítulo são mostrados os experimentos realizados com dados simulados e reais. E finalmente, no capítulo quinto são apresentados as conclusões e considerações finais do trabalho, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O método de orientação indireta de fotografias consiste em estimar os parâmetros de posição e rotação da câmara, no momento da tomada da fotografia; através de um modelo matemático, um método de ajustamento de observações e feições cartográficas correspondentes extraídas no espaço imagem e no espaço objeto. Diversas pesquisas na comunidade têm abordado o tema de integração de dados derivados de Fotogrametria e SVLA para orientação indireta de fotografias. Essas abordagens tratam da geometria do sensor e dos dados disponíveis para executar tal tarefa. É importante notar que o tipo de feição a ser utilizada depende do modelo matemático funcional empregado para relacionar os espaços imagem e objeto.

Apesar da primitiva pontual ser a mais difundida e utilizada na comunidade fotogramétrica, desde a década de 1980, feições lineares e planos segmentados têm sido usados como controle de campo no processo de orientação de fotografias (Lugnani, 1980; Kubik, 1988; Mulawa e Mikhail, 1988; Tommaselli e Lugnani, 1988; Roberts, 1988; Liu e Huang, 1988; Heikkila, 1991; Shwermann, 1994; Heuvel, 1997; Dal Poz e Tommaselli, 1988; Habib 1999 e 2002; Schenk, 2004); e outros. No caso da integração de dados com abordagens voltadas para o uso de feições pontuais pode-se citar os trabalhos dos seguintes pesquisadores, a saber: Mitishita et al. (2008); dos Santos et al. (2010a); Mitishita et al. (2011); entre outros. Já os trabalhos relacionados com uso de feições lineares e planos segmentados são: Habib et al. (2004, 2005a, 2005b, 2007); Dalmolin et al. (2005); dos Santos et al. (2010b); etc.

2.1 ESTADO DA ARTE

A idéia de usar feições não pontuais no processo de orientação indireta de fotografias, não é nova. Lugnani (1980) demonstrou a viabilidade da utilização de entidades lineares como controle de campo. Ele introduziu o conceito de feição linear e apresentou a formulação para observações fotogramétricas e feições lineares para serem combinadas no MMQ. Este então foi o primeiro passo para combinar métodos baseados em feições lineares com a teoria da estimação. Desde então, muitos

esforços têm sido feitos para explorar o uso de diferentes tipos de feições cartográficas em tarefas fotogramétricas. Posteriormente, Mulawa e Mikhail (1988) expandiu o modelo matemático apresentado em sua tese de doutorado para incluir diferentes modelos (linhas, curvas e planos) e apresentou o princípio de isometria com feições lineares. Tommaselli e Lugnani (1988) apresentaram o modelo dos planos equivalentes, que estabelece uma relação funcional entre linhas retas no espaço objeto e no espaço imagem. Esse modelo foi utilizado com êxito na resseção espacial de fotografias e na criação de modelos estereoscópicos. Conforme a análise dos resultados, a qualidade dos parâmetros de posição e rotação da câmara é fortemente dependente do número e configuração geométrica das linhas retas usadas na estimativa dos parâmetros. De acordo com os autores, melhores resultados podem ser obtidos com linhas retas de grandes dimensões.

Tommaselli e Tozzi (1996) aperfeiçoaram o modelo supracitado para aplicá-lo num procedimento recursivo de resseção espacial de fotografias. Os resultados obtidos demonstraram que a abordagem proposta pode ser usada em sistemas de visão de máquina em tempo real. Heuvel (1997) propôs um método para a determinação dos POEs, através de um conjunto de feições lineares paralelas e coplanares formando um paralelogramo no espaço objeto. O procedimento consiste em duas etapas, a saber: na primeira etapa são calculadas as distâncias entre o centro perspectivo da câmara e as feições lineares; a segunda etapa consiste na utilização destas distâncias para a determinação dos POEs. A principal vantagem deste método é a ausência de singularidades em relação à distribuição das feições.

Zalmanson (2000) desenvolveu um método indireto de orientação de fotografias baseado no uso de um conjunto de curvas extraídas nos espaços imagem e objeto. Os Experimentos com curvas analíticas, também conhecidas como feições *free-forms* apresentaram resultados precisos, confirmando a viabilidade do método proposto. Habib (1999) modificou o modelo de Mulawa e Mikhail (1988) combinando pontos e feições lineares para o problema de fototriangulação. Nesta abordagem, uma linha no espaço objeto é representada por dois pontos que não são necessariamente seus pontos: final e inicial. Esta escolha é causa natural da facilidade em encontrar segmentos de linhas em cenas urbanas. Neste caso, a relação de correspondência é bimodal, uma vez que na primeira fotografia a feição linear é representada por pontos com coordenadas fotogramétricas (x' , y') e nas fotografias subseqüentes, são representadas por duas coordenadas polares (θ , ρ).

Para a primeira fotografia a relação geométrica entre as feições no espaço imagem e no espaço objeto é definida pela equação de colinearidade, enquanto que para as demais fotografias existe uma condição de coplanaridade.

É importante lembrar que os métodos, de orientação indireta de fotografias, discutidos acima, são baseados no uso de apoio de campo determinado através de técnicas de levantamento geodésico. Esses métodos são morosos e de alto custo operacional. Uma alternativa para extração de apoio de campo de forma rápida e autônoma é o uso do sistema LiDAR. Com este novo conceito em extração de apoio de campo Habib et. al. (2004) apresentaram uma abordagem para orientação de fotografias utilizando feições *free forms* e dados LIDAR. Os experimentos realizados apontaram certa viabilidade na aplicação do método, apesar das imprecisões adicionais que podem ser atribuídas a algumas dificuldades e ambigüidades provenientes da identificação das feições na fotografia e na imagem de intensidade do pulso LASER. Dalmolin et. al. (2005) utilizaram o modelo dos planos equivalentes, desenvolvido por Tommaselli e Tozzi (1996), usando como apoio de campo linhas retas automaticamente extraídas na imagem de intensidade do pulso LASER. Os resultados apresentados mostraram a potencialidade do método; embora não sejam estatisticamente satisfatórios, uma vez que não foi possível extrair linhas retas com precisão devido à baixa qualidade geométrica e radiométrica da imagem de intensidade, além do algoritmo de extração de feições retas utilizado não ser robusto o suficiente para tratar os problemas evidenciados.

Mitishita et. al. (2008) apresentaram um método de orientação exterior de fotografias utilizando como controle de campo o centróide de telhados de edifícios derivados de dados LiDAR. Os centróides são determinados a partir da intersecção de retas que ligam cantos opostos de edificações com telhados planos. No entanto, os resultados obtidos apresentaram discrepâncias inferiores ao esperado, viabilizando a aplicação da técnica proposta. Uma desvantagem do método é sua limitação ao uso de telhados planos. Dos Santos et. al. (2010) empregaram um modelo de monorrestituição para extrair diretamente coordenadas tridimensionais sobre os pontos extremos de linhas retas, manualmente extraídas na fotografia. A determinação direta das coordenadas tridimensionais é feita a partir da intersecção da reta de colinearidade e o MDT derivado do SVLA. Determinadas as linhas retas de controle, o modelo dos planos equivalentes é empregado para estimar os parâmetros de orientação da fotografia. Os resultados dos experimentos mostraram que o método

é promissor e possui potencialidade na orientação indireta de fotografias. A integração de dados permitiu a extração de apoio fotogramétrico com melhor qualidade que a precisão nominal fornecida pelo sistema LiDAR.

Desde que os métodos de orientação indireta de fotografias baseados em feições lineares foram introduzidos primeiro nos últimos anos, com o surgimento da tecnologia LiDAR, diferentes abordagens fundamentadas em outros tipos de feições têm sido apresentadas. Em uma forma bastante simplificada, o planos segmentados a partir de um conjunto de pontos tridimensionais tem mostrado potencialidade no processo de orientação de fotografias.

Para mostrar a viabilidade do uso de planos segmentados no método indireto de orientação de fotografias, Habib et al. (2005a) apresentaram uma nova abordagem onde superfícies planas, especificamente telhados de edificações definidas através de dados brutos derivados do SVLA, são utilizadas como apoio de campo. Diversos experimentos foram realizados e os resultados obtidos foram comparados com aqueles determinados por métodos convencionais de orientação indireta de fotografias. Em Habib et al. (2007) é apresentada uma metodologia que combina diversos tipos de feições para o georreferenciamento de fotografias adquiridas com câmaras digitais de pequeno formato e um par de imagens de satélite IKONOS. Neste trabalho, duas metodologias são propostas; sendo uma baseada no uso de feições lineares, enquanto a outra emprega o uso de planos segmentados, ambas extraídas dos dados LiDAR e incorporadas como apoio de campo num ajustamento simultâneo por feixes de raios perspectivos. Os resultados experimentais mostraram que é possível a integração de dados LiDAR e fotogramétricos para o georreferenciamento de imagens. Além disso, foi demonstrado que a incorporação de dados LIDAR, imagens aéreas e de satélite em um único procedimento de fototriangulação fornecem resultados compatíveis, quando comparados com métodos tradicionais.

2.2 MODELOS MATEMÁTICOS

Nesta seção serão apresentados alguns modelos matemáticos desenvolvidos para orientação indireta de fotografias. Os modelos matemáticos aqui apresentados relacionam o espaço imagem e o espaço objeto por meio de feições pontuais, lineares e/ou feições *free-forms*. Primeiramente será apresentado o modelo de colinearidade.

Em seguida serão apresentados modelos matemáticos baseados em feições lineares e planos segmentados.

2.2.1 Modelo de colinearidade

De acordo com Mikhail et al. (2001) a característica fundamental das imagens de quadro é que o centro perspectivo da câmara (CP), o ponto no espaço imagem e o seu correspondente no espaço objeto são colineares. Esta condição pode ser expressa como uma componente de um vetor no espaço imagem ou no espaço objeto. A Figura 1 apresenta a geometria do modelo supracitado.

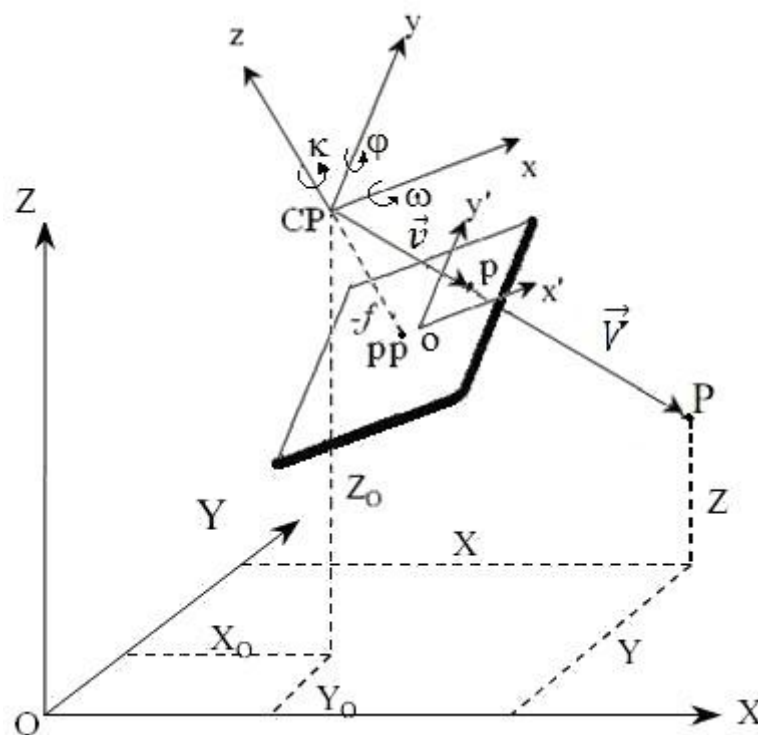


FIGURA 1 – CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE.

FONTE: O autor (2011).

Onde,

- CP: centro perspectivo da câmara;
- CP_{xyz} : é o sistema referencial fotogramétrico tridimensional, cuja origem é o centro perspectivo da câmara;
- f : distância focal calibrada da câmara;

- $ox'y'$: o sistema de coordenadas com origem no centro da fotografia;
- κ , φ e ω : ângulos de Euler correspondentes às rotações em torno de z , y e x , respectivamente;
- pp : ponto principal definido pela projeção ortogonal do CP sobre o plano da fotografia;
- OXYZ: sistema de coordenadas tridimensionais no espaço objeto;
- X_0 , Y_0 e Z_0 : coordenadas tridimensionais do CP no espaço objeto;
- P : ponto da superfície física da Terra;
- X , Y e Z : coordenadas tridimensionais do ponto P no espaço objeto;
- p : fotografia de P no positivo fotográfico.
- \vec{v} : vetor que parte do CP até um ponto p no espaço imagem; e
- \vec{V} : vetor que parte do CP até o ponto P no espaço objeto.

Na Figura 1 o vetor \vec{v} é uma versão reduzida do vetor \vec{V} . Esses vetores podem ser expressos em relação aos sistemas de coordenadas, como segue:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' - x_{pp} \\ y' - y_{pp} \\ f - 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde x , y , $-f$ são as coordenadas do ponto p no sistema referencial fotogramétrico tridimensional, x' , y' são as coordenadas do ponto p no sistema referencial fiducial (ou sistema referencial com origem no centro da fotografia, caso a fotografia é tomada por uma câmara digital) e x_{pp} , y_{pp} são as coordenadas do ponto principal da fotografia.

O vetor \vec{V} pode ser relacionado ao vetor \vec{v} multiplicando suas coordenadas pela matriz de rotação R (dada em função dos ângulos de Euler (κ , φ , ω), sendo essa matriz o produto das matrizes na ordem R_κ , R_φ e R_ω), necessárias para alinhar os dois sistemas de coordenadas. Mas para que os vetores \vec{v} e \vec{V} sejam iguais é necessário ainda multiplicar o vetor \vec{V} pelo fator de escala λ , como segue:

$$\vec{v} = \lambda R \vec{V} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Sendo

$$r_{11} = \cos \varphi \cos \kappa$$

$$r_{12} = \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa$$

$$r_{13} = \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa$$

$$r_{21} = -\cos \varphi \sin \kappa$$

$$r_{22} = \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa$$

$$r_{23} = \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa$$

$$r_{31} = \sin \varphi$$

$$r_{32} = -\sin \omega \cos \varphi$$

$$r_{33} = \cos \omega \cos \varphi$$

Onde r_{ij} são elementos da matriz R de rotação em função dos ângulos de rotação da câmara para $i = 1 \dots 3$ e $j = 1 \dots 3$. Para eliminar o fator de escala λ , basta dividir a 1ª e a 2ª equação pela 3ª, equação resultando assim nas equações de colinearidade dada abaixo:

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= -f \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (4)$$

A Equação (4) é a conhecida equação de colinearidade. A seguir serão apresentados modelos fotogramétricos baseados em feições lineares.

2.2.2 Modelo dos planos equivalentes

O modelo dos planos equivalentes foi proposto por Tommaselli e Lugnani (1988) e rearranjado por Tommaselli e Tozzi (1996) para tornar uma função explícita. Esse modelo relaciona funcionalmente uma linha reta no espaço imagem com sua homóloga no espaço objeto, considerando a equivalência entre os *planos de*

interpretação descritos no espaço objeto e no espaço imagem (Figura 2). O plano de interpretação no espaço imagem é o plano formado pela linha reta no espaço imagem e o CP da câmara; já o plano de interpretação no espaço objeto é o plano formado pela linha reta no espaço objeto e o CP da câmara.

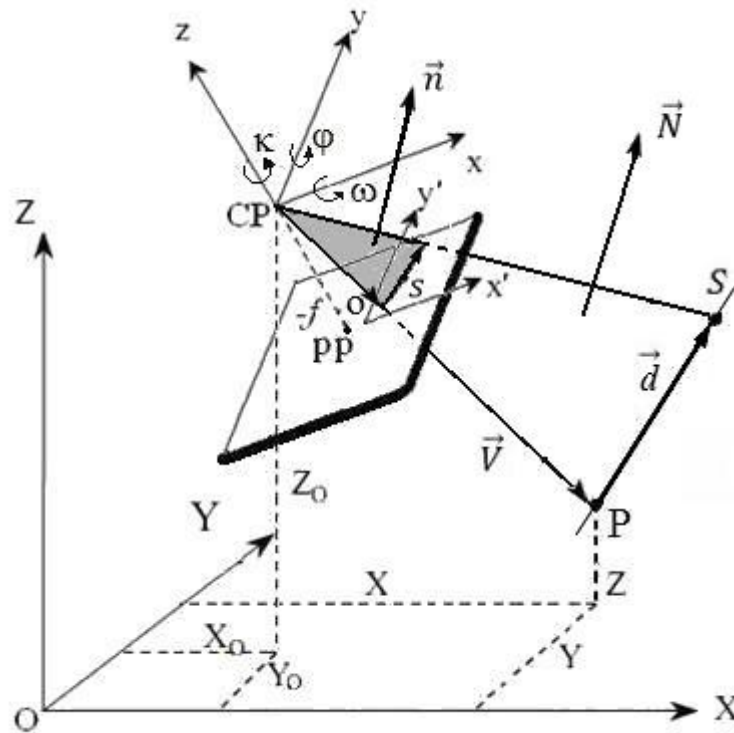


FIGURA 2 – GEOMETRIA DOS PLANOS EQUIVALENTES.

FONTE: O autor (2011).

Onde,

- S : linha reta no espaço objeto;
- s : linha reta no espaço imagem homóloga à S ;
- P : um ponto qualquer de S ;
- \vec{V} : vetor que parte do CP até o ponto P no espaço objeto.
- \vec{d} : vetor diretor da reta S ;
- \vec{N} : vetor normal ao plano de interpretação no espaço objeto;
- \vec{n} : vetor normal ao plano de interpretação no espaço imagem.

Segundo Tommaselli e Tozzi (1996) a equação da reta s na forma normal é dada por:

$$x \cos \theta + y \sin \theta - \rho = 0 \quad (5)$$

Onde θ e ρ são os parâmetros da reta s , x e y são coordenadas de um ponto qualquer da reta s . Logo o vetor \vec{n} normal ao plano de interpretação no espaço imagem é dado por:

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} -f \cos \theta \\ -f \sin \theta \\ \rho \end{bmatrix} \quad (6)$$

O vetor normal ao plano de interpretação no espaço objeto é definido pelo produto vetorial entre o vetor diretor da linha reta \vec{d} e o vetor \vec{V} (TOMMASELLI e TOZZI, 1996).

$$\vec{N} = \vec{d} \times \vec{V} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_3(Y - Y_0) + v_2(Z - Z_0) \\ v_3(X - X_0) - v_1(Z - Z_0) \\ -v_2(X - X_0) + v_1(Y - Y_0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Onde v_1 , v_2 , e v_3 são as componentes do vetor diretor \vec{d} no espaço objeto.

A fim de eliminar as diferenças angulares entre os sistemas de referência do espaço imagem e do espaço objeto é necessário multiplicar o vetor \vec{N} pela matriz de rotação R , resultando em um vetor normal ao plano de interpretação no espaço objeto que possui a mesma direção que o vetor \vec{n} , mas com magnitude diferente. Para que os vetores \vec{n} e \vec{N} sejam iguais é necessário ainda multiplicar o vetor \vec{N} pelo fator de escala λ , como segue (TOMMASELLI, 1993):

$$\vec{n} = \lambda R \vec{N} = \begin{bmatrix} -f \cos \theta \\ -f \sin \theta \\ \rho \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3 \\ r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3 \\ r_{31}N_1 + r_{32}N_2 + r_{33}N_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Tommaselli e Tozzi (1996) eliminaram algebricamente o elemento λ dividindo a Equação (8) em dois conjuntos de equações, de acordo com o valor do parâmetro θ para que sejam evitadas divisões por zero. Para intervalos de linhas retas horizontais ($45^\circ < \theta \leq 135^\circ$ ou $225^\circ < \theta \leq 315^\circ$) tem-se:

$$\begin{aligned}
 a &= -\frac{\cos \theta}{\sin \theta} = -\frac{r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3}{r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3} \\
 b &= -\frac{\rho}{\sin \theta} = -f \frac{r_{31}N_1 + r_{32}N_2 + r_{33}N_3}{r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Onde os elementos a e b são os parâmetros da equação da reta horizontal no plano:

$$y = ax + b \tag{10}$$

Para intervalos de retas verticais ($0^\circ < \theta \leq 45^\circ$ ou $135^\circ < \theta \leq 225^\circ$ ou $315^\circ < \theta \leq 360^\circ$) tem-se:

$$\begin{aligned}
 a^* &= \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = -\frac{r_{21}N_1 + r_{22}N_2 + r_{23}N_3}{r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3} \\
 b^* &= \frac{\rho}{\cos \theta} = -f \frac{r_{31}N_1 + r_{32}N_2 + r_{33}N_3}{r_{11}N_1 + r_{12}N_2 + r_{13}N_3}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Onde os elementos a^* e b^* são os parâmetros da equação da reta verticais no plano:

$$x = a^*y + b^* \tag{12}$$

Schenk (2004) classifica o modelo acima como uma abordagem coplanar, pois ele preserva a coplanaridade entre a linha reta no espaço imagem, a linha reta no espaço objeto e o CP da câmara. Na próxima seção será apresentada uma versão modificada do modelo dos planos equivalentes.

2.2.3 Método de fototriangulação de Habib

Habib *et. al.* (1999) apresentaram um métodos de fototriangulação, que se baseia na manipulação de retas. Neste método são usadas feições lineares que aparecem em um grupo de fotografias sobrepostas, juntamente com alguns pontos de ligação e controle. Inicialmente as feições lineares extraídas na primeira fotografia são representadas pelos pontos p_1 e p_2 . A relação entre os pontos no espaço imagem e seus pontos correspondentes P_1 e P_2 no espaço objeto é estabelecida através das

equações de colinearidade. Já para as fotografias subseqüentes, as feições lineares homólogas são representadas pela equação normal (Equação (5)) da reta definida pelos parâmetros θ_i e ρ_i , pois se trata da i -ésima fotografia.

Assim como o modelo dos planos equivalentes, no modelo proposto por Habib *et. al.* (2000) não há necessidade de correspondência ponto a ponto entre os dois pontos observados sobre a feição reta na primeira fotografia e aqueles observados sobre as fotografias seguintes, como é mostrado na Figura 3. Na i -ésima fotografia o *plano objeto* é definido, como o plano que contém o CP da i -ésima fotografia (CP_i) e a feição reta no espaço objeto. O plano fotográfico como sendo plano que contém o CP_i e o segmento de reta contido nesta fotografia

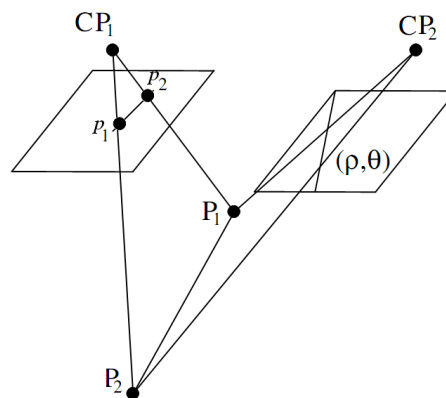


FIGURA 3 – GEOMETRIA DO PRIMEIRO MODELO DE HABIB.

FONTE: HABIB *et. al.* (2000).

Onde,

- P_1, P_2 : pontos pertencentes à feição reta no espaço objeto;
- p_1, p_2 : pontos pertencentes à feição reta na primeira fotografia;
- θ, ρ : representação das feições retas nas fotografias seguintes;
- CP_1 : centro perspectivo da câmara da primeira fotografia.
- CP_2 : centro perspectivo da câmara da segunda fotografia.

De forma análoga ao modelo dos planos equivalentes o plano Imagem da fotografia i pode ser definido pelo seu vetor normal \vec{n}_i , que pode ser expresso em relação aos sistemas de coordenadas fotogramétricas como segue:

$$\vec{n}_i = \begin{bmatrix} -f \cdot \cos \theta_i \\ -f \cdot \sin \theta_i \\ \rho_i \end{bmatrix} \quad (13)$$

Por outro lado, o vetor \vec{V}_1 que parte do CP_i até o ponto P_1 , está contido no plano objeto, assim esse vetor é perpendicular ao vetor normal ao plano objeto. De forma análoga o vetor \vec{V}_2 que parte do CP_i até o ponto P_2 , também está contido no plano objeto. Deste modo, para cada uma das feições lineares são introduzidas injunções ao modelo cuja condição diz que o produto escalar desses vetores deve ser zero, ou seja:

$$\begin{aligned} (R_i \vec{V}_1) \cdot \vec{n}_i &= \left(R_i \begin{bmatrix} X_1 - X_{0_i} \\ Y_1 - Y_{0_i} \\ Z_1 - Z_{0_i} \end{bmatrix} \right)^T \begin{bmatrix} -f \cdot \cos \theta_i \\ -f \cdot \sin \theta_i \\ \rho_i \end{bmatrix} = 0 \\ (R_i \vec{V}_2) \cdot \vec{n}_i &= \left(R_i \begin{bmatrix} X_2 - X_{0_i} \\ Y_2 - Y_{0_i} \\ Z_2 - Z_{0_i} \end{bmatrix} \right)^T \begin{bmatrix} -f \cdot \cos \theta_i \\ -f \cdot \sin \theta_i \\ \rho_i \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Onde $X_{0_i}, Y_{0_i}, Z_{0_i}$ são as coordenadas do CP_i no espaço objeto, X_1, Y_1, Z_1 são as coordenadas do ponto P_1 no espaço objeto, X_2, Y_2, Z_2 são as coordenadas do ponto P_2 no espaço objeto, R_i é matriz de rotação da fotografia i , que relaciona o vetor normal ao plano objeto com o vetor normal ao plano fotografia.

Este método pode ser ligeiramente modificado para realizar uma ressecção espacial de uma única foto com uso de feições lineares como apoio de campo. Essa feições podem ser facilmente obtidos a partir de um banco de dados GIS existentes (HABIB *et. al.*, 2000).

2.2.4 Modelo de colinearidade estendido para feições retas

O modelo de colinearidade estendido (também conhecido como modelo de parâmetros adicionais) apresentado por Schenk (2004) é baseado na relação entre pontos que descrevem feições lineares extraídas no espaço imagem e suas

$$P = A + t\vec{d} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A + td_x \\ Y_A + td_y \\ Z_A + td_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

Onde t é um parâmetro livre, d_x , d_y , e d_z são as componentes do vetor diretor \vec{d} . Substituindo a Equação (15) na Equação (4), têm-se a equação de colinearidade estendida:

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{r_{11}(X_A + td_x - X_0) + r_{12}(Y_A + td_y - Y_0) + r_{13}(Z_A + td_z - Z_0)}{r_{31}(X_A + td_x - X_0) + r_{32}(Y_A + td_y - Y_0) + r_{33}(Z_A + td_z - Z_0)} \\ y &= -f \frac{r_{21}(X_A + td_x - X_0) + r_{22}(Y_A + td_y - Y_0) + r_{23}(Z_A + td_z - Z_0)}{r_{31}(X_A + td_x - X_0) + r_{32}(Y_A + td_y - Y_0) + r_{33}(Z_A + td_z - Z_0)} \end{aligned} \quad (16)$$

Neste caso além dos seis parâmetros de orientação exterior (κ , φ , ω , X_0 , Y_0 , Z_0), o parâmetro t também é considerado como incógnita adicional a ser estimada para cada feição linear aplicada no MMQ. De acordo com Schenk (2004), embora este modelo funcione adequadamente, ele é sensível às aproximações iniciais. No entanto, não exige que uma feição linear seja extraída no espaço imagem, pois neste caso é possível utilizar qualquer ponto da feição linear no espaço imagem como observação no processo; uma vez que, geralmente, não é possível determinar feições lineares diretamente na fotografia.

Esse autor ainda utiliza outra forma de representar a reta S proposta por Roberts (1988), baseado em dois parâmetros de orientação e dois parâmetros de posição. Essa representação foi substituída na equação de colinearidade. (maiores detalhes ver Schenk (2004)).

2.2.5 Modelo de colinearidade estendido para feições lineares Paramétricas

De forma análoga, Mulawa e Mikhail (1988), estenderam o modelo de colinearidade para relacionar funcionalmente feições pontuais extraídas no espaço imagem com curvas paramétricas no espaço objeto. A representação paramétrica de uma curva no espaço objeto é dada por:

$$\Gamma(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \\ Z(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Onde $\Gamma(t)$ descreve o lugar geométrico dos pontos na curva no espaço objeto como uma função do parâmetro t . Substituindo a Equação (17) na Equação (4), tem-se a equação de colinearidade estendida para feições lineares paramétricas.

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{r_{11}(X(t) - X_0) + r_{12}(Y(t) - Y_0) + r_{13}(Z(t) - Z_0)}{r_{31}(X(t) - X_0) + r_{32}(Y(t) - Y_0) + r_{33}(Z(t) - Z_0)} \\ y &= -f \frac{r_{21}(X(t) - X_0) + r_{22}(Y(t) - Y_0) + r_{23}(Z(t) - Z_0)}{r_{31}(X(t) - X_0) + r_{32}(Y(t) - Y_0) + r_{33}(Z(t) - Z_0)} \end{aligned} \quad (18)$$

Zalmanson (2000) apresenta um modelo matemático que relaciona o ângulo da reta tangente à curva no espaço imagem com o vetor diretor da reta tangente a curva homóloga no espaço objeto. Uma discussão mais ampla sobre este assunto, pode ser encontrada em Zalmanson (2000). Outros modelos matemáticos desenvolvidos para recuperar POEs, que utilizam parábolas, círculos, elipses e hipérbolas como apoio de campo, são encontrados em Mulawa e Mikhail (1988).

2.2.6 Modelo matemático de Mulawa e Mikhail

Outro modelo matemático aplicado à resseção espacial de imagens que também relaciona pontos pertencentes às feições retas extraídas no espaço imagem e feições retas correspondentes no espaço objeto é o modelo apresentado por Mulawa e Mikhail (1988). Como é apresentado na Figura 5 o vetor \vec{v} que parte do CP até um ponto qualquer p é pertencente à feição reta s contido no espaço imagem é coplanar ao vetor diretor da feição reta S no espaço objeto e o vetor \vec{V} que parte do CP até o ponto qualquer P da feição reta S no espaço objeto.

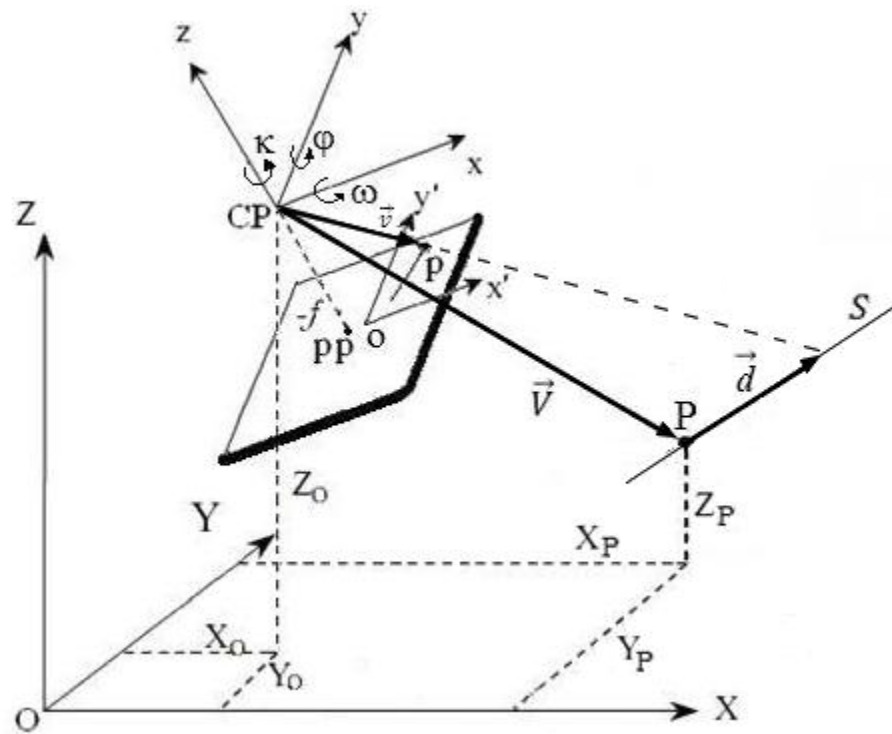


FIGURA 5 – GEOMETRIA DO MODELO DE MULAWA e MIKHAIL.

FONTE: O autor (2011).

Onde:

- S : feição reta no espaço objeto;
- \vec{d} : vetor diretor da feição reta S no espaço objeto;
- P : ponto qualquer na feição reta S no espaço objeto;
- X_p, Y_p e Z_p : coordenadas tridimensionais do ponto P no espaço objeto;
- p : fotografia de um ponto qualquer na feição reta S no espaço imagem.
- \vec{V} : vetor que parte do CP até o ponto P ; e
- \vec{v} : vetor que parte do CP até o ponto p .

Desta forma, sendo o vetor \vec{v} multiplicado pela matriz de rotação transposta (R^T) é coplanar aos vetores \vec{d} e \vec{V} . Assim o produto misto desses vetores deve ser zero, como segue:

$$(\vec{V} \times \vec{d}) \cdot (R^T \vec{v}) = \left(\begin{bmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \right)^T \left(R^T \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} \right) = 0 \quad (19)$$

Onde, x_p e y_p são as coordenadas do ponto p no espaço imagem, d_x, d_y, d_z são as componentes do vetor diretor da feição reta S no espaço objeto.

Para Mulawa e Mikhail (1988) a grande vantagem deste modelo é a relação de coplanaridade que capta a essência da geometria sem precisar de parâmetros adicionais. Os autores advertem alguns possíveis casos mal-condicionados, como por exemplo, quando se utiliza feições paralelas. Porém, não invalida a potencialidade deste modelo matemático. Ainda é apontada pelos autores, a possibilidade de se utilizar duas equações para cada feição linear extraída; uma vez que, uma feição linear no espaço imagem pode ser definida por no mínimo dois pontos distintos, oferecendo dois feixes de raios fotogramétricos e, conseqüentemente, duas equações de condição. Maiores detalhes ver Mulawa e Mikhail (1988).

2.2.7 Modelo fotogramétrico com uso de planos segmentados

Habib et al (2005a) apresentaram uma abordagem baseada no uso de planos segmentados como apoio de campo para orientação de fotografias. Neste trabalho, para cada telhado de edificação são extraídos no mínimo três pontos fotogramétricos (O, P, Q) foto identificados em duas ou mais fotografias e um ponto tridimensional $L = (X_p, Y_p, Z_p)$ dos dados LiDAR, cuja condição é pertencer ao plano formado por OPQ (Figura 6).

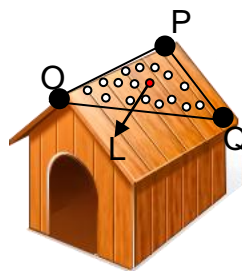


FIGURA 6 – PONTOS FOTOGAMÉTRICOS E PONTOS LiDAR.

FONTE: O autor (2011).

A condição a ser usada como injunção no processo de fototriangulação é a que segue:

$$\begin{vmatrix} X_L & Y_L & Z_L & 1 \\ X_O & Y_O & Z_O & 1 \\ X_P & Y_P & Z_P & 1 \\ X_Q & Y_Q & Z_Q & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (20)$$

O sistema de coordenadas dos pontos O, P, Q no espaço objeto é, inicialmente, desconhecido. Esta restrição é aplicada para todos os pontos LiDAR que pertencem ao plano formado. O mesmo procedimento é aplicado novamente para outro plano candidato e assim por diante.

Ao considerar a expansão de Laplace ao longo das linhas 1-4 (Equação (20)) e ao efetuar algumas manipulações algébricas, o determinante da Equação (20) é escrito como segue:

$$\begin{aligned} C = & X_L \{ Y_O (Z_P - Z_Q) - Z_O (Y_P - Y_Q) + (Y_P Z_Q - Y_Q Z_P) \} \\ & - Y_L \{ X_O (Z_P - Z_Q) - Z_O (X_P - X_Q) + (X_P Z_Q - X_Q Z_P) \} \\ & + Z_L \{ X_O (Y_P - Y_Q) - Y_O (X_P - X_Q) + (X_P Y_Q - X_Q Y_P) \} \\ & - 1 \cdot \{ X_O (Y_P Z_Q - Y_Q Z_P) - Y_O (X_P Z_Q - X_Q Z_P) + Z_O (X_P Y_Q - X_Q Y_P) \} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

A Equação (21) não é linear e desenvolvida para ser usada como injunção no processo de fototriangulação. Os autores enfatizam que é extremamente importante que o número mínimo e a orientação dos planos devem ser investigados para se encontrar os melhores resultados no processo. Para maiores detalhes ver (Ghanma, 2006).

2.3 SISTEMA DE VARREDURA LiDAR AEROTRANSPORTADO

O SVLA tem sido concebido como uma técnica rápida, segura e precisa de aquisição de informações tridimensionais sobre a superfície física. A acessibilidade, o aumento na densidade e versatilidade de novos SVLA estão causando exponencial profusão e disponibilidade dos dados derivados do sistema supracitado.

O sistema consiste em realizar uma varredura sobre a superfície física de forma aleatória, registrar o tempo de emissão e recepção do pulso, bem como as informações fornecidas pelos sistemas de integração GPS/INS e a intensidade de

retorno do pulso de cada objeto perfilado pelo sistema. A Figura 7 ilustra a relação existente na integração do GPS/INS e LASER.

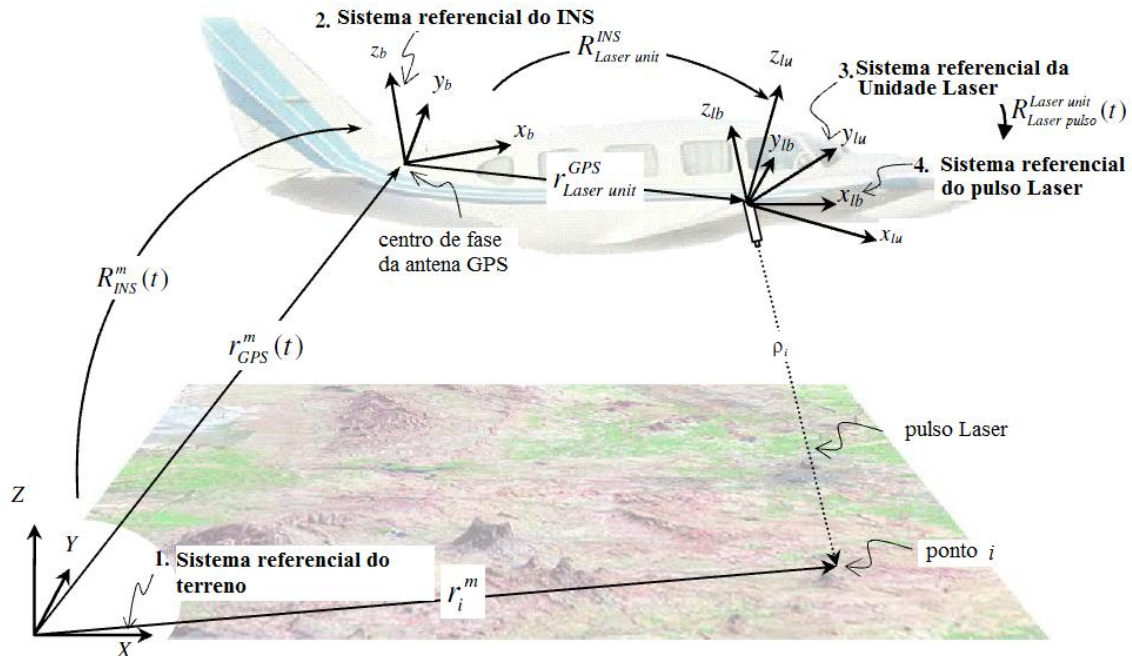


FIGURA 7 – RELAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS GPS, INS E LASER

FONTE: GHANMA (2006)

Onde:

- i : ponto no sistema referencial do terreno;
- r_i^m : vetor posição do ponto i ;
- $r_{GPS}^m(t)$: vetor de coordenadas do GPS no sistema referencial do terreno;
- $R_{INS}^m(t)$: matriz de rotação entre o sistema referencial do INS e o sistema referencial do terreno;
- $R_{LASER_Unit}^{INS}$: matriz de rotação entre o sistema referencial da unidade Laser e o sistema referencial do INS determinados por calibração;
- $r_{LASER_Unit}^{INS}$: vetor do braço entre a origem do INS e a origem do sistema referencial da unidade Laser, determinado por calibração,
- t : tempo de perfilamento do ponto determinado por sincronização do mecanismo do sistema Laser,
- $R_{LASER_Pulso}^{LASER_Unit}(t)$: matriz de rotação entre o sistema referencial da unidade Laser e do pulso Laser,

- ρ_i é a coordenada do ponto i no sistema referencial do pulso Laser.

Portanto a posição de um ponto SVLA é diretamente calculada através da Equação (22) (GHANMA, 2006):

$$r_i^m = r_{GPS}^m(t) + R_{INS}^m(t) R_{LASER_Unit}^{INS} \left(r_{LASER_Unit}^{INS} + R_{LASER_Pulso}^{LASER_Unit}(t) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho_i \end{bmatrix} \right) \quad (22)$$

A complexidade do sistema reflete sobre a qualidade posicional das coordenadas. Para Maas (2003) as principais fontes de erros, que afetam os dados fornecidos pelo SVLA são: os componentes básicos que integram o sistema; transformação de coordenadas entre sistemas; erros dos sistemas de navegação INS e GPS; tempo de sincronização e todos os problemas advindos da integração entre os sensores; entre outros. De acordo com Wehr e Lohr (1999) o sistema SVLA fornece coordenadas, com precisão planimétrica em torno de 50 cm e altimétrica em torno de 15 cm, para uma altura de vôo em torno de 1000 metros.

As informações registradas pelo sistema SVLA são utilizadas em pós-processamento para gerar um MDT (Modelo Digital de Terreno) e um MDS (Modelo Digital de Superfície) da região. Os valores de intensidade do pulso armazenados são, em pós-processamento, utilizados para produzir uma imagem de intensidade do pulso Laser (Figura 8).

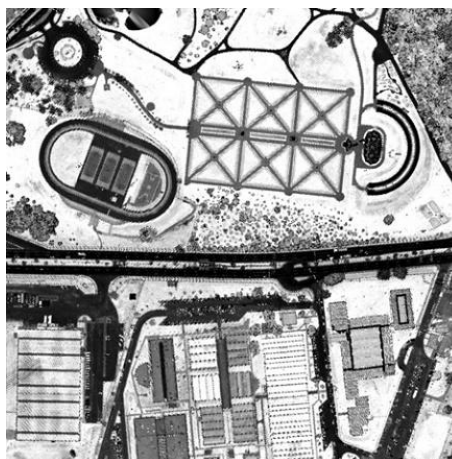


FIGURA 8 – IMAGEM DE INTENSIDADE DO SVLA
FONTE: LACTEC

Como descrito anteriormente, existe uma interessante sinergia entre Fotogrametria e o SVLA. De acordo com Baltasvias (1999) e Satale e Kulkarni (*apud* GHANMA, 2006), os prós e contras de ambas as técnicas de levantamentos e sua natureza complementar impulsiona a integração dos dados, possibilitando uma descrição mais completa da superfície física do ponto de vista geométrico e semântico. A Quadro 1 e Quadro 2 apresentam algumas características.

PRÓS DO SVLA	CONTRAS DA FOTOGRAMETRIA
Alta densidade de informações sobre superfícies homogêneas	Quase nenhuma informação posicional ao longo de superfícies homogêneas
Sensor ativo	Sensor passivo
Aquisição direta de informações tridimensionais	Aquisição indireta de informações tridimensionais
Precisão altimétrica é melhor que a planimétrica	Precisão altimétrica é pior que a planimétrica

QUADRO 01 – VANTAGENS DO SVLA SOBRE A FOTOGRAMETRIA

FONTE: GHANMA (2006)

PRÓS DA FOTOGRAMETRIA	CONTRAS DO SVLA
Altíssima redundância	Não possui redundância
Rica em informação semântica	Pobre em informação semântica
Precisão planimétrica melhor que altimétrica	Precisão planimétrica pior que altimétrica
Densidade de informações na determinação de Breaklines	Quase nenhuma informação ao longo de Breaklines

QUADRO 02 – VANTAGENS DA FOTOGRAMETRIA SOBRE O SVLA

FONTE: GHANMA (2006)

Uma das vantagens que tem sido discutida pela comunidade é o uso da integração dos dados derivados dos diferentes sensores como alternativa para extração de apoio de campo de forma rápida, autônoma e direta por meio da emissão de pulsos LASER altamente direcionados para a superfície física. Baseado na

hipótese apresentada a seguir será desenvolvido um modelo matemático fundamentado na integração de dados para extração de telhados adjacentes derivados dos dados LiDAR.

2.4 SISTEMA DE REFERÊNCIA DO ESPAÇO IMAGEM

Segundo Gonzalez e Woods (2008) uma imagem digital é composta de um número finito de elementos, sendo que cada elemento tem uma localização e valores particulares. Esses elementos são chamados de pixel (picture element). De acordo com Galo (1993) os pixels de uma imagem são ordenados em uma matriz, sendo que cada pixel é associado por um tom de cinza ou cor.

De acordo com Reiss (2002) uma imagem digital é referenciada por um sistema plano-retangular, levógiro, com origem no canto superior esquerdo da imagem, sendo o eixo X e Y respectivamente coincidentes com a primeira linha e a primeira coluna. Este sistema conhecido como sistema de coordenadas de máquina.

Na realização de processos fotogramétricos com imagens é conveniente transformar as coordenadas de um ponto qualquer do sistema de máquina um sistema de coordenadas é dextrógiro, com origem no centro da imagem, similar ao sistema referencial fiducial (REISS, 2002). Essas transformações podem ser realizadas através de uma translação, uma reflexão no eixo y e ambos seguidos da aplicação de um fator de escala representado pelo tamanho do pixel, como segue:

$$\begin{aligned} x' &= \left(C - \frac{T_C - 1}{2} \right) t_p \\ y' &= \left(-L + \frac{T_L - 1}{2} \right) t_p \end{aligned} \quad (23)$$

Onde, x' e y' são coordenadas referenciadas ao no sistema de coordenadas com origem no centro da imagem, L e C são coordenadas do sistema matricial, T_L e T_C são o tamanho da imagem em coluna (L) e linha (C) e t_p é o tamanho do pixel.

Além disso ainda é necessário corrigir alguns efeitos sistemáticos no processo de aquisição das imagens digitais. A primeira correção a ser feita é a do deslocamento do ponto principal (pp) ocorre pela pequena probabilidade de

coincidência do eixo óptico com o centro do sensor da câmara (REISS, 2002). Para correção deste efeito sistemático é realizada uma translação dos eixos para o ponto principal câmara, como segue:

$$\begin{cases} x_f = x' - x_{pp} \\ y_f = y' - y_{pp} \end{cases} \quad (24)$$

Onde, x_{pp} e y_{pp} são coordenadas do ponto principal no sistema de coordenadas com origem no centro da imagem, x' e y' são as coordenadas no sistema de coordenadas com origem no centro da imagem e, x_f e y_f são coordenadas no referencial fotogramétrico afetadas por alguns erros sistemáticos.

Outros efeitos sistemáticos no processo de aquisição das imagens digitais distorções das lentes. As distorções das lentes são consideradas como perturbações sofridas pelos feixes de luz ao atravessar o sistema ótico (GALO, 1993). Uma dessas as distorções é chamada de distorção radial simétrica, que segundo Andrade (2003), é a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luminoso ao atravessar um sistema de lentes de uma câmara. Conrady (*apud* ANDRADE, 2003) modelou essa distorção por meio do seguinte polinômio:

$$\begin{cases} \delta x_r = x_f(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \\ \delta y_r = y_f(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \end{cases} \quad (25)$$

Sendo

$$r = \sqrt{x_f^2 + y_f^2}$$

Onde, δx_r e δy_r são respectivamente as componente x_f e y_f da distorção radial simétrica e K_1 , K_2 e K_3 são os coeficientes da distorção radial simétrica.

Outro tipo de distorções da lente é denominado de distorção descentrada, e é causada pela impossibilidade do fabricante em produzir uma lente que apresente um alinhamento perfeito de seus eixos ópticos das lentes, implicando num deslocamento da imagem (ANDRADE, 2003). A distorção descentrada pode ser modelada pela seguinte equação:

$$\begin{cases} \delta x_d = P_1(r^2 + 2x'^2) + 2P_2x_fy_f \\ \delta y_d = 2P_1x_fy_f + P_2(r^2 + 2y'^2) \end{cases} \quad (26)$$

Onde, δx_d e δy_d são respectivamente as componente x_f e y_f da distorção radial simétrica e P_1 e P_2 são os coeficientes da distorção descentrada.

Em alguns casos também são considerados efeito de não ortogonalidade entre o plano o sensor CCD e eixo óptico (REISS, 2002) e a diferença de escala entre os eixos x e y do sistema de coordenadas de imagem (GALO, 1993). Moniwa (*apud* GALO, 1993) propôs o seguinte modelo matemático afim corrigir esse efeito:

$$\begin{cases} \delta x_A = Ax_f \\ \delta y_A = By_f \end{cases} \quad (27)$$

Onde, δx_A e δy_A são respectivamente as componente x_f e y_f da distorção de afinidade e A e B são os parâmetros de afinidade. Deste modo a correção das distorções das lentes e afinidade é calculada pelas seguintes equações:

$$\begin{cases} x_p = x_f - \delta x_r - \delta x_d - \delta x_A \\ y_p = y_f - \delta y_r - \delta y_d - \delta y_A \end{cases} \quad (28)$$

Onde, x_p e y_p são as coordenadas dos pontos no referencial fotogramétrico corrigidas de alguns erros sistemáticos.

Os parâmetros x_{pp} , y_{pp} , K_1 , K_2 , K_3 , P_1 , P_2 , A e B em conjunto com a distância focal calibrada (f) são chamados de parâmetro de orientação interior (POI) e são obtidos por um processo de calibração da câmara. Maiores detalhes sobre a Orientação Interior podem ser encontrados em: Lugnani (1987), Galo (1993), Andrade (2003), Reiss (2002).

3 MATERIAIS E MÉTODO

No capítulo anterior foram revisados alguns modelos matemáticos desenvolvidos para orientação indireta de imagens. Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na realização do trabalho, o fluxograma da metodologia de desenvolvimento, as imagens de intensidade do pulso LASER e a imagem digital, bem como o modelo fotogramétrico proposto para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho são os que seguem:

- Linguagem de programação Matlab R2007b;
- Material bibliográfico disponível na biblioteca de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Paraná;
- Micro-computador desktop com processador Intel® Core™2 Quad, 2 Gb de ram e 260 Gb de espaço em disco. Recurso adquirido junto ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa) pela concessão de auxílio financeiro referente ao projeto Jovem Pesquisador no. Processo 570316/2008-1;
- Imagens digitais adquiridas com a câmara digital DSC-F717 (dados fornecidos pela Empresa Agritec S/A);
- Um arquivo bruto ASCII de pontos por linha, derivado do sistema de varredura LASER aerotransportado OPTECH ALTM 2050 (dados fornecidos pelo LACTEC); e
- Uma imagem de intensidade do pulso Laser gerada em pós-processamento em função dos respectivos sinais de intensidade de retorno dos alvos perfilados na superfície física.

3.2 MÉTODO

Neste trabalho o modelo fotogramétrico proposto é baseado no modelo desenvolvido por Mulawa e Mikhail (1988) modificado para permitir a inserção de observações advindas dos parâmetros dos planos adjacentes de telhados derivados do conjunto de dados fornecido pelo SVLA. Dentro deste contexto, este estudo foi subdividido em algumas etapas que serão detalhadas nas próximas seções. A Figura 9 apresenta o diagrama da metodologia proposta.

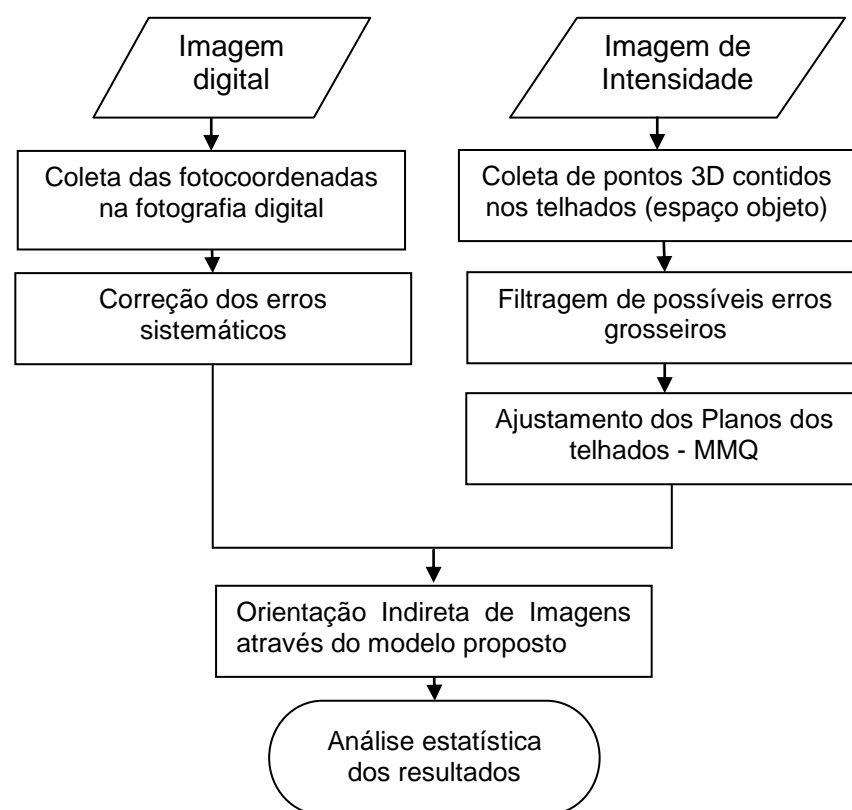


FIGURA 9 – DIAGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA

3.2.1 Coleta das fotocoordenadas e correção dos erros sistemáticos

A primeira etapa do trabalho consiste em selecionar fotocoordenadas, na imagem digital adquirida com a câmara de pequeno formato de quadro, sobre as cumeeiras dos telhados. É importante lembrar que o procedimento é realizado manualmente e pode ser coletado qualquer ponto sobre a respectiva cumeeira; além disso, os telhados selecionados devem possuir duas entidades planas concorrentes,

cuja intersecção resulta em uma linha reta que representa sua cumeeira (ver Figura 10).

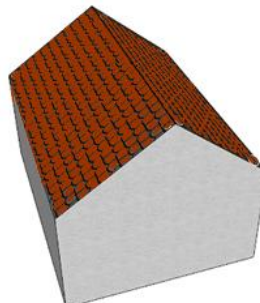


FIGURA 10 – TELHADOS FORMADOS POR PLANOS ADJACENTES

FONTE: O autor (2011)

A Figura 11 apresenta um exemplo de um ponto qualquer coletado sobre a cumeeira de um telhado representado em uma imagem digital colorida.



FIGURA 11 – PONTO CONTIDO NA CUMEEIRA DO TELHADO

FONTE: O autor (2011)

Esses pontos foram selecionados manualmente na fotografia aérea através de um algoritmo implementado em ambiente MatLab. Este algoritmo coleta as coordenadas por meio do clique do botão esquerdo do mouse e armazena, em coordenadas de máquina (Coluna e Linha), em arquivo ASCII. Posteriormente, cada uma das coordenadas coletadas é transformada para o sistema referencial com origem no centro da fotografia (Equação (23)), e aplicada a correção dos efeitos das distorções sistemáticas, como descrito no item 2.4. Maiores detalhes podem ser vistos em Galo (1993) e Reiss (2002). Desta forma, as coordenadas, devidamente corrigidas, podem ser utilizadas no Ajustamento pelo MMQ para estimativa dos POEs.

3.2.2 Manuseio dos dados SVLA

A nuvem de pontos 3D derivada do SVLA foi coletada em setembro de 2003 pelo sistema da OPETCH ALTM 2050. Esse sistema realiza uma varredura com um perfilamento dos pontos através de um espelho oscilante, gerando uma malha de pontos com espaçamento irregular (maiores detalhes ver Wehr e Lohr, 1999). Os dados coletados pelo SVLA são armazenados em um arquivo ASCII, onde cada linha corresponde as coordenadas Este (E), Norte (N), altitude ortométrica (H) e valores de intensidade do pulso LASER (I) do retorno de cada ponto perfilado no terreno.

3.2.3 Aquisição de pontos contidos nos telhados

A fim de selecionar adequadamente as edificações que serão usadas como apoio de campo, na orientação indireta da fotografia: são manualmente coletados os quatro cantos de uma “água” dos telhados adjacentes presentes na imagem de intensidade do pulso LASER (Figura 12).

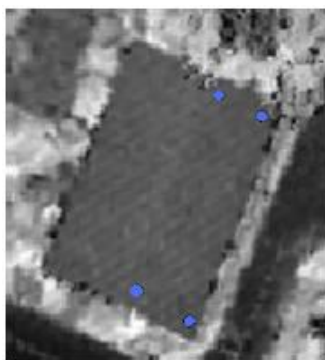


FIGURA 12 – PONTOS COLETADOS NA IMAGEM DE INTENSIDADE DO PULSO LASER

FONTE: O autor (2011)

Ao delimitar manualmente a “água” dos telhados de cada uma das edificações potencialmente selecionadas como apoio de campo, todos os pixels contidos no limite definido são automaticamente rotulados ao respectivo telhado e suas coordenadas Coluna (C) e Linha (L) são armazenadas em arquivo ASCII.

É importante notar que cada os pixels coletados na imagem de intensidade do pulso estão referenciados ao sistema de máquina (C , L) e devem ser transformados para o sistema referencial SAD69 com coordenadas Este (E) e Norte (N). Esta transformação é realizada como segue:

$$\begin{aligned} E &= E_0 + (C - 1)RPT \\ N &= N_0 - (L - 1)RPT \end{aligned} \quad (29)$$

Onde, E_0 e N_0 são as respectivas coordenadas Este e Norte da origem do sistema referencial adotado no trabalho e RPT é a resolução do pixel da imagem de intensidade do pulso, no terreno. Note que a coordenada altimétrica deverá ser obtida em processo posterior e maiores detalhes podem ser encontrados em Dalmolin et al. (2005).

3.2.2.4 Filtragem de possíveis erros grosseiros

O conjunto de pontos 3D pertencentes a cada um dos telhados delimitados são plotados em um gráfico para o reconhecimento de possíveis pontos não pertencentes ao plano do telhado, como por exemplo, pontos situados no terreno, em chaminé de lareira ou churrasqueira, no muro das edificações etc. Caso existirem pontos, cujas características atendem algum dos exemplos supracitados, são manualmente eliminados e um novo conjunto de dados é armazenado em arquivo ASCII. Este arquivo é utilizado no MMQ para ajustamento dos planos dos telhados e, conseqüentemente, para estimativa dos parâmetros da equação geral dos planos, como será descrito na subseção seguinte. A Figura 13 apresenta um exemplo de gráficos que representam pontos 3D plotados antes e após a eliminação dos pontos não pertencentes ao plano de um telhado.

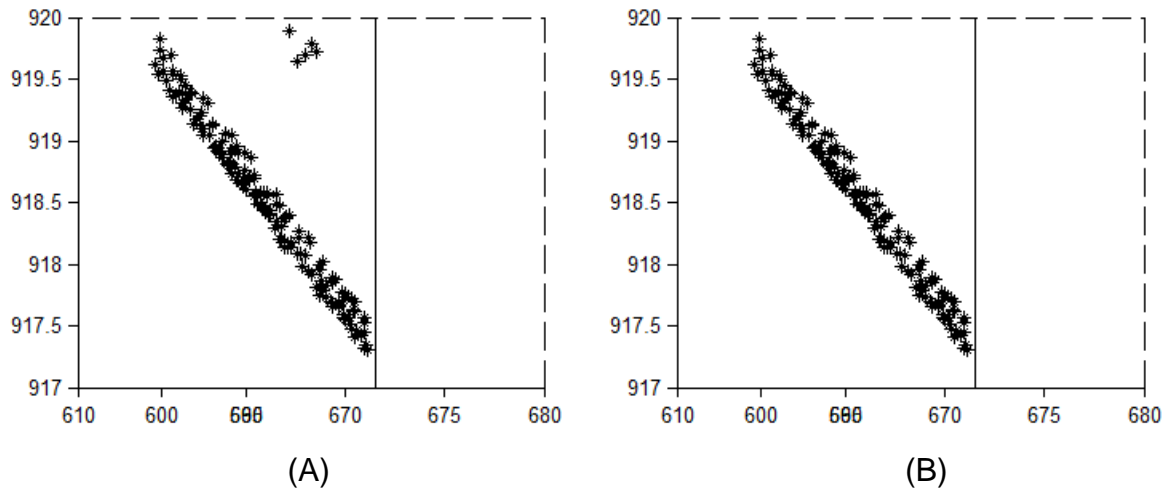


FIGURA 13 – GRÁFICO DOS PONTOS COLETADOS (A) ANTES DA ELIMINAÇÃO DOS PONTOS NÃO PERTENCENTES À “ÁGUA” DO TELHADO; (B) APÓS A ELIMINAÇÃO DOS PONTOS NÃO PERTENCENTES À “ÁGUA” DO TELHADO

FONTE: O autor (2011)

3.2.3 Cálculo dos Parâmetros da equação geral dos planos

Para se obter os parâmetros da equação geral do plano representada pela “água” do telhado foi realizado um ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados. Esse ajustamento foi realizado de forma isolada para cada “água” do telhado. A equação geral do plano é definida como segue:

$$AX + BY + CZ + D = 0 \quad (30)$$

Onde, A , B , C e D são os parâmetros do plano a serem ajustados, X , Y e Z são coordenadas 3D de um ponto pertencente a cada “água” do telhado. Como a Equação (30) é de forma implícita, o método combinado de ajustamento de observações com injunção foi utilizado para a obtenção dos parâmetros supracitados. A injunção estabelecida neste ajustamento foi: o vetor normal ao plano deve ser unitário, ou seja:

$$A^2 + B^2 + C^2 - 1 = 0 \quad (31)$$

Foram consideradas como observações as coordenadas (X, Y, Z) dos pontos pertencentes aos planos definidos pelas “águas” dos telhados para cada uma das edificações. Foi assumida uma precisão planimétrica de 50 cm e altimétrica de 15 cm, de acordo com a precisão nominal fornecida pelo fabricante do SVLA (utilizado para este trabalho), considerando uma altura de vôo em torno de 1000 m.

Ao final de cada ajustamento, os resíduos dos pontos ajustados foram comparados com um limiar pré-estabelecido (0,2 a 0,5 metros dependendo da configuração dos pontos sobre as “águas” dos telhados). Os pontos, cujo módulo do resíduo da coordenada altimétrica (Z) é maior que o limiar pré-estabelecido são excluídos do conjunto de dados ajustados. Em seguida, é novamente aplicado o MMQ e as coordenadas altimétricas encontradas são comparadas com o valor de limiar pré-estabelecido. O processo é repetido até que todos os pontos apresentem resíduos inferiores aos valores anteriormente estabelecidos. Finalmente, os parâmetros dos planos dos telhados adjacentes de cada edificação selecionada são obtidos e podem ser utilizados como apoio de campo para estimativa dos POEs.

3.3 MODELO PROPOSTO

O modelo fotogramétrico proposto neste trabalho pode ser chamado de modelo dos planos adjacentes. Este modelo é baseado no relacionamento funcional entre planos adjacentes que representam os telhados de edificações derivadas do SVLA (espaço objeto) e qualquer ponto imagem da cumeeira de uma edificação presente na fotografia aérea digital (espaço imagem). Inicialmente será apresentada uma forma matemática de descrever a intersecção de dois planos adjacentes, tornando assim possível o desenvolvimento do modelo matemático proposto.

3.3.1 Intersecção de planos adjacentes no espaço objeto

Geralmente, uma reta no espaço euclidiano é determinada por dois pontos, por um ponto e seu vetor diretor ou pela intersecção entre dois planos. No último caso, se pode obter uma equação matemática através da intersecção de duas faces planas, cujos atributos são representados, neste caso, por telhados planos

adjacentes. Na Figura 14 é apresentada a disposição dessas faces planas em uma edificação qualquer no espaço objeto.

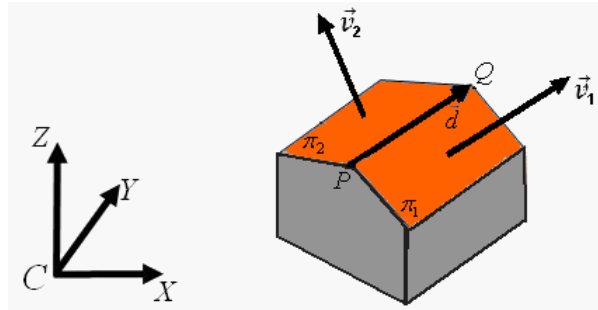


FIGURA 14 – VETORES ORTOGONAIS AOS PLANOS ADJACENTES REPRESENTADOS PELOS TELHADOS DE EDIFICAÇÕES.

FONTE: O autor (2011)

Onde,

- π_1 e π_2 : faces planas que representam os planos adjacentes de telhados;
- P e Q : pontos da reta \overleftrightarrow{PQ} formada pela interseção dos planos π_1 e π_2 ;
- \vec{d} : vetor diretor da reta \overleftrightarrow{PQ} ;
- $OXYZ$: sistema de coordenadas tridimensionais no espaço objeto;
- \vec{v}_1 : vetor ortogonal ao plano π_1 ;
- \vec{v}_2 : vetor ortogonal ao plano π_2 .

Os planos π_1 e π_2 , são, respectivamente, definidos pelas equações:

$$A_1X + B_1Y + C_1Z + D_1 = 0 \quad (32)$$

$$A_2X + B_2Y + C_2Z + D_2 = 0 \quad (33)$$

Onde, A_1 , B_1 , C_1 e D_1 são os parâmetros do plano π_1 e A_2 , B_2 , C_2 e D_2 são os parâmetros do plano π_2 . Logo os vetores ortogonais aos planos podem ser expressos em relação aos sistemas de coordenadas, como segue:

$$\vec{v}_1 = \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\vec{v}_2 = \begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Sendo \vec{d} o vetor diretor da reta \overleftrightarrow{PQ} , então \vec{d} é simultaneamente ortogonal aos vetores \vec{v}_1 e \vec{v}_2 normais aos planos. Neste caso, o vetor \vec{d} pode ser determinado pelo produto vetorial entre \vec{v}_1 e \vec{v}_2 , como segue:

$$\vec{d} = \vec{v}_1 \times \vec{v}_2 = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 C_2 - C_1 B_2 \\ C_1 A_2 - A_1 C_2 \\ A_1 B_2 - B_1 A_1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Como o ponto P determinado pelas coordenadas X_P , Y_P e Z_P pertence aos planos π_1 e π_2 (Figura 14), tem-se o seguinte sistema de equações lineares a saber:

$$\begin{cases} A_1 X_P + B_1 Y_P + C_1 Z_P = -D_1 \\ A_2 X_P + B_2 Y_P + C_2 Z_P = -D_2 \end{cases} \quad (37)$$

Este sistema de equações lineares pode ser reescrito pelo produto escalar dos vetores, como segue:

$$\begin{cases} \vec{v}_1 \cdot \vec{u} = \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = -D_1 \\ \vec{v}_2 \cdot \vec{u} = \begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \\ C_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = -D_2 \end{cases} \quad (38)$$

Sendo o vetor \vec{u} o vetor que parte da origem do sistema coordenadas tridimensionais no espaço objeto ao ponto P qualquer.

3.3.2 Modelo de interseção de planos adjacentes

O modelo matemático proposto é baseado no modelo matemático desenvolvido por Mulawa e Mikhail (1988), no entanto os parâmetros dos planos dos telhados adjacentes são inseridos no problema; o que torna o modelo proposto uma nova alternativa de uso de apoio de campo para orientação indireta de fotografias. Deste modo, o modelo matemático proposto permite relacionar a reta \overleftrightarrow{PQ} ,

representada pela cumeeira dos telhados adjacentes no espaço objeto com um ponto p qualquer da reta r no espaço imagem, como é mostrado na Figura 15.

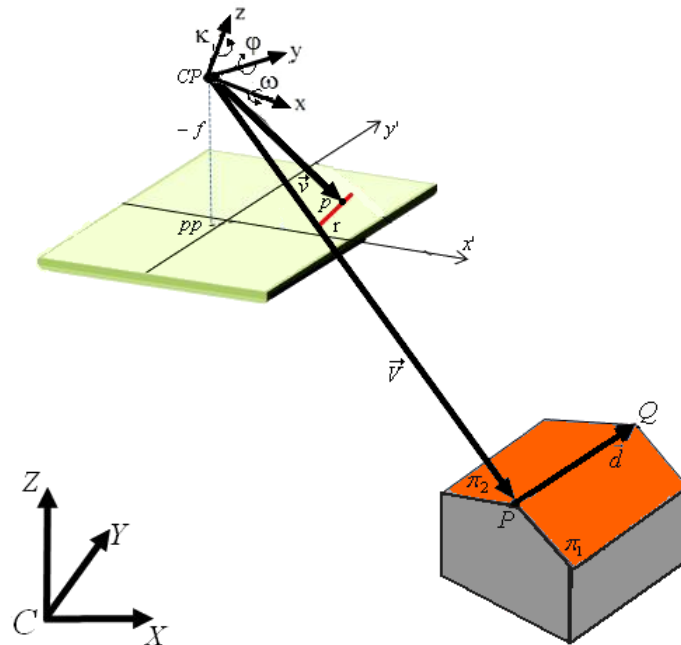


FIGURA 15 – GEOMETRIA DO MODELO ADAPTADO DE MULAWA E MIKHAIL.
FONTE: O autor (2011)

Onde,

- CP: centro perspectivo da câmara;
- CP_{xyz} : é o sistema referencial fotogramétrico tridimensional cuja origem é o centro perspectivo da câmara;
- f : distância focal calibrada da câmara;
- oxy : o sistema de coordenadas com origem no centro da imagem;
- κ , φ e ω : ângulos de Euler correspondentes às rotações em torno de z , y e x , respectivamente;
- pp : ponto principal definido pela projeção ortogonal do CP sobre o plano da imagem;
- r : linha reta no espaço imagem homóloga a reta \overrightarrow{PQ} ;
- p : imagem de ponto qualquer na linha reta r no espaço imagem;
- \vec{V} : vetor que parte do CP até o ponto P ; e
- \vec{v} : vetor que parte do CP até o ponto p .

De maneira análoga ao modelo desenvolvido por Mulawa e Mikhail (1988), o vetor \vec{v} multiplicado pela matriz de rotação transposta R^T (dada em função dos ângulos de Euler $(\kappa, \varphi, \omega)$ (sendo essa matriz o produto das matrizes na ordem R_κ, R_φ e R_ω) é coplanar aos vetores \vec{d} e \vec{V} . Assim, o produto misto desses vetores deve ser zero, como segue:

$$(\vec{V} \times \vec{d}) \cdot (R^T \vec{v}) = 0 \quad (39)$$

Os vetores \vec{V} e \vec{v} são expressos em relação aos sistemas de coordenadas no espaços objeto e imagem, como segue:

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} X_P - X_0 \\ Y_P - Y_0 \\ Z_P - Z_0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} \quad (41)$$

Deste modo o vetor \vec{V} pode ser escrito pela soma dos vetores \vec{V}_P e \vec{V}_0 , assim sendo.

$$\vec{V} = \vec{u} + \vec{V}_0 = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -X_0 \\ -Y_0 \\ -Z_0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

Substituindo a Equação (42) na Equação (39), tem-se:

$$((\vec{u} + \vec{V}_0) \times \vec{d}) \cdot (R^T \vec{v}) = 0 \quad (43)$$

Utilizando as propriedades de produto escalar (ou produto interno) descrita por Anton e Rorres (2001, p 115) tem-se:

$$(\vec{u} \times \vec{d} + \vec{V}_0 \times \vec{d}) \cdot (R^T \vec{v}) = 0 \quad (44)$$

Substituído a Equação (36) na Equação (44) tem-se:

$$\left(\vec{u} \times (\vec{v}_1 \times \vec{v}_2) + (\vec{V}_0 \times \vec{d}) \right) \cdot (R^T \vec{v}) = 0 \quad (45)$$

Segundo Anton e Rorres (2001, p 114) a Relação entre produto vetorial de três vetores é dada pela relação:

$$\vec{u} \times (\vec{v}_1 \times \vec{v}_2) = (\vec{u} \cdot \vec{v}_2) \vec{v}_1 - (\vec{u} \cdot \vec{v}_1) \vec{v}_2 \quad (46)$$

Assim substituído a Equação (46) na Equação (45) tem-se:

$$\left((\vec{u} \cdot \vec{v}_2) \vec{v}_1 - (\vec{u} \cdot \vec{v}_1) \vec{v}_2 + (\vec{V}_0 \times \vec{d}) \right) \cdot (R^T \vec{v}) = 0 \quad (47)$$

Substituído a Equação (38) na Equação (47) tem-se:

$$\left(-D_2 \vec{v}_1 + D_1 \vec{v}_2 + (\vec{V}_0 \times \vec{d}) \right) \cdot (R^T \vec{v}) = 0 \quad (48)$$

Isto é:

$$\left(-D_2 \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{bmatrix} + D_1 \begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \\ C_2 \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} -X_0 \\ -Y_0 \\ -Z_0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_1 C_2 - B_2 C_1 \\ A_2 C_1 - A_1 C_2 \\ A_1 B_2 - A_2 B_1 \end{bmatrix} \right) \right) \cdot R^T \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} = 0 \quad (49)$$

Resolvendo o produto misto e manipulando algebricamente a Equação (49), tem-se:

$$\begin{aligned} & [(D_1 A_2 - A_1 D_2) - Y_0 (A_1 B_2 - A_2 B_1) + Z_0 (A_2 C_1 - A_1 C_2)] (r_{11} x_p + r_{21} y_p - r_{31} f) \\ & + [(D_1 B_2 - B_1 D_2) - Z_0 (B_1 C_2 - B_2 C_1) + X_0 (A_1 B_2 - A_2 B_1)] (r_{12} x_p + r_{22} y_p - r_{32} f) \quad (50) \\ & + [(D_1 C_2 - C_1 D_2) - X_0 (A_2 C_1 - A_1 C_2) + Y_0 (B_1 C_2 - B_2 C_1)] (r_{13} x_p + r_{23} y_p - r_{33} f) = 0 \end{aligned}$$

Sendo

$$r_{11} = \cos \varphi \cos \kappa$$

$$r_{12} = \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa$$

$$r_{13} = \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa$$

$$r_{21} = -\cos \varphi \sin \kappa$$

$$r_{22} = \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa$$

$$r_{23} = \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa$$

$$r_{31} = \sin \varphi$$

$$r_{32} = -\sin \omega \cos \varphi$$

$$r_{33} = \cos \omega \cos \varphi$$

A Equação (50) implica no modelo de interseção dos planos adjacentes, proposto neste trabalho de pesquisa para orientação indireta de imagens. O modelo matemático proposto é composto por apenas uma equação de condição, sendo possível o uso do modelo combinado de Ajustamento por Mínimos Quadrados.

3.3.3 Observações e Parâmetros

No modelo supracitado os seguintes elementos serão utilizados como observações no método de Ajustamento por Mínimos Quadrados:

- Fotocoordenadas dos pontos pertencentes às cumeeiras das edificações no espaço imagem, devidamente corrigidas dos efeitos sistemáticos (x_p e y_p);
- Parâmetros dos planos dos telhados adjacentes no espaço objeto, derivados do SVLA ($A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1$ e D_2).

Cada observação tem uma precisão, na qual definirá o peso das observações no MMQ. Os desvios padrão dos parâmetros dos planos foram obtidos por meio do ajustamento dos planos, descrito na subseção 3.2.2.3. Para as fotocoordenadas foram assumidos desvios padrão de $4\mu\text{m}$, sendo este valor aproximadamente o tamanho do pixel na fotografia aérea digital aérea.

Os parâmetros de rotação e posição da câmara no momento da tomada da fotografia ($\kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0$ e Z_0) serão obtidos no processo de orientação indireta. Ou seja, para cada ponto imagem coletado na fotografia digital ter-se-á uma equação de condição (Equação (50)), 10 observações ($x_p, y_p, A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1$ e D_2) e 6 parâmetros a serem determinados.

3.4 GERAÇÃO DE DADOS SIMULADO

Para verificar a potencialidade do modelo matemático proposto serão realizados experimentos com dados simulados. Os dados simulados apresentam edificações com telhados geometricamente bem definidos, inclinação de 45 graus, entre outras situações. Os pontos tridimensionais simulados, neste caso, possuem distribuição eqüidistante em cada uma das “águas” dos telhados de uma edificação, cuja disposição pode ser vista na Figura 16.

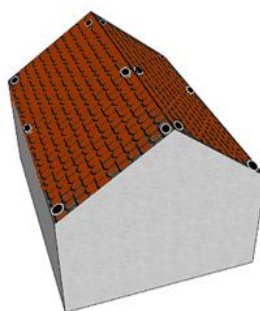


FIGURA 16 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS EM CADA PLANO DOS TELHADOS ADJACENTES

FONTE: O autor (2011)

A metodologia de simulação dos dados é composta por três conjuntos de dados, cujas edificações são distribuídas ao longo da fotografia com diferentes configurações geométricas e orientação dos telhados. As coordenadas tridimensionais serão simuladas em sistema referencial arbitrário.

Os parâmetros de orientação interior e exterior da câmara serão simulados como valores verdadeiros e para cada edificação simulada, um ponto qualquer contido sobre a cumeeira do telhado será projetado para o espaço imagem através das equações de colinearidade direta. Os pontos projetados serão usados como fotocoordenadas no Ajustamento.

Simulados os pontos tridimensionais no espaço objeto e projetados os pontos para o espaço imagem serão aplicados erros randômicos sobre os mesmos, sendo para cada conjunto de dados, inseridos diferentes desvios padrão. Finalmente, os pontos simulados para cada um dos telhados adjacentes serão usados no MMQ para calcular os parâmetros dos planos, a serem inseridos no modelo matemático

proposto. As discrepâncias entre os parâmetros de orientação exterior calculados e os verdadeiros serão calculadas e estatisticamente analisadas. Também serão comparados os desvios padrão encontrados em função dos erros randômicos inseridos para cada conjunto de dados.

4 EXPERIMENTOS

No capítulo 3 foram apresentados os materiais utilizados para a realização do trabalho e desenvolvimento da metodologia proposta. Neste capítulo serão apresentados os experimentos com dados simulados (item 4.1) e reais (item 4.2).

4.1 CARACTERÍSTICA DOS EXPERIMENTOS COM DADOS SIMULADOS

Os experimentos com dados simulados consistem em verificar a influência dos erros de medida no espaço imagem e no espaço objeto, na utilização do modelo matemático proposto. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de orientação interior e exterior da câmara simulados.

TABELA 1 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E EXTERIOR SIMULADOS.

PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR									
f (mm)	x_{pp} (mm)	y_{pp} (mm)	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2	A	B
10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR									
κ_{rad}	φ_{rad}	ω_{rad}	$X_{0(m)}$	$Y_{0(m)}$	$Z_{0(m)}$				
1,95	0,0	0,0	1032,0	1172,0	651,0				

FONTE: O autor (2011)

Os experimentos com dados simulados estão divididos em dois grupos, sendo o grupo 1 composto por quatro configurações e o grupo 2 com uma configuração. Para cada uma das configurações foi simulado um conjunto de nove edificações com diferentes alturas, orientações e tamanhos. As edificações são simuladas por 12 pontos tridimensionais no espaço objeto (6 pontos para cada “água” de telhado, ver Figura 16), sendo aleatoriamente inseridos desvios padrão para a planimetria com os seguintes valores, a saber: 1) 0,3m; 2) 0,5m; e 3) 0,8m. E para a altimetria: 0,25m.

Um ponto tridimensional qualquer, de cada uma das cumeeiras dos telhados simulados no espaço objeto, é projetado para o espaço imagem através das equações de colinearidade direta, os valores simulados dos POIs e dos POEs, com desvio padrão de 3 μm , aleatoriamente inserido no ponto imagem. O algoritmo utilizado para a condução dos experimentos foi implementado na linguagem de programação Matlab R2007b. A Figura 17 mostra a distribuição e as orientações das edificações simuladas.

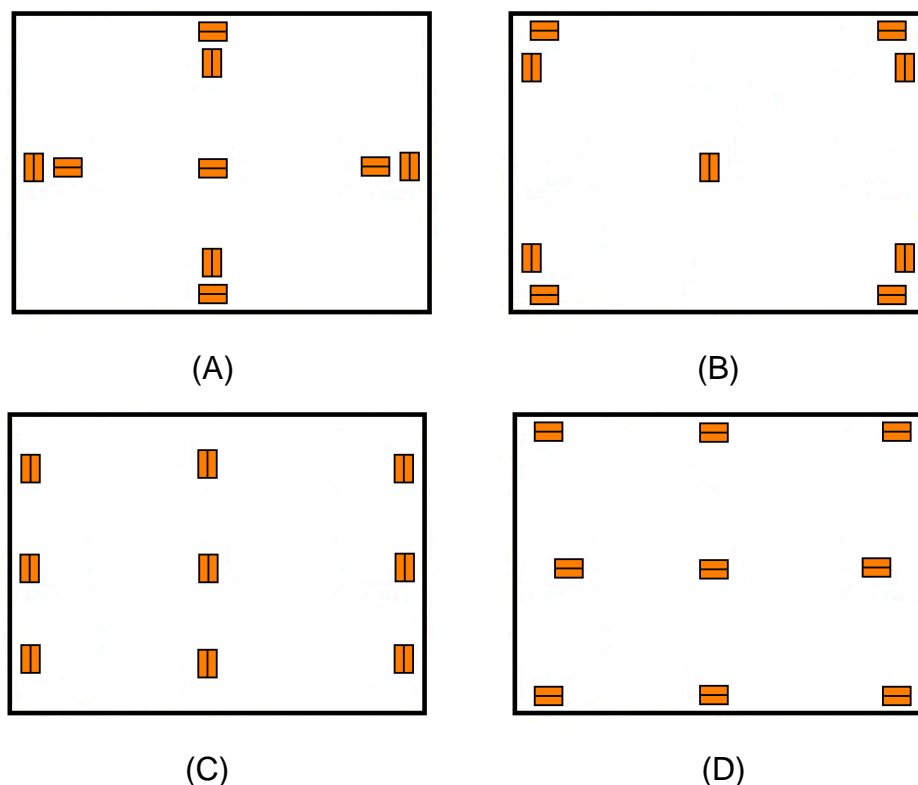


FIGURA 17 – CONFIGURAÇÕES SIMULADAS – GRUPO 1.

FONTE: O autor (2011)

Como se pode observar, as edificações simuladas e presentes nas Figuras 17A (Configuração 1) e 17B (Configuração 2) se assemelham a situações esperadas nos experimentos com dados reais, cuja distribuição é pertinente e as orientações e alturas das edificações são variadas. Nas Figuras 17C (Configuração 3) e 17D (Configuração 4) as cumeeiras dos telhados são paralelas ao eixo X e ao eixo Y do sistema referencial no espaço objeto, respectivamente.

O grupo 2 está dividido em dois experimentos, isto é: o primeiro experimento se refere a conjunto de nove edificações simuladas com alturas variadas; e no

segundo experimento foram simuladas edificações com mesma altura. Estes experimentos foram elaborados para investigar qual influência este tipo de situação exerce na recuperação dos POEs, através do modelo proposto.

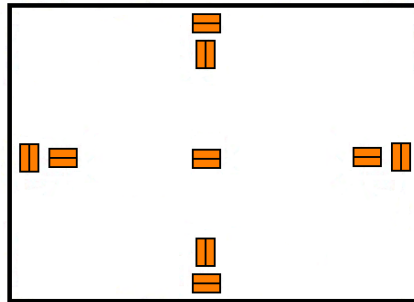


FIGURA 18 – CONFIGURAÇÃO SIMULADA – GRUPO 2.

FONTE: O autor (2011)

É importante notar que o conjunto de dados simulados representa a situação real investigada neste trabalho, cujos erros inseridos correspondem à precisão planimétrica esperada nos dados SVLA, cujas coordenadas serão extraídas da imagem de intensidade do pulso laser interpolada. A Tabela 2 mostra os parâmetros aproximados aplicados para o início da convergência do MMQ, para o grupo 1 e 2.

TABELA 2 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS.

κ_{rad}	φ_{rad}	ω_{rad}	$X_{0(m)}$	$Y_{0(m)}$	$Z_{0(m)}$
1,90	0,06	0,01	900,0	1100,0	630,0

FONTE: O autor (2011)

4.3.1 Discussão dos resultados obtidos com dados simulados

Os experimentos com dados simulados consistem em verificar a influência dos erros de medida no espaço imagem e no espaço objeto, na utilização do modelo matemático proposto neste trabalho. A Figura 19 mostra as variações dos desvios padrão para as rotações (rad) e posição (m) dos POEs estimados com o método proposto, conforme são inseridos os desvios padrão nas coordenadas do espaço

objeto (PLANIMETRIA: set_1a: 0,3m; set_2a: 0,5m; set_3a: 0,8m; ALTIMETRIA: 0,25m), para cada um dos experimentos elaborados no grupo 1.

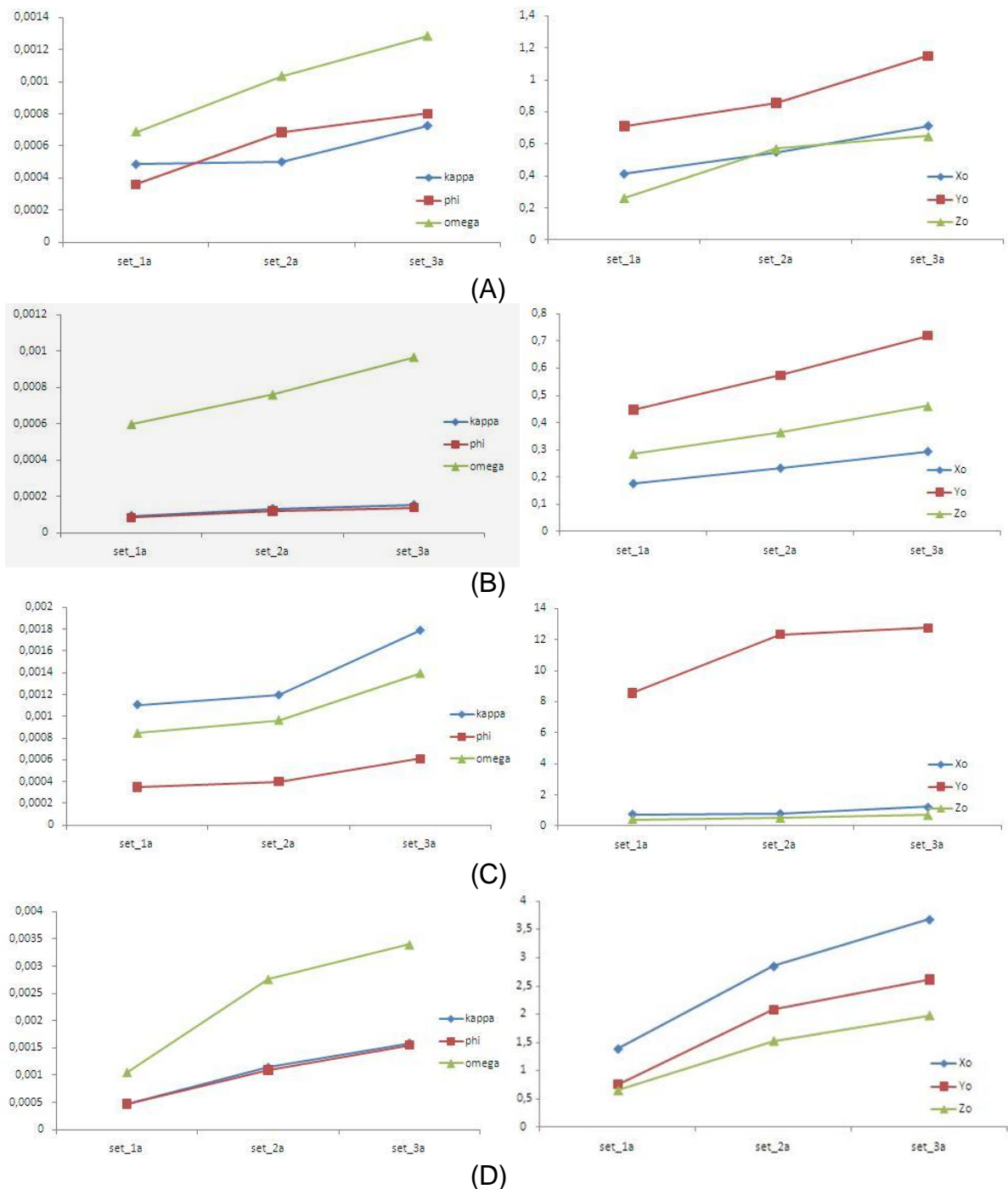


FIGURA 19 – DESVIOS PADRÃO DAS ROTAÇÕES (RAD) E POSIÇÃO (M) ESTIMADOS PARA: (A) EXPERIMENTO I; (B) EXPERIMENTO II; EXPERIMENTO III; (D) EXPERIMENTO IV.

FONTE: O autor (2011)

A Figura 20 apresenta a média dos desvios padrão dos parâmetros estimados para cada experimento realizado, cujas configurações são apresentadas na Figura 17 (grupo1).

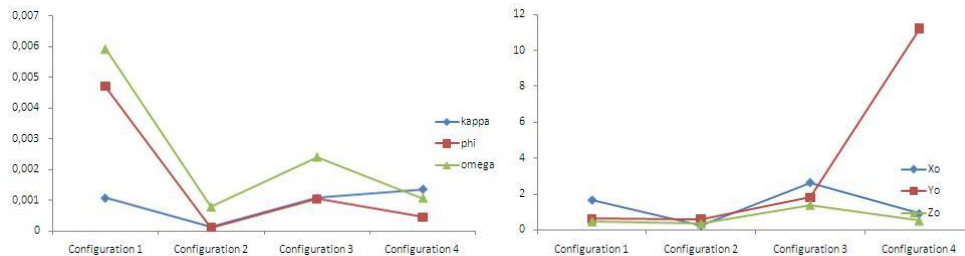


FIGURA 20 – MÉDIA DOS DESVIOS PADRÃO PARA CADA CONFIGURAÇÃO SIMULADA.

FONTE: O autor (2011)

A Figura 21 mostra a discrepância média entre os parâmetros de referência (valores considerados como verdadeiros) e os parâmetros de posição (m) estimados usando o método proposto, para cada conjunto de dados simulados.

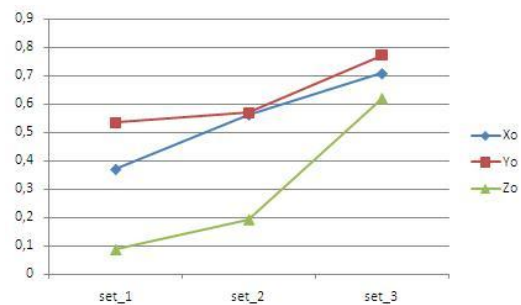


FIGURA 21 – DISCREPÂNCIA MÉDIA ENTRE OS PARÂMETROS DE REFERÊNCIA E ESTIMADOS (POSIÇÃO) PELO MÉTODO PROPOSTO.

FONTE: O autor (2011)

Como era esperado, à medida que piora a precisão das coordenadas tridimensionais no espaço objeto derivados do SVLA, a precisão dos parâmetros estimados também piora (ver Figura 19), independentemente do tipo de configuração elaborada. No entanto, a configuração que apresentou melhor precisão é a de número 2, uma vez que foram usadas edificações com orientações horizontais e verticais e melhor distribuição geométrica ao longo da fotografia. A precisão calculada para as

translações são muito similares às precisões dos pontos simulados no espaço objeto e usados para determinar os parâmetros dos planos dos telhados adjacentes.

Na Figura 19, também pode ser notado que os desvios padrão estimados aumentam linearmente, conforme aumentam os desvios padrão inseridos nas coordenadas tridimensionais. Este fenômeno é independente da distribuição e orientação das edificações. No primeiro e segundo experimentos (Figuras. 19A e 19B), os parâmetros κ e φ e os parâmetros X_0 e Z_0 foram menos afetados pelos desvios padrão inseridos no espaço objeto. No terceiro e quarto experimentos (Figuras. 19C e 19D), os parâmetros φ e Z_0 foram os menos afetados pelo fator supracitado. Ou seja, os resultados encontrados mostraram os efeitos derivados da qualidade posicional do SVLA para estimação indireta dos parâmetros de orientação exterior.

Também como era esperada, de acordo com os resultados apresentados na Figura 20, a segunda configuração elaborada para os experimentos mostra a melhor distribuição geométrica das edificações, uma vez que apresentou os melhores desvios padrão na estimativa dos POEs, usando o método proposto. Contudo, uma combinação entre as configurações 1 e 2 seria considerado como situação ideal para os experimentos com dados reais.

Outros fatores a serem notados nos resultados obtidos com dados simulados são: não é sugerido o uso de edificações apenas com orientações das cumeeiras paralelas aos eixos X ou Y , do sistema referencial do espaço objeto (ver Figuras 19C e 19D); existe compatibilidade dos valores de discrepância entre os parâmetros de referência e os estimados conforme aumenta os desvios padrão inseridos nas coordenadas tridimensionais do espaço objeto (ver Figura 21); em média, a discrepância e os desvio padrão da coordenada Z_0 é melhor estimada, uma vez que a precisão da altimetria derivada do SVLA é melhor que a precisão planimétrica (atendendo os padrões da simulação, ver Figuras. 20 e 21).

Uma vez que se acredita que a variação da altura das edificações usadas como apoio de campo no método proposto também influencia na estimativa dos POEs, a Figura 22 mostra a discrepância entre os parâmetros de referência e os parâmetros calculados, usando o método proposto e as configurações, referentes à configuração e situação apresentada na Figura 18, isto é: uso de edificações com alturas variadas e mesma altura (grupo 2).

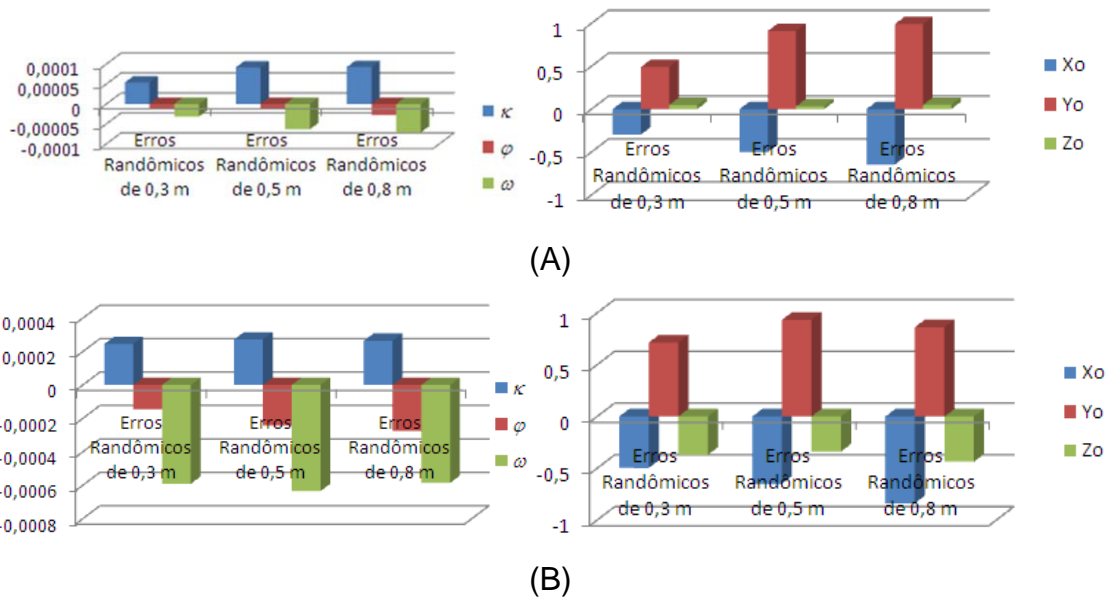


FIGURA 22 – DISCREPÂNCIAS DOS POEs CALCULADOS REFERENTES À FIGURA 18. (A) EDIFICAÇÕES SIMULADAS COM ALTURAS VARIADAS; (B) EDIFICAÇÕES SIMULADAS COM MESMA ALTURA.

FONTE: O autor (2011)

Como era esperada, ao comparar a Figura 22A e 22B se percebe que os POEs que possuem melhor estimativa são aqueles calculados com edificações cujas alturas são variadas. A menor discrepância pode ser verificada no parâmetro Z_0 . Isto mostra um dos potenciais da integração de dados derivados do SVLA e Fotogrametria, ou seja, a determinação do parâmetro Z_0 com qualidade. Este pode ser um fator impactante.

4.2 CARACTERÍSTICA DOS EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS

Este experimento foi conduzido com a finalidade de avaliar a potencialidade e viabilidade do modelo proposto com uso de dados reais. Nestes experimentos foi utilizadas com uma imagem digital colorida, pertencente à empresa AGRITEC/S.A, capturadas por uma câmara digital Sony DSC-727 717. A Figura 23 apresenta a imagem utilizada neste experimento.



FIGURA 23 – IMAGEM 198.

FONTE: AGRITEC/S.A

Os POI da câmara foram calibrados por Delara et al. (2004), e são apresentados na Tabela 3. É importante lembrar que os POI da câmara foram calibrados em unidade de pixel, ou seja, Delara et al.(2004), definido o tamanho do pixel como sendo igual a 1 μm .

TABELA 3 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR CÂMARA DIGITAL SONY DSC-727 717.

f	x_{pp}	y_{pp}	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2	A	B
2931,722	-71,648	-40,965	-2,640e-08	3,242e-15	3,061e-22	-4,130e-07	2,429e-07	-1,346e-04	-2,033e-05

FONTE: DELARA et al. (2004)

Deste modo foram realizados quatro testes com dados reais, divididos em quatro experimentos. A Tabela 4 apresenta as características de cada um dos experimentos realizados e as especificações do conjunto de dados derivado do SVLA e Fotogrametria. As edificações selecionadas foram classificadas entre “pequeno” e “grande” de acordo com seu tamanho (telhado perfilados pelo SVLA com densidade inferior a 5 pontos/ m^2 é considerado como “telhado pequeno” já o telhado com densidade superior a 5 pontos/ m^2 é considerado como “telhado grande”). Além disso, também foram usados 19 pontos GPS pré-sinalizados, com coordenadas no sistema referencial SAD69, utilizados como pontos de checagem.

TABELA 4 – CARACTERÍSTICA DOS EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS.

Características das Edificações usadas como apoio de campo			
Experimento	Quantidade (*)	Tamanho (*)	Altura (*)
I	8	Variado	Variado
II	21	95% pequeno	Variado
III	25	90% grande	Variado
IV	46	Variado	Variado
Dados SVLA			
Equipamento	Imagem de intensidade	Precisão (H-V)	Espaçamento
ALTM-2050	SIM	80-25 cm	2,24 pontos/m ²
Dados fotogramétricos			
Câmara	Distância focal	GSD	Precisão
DSC-F717	10,078 mm	40 cm	0,004 mm

* Edificações segmentadas no espaço objeto

FONTE: O autor (2011)

A Figura 20 mostra a distribuição das edificações manualmente selecionadas como apoio de campo e segmentadas na imagem de intensidade do pulso laser.

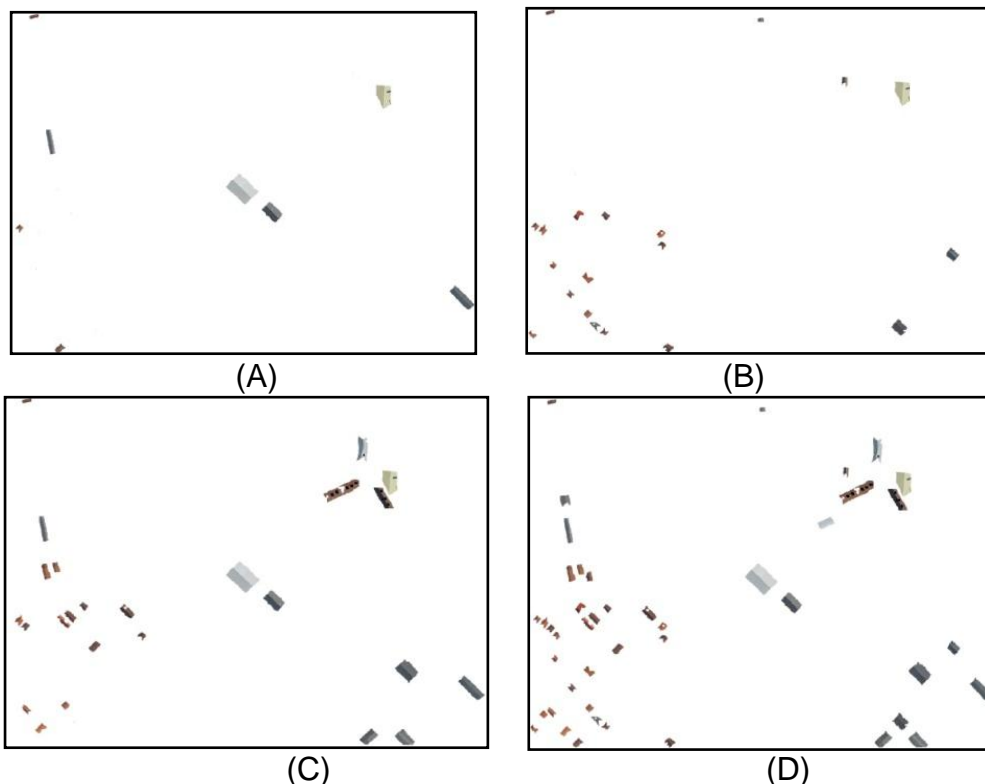


FIGURA 20 – EDIFICAÇÕES SELECIONADAS E SEGMENTADAS. (A) EXPERIMENTO I; (B) EXPERIMENTO II; (C) EXPERIMENTO III; (D) EXPERIMENTO IV.

FONTE: O autor (2011)

Como Mulawa e Mikhail (1988) apontavam a possibilidade de se utilizar duas equações para cada feição reta (pois, uma feição reta pode ser representada por no mínimo dois pontos) foram realizados dois tipos de experimentos com dados reais. Nos experimentos do Tipo I foi utilizado apenas um ponto para cada cumeeira, obtendo uma equação para cada telhado. Já os experimentos do Tipo II foram utilizados dois pontos para cada cumeeira, obtendo duas equações para cada telhado selecionado. A seguir serão discutidos os resultados encontrados com experimentos do Tipo I (item 4.2.1) e Tipo II (item 4.2.2).

4.2.1 Discussão dos resultados do experimento do Tipo I

Para avaliar os resultados obtidos com o método proposto, o método convencional de resseção espacial de imagens incorporando um conjunto de 19 pontos tridimensionais, devidamente pré-sinalizados e determinados através de levantamento GPS. Esses dados foram Ajustados no MMQ, juntamente com as equações de colinearidade, para estimativa dos parâmetros de orientação exterior da câmara e serão considerados como valores de referência. Na Tabela 5 podem ser encontrados os valores dos parâmetros estimados por ambos os métodos e as respectivas discrepâncias calculadas, para cada um dos experimentos elaborados.

TABELA 5 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS DO TIPO I.

POEs estimados com o método convencional					
κ_{rad}	φ_{rad}	ω_{rad}	$X_{0(m)}$	$Y_{0(m)}$	$Z_{0(m)}$
1,9509 $\pm 0,0004$	0,0015 $\pm 0,0024$	-0,0124 $\pm 0,0023$	677404,23 $\pm 1,93$	7183611,85 $\pm 1,84$	1652,19 $\pm 0,55$
POEs estimados com o método proposto – Experimento I					
κ_{rad}	φ_{rad}	ω_{rad}	$X_{0(m)}$	$Y_{0(m)}$	$Z_{0(m)}$
1,9513 $\pm 0,0001$	0,0010 $\pm 0,0015$	-0,0054 $\pm 0,0014$	677408,54 $\pm 1,02$	7183605,62 $\pm 1,10$	1652,47 $\pm 0,18$
Discrepância entre o método convencional e o Experimento I					
0,0004	0,0085	0,007	4,31	6,23	0,47
POEs estimados com o método proposto – Experimento II					
<i>Não encontrou solução única</i>					
POEs estimados com o método proposto – Experimento III					
κ_{rad}	φ_{rad}	ω_{rad}	$X_{0(m)}$	$Y_{0(m)}$	$Z_{0(m)}$
1,95083 $\pm 0,00006$	0,0018 $\pm 0,0002$	-0,0116 $\pm 0,0002$	677402,59 $\pm 0,18$	7183610,81 $\pm 0,19$	1652,32 $\pm 0,03$
Discrepância entre o método convencional e o Experimento III					
0,0008	0,0001	0,0003	1,64	1,04	0,13
POEs estimados com o método proposto – Experimento IV					
κ_{rad}	φ_{rad}	ω_{rad}	$X_{0(m)}$	$Y_{0(m)}$	$Z_{0(m)}$
1,95047 $\pm 0,0001$	0,0037 $\pm 0,0001$	-0,0134 $\pm 0,0001$	677404,10 $\pm 0,02$	7183612,14 $\pm 0,016$	1652,35 $\pm 0,004$
Discrepância entre o método convencional e o Experimento IV					
0,0004	0,0002	0,0001	0,12	0,18	0,16

FONTE: O autor (2011)

Como descrito acima, quatro experimentos foram conduzidos para avaliar a potencialidade e viabilidade do método proposto para orientação indireta de fotografias com dados reais. Em todos os experimentos, foram usadas edificações derivadas dos dados SVLA com diferentes dimensões, orientações e distribuição geométrica. O segundo experimento não encontrou solução única para o problema porque apenas edificações de pequeno porte e geometricamente deficientes foram usadas na estimativa dos parâmetros. Dentre os experimentos que encontraram solução, o experimento I apresentou os piores resultados, uma vez que o número de edificações e a distribuição geométrica do apoio utilizado. O terceiro e quarto experimentos, cujas características são apresentadas na Tabela 4 e Figuras 19C e 19D apresentaram os melhores resultados (ver Tabela 5). Os resultados encontrados com uso do conjunto de dados inerente ao experimento IV são melhores que aqueles encontrados no experimento III, porque maior quantidade de apoio de campo foi usada na estimação dos POEs.

Os resultados obtidos para o experimento IV mostraram que o parâmetro de rotação κ apresentou a maior discrepância (0,0004 rad), enquanto o maior valor de discrepância para as translações foi de 0,18 m. Esses resultados são esperados, devido à distribuição e a orientação geométrica das edificações empregadas na estimativa. Isto mostra que a configuração geométrica do apoio de campo utilizado é fator preponderante no cálculo dos POEs, usando o método proposto.

Conforme o número de observações aumenta, a discrepância entre os métodos diminui e a estimativa dos desvios padrão tem tendência a melhorar, usando o método proposto. Na verdade, embora a precisão das coordenadas tridimensionais determinadas por meio do levantamento GPS é melhor do que a precisão posicional do SVLA, os desvios padrão dos parâmetros determinados pelo método proposto revelaram valores melhores do que os determinados pelo método convencional, pois o número de observações é maior. Isto é, no método proposto para cada edificação usada como apoio de campo existem 10 observações ($x_p, y_p, A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1$ e D_2) contra 2 observações (x_p, y_p), derivada do método convencional de orientação indireta de fotografias. Entretanto, o modelo matemático proposto fornece uma equação e o número de parâmetros a serem determinados pelo MMQ é igual a 6. Sendo assim, 7 edificações de duas águas são suficientes para resolver o problema, enquanto que no método convencional apenas 3 pontos são o suficiente para solucionar o problema.

Em todos os experimentos, os POEs estimados foram influenciados por erros sistemáticos não modelados na coordenada Y , bem como pela qualidade das coordenadas X e Z ($\sim 0,8\text{m}$ e $0,25\text{ m}$), ambos derivados do conjunto de dados SVLA. Maiores detalhes ver dos Santos et al. (2010). Quando utilizadas edificações de pequeno porte foram determinados parâmetros dos planos de pior qualidade. O fato é decorrente da baixa densidade de pontos perfilados no espaço objeto ($\sim 2,24$ pontos/m²); por isso a influência do uso de edificações com essas características deve ser investigada.

4.2.2 Discussão dos resultados do experimento do Tipo II

Na Tabela 5 podem ser encontrados os valores dos parâmetros estimados por ambos os métodos e as respectivas discrepâncias calculadas, para cada um dos experimentos elaborados.

TABELA 6 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS DO TIPO II

POEs estimados com o método convencional					
κ_{rad}	φ_{rad}	ω_{rad}	$X_{0(m)}$	$Y_{0(m)}$	$Z_{0(m)}$
1,9509 $\pm 0,0004$	0,0015 $\pm 0,0024$	-0,0124 $\pm 0,0023$	677404,23 $\pm 1,93$	7183611,85 $\pm 1,84$	1652,19 $\pm 0,55$
POEs estimados com o método proposto – Experimento I					
κ_{rad}	φ_{rad}	ω_{rad}	$X_{0(m)}$	$Y_{0(m)}$	$Z_{0(m)}$
1,950 $\pm 0,00012$	0,0028 $\pm 0,0011$	-0,0118 $\pm 0,0006$	677403,36 $\pm 0,797$	7183610,87 $\pm 0,548$	1652,57 $\pm 0,149$
Discrepância entre o método convencional e o Experimento I					
-0,0006	0,0013	0,0004	-0,8689	-0,9856	0,3820
POEs estimados com o método proposto – Experimento II					
<i>Não encontrou solução única</i>					
POEs estimados com o método proposto – Experimento III					
κ_{rad}	φ_{rad}	ω_{rad}	$X_{0(m)}$	$Y_{0(m)}$	$Z_{0(m)}$
1,95075 $\pm 0,0001$	0,0028 $\pm 0,0006$	-0,0127 $\pm 0,0004$	677403,37 $\pm 0,512$	7183611,621 $\pm 0,3701$	1652,38 $\pm 0,0994$
Discrepância entre o método convencional e o Experimento III					
-0,00012	0,001327	-0,00034	-0,86236	-0,23599	0,192348
POEs estimados com o método proposto – Experimento IV					
κ_{rad}	φ_{rad}	ω_{rad}	$X_{0(m)}$	$Y_{0(m)}$	$Z_{0(m)}$
1,9505 $\pm 0,0001$	0,0038 $\pm 0,0010$	-0,0131 $\pm 0,0006$	677404,12 $\pm 0,7655$	7183611,88 $\pm 0,5243$	1652,33 $\pm 0,1450$
Discrepância entre o método convencional e o Experimento IV					
-0,00030	0,002306	-0,00081	-0,10787	0,026385	0,137190

FONTE: O autor (2011)

Mais uma vez o segundo experimento não encontrou solução única para o problema porque apenas edificações de pequeno porte e geometricamente deficientes foram usadas na estimativa dos parâmetros. Dentre os experimentos que encontraram solução, o experimento I cuja sua configuração é apresentada na Tabela 4 e Figura 19A, apresentou os piores resultados. O terceiro e quarto experimentos, onde as suas configurações são apresentadas na Tabela 4 e Figuras 19C e 19D apresentaram os melhores resultados (ver Tabela 6). Os resultados encontrados com

uso do conjunto de dados inerente ao experimento IV são melhores que aqueles encontrados no experimento III.

Os resultados obtidos para o experimento IV mostraram que o parâmetro de rotação κ apresentou a maior discrepância (0,0003 rad), enquanto o maior valor de discrepância para as translações foi de 0,13 m. Esses resultados também são esperados, devido à distribuição e a orientação geométrica das edificações empregadas na estimativa.

Neste experimento foi utilizado para cada edificação usada como apoio de campo existem 12 observações $(x_{p_1}, y_{p_1}, x_{p_2}, y_{p_2}, A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1$ e $D_2)$ contra 10 observações $(x_p, y_p, A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1$ e $D_2)$ derivada do método anterior e 2 observações (x_p, y_p) , derivada do método convencional de orientação indireta de fotografias. Entretanto, o modelo matemático proposto fornece uma equação e o número de parâmetros a serem determinados pelo MMQ é igual a 6. Sendo assim, 4 edificações de duas águas são suficientes para resolver o problema, enquanto que no método convencional apenas 3 pontos são o suficiente para solucionar o problema.

A seguir serão apresentadas as conclusões e recomendações futuras.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Este trabalho apresentou um método de integração de dados derivados do SVLA e Fotogrametria para a orientação indireta de uma fotografia digital com uso de telhados adjacentes como apoio de campo.

Um modelo matemático foi desenvolvido para determinação dos parâmetros de orientação exterior de uma única fotografia. Este modelo é uma versão modificada do modelo desenvolvido por Mulawa e Mikhail (1988), cuja diferença está baseada na inserção de parâmetros dos planos, advindos de telhados adjacentes extraídos da imagem de intensidade do pulso LASER.

Experimentos com dados simulados e reais foram realizados. Os resultados obtidos foram analisados, permitindo avaliar a viabilidade do uso do método proposto para o processo de orientação.

5.1 CONCLUSÃO

Nos experimentos utilizando o conjunto de dados simulados, os resultados demonstraram que a configuração geométrica e a distribuição das edificações têm grande influência na estimativa dos parâmetros de orientação. Além disso, a melhor estimativa depende da qualidade posicional dos dados SVLA.

Com relação aos experimentos com dados reais, a quantidade de edificações usadas como apoio de campo, a variação de altura e a dimensão também são fatores importantes na recuperação dos POEs. Como esperado, os melhores resultados foram obtidos com a configuração número 2. O método proposto tem potencial para alcançar melhores resultados quando se utiliza dados SVLA com qualidade posicional melhor que a empregada nos experimentos, assim como quando usa edificações com diferentes orientações geométricas.

Para investigar a potencialidade do método proposto com dados reais, quatro experimentos foram elaborados, cujos resultados obtidos foram diretamente comparados com os resultados alcançados com o método convencional. A análise das discrepâncias revelou que ambos os métodos são compatíveis. A precisão dos parâmetros, determinados com o método proposto, revelaram valores melhores do

que aqueles estimados pelo método convencional; fato explicado pela superabundância de observações usadas, devido a característica do método proposto.

Foi verificado que a qualidade dos parâmetros de translação do CP da câmara depende, principalmente, da qualidade posicional dos dados SVLA e a dos parâmetros de rotação são influenciados pela configuração geométrica das edificações. Em todos os experimentos, a coordenada Z_0 apresentou uma boa estimativa, mostrando uma das contribuições da integração de dados SVLA e Fotogrametria, uma vez que a partir disto, se pode empregar coordenadas altimétricas (derivadas do SVLA), de alta precisão, refletindo na estimativa do parâmetro supracitado. Porém, a contribuição mais importante do método proposto é o desenvolvimento de um modelo matemático baseado no uso de parâmetros dos planos de telhados adjacentes extraídos da imagem de intensidade do pulso LASER.

O método proposto se mostrou eficiente em quase todos os experimentos. Não obstante, os experimentos que não atingiram resultados compatíveis com o método convencional mostraram as desvantagens do método sugerido neste trabalho, a saber: se deve evitar somente o uso de edificações de pequeno porte, quando utilizados dados SVLA perfilados com densidade inferior a 5 pontos/m², uma vez que neste caso, as edificações são de difícil reconhecimento, detecção e segmentação; a configuração geométrica das edificações é um fator essencial; somente telhados de duas águas podem ser empregados no método proposto, apesar de sua eficiência não depender de edificações isoladas; em áreas rurais dificilmente são encontrados edificações, o que impossibilita o emprego do método proposto.

A análise dos resultados com dados simulados e reais permite concluir que o método proposto funciona adequadamente para orientação indireta de fotografias, atingindo resultados compatíveis com o método convencional. As principais características do método proposto são as que seguem: cenas de ambientes modificados pelo homem contêm uma infinidade de planos que podem ser facilmente segmentados; o uso de planos adjacentes tem mostrado sua potencialidade em tarefas fotogramétricas, especialmente em orientação de fotografias; os planos não são considerados uma ocorrência isolada, uma vez que pela intersecção de planos adjacentes é possível extrair linhas retas, e por isso pode ser considerado geometricamente bem definido. Além disso, o número de observações é superabundante, o que resulta na estimativa de parâmetros altamente precisos; são

facilmente detectados, reconhecidos e identificados em qualquer tipo de fotografia e, principalmente, com diferentes orientações. Enfim, desde que a implantação de alvos para coleta de pontos tridimensionais no espaço objeto é uma tarefa complexa e demanda esforço operacional, tempo e custo; os planos adjacentes podem ser usados como controle de campo, atenuando os problemas supracitados, além de não exigir pré-sinalização de alvos.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para continuidade desta pesquisa destacam-se:

- Realizar experimentos com dados advindos do SVLA com melhor qualidade posicional e com maior densidade de pontos/m²;
- Usar duas ou mais fotografias e aplicar o método proposto no ajustamento simultâneo de feixes de raios perspectivos, para recuperação dos parâmetros de orientação exterior da câmara;
- Realizar esforços na automação da extração e segmentação de edificações com telhados de duas águas;
- Aplicar o método proposto na orientação exterior de imagens extraídas de sensores de varredura linear (pushbroom);
- Ampliar o método proposto para receber edificações com qualquer tipo de telhado; e
- Automatizar o processo de correspondência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. SBEE 2 ed. Curitiba, PR, 2003.
- ANTON, Howard; RORRES, Chris. **Álgebra linear com aplicações**. 8.ed. Bookman, Porto Alegre. 2001.
- BALTSAVIAS, E. P. **A comparison between Photogrammetry and LASER scanning**. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing v.54 – ISPRS, 1999.
- DALMOLIN, Q. **Ajustamento por Mínimos Quadrados**. Curitiba: Imprensa Universitária (UFPR), 2004.
- DALMOLIN, Q., SANTOS, D. R., DELARA, R.; BÄHR, H. P. **O uso de feições retas extraídas do MDT gerado pelo sistema de varredura LASER como apoio para o cálculo da resseção espacial de imagens digitais**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 11, n. 1, p.117-140, 2005.
- DAL POZ, A. P., TOMMASSELLI, A. M. G. **Automatic absolute orientation of scanned aerial photographs**. In Anais do X SIBGRAPI, pp. 1-8, 1998.
- DOS SANTOS, D. R., DAL POZ, A. P., DALMOLIN, Q. **Indirect orientation of images using control points extracted by the means of monoplotting model**. The Photogrammetric Journal of Finland, 22(1), pp. 25-43, 2010.
- DOS SANTOS, D. R., DAL POZ, A. P., DALMOLIN, Q. **Orientação indireta de imagens com uso de apoio fotogramétrico extraído a partir da integração de dados derivados do sistema LiDAR e Fotogrametria**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 16, n. 2, p.347-364, 2010.
- GALO, M. **Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais**, Curitiba, 1993, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.
- GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994.
- GHANMA, M. S. **Integration of Photogrammetry and LIDAR**. PhD Thesis – Department of Geomatics Engineering – Calgary, Alberta. 2006.
- GONZALEZ, R.C., WOODS, R.E. **Digital Image Processing**, 3rd Ed. Prentice Hall, USA, 2008.
- HABIB, A. **Motion parameter estimation by tracking stationary threedimensional straight lines in image sequences**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 53, pp.174-182, 1999.
- HABIB, A. F., GHANMA, M. S., KIN, C. J., MITISHITA, E. A. **Alternative approaches for utilizing LiDAR data as a source of control information for photogrammetric models**. International Archives of XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, Comission I, 6p., 2004.

- HABIB, A. F., GHANMA, M. S., MITISHITA, E. A. **Photogrammetric georeferencing using LiDAR linear and areal features**. Korean Journal of Geomatics, 5(1), pp. 1-13. 2005a.
- HABIB, A. F., GHANMA, M. S., MORGAN, M. F., AL-RUZOUQ, R. **Photogrammetric registration using linear features**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 71(6), pp. 699-707. 2005b.
- HABIB, A. F., ASMAMAW, A., KELLEY, D., MAY, M. **Linear Features in Photogrammetry**. Report No. 450, Department of Civil and Environmental Engineering and geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, 2000.
- HABIB, A. F., BANG, K., ALDELGGAWY, M., SHIN, S. **Integration of Photogrammetric and LiDAR Data in a Multi-primitive Triangulation Procedure**, Proceedings of the ASPRS 2007, Tampa, Florida, 2007.
- HEUVEL, F. A. van den. **Exterior orientation using coplanar parallel lines**. 10th Scandinavian Conference on Image Analysis, Lappeenranta, p. 71-78, 1997.
- HEIKKILA, J. **Use of linear features in digital photogrammetry**. Photogrammetric Journal of Finland, 12 (2), pp. 40-56, 1991.
- KUBIK, K. **Relative and Absolute Orientation Based on Linear Features**. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 46, p. 199-204, 1988.
- LIU, Y., HUANG, T, S. **A Linear Algorithm for Motion Estimation Using Straight Line Correspondences**. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 44 (1), pp. 35-57, 1988.
- LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. Ed. UFPR, pp. 134, Curitiba, 1987.
- LUGNANI, J.B. **Using Digital Entities as Control**. PhD thesis. Department of Surveying Engineering. University of New Brunswick, pp. 159, 1981.
- MAAS, H. G. **Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data – user requirements and system performance**. Proceedings of 49o. Photogrammetric Week 2003 (Ed. D. Fritsch), Wichmann Verlag, pp. 117-125, 2003.
- MIKHAIL, E. M., ACKERMAN, F. **Observations and Least Squares**. IEP Series in Civil Engineering, New York, 1976.
- MITISHITA, E. A., CORTES, J., CENTENO, J. **Indirect georeferencing of digital SLR imagery using signalized LiDAR control points**. Photogrammetric Record, v. 26 (133), p. 58-72, 2011.
- MITISHITA, E. A., HABIB, A., CENTENO, J., MACHADO, A. L., LAY, J., WONG, C. **Photogrammetric and Lidar Data Integration Using the Centroid of a Rectangular Roof as a Control Point**. The Photogrammetric Record 23(121), 2008.
- MULAWA, D. C., MIKHAIL, E. M. **Photogrammetric treatment of linear features**. International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing, International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Kyoto/Japan, 1988.

REISS, M. L. L., **Restituição Fotogramétrica Flexível de Imagens à Curta Distância: Estudo de Método e Desenvolvimento de Protótipo**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. p161. 2002.

ROBERTS, K. A. **New Representation for a Line**. In: Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, p. 635-640, 1988.

SATALE, D., KULKARNI, M. 2003. **LiDAR in mapping**. Map India Conference GISdevelopment.net. <http://www.gisdevelopment.net/technology/gis/mi03129.htm> (acessado em dezembro de 2010).

SCHENK, T. **From point-based to feature-based aerial triangulation**. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 58 (2004) 315–329, 2004.

SHWERMANN, R. **Automatic image orientation and object reconstruction using straight lines in close-range photogrammetry**. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Melbourne, 30, Commission V, pp. 349-356, 1994.

TOMMASELLI, A.M.G. **Orientation and reconstruction of close-range images using lines**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33 part B5, Amsterdam, Netherlands, pp. 838-84. 2000.

TOMMASELLI, A. M. G., LUGNANI, J. B. **An alternative mathematical model to the collinearity equation using straight features**. In: Proceedings of 16th International Congress of Photogrammetry and remote Sensing. Kyoto, 1988.

TOMMASELLI, A. M. G., TOZZI, C. **A recursive approach to space resection using straight lines**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 62, no. 1, p. 55-66, 1996.

WEHR, A., LOHR, U. **Airborne Laser Scanning – An Introduction and Overview**. Journal of Photogrammetric and Remote Sensing. vol. 54, no. 1, pp. 68-82, 1999.

ZALMASON, G. **Hierarchical recovery of exterior orientation from parametric and natural 3-D curves**. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, part B2, p.610- 617, 2000.

ZIELINSKI, H. **Line photogrammetry with multiple images**. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXIX, part B3, pp.669-676, Washington, 1992.

ANEXO

MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

O ajustamento por Mínimos Quadrados é o ramo da matemática aplicada que tem por finalidade encontrar uma solução única para problemas onde o número de observação é maior que o seu número de parâmetros (DALMOLIN, 2004).

De acordo com Mikhail e Ackerman (1976), o modelo combinado é aplicado em modelos funcionais que ajustam observações e parâmetros. Os modelos funcionais aplicados a esse método são formados por equações implícitas do tipo:

$$F(X_a, L_a) = 0 \quad (51)$$

O modelo combinado de ajustamento não-linear é obtido através da linearização do funcional $F(X_a, L_a)$, utilizando a expansão em série de Taylor, tomando-se apenas os dois primeiros termos da série, assim:

$$A_{(r \times u)} X_{(u \times 1)} + B_{(r \times n)} V_{(n \times 1)} + W_{(r \times 1)} = 0 \quad (52)$$

Sendo:

$$A_{(r \times u)} = \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{X_0, L_b}$$

$$B_{(r \times n)} = \frac{\partial F}{\partial L_a} \Big|_{X_0, L_b}$$

$$W_{(r \times 1)} = F \left(X_{0(u \times 1)}, L_{a(n \times 1)} \right)$$

$$X_{(u \times 1)} = X_{a(u \times 1)} - X_{0(u \times 1)}$$

$$V_{(n \times 1)} = L_{a(n \times 1)} - L_{b(n \times 1)}$$

Onde, X_0 é o vetor dos parâmetros aproximados, X_a é o vetor dos parâmetros ajustados L_b é o vetor das observações e L_a é o vetor das observações ajustadas, r é número de equações, n é número de observações e u é número de parâmetros.

Assim sendo tem-se a seguinte solução para as equações normais.

$$X = [A^T(BPB^T)^{-1}A]^{-1}A^T(BPB^T)^{-1}W \quad (53)$$

Onde, P é a matriz peso das observações. Neste caso P é o inverso da Matriz Variância-Covariância (MVC) das observações.

A diferença entre o vetor das observações e o vetor das observações ajustadas é denominado vetor dos resíduos, dado por:

$$V = P^{-1}B^T(BPB^T)^{-1}(AX + W) \quad (54)$$

No caso de modelos não lineares, iterações são requeridas. Assim para a i -ésima iteração expansão em série de Taylor:

$$A_i X_i + B_i V_i + W_i = 0 \quad (55)$$

Sendo:

$$A_i = \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{X_i, L_i}$$

$$B_i = \frac{\partial F}{\partial L_a} \Big|_{X_i, L_i}$$

$$W_i = B_i(L_b - L_i) + F(X_i, L_i)$$

A solução para as equações normais é dado por:

$$X_i = \left[A_i^T (B_i P B_i^T)^{-1} A_i \right]^{-1} A_i^T (B_i P B_i^T)^{-1} W_i \quad (56)$$

Sendo admitido para a primeira iteração $X_a = X_0$ e $L_i = L_b$. Para as demais iterações os parâmetros ajustados da iteração anterior (X_a^{i-1}) serão usados na próxima iteração como parâmetros aproximados (GEMAEL, 1994). As observações ajustadas da iteração anterior serão usadas na montagem das matrizes A_i , B_i e W_i . O vetor dos parâmetros ajustados é obtido através de:

$$X_a^i = X_a^{i-1} + X_i \quad (57)$$

O vetor das observações ajustadas é obtido por:

$$L^a_i = L_b + V_i \quad (58)$$

Sendo

$$V_i = P^{-1}B_i^T(B_iPB_i^T)^{-1}(A_iX_i + W_i)$$

A solução numérica do ajustamento converge, quando os resíduos e os parâmetros tendem a estabilizar e, portanto, as correções dos parâmetros tendem a zero. Segundo Mikhail e Ackerman (1976) o grau de liberdade (s) é calculado pela equação:

$$s = r - u \quad (59)$$

com

$$n > r - u$$

O valor do sigma a posteriori ($\hat{\sigma}^2$) é estimado por:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{V^T PV}{s} \quad (60)$$

Assim sendo, Matriz Variância Covariância (MVC) dos parâmetros ajustados (Σ_{X_a}) é dada por:

$$\Sigma_{X_a} = \hat{\sigma}^2[A^T(BPB^T)^{-1}A]^{-1} \quad (61)$$

MODELO COMBINADO DE AJUSTAMENTO COM INJUNÇÃO

De acordo com Andrade (2003) uma Injunção é uma condição ou restrição aplicada a uma ou mais variáveis. Gemael (1994) apresenta o método combinado admitindo a existência de “equações de condição particulares” vinculando todos ou parte dos parâmetros:

$$G(X_a) = 0 \quad (62)$$

Esta equação pode ser linearizada utilizando expansão em série de Taylor:

$$C_{(l \times u)} X_{(u \times 1)} + W'_{(l \times 1)} = 0 \quad (63)$$

Sendo:

$$C_{(l \times u)} = \frac{\partial G}{\partial X_a} \Big|_{X_a}$$

$$W'_{(l \times 1)} = G(X_a)$$

Onde, X_a é o vetor dos parâmetros ajustados, l é número de equações de injeção e u é número de parâmetros. Deste modo tem-se a seguinte solução para as equações normais.

$$X = X^* + [A^T(BPB^T)^{-1}A]^{-1}C^T[C[A^T(BPB^T)^{-1}A]^{-1}C^T]^{-1}[CX^* - W] \quad (64)$$

Sendo

$$X^* = -[A^T(BPB^T)^{-1}A]^{-1}A^T(BPB^T)^{-1}W$$

Assim o vetor dos parâmetros ajustados é obtido em cada iteração através de:

$$X_a^i = X_a^{i-1} + X_i \quad (65)$$

Segundo Gemael (1994) o grau de liberdade (s) é calculado pela equação:

$$s = r - u + l \quad (66)$$

O valor do sigma a posteriori ($\hat{\sigma}^2$) é estimado pela Equação (60). Assim sendo, MVC dos parâmetros ajustados (Σ_{X_a}) é dada por:

$$\Sigma_{X_a} = \Sigma_{X^*_a} - \Sigma_{X^*_a} C^T [C \Sigma_{X^*_a} C^T]^{-1} C \Sigma_{X^*_a} \quad (67)$$

Sendo

$$\Sigma_{X^*_a} = \hat{\sigma}^2 [A^T(BPB^T)^{-1}A]^{-1}$$

APÊNDICE

Modelo Matemático Proposto

$$\begin{aligned}
 F = & [(D_1A_2 - A_1D_2) - Y_0(A_1B_2 - A_2B_1) + Z_0(A_2C_1 - A_1C_2)](r_{11}x_p + r_{21}y_p + r_{31}z_p) \\
 & + [(D_1B_2 - B_1D_2) - Z_0(B_1C_2 - B_2C_1) + X_0(A_1B_2 - A_2B_1)](r_{12}x_p + r_{22}y_p + r_{32}z_p) \\
 & + [(D_1C_2 - C_1D_2) - X_0(A_2C_1 - A_1C_2) + Y_0(B_1C_2 - B_2C_1)](r_{13}x_p + r_{23}y_p + r_{33}z_p) = 0
 \end{aligned}$$

Sendo

$$r_{11} = \cos \varphi \cos \kappa$$

$$r_{12} = \cos \omega \sen \kappa + \sen \omega \sen \varphi \cos \kappa$$

$$r_{13} = \sen \omega \sen \kappa - \cos \omega \sen \varphi \cos \kappa$$

$$r_{21} = -\cos \varphi \sen \kappa$$

$$r_{22} = \cos \omega \cos \kappa - \sen \omega \sen \varphi \sen \kappa$$

$$r_{23} = \sen \omega \cos \kappa + \cos \omega \sen \varphi \sen \kappa$$

$$r_{31} = \sen \varphi$$

$$r_{32} = -\sen \omega \cos \varphi$$

$$r_{33} = \cos \omega \cos \varphi$$

Derivadas do Modelo Matemático Proposto

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial F}{\partial \kappa} = & [(D_1A_2 - A_1D_2) - Y_0(A_1B_2 - A_2B_1) + Z_0(A_2C_1 - A_1C_2)](r_{21}x_p - r_{11}y_p) \\
 & + [(D_1B_2 - B_1D_2) - Z_0(B_1C_2 - B_2C_1) + X_0(A_1B_2 - A_2B_1)](r_{22}x_p - r_{11}y_p) \\
 & + [(D_1C_2 - C_1D_2) - X_0(A_2C_1 - A_1C_2) + Y_0(B_1C_2 - B_2C_1)](r_{23}x_p - r_{13}y_p)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial F}{\partial \varphi} = & [(D_1A_2 - A_1D_2) - Y_0(A_1B_2 - A_2B_1) + Z_0(A_2C_1 - A_1C_2)] \left(\frac{\partial r_{11}}{\partial \varphi} x_p + \frac{\partial r_{21}}{\partial \varphi} y_p + \frac{\partial r_{31}}{\partial \varphi} z_p \right) \\
 & + [(D_1B_2 - B_1D_2) - Z_0(B_1C_2 - B_2C_1) + X_0(A_1B_2 - A_2B_1)] \left(\frac{\partial r_{12}}{\partial \varphi} x_p + \frac{\partial r_{22}}{\partial \varphi} y_p + \frac{\partial r_{32}}{\partial \varphi} z_p \right) \\
 & + [(D_1C_2 - C_1D_2) - X_0(A_2C_1 - A_1C_2) + Y_0(B_1C_2 - B_2C_1)] \left(\frac{\partial r_{13}}{\partial \varphi} x_p + \frac{\partial r_{23}}{\partial \varphi} y_p + \frac{\partial r_{33}}{\partial \varphi} z_p \right)
 \end{aligned}$$

Sendo

$$\frac{\partial r_{11}}{\partial \varphi} = -\operatorname{sen} \varphi \cos \kappa$$

$$\frac{\partial r_{12}}{\partial \varphi} = -\operatorname{sen} \omega \cos \varphi \cos \kappa$$

$$\frac{\partial r_{13}}{\partial \varphi} = \cos \omega \cos \varphi \cos \kappa$$

$$\frac{\partial r_{21}}{\partial \varphi} = \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \kappa$$

$$\frac{\partial r_{22}}{\partial \varphi} = -\operatorname{sen} \omega \cos \varphi \operatorname{sen} \kappa$$

$$\frac{\partial r_{23}}{\partial \varphi} = \cos \omega \cos \varphi \operatorname{sen} \kappa$$

$$\frac{\partial r_{31}}{\partial \varphi} = \cos \varphi$$

$$\frac{\partial r_{32}}{\partial \varphi} = \operatorname{sen} \omega \operatorname{sen} \varphi$$

$$\frac{\partial r_{33}}{\partial \varphi} = -\cos \omega \operatorname{sen} \varphi$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \omega} = & [(D_1 B_2 - B_1 D_2) - Z_0(B_1 C_2 - B_2 C_1) + X_0(A_1 B_2 - A_2 B_1)](-r_{13}x_p - r_{23}y_p + r_{33}z_p) \\ & + [(D_1 C_2 - C_1 D_2) - X_0(A_2 C_1 - A_1 C_2) + Y_0(B_1 C_2 - B_2 C_1)](r_{12}x_p + r_{22}y_p + r_{32}z_p) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F}{\partial X_0} = (A_1 B_2 - A_2 B_1)(r_{12}x_p + r_{22}y_p + r_{32}z_p) - (A_2 C_1 - A_1 C_2)(r_{13}x_p + r_{23}y_p + r_{33}z_p)$$

$$\frac{\partial F}{\partial Y_0} = -(A_1 B_2 - B_1 A_2)(r_{11}x_p + r_{21}y_p + r_{31}z_p) + (B_1 C_2 - C_1 B_2)(r_{13}x_p + r_{23}y_p + r_{33}z_p)$$

$$\frac{\partial F}{\partial Z_0} = (C_1 A_2 - A_1 C_2)(r_{11}x_p + r_{21}y_p + r_{31}z_p) - (B_1 C_2 - C_1 B_2)(r_{12}x_p + r_{22}y_p + r_{32}z_p)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial x_p} &= [(D_1A_2 - A_1D_2) - Y_0(A_1B_2 - A_2B_1) + Z_0(A_2C_1 - A_1C_2)]r_{11} \\ &\quad + [(D_1B_2 - B_1D_2) - Z_0(B_1C_2 - B_2C_1) + X_0(A_1B_2 - A_2B_1)]r_{12} \\ &\quad + [(D_1C_2 - C_1D_2) - X_0(A_2C_1 - A_1C_2) + Y_0(B_1C_2 - B_2C_1)]r_{13}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial y_p} &= [(D_1A_2 - A_1D_2) - Y_0(A_1B_2 - A_2B_1) + Z_0(A_2C_1 - A_1C_2)]r_{21} \\ &\quad + [(D_1B_2 - B_1D_2) - Z_0(B_1C_2 - B_2C_1) + X_0(A_1B_2 - A_2B_1)]r_{22} \\ &\quad + [(D_1C_2 - C_1D_2) - X_0(A_2C_1 - A_1C_2) + Y_0(B_1C_2 - B_2C_1)]r_{23}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial z_p} &= [(D_1A_2 - A_1D_2) - Y_0(A_1B_2 - A_2B_1) + Z_0(A_2C_1 - A_1C_2)]r_{31} \\ &\quad + [(D_1B_2 - B_1D_2) - Z_0(B_1C_2 - B_2C_1) + X_0(A_1B_2 - A_2B_1)]r_{32} \\ &\quad + [(D_1C_2 - C_1D_2) - X_0(A_2C_1 - A_1C_2) + Y_0(B_1C_2 - B_2C_1)]r_{33}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial A_1} &= (-D_2 - Y_0B_2 - Z_0C_2)(r_{11}x_p + r_{21}y_p + r_{31}z_p) + X_0B_2(r_{12}x_p + r_{22}y_p + r_{32}z_p) \\ &\quad + X_0C_2(r_{13}x_p + r_{23}y_p + r_{33}z_p)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial A_2} &= (D_1 + Y_0B_1 + Z_0C_1)(r_{11}x_p + r_{21}y_p + r_{31}z_p) - X_0B_1(r_{12}x_p + r_{22}y_p + r_{32}z_p) \\ &\quad - X_0C_1(r_{13}x_p + r_{23}y_p + r_{33}z_p)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial B_1} &= Y_0A_2(r_{11}x_p + r_{21}y_p + r_{31}z_p) + (-D_2 - Z_0C_2 - X_0A_2)(r_{12}x_p + r_{22}y_p + r_{32}z_p) \\ &\quad + Y_0C_2(r_{13}x_p + r_{23}y_p + r_{33}z_p)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial B_2} &= -Y_0A_1(r_{11}x_p + r_{21}y_p + r_{31}z_p) + (D_1 + Z_0C_1 + X_0A_1)(r_{12}x_p + r_{22}y_p + r_{32}z_p) \\ &\quad - Y_0C_1(r_{13}x_p + r_{23}y_p + r_{33}z_p)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial C_1} &= Z_0A_2(r_{11}x_p + r_{21}y_p + r_{31}z_p) + Z_0B_2(r_{12}x_p + r_{22}y_p + r_{32}z_p) \\ &\quad + (-D_2 - X_0A_2 - Y_0B_2)(r_{13}x_p + r_{23}y_p + r_{33}z_p)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial C_2} = & -Z_0 A_1 (r_{11} x_p + r_{21} y_p + r_{31} z_p) - Z_0 B_1 (r_{12} x_p + r_{22} y_p + r_{32} z_p) \\ & + (D_2 + X_0 A_1 + Y_0 B_1) (r_{13} x_p + r_{23} y_p + r_{33} z_p) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F}{\partial D_1} = A_2 (r_{11} x_p + r_{21} y_p + r_{31} z_p) + B_2 (r_{12} x_p + r_{22} y_p + r_{32} z_p) + C_2 (r_{13} x_p + r_{23} y_p + r_{33} z_p)$$

$$\frac{\partial F}{\partial D_2} = A_1 (r_{11} x_p + r_{21} y_p + r_{31} z_p) + B_1 (r_{12} x_p + r_{22} y_p + r_{32} z_p) + C_1 (r_{13} x_p + r_{23} y_p + r_{33} z_p)$$