

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GRAZIELLA VALENÇA DE SOUZA

GERAÇÃO DE MDT USANDO UM TRIPLET DE IMAGEM ALOS E
TRANSFORMAÇÃO LINEAR DIRETA (DLT)



CURITIBA

2011

GRAZIELLA VALENÇA DE SOUZA

GERAÇÃO DE MDT USANDO UM TRIPLET DE IMAGEM ALOS E
TRANSFORMAÇÃO LINEAR DIRETA (DLT)

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Área de Concentração em Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador:

Prof. Dr. Jorge Antonio da Silva Centeno

CURITIBA

2011

TERMO DE APROVAÇÃO

GRAZIELLA VALENÇA DE SOUZA

*"GERAÇÃO DE MDT USANDO UM TRIPLET DE IMAGEM ALOS E A
TRANSFORMAÇÃO LINEAR DIRETA (DLT)"*

Dissertação nº 241 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. Jorge Antonio Silva Centeno
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Alvaro Muriel Lima Machado
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Quintino Dalmolin
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 27 de janeiro de 2011.

*Aos meus queridos pais Vera e Antônio,
meus irmãos André, Tatiana e Patrícia,
ao mais que namorado Julio,
por todo amor, incentivo e apoio.
Sem vocês não teria sido possível.*

AGRADECIMENTO

Ao professor Jorge Antônio da Silva Centeno, pela orientação neste trabalho e em outros tantos artigos, ao longo destes anos de convivência, desde a graduação, onde tive o primeiro contato com a área. Obrigada pela amizade e atenção.

Aos professores Quintino Dalmolin, Hideo Araki, Álvaro Muriel Lima Machado e Edson Aparecido Mitishita pelo auxílio sempre presentes nas dúvidas, e pelos conselhos.

Aos demais professores do Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG) e do Departamento de Geomática, que foram essenciais em minha formação.

Às mais que companheiras de laboratório, Caroline Bérghamo, Fabiana Pires de Castro e Naíssa Luz, pela amizade, auxílio em algumas dúvidas, empréstimo de material dentro e fora da universidade, e ao Andrey por toda ajuda.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro dado a esta pesquisa através da bolsa de estudos concedida.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, seja em aspectos científicos, ou com palavras de apoio e incentivo.

Tua caminhada ainda não terminou....
A realidade te acolhe dizendo que pela frente
o horizonte da vida necessita de tuas palavras e do teu silêncio.

Se amanhã sentires saudades, lembra-te da fantasia e
sonha com tua próxima vitória.
Vitória que todas as armas do mundo jamais conseguirão obter,
porque é uma vitória que surge da paz e não do ressentimento.

É certo que irás encontrar situações tempestuosas novamente,
mas haverá de ver sempre o lado bom da chuva que cai
e não a faceta do raio que destrói.

Tu és jovem. Atender a quem te chama é belo,
lutar por quem te rejeita é quase chegar a perfeição.
A juventude precisa de sonhos e se nutrir de lembranças,
assim como o leito dos rios precisa da água que rola
e o coração necessita de afeto.

Não faças do amanhã o sinônimo de nunca,
nem o ontem te seja o mesmo que nunca mais.
Teus passos ficaram. Olhes para trás... Mas vá em frente,
pois há muitos que precisam que chegues para poderem seguir-te.

Charles Chaplin

RESUMO

O sistema sensor ALOS permite a geração de Modelos Digitais de Superfície, pois adquire imagens estereoscópicas nos modos Nadir, *Forward* e *Backward*. A aplicação da metodologia neste trabalho realiza uma fototriangulação do triplet de imagem ALOS a partir de pontos de controle com suas coordenadas planimétricas obtidas em uma ortofotocarta 1:10.000 e suas coordenadas altimétricas em uma carta 1:2.000. Para isso, fez-se uso do cálculo das coordenadas aproximadas no espaço objeto para o ajustamento através do método das paralaxes, onde a base utilizada é a distância entre os centros de perspectiva das imagens *forward* e *backward*. Como modelagem matemática, utilizou-se a transformação DLT para o cálculo das coordenadas de terreno dos pontos fotogramétricos. A qualidade do ajustamento é avaliada pela análise das unidades de peso *a priori* e *a posteriori*, e pelo teste estatístico de Qui-quadrado.

ABSTRACT

The ALOS sensor system allows the generation of Digital Surface Models, for acquiring stereoscopic images in order Nadir, Forward and Backward. The methodology of this work makes a triplet phototriangulation ALOS image from the control points with their planimetric coordinates obtained in a 1:10.000 map and height coordinates in a 1:2.000 map. A calculate of the coordinates in the object space to approximate the adjustment by the method of parallax was made necessary. The base used forward and backward images. Mathematical modeling used was the DLT transformation to calculate the ground coordinates of photogrammetric points. The quality of obtained coordinates was evaluated by analysis of weight unit a priori and a posteriori and statistical test of chi-squared.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 – SISTEMA DE VARREDURA ALOS.	19
FIGURA 02 – SENSOR PRISM.	20
FIGURA 03 – SISTEMA DE SENSORES ALOS.	20
FIGURA 04 – MODELAGEM MATEMÁTICA EXPLÍCITA	27
FIGURA 05 – ÂNGULOS DE EULER.	28
FIGURA 06 – PROJEÇÃO DE UM PONTO EM UMA FOTOGRAFIA ANALÓGICA.	30
FIGURA 07 – RELAÇÃO ENTRE ESPAÇO IMAGEM POSITIVO E ESPAÇO OBJETO.	30
FIGURA 08 – RELAÇÃO ENTRE O CENTRO DE PROJEÇÃO E O ESPAÇO OBJETO.	31
FIGURA 09 – SISTEMA DE REFERÊNCIA DO ESPAÇO IMAGEM TRIDIMENSIONAL.	32
FIGURA 10 – PARALAXES DE UM PONTO A NO TERRENO	36
FIGURA 11 – DIFERENÇAS DE PARALAXE ENTRE DOIS PONTOS	38
FIGURA 12 – ÁREA DE ESTUDOS.	40
FIGURA 13 – RECORTE EM RELAÇÃO À IMAGEM TOTAL.	41
FIGURA 14 – TRIPLET – IMAGEM FORWARD, NADIR E BACKWARD.	41
FIGURA 15 – ORTOFOTOCARTA EM ESCALA 1:10.000.	42
FIGURA 16 – CURVAS DE NÍVEL	42
FIGURA 17 – ORGANOGRAMA DA METODOLOGIA APLICADA.	43
FIGURA 18 – POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE.	45
FIGURA 19 – POSICIONAMENTO DOS PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS	47
FIGURA 20 – CÁLCULO DO TAMANHO DO PIXEL	49

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 – NÍVEIS DE PROCESSAMENTO ALOS.....	22
QUADRO 02 – COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE NO TRIPLET ALOS.	45
QUADRO 03 – COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE NO TERRENO.....	46
QUADRO 04 – COORDENADAS DOS PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS NA IMAGEM.....	48
QUADRO 05 – COORDENADAS DO CENTRO DAS IMAGENS NO ESPAÇO OBJETO....	50
QUADRO 06 – PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO DLT	54
QUADRO 07 – COORDENADAS APROXIMADAS DOS PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS	55
QUADRO 08 – PONTOS DE CONTROLE NO ESPAÇO OBJETO.....	59
QUADRO 09 – PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS NO ESPAÇO OBJETO	60

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 01 – DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS APROXIMADAS E LIDAS	56
GRAFICO 02 – RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE	57
GRAFICO 03 – RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS DOS PONTOS FOTOGAMÉTRICOS	57
GRAFICO 04 – VARIAÇÃO DOS PONTOS FOTOGAMÉTRICOS.....	61
GRAFICO 05 – ERRO DE FECHAMENTO.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS – *Advanced Landimg Observing Satellite*

AVNIR – *Advanced Visible and Near Infrared Radiometer*

CCD – *Charge-Coupled Device*

JAXA – *Japan Aerospace Exploration Agency*

MDS – *Modelo Digital de Superfície*

MDT – *Modelo Digital de Terreno*

PALSAR – *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*

PRISM – *Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	18
2.1	A MISSÃO ALOS	18
2.1.1	O sensor PRISM	19
2.2	ESTADO DA ARTE.....	23
2.3	MODELAGEM MATEMÁTICA	26
2.3.1	Modelos Explícitos	26
2.3.2	Modelo Implícito.....	29
2.3.2.1	Transformação Linear Direta	29
2.4	MÉTODO DAS PARALAXES.....	36
2.4.1	Cálculo das coordenadas planimétricas	37
2.4.2	Cálculo das coordenadas altimétricas	37
3	MATERIAIS.....	40
3.1	ÁREA DE ESTUDO	40
4	MÉTODOS.....	43
4.1	PONTOS DE CONTROLE	44
4.2	CÁLCULO DOS PARÂMETROS DLT	46
4.3	COORDENADAS DOS PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS NO ESPAÇO IMAGEM 47	
4.3.1	Cálculo das coordenadas do espaço imagem em milímetros	48
4.4	VALORES APROXIMADOS – MÉTODO DAS PARALAXES	50
4.5	CÁLCULO DAS COORDENADAS NO ESPAÇO OBJETO DOS PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS.....	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1	ERRO MÉDIO QUADRÁTICO	53
5.2	PARÂMETROS DA DLT	54
5.3	COORDENADAS APROXIMADAS – MÉTODO DAS PARALAXES	54

5.4	RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS.....	56
5.5	COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS NO ESPAÇO OBJETO.....	58
5.5.1	Pontos de controle	58
5.5.2	Pontos fotogramétricos	59
5.5.3	Variância da unidade de peso a posteriori	61
5.5.4	Comparação da variância de peso	62
5.6	ERRO DE FECHAMENTO DAS COORDENADAS DE TERRENO	62
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	64
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

Atualmente os modelos digitais de terreno são utilizados na criação de Sistemas de Informação Geográfica; na Cartografia para obtenção de curvas de nível; na Geografia para simulações de eventos, enchentes; na Engenharia Florestal para alterações temporais, cálculo de volume, entre outros.

Estes modelos podem ser gerados através de dados obtidos por Laser Scanner, imagens de satélite, imagens aéreas, com ou sem associação a outros dados, como os obtidos por RADAR.

Esta pesquisa traz o uso de técnicas fotogramétricas em um triplet de imagens do satélite ALOS, a fim de calcular as coordenadas tridimensionais no espaço objeto de um grupo de pontos fotogramétricos.

Os dados obtidos por sensores de satélites como o PRISM do ALOS podem trazer algumas dificuldades:

- Orientação exterior: as três imagens não possuem a mesma geometria. Além disto, de acordo com o nível de correção escolhido, a imagem não traz informações sobre seus parâmetros físicos.
- Resolução espacial: os modelos gerados a partir de imagens de satélite possuem qualidade inferior que um mesmo modelo gerado por imagens fotogramétricas.
- Tamanho das imagens: O volume de dados obtido pelo sensor PRISM é extenso, o que gera arquivos que exigem um elevado custo computacional durante o processamento.

Como vantagens do uso das imagens do satélite ALOS têm-se:

- a diminuição no orçamento devido ao baixo custo de sua aquisição, em relação a técnicas fotogramétricas.
- A facilidade e rapidez na aquisição comercial dos dados.

A fim de calcular as coordenadas no espaço objeto de um conjunto de pontos fotogramétricos, utilizaram-se técnicas fotogramétricas, aplicadas no triplet de imagens do satélite ALOS.

Para o cálculo das coordenadas dos pontos fotogramétricos no espaço objeto, foi realizado um ajustamento com injunção de posição, o qual, por ser não-

linear, exigiu coordenadas aproximadas dos pontos fotogramétricos. Estas coordenadas foram obtidas através das equações de paralaxe, o que permitiu evitar o uso de um modelo digital de terreno da região como base de dados, e dispensou a coleta de dados em campo, para obtenção destes valores, o que torna o método viável para áreas de difícil acesso.

Para o cálculo das coordenadas dos pontos fotogramétricos obtidas no espaço objeto foi utilizado como modelo matemático a transformação linear direta (DLT), para que em estudos posteriores, seja possível a geração de modelos digitais de terreno.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Relacionar o espaço imagem e espaço objeto de um triplet de imagem ALOS, através de um modelo matemático implícito, a Transformação Linear Direta – DLT, com a finalidade de gerar um Modelo Digital de Terreno (MDT).

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Identificar pontos de controle e obter suas coordenadas no espaço imagem e espaço objeto;
- Identificar pontos fotogramétricos e medir suas coordenadas no espaço imagem;
- Determinar as coordenadas iniciais tridimensionais no espaço objeto dos pontos fotogramétricos, através das equações de paralaxe, a fim de realizar o cálculo das coordenadas dos pontos fotogramétricos no espaço objeto;

- Calcular as coordenadas tridimensionais ajustadas dos pontos fotogramétricos no espaço objeto, fazendo-se uso da Transformação Linear Direta (DLT).
- Avaliar a qualidade das coordenadas obtidas através da análise da variância dos resíduos a posteriori e teste estatístico de Qui-quadrado, para validação do método.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os Modelos Digitais de Superfície representam uma base importante para a criação de Sistemas de Informação Geográfica, bem como para a produção de modelos tridimensionais de textura para visualização e animação.

Para geração de tais modelos a partir do triplet de imagens ALOS, primeiramente deve-se relacionar o espaço imagem com o espaço objeto, conhecendo-se assim seus parâmetros de transformação, neste caso, da Transformação Linear Direta (DLT), já que os parâmetros de atitude do satélite não encontram-se disponíveis.

O cálculo das coordenadas tridimensionais no espaço objeto dos pixels escolhidos nas imagens, já que as imagens do triplet ALOS não possuem a mesma geometria, é realizado através de um ajustamento não linear com injunção de posição. Os valores das injunções são correspondentes aos pontos de controle.

Como são três as imagens que compõem o triplet do ALOS, através da fototriangulação do triplet, as coordenadas de altitude são obtidas com uma maior confiabilidade, pois os raios que se cruzam originam-se de três pontos de vistas distintos de uma mesma região: o nadir, o *forward* e o *backward*.

O uso de imagens triplet do satélite ALOS representa uma diminuição significativa no orçamento, devido ao baixo custo de sua aquisição, em comparação às fotografias aéreas. O modelo gerado pode chegar à resolução de 2,5 metros, o que permite gerar cartas em escala de até 1:25.000. Sua utilização compreende estudos em áreas rurais, estudos de uso do solo, análises de riscos, entre outros.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 A MISSÃO ALOS

O lançamento do satélite ALOS, em 24 de janeiro de 2006, teve como objetivos (JAXA, 2006):

- Prover mapas para o Japão e outros países, incluindo aqueles localizados na região da Ásia e Pacífico;
- Executar observações regionais a fim da harmonização entre o ambiente e desenvolvimento;
- Conduzir o monitoramento de desastres ao redor do mundo;
- Levantamento de recursos naturais;
- Desenvolver tecnologia necessária para futuros satélites de observação terrestre.

A distribuição dos dados obtidos pelo satélite ALOS teve início no dia 24 de outubro de 2006.

O satélite ALOS possui três sensores (JAXA, 2006):

- *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping* (PRISM), o qual compreende três conjuntos de sistemas ópticos para medição precisa da elevação;
- *Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2* (AVNIR-2), o qual realiza o mapeamento da cobertura da superfície terrestre através de sensor multi espectral com 4 bandas (RGB e infra-vermelho próximo);
- *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR), o qual é habilitado para realizar observações, independente das condições climáticas e de iluminação (realiza observações noturnas).

2.1.1 O sensor PRISM

O PRISM é um radiômetro pancromático que cobre uma faixa espectral de 0,52 a 0,77 micrômetros. Apresenta 2,5 m de resolução espacial no nadir, e resolução radiométrica de 8 bits. Possui três sistemas ópticos independentes para visadas nadir, *forward* (com inclinação para frente) e *backward* (com inclinação para trás), tornando possível a produção de uma imagem estereoscópica ao longo da trajetória do satélite. (FIGURA 01).

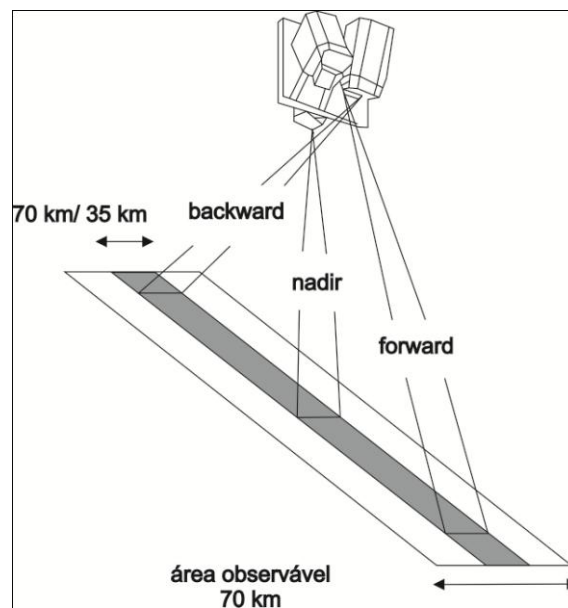


FIGURA 01 – SISTEMA DE VARREDURA ALOS.
FONTE: JAXA (2006)

Sendo o sensor PRISM do tipo *pushbroom*, a geometria do imageamento é caracterizada pela projeção aproximadamente paralela à direção da trajetória (along-track) e projeção perspectiva na direção transversal à trajetória (across-track) (KOCAMAN e GRUEN, 2007).

Considerando a estratégia de imageamento da JAXA, a imagem PRISM Triplet tem inclinação de 1,2° na direção transversal à trajetória. Como a abertura angular de varredura é cerca de 2,9°, nos extremos da faixa de 35Km pode-se encontrar uma inclinação de até 2,65°. Quanto maior a ondulação do terreno e maior a inclinação do sensor, maior será a deformação devido ao relevo nesta imagem. Tal deformação pode ser corrigida através do processo de ortorretificação (IBGE, 2009).

O sensor PRISM pode operar nos modos Nadir e Triplet, variando para isto a configuração de seus sensores, mostrados na FIGURA 2.

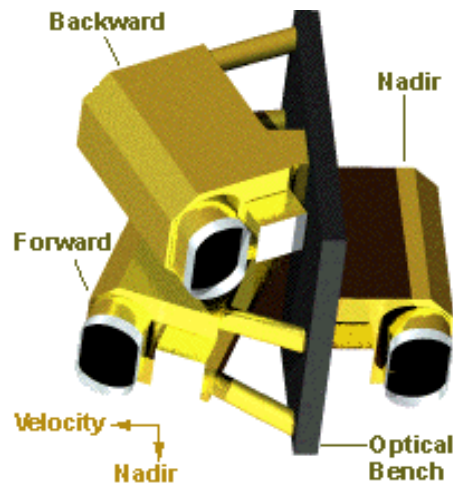


FIGURA 02 – SENSOR PRISM.
FONTE: JAXA (2006)

Cada um dos três sistemas ópticos é composto por conjuntos de CCDs.

O radiômetro da imagem nadir possui 6 CCDs alinhados, cada um com dimensão de 4992 pixels, com superposição nominal de 32 pixels, distribuídos em 16000 linhas (JAXA, 2006). As imagens *backward* e *forward* são adquiridas por sensores que possuem 8 CCDs alinhados com dimensão de 4928 pixels distribuídos também em 16000 linhas e com a mesma superposição (JAXA, 2006).

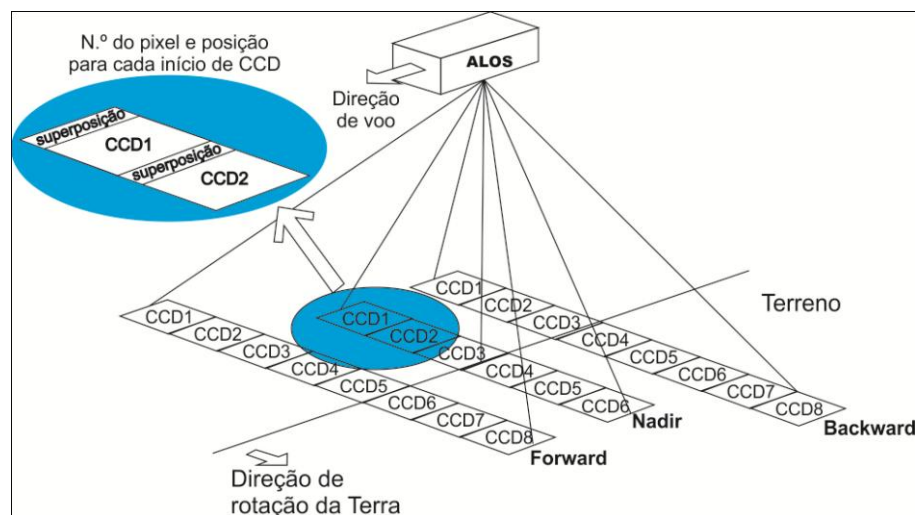


FIGURA 03 – SISTEMA DE SENSORES ALOS.
FONTE: ADAPTADO DE JAXA (2006)

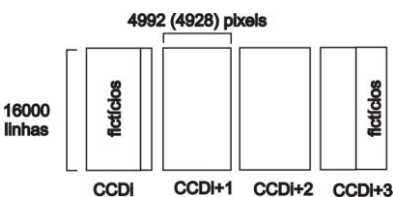
No modo Nadir apenas esta visada é utilizada, com os 6 CCDs que a compõem, e cujo telescópio cobre uma faixa de 70km.

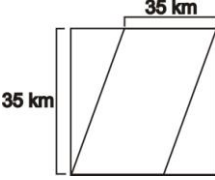
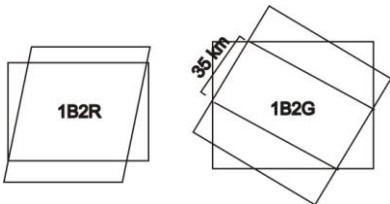
No modo Triplet as 3 visadas são utilizadas, porém apenas 4 CCDs são utilizados para obter estereoscopia numa faixa de 35km (FIGURA 01). No modo triplet as visadas Forward e Backward têm inclinações de 23,8° para frente e para trás, respectivamente, formando pares estereoscópicos com uma relação base/altura (B/H) igual 1,0. Além da inclinação da visada, o sensor pode ser inclinado lateralmente em +/-1,5°.

A cena PRISM é definida pelo RSP (Reference System for Planning), número (trajetória e quadro) e pela distância da mudança de posição da cena. Cada varredura em uma trajetória é separada em 7200 quadros, com base na latitude do satélite. O número do quadro é alocado a cada 5 cenas (aproximadamente 28 km).

A mudança de cenário pode ser realizada nos dados processados, e a distância da mudança de cena é especificada pelo número de quadros.

No subsistema de processamento de dados ALOS, a cena de um produto bruto (não corrigido geometricamente) e um produto georreferenciado (com a projeção baseada na linha de vôo) são definidas pela determinação da posição e intervalo da imagem, utilizando dados de entrada do RSP. A cena de um produto geocodificado (com sua projeção baseada na direção do mapa) é definida pela rotação do mesmo intervalo da imagem georreferenciada para o norte do mapa. No QUADRO 01 detalham-se os níveis de correção da imagem ALOS:

Nível	Modo de observação	Tamanho da cena	Definição da cena e métodos de extração
1A,1B1	Nadir modo normal, visada forward e backward	<p>Aproximadamente 35 x 35 km.</p> <p>Nadir: 4992 pixels x 16000 linhas x 4 = 305 Mb</p> <p>Forward e Backward: 4928 pixels x 16000 linhas x 4 = 301 Mb</p>  <p>O diagrama mostra uma barra horizontal representando a cena. A altura é rotulada como '16000 linhas'. A largura total é rotulada como '4992 (4928) pixels'. A barra é dividida em quatro seções verticais rotuladas 'CCDI', 'CCDH+1', 'CCDH+2' e 'CCDH+3'. As seções 'CCDI' e 'CCDH+3' são rotuladas como 'fictícios'.</p>	<p>A posição da cena é definida pelo número RSP do satélite (trajetória e quadro) e distância da mudança de cena. O cálculo do tempo do centro da cena corresponde ao número do quadro e a exata equidistância entre as linhas acima e abaixo do tempo calculado. Quando a mudança de cena é especificada, o tempo do centro corresponde ao número da mudança do frame calculado. A imagem criada por unidade de CCD. O tamanho de cada cena é 4992 pixels (visada nadir) e 4928 pixels (forward e backward) e as áreas que não possuem dados, podem ser deixadas com fictícios. Os números de pixel pares e ímpares devem ser reordenados. Usualmente há 4 CCDs (4 arquivos), mas pode ser ocasionalmente 3 CCDs.</p>

Nível	Modo de observação	Tamanho da cena	Definição da cena e métodos de extração
1B2R,	Nadir modo normal, visada forward e backward	35 km x 35 km (Exceto áreas fora do quadro) (14000+ α) pixel x 14000 linhas = 187 Mb 	A posição da cena é definida pelo número RSP do satélite (trajetória e quadro) e a distância da mudança de cena. O cálculo do tempo do centro da cena corresponde ao número do quadro e a exata equidistância entre as linhas acima e abaixo do tempo calculado. Quando a mudança de cena é especificada, o tempo do centro corresponde ao número da mudança do frame calculado. Há apenas um arquivo total, pois cada CCD é combinado para formar uma cena.
1B2G	Nadir modo normal, visada forward e backward	Tamanho variável 	A posição da cena é definida pelo número RSP do satélite (trajetória e quadro) e a distância da mudança de cena. O cálculo do tempo do centro da cena corresponde ao número do quadro e a exata equidistância entre as linhas acima e abaixo do tempo calculado. Quando a mudança de cena é especificada, o tempo do centro corresponde ao número da mudança do frame calculado. Há apenas um arquivo total, pois cada CCD é combinado para formar uma cena.

QUADRO 01 – NÍVEIS DE PROCESSAMENTO ALOS.
FONTE: JAXA (2005).

Os níveis de processamento das imagens ALOS são descritos como (JAXA, 2005):

- Nível 0 – Gerado no subsistema de processamento de dados. Este nível são os dados brutos gerados por todo segmento *downlink* e todas bandas. Este produto é dividido em um tamanho equivalente a uma cena.
- Nível 1A - Dados brutos extraídos dos dados do nível 0, com linhas expandidas e generalizadas. Informações auxiliares como informações radiométricas requeridas para o processamento do nível 1B são adicionadas.
- Nível 1B1 – Dados com correção radiométrica dos dados do nível 1A, e adicionado o coeficiente de calibração absoluta. Informações auxiliares como as radiométricas requeridas para o processamento, acima do nível 1B2 são adicionadas.
- Nível 1B2 – Dados com correção geométrica dos dados do nível 1B1. As opções de correções disponíveis são:
 - R - Dados georreferenciados;
 - G - Dados geocodificados.

A JAXA elaborou uma estratégia para aquisição de dados utilizando os 3 sensores ALOS para todos os continentes, nos 3 primeiros anos de operação do satélite. De acordo com esta estratégia, o Brasil tem sido imageado completamente pelo sensor PRISM, uma vez a cada ano, nos meses de março a junho, podendo ocorrer a inclusão de passagens não previstas, como a que ocorreu próximo ao inverno de 2008. A JAXA definiu que o sensor PRISM deve usar o modo de observação Triplet para esta cobertura anual. Para garantir continuidade entre as faixas é necessário imagear em 2 ciclos, sendo o primeiro com inclinação lateral do sensor, de $-1,2^\circ$ e o segundo de $+1,2^\circ$.

2.2 ESTADO DA ARTE

A questão central da pesquisa é a obtenção de informações tridimensionais a partir dos dados de pares estereoscópicos de imagens ALOS, o que foi vastamente estudada em Fotogrametria.

Com o surgimento de sistemas sensores de alta resolução, esta prática se estendeu a imagens de satélite, iniciando com o sistema SPOT em 1986. Os mais modernos sistemas sensores de sensoriamento remoto utilizam o mesmo princípio dos primeiros da série SPOT, redirecionando os sensores no sentido transversal ao deslocamento da plataforma e ainda introduziram a prática da obtenção de imagens *forward* e *backward*, na mesma órbita, para minimizar a diferença temporal entre as imagens que formam o par (WOLFF e GRUEN, 2009).

WOLFF e GRUEN, 2009 utilizaram o software SAT-PP, desenvolvido na Universidade de Hannover, para a geração de modelos digitais com base num triplet ALOS. Numa primeira tentativa, foram usados os coeficientes dos polinômios racionais (RPCs) para a orientação das imagens, mas como esta prática revelou não gerar resultados eficientes, eles optaram por determinar seus próprios coeficientes usando um modelo de georreferenciamento – DGR (*Direct Georeferencing Model with Stochastic Exterior Orientation Elements*).

KOCAMAN e GRUEN (2007) realizaram a calibração e validação das imagens ALOS PRISM em três campos de prova: um em Zurique, Suíça; Sakurajima, Japão e Wellington, África do Sul. Para o georreferenciamento

aplicaram o modelo DGR e PPM (*Piecewise Polynomial Model*). Encontraram que o modelo DGR possui melhor performance no caso de poucos pontos de controle. Para o conjunto de dados de Zurique e Sakurajima, com a correta definição a priori do elementos de orientação interior e exterior, 2 pontos de controle são suficientes para atingir uma precisão sub-pixel. Sobre todos os campos de prova, conseguiram com o modelo DGR precisões planimétricas de cerca de meio pixel, e altimétrica de 1/3 de pixel. Quando utilizados os polinômios racionais (RPC), alcançaram precisões entre 0,7 e 2,6 pixels. Nestes casos, efeitos sistemáticos nos resíduos dos pontos de checagem foram notados, os quais puderam ser parcialmente removidos quando usados os termos de correção dos RPCs. Quando comparados os casos, os resultados obtidos anteriormente com outros sensores similares (SPOT-5, IKONOS, QuickBird), notaram que a precisão obtida, em pixels, é a mesma para estes sensores.

SCHNEIDER et al., 2008 geraram um Modelo Digital de Superfície, utilizando orientação exterior baseada em polinômios racionais, fazendo uso de dados cedidos pela JAXA, onde constataram que os modelos gerados possuem uma variação nas coordenadas altimétricas de até 60m na direção do vôo. Os autores utilizaram o software da DLR (*Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt*).

WESER et al., 2008 testaram um modelo de auto calibração criado na Universidade de Melbourne para um sensor pushbroom individual. Os autores compararam dados obtidos com e sem a auto-calibração e avaliaram os resultados para duas áreas de estudos. Os valores dos erros médios quadráticos para o modelo onde foi realizada a auto calibração foram reduzidos em 25% nos dados planimétricos (de 2,0 para 1,6m), e de 9% nos dados altimétricos (de 2,3 para 2,1m).

DEBIASI, 2008 aplicou o modelo matemático da DLT para a ortorretificação de imagens CBERS 2 em área de relevo acidentado, utilizando dois modelos digitais distintos: o modelo digital de elevação de cartas topográficas, e o modelo digital de elevação do SRTM. Como conclusões, a escolha do modelo digital de elevação influenciou na qualidade do produto final gerado. O modelo digital de elevação do SRTM mostrou-se satisfatório para ortorretificação de imagens na escala 1:50.000 ou menores. O autor apresentou como vantagem do uso da DLT para a correção geométrica destas imagens, a modelagem dos parâmetros de distorção relativos à sua aquisição, diferente do uso de polinômios de segundo grau.

ABREU, 2005 verificou a capacidade do sistema de monorrestituição digital para restituir imagens de alta resolução por meio da transformação DLT. Os dados monorrestituídos de uma imagem Quickbird foram comparados com dados coletados com GPS, em campo, provenientes da monorrestituição de fotos aéreas convencionais na escala 1:5000 e da estereorrestituição de fotos 1:5000. A comparação deu-se pelo uso de um conjunto de pontos comuns, embasada no padrão de exatidão cartográfica para a referida escala 1:5000 e em métodos estatísticos para avaliar a normalidade dos dados e a ausência de erros sistemáticos significativos. Mostrou-se que a metodologia desenvolvida pode ser aplicada para o mapeamento planimétrico de vias, edificações e divisas, na escala 1:5000, compatível com os métodos convencionais.

MITISHITA et al., 2003 realizaram uma monorrestituição de imagens do satélite de alta resolução Ikonos 2 (geo), utilizando-se da transformação DLT e modelo digital de terreno. Os resultados obtidos na modelagem matemática dos parâmetros orbitais com a função de transformação DLT foram satisfatórios, permitindo aproximar a aplicação rigorosa com as equações de colinearidade, onde são conhecidos os parâmetros geométricos da órbita e do satélite. A discrepância linear média obtida na verificação da exatidão do modelo de transformação DLT em pontos de apoio, perfeitamente visíveis e identificáveis na imagem, aproximou a exatidão desejável de um pixel.

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

A relação entre o espaço imagem e o espaço objeto, tanto na Fotogrametria como no Sensoriamento Remoto é obtida através de parâmetros calculados através de modelos matemáticos.

Existem modelos explícitos, os quais descrevem a geometria do sensor no instante da tomada da imagem. Estes modelos fornecem resultados mais precisos (ELASHMAWY et al., 2005). No Sensoriamento Remoto, para o desenvolvimento destes modelos, necessitam-se os dados da trajetória do satélite e parâmetros de calibração do sensor. Na Fotogrametria, necessitam-se os parâmetros de orientação interior e exterior.

Outro tipo de modelagem matemática é a implícita, que independe dos parâmetros da plataforma e do sensor ou da recuperação da geometria no instante da tomada da foto. Geralmente os modelos matemáticos implícitos são menos precisos que os modelos explícitos, justamente por não utilizarem os parâmetros do sensor, porém em alguns casos, a precisão alcançada se aproxima da obtida através dos modelos explícitos (ELASHMAWY et al., 2005).

Nesta pesquisa, a pesar de ser feito o uso de imagens de sensores orbitais, a aplicação matemática é embasada nos princípios da Fotogrametria, ou seja, imagens orbitais serão tratadas como fotos aéreas.

2.3.1 Modelos Explícitos

Os modelos explícitos são baseados na equação de colinearidade modificada. Para sua aplicação são necessários parâmetros de atitude (ω , ϕ , κ), calibração (parâmetros de orientação interior) e órbita do sensor (X_0 , Y_0 , Z_0), conforme demonstrado na FIGURA 04:

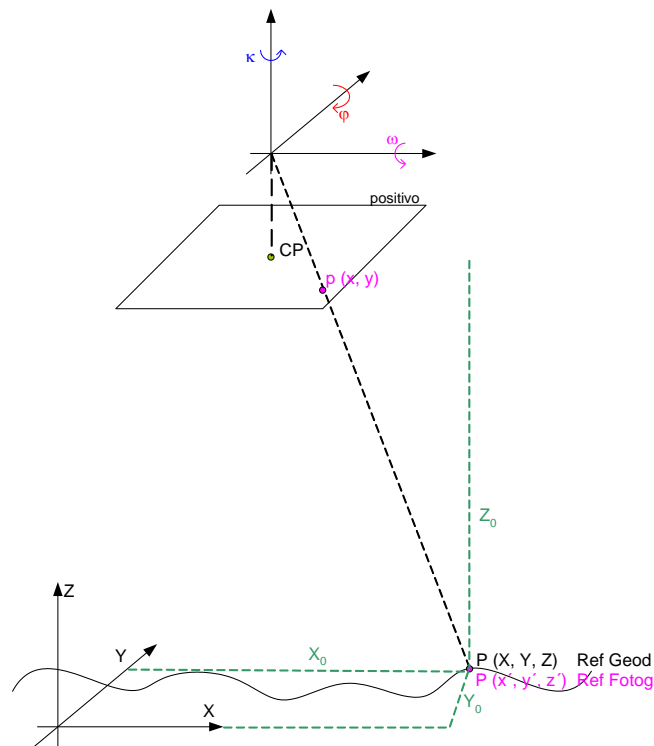


FIGURA 04 – MODELAGEM MATEMÁTICA EXPLÍCITA
 FONTE: MENDONÇA (2006)

$$x_p = x_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y_p = y_0 - f \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$
(01)

Onde:

x_p e y_p são as coordenadas fotogramétricas

x_0 e y_0 são as coordenadas do ponto principal

f é a distância focal

X, Y, Z são as coordenadas do ponto no espaço objeto

X_0, Y_0, Z_0 são as coordenadas do centro de perspectiva no espaço objeto

r_{ij} são os elementos da matriz de rotação R , composta pelo triplo produto das rotações a seguir:

$$\begin{aligned}
 R_x(\omega) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \text{sen}(\omega) \\ 0 & -\text{sen}(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix} \\
 R_y(\phi) &= \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & -\text{sen}(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \\
 R_z(\kappa) &= \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & \text{sen}(\kappa) & 0 \\ -\text{sen}(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{02}$$

Para uma rotação em ω , ϕ , κ :

$$R = R_z(\kappa) * R_y(\phi) * R_x(\omega) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \tag{03}$$

$$\begin{aligned}
 r_{11} &= \cos(\phi) * \cos(\kappa) \\
 r_{12} &= \cos(\omega) * \text{sen}(\kappa) + \text{sen}(\omega) * \text{sen}(\phi) * \cos(\kappa) \\
 r_{13} &= \text{sen}(\omega) * \text{sen}(\kappa) - \cos(\omega) * \text{sen}(\phi) * \cos(\kappa) \\
 r_{21} &= -\cos(\omega) * \text{sen}(\kappa) \\
 r_{22} &= \cos(\omega) * \cos(\kappa) - \text{sen}(\omega) * \text{sen}(\phi) * \text{sen}(\kappa) \\
 r_{23} &= \text{sen}(\omega) * \text{sen}(\phi) - \cos(\omega) * \text{sen}(\phi) * \text{sen}(\kappa) \\
 r_{31} &= \text{sen}(\phi) \\
 r_{32} &= -\text{sen}(\omega) * \cos(\phi) \\
 r_{33} &= \cos(\omega) * \cos(\phi)
 \end{aligned} \tag{04}$$

Onde:

ω , ϕ , κ são os ângulos de Euler, como mostrado abaixo (FIGURA 05):

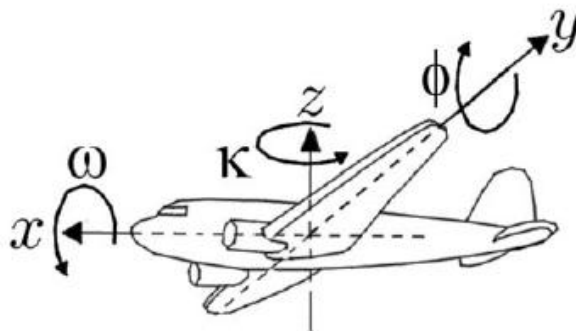


FIGURA 05 – ÂNGULOS DE EULER.
 FONTE: COELHO e BRITO (2007)

Os modelos matemáticos explícitos também são conhecidos por modelos físicos, pois descrevem fisicamente a geometria do imageamento (ELASHMAWY et al., 2005).

2.3.2 Modelo Implícito

O modelo matemático implícito independe dos parâmetros do sensor e do tipo de plataforma, ou seja, dos parâmetros de orientação interior e exterior, sendo, por este motivo, aplicados em imagens que estes dados não são fornecidos (OKAMOTO et al., 1998). A relação entre o espaço imagem e o espaço objeto é feita através de pontos de controle.

Nesta pesquisa foi utilizado o modelo matemático implícito conhecido como Transformação Linear Direta (DLT), descrito abaixo.

2.3.2.1 Transformação Linear Direta

A Transformação Linear Direta – DLT é um modelo matemático inicialmente aplicado por ABDEL-AZIZ e KARARA (1971) para a calibração de câmeras não métricas.

A transformação DLT, não exige os parâmetros de orientação interior e exterior do sensor, o que permite aplicações de relacionamento do espaço objeto com o espaço imagem, principalmente quando estes parâmetros não estão disponíveis, como é o caso das imagens ALOS 1B2G (FRASER, 1996).

No Sensoriamento Remoto a DLT é considerada como um caso particular da transformação matemática denominada de Razão de Polinômios que é vastamente empregada na extração de informações 3D ou 2D a partir de imagens de satélite sem os parâmetros geométricos do sensor e órbita do satélite. (BALTSAVIAS, 2001).

A DLT utiliza um conjunto de pontos de controle que possuem suas coordenadas medidas no espaço imagem, e conhecidas no espaço objeto. Geralmente as coordenadas dos pontos de controle são fixas em um sistema rígido,

e o problema consiste em calcular a relação entre as coordenadas 2D do espaço imagem e as coordenadas 3D do espaço objeto (BARDSLEY e LI, 2007).

Uma imagem tomada por uma câmera fotográfica é equivalente a obter do ponto P no espaço objeto sua imagem P' no plano do filme, ou seja, negativo, com o ponto O representando o centro de projeção, o ponto PP sendo o ponto principal, f a distância focal, conforme ilustra a FIGURA 06.

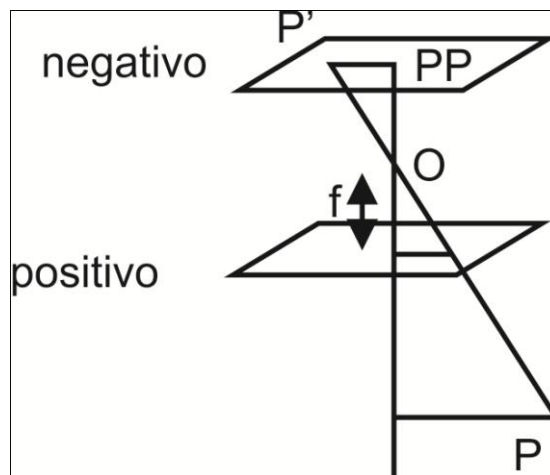


FIGURA 06 – PROJEÇÃO DE UM PONTO EM UMA FOTOGRAFIA ANALÓGICA.
FONTE: SEKER (2001)

Para imagens digitais, o ponto P' se encontrará no CCD da câmera.

A relação direta entre as coordenadas do ponto na imagem P' e as coordenadas do ponto P no espaço objeto é possível, conforme se demonstra na FIGURA 07:

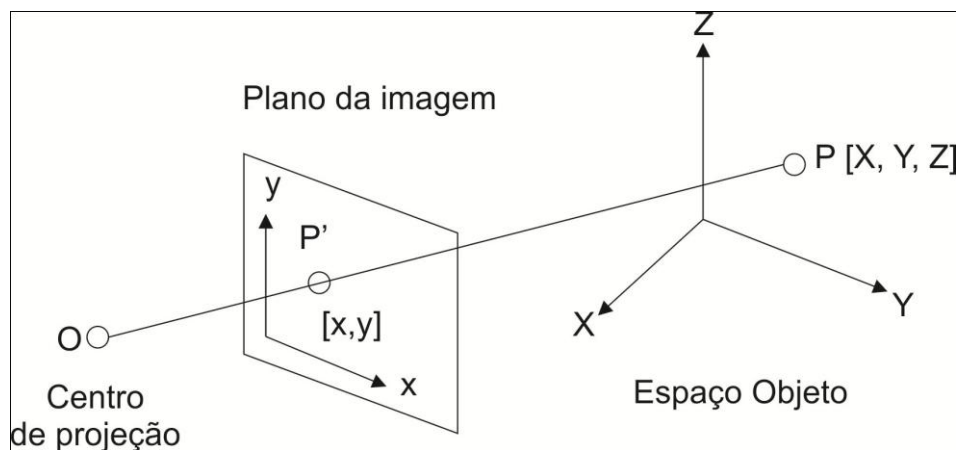


FIGURA 07 – RELAÇÃO ENTRE ESPAÇO IMAGEM POSITIVO E ESPAÇO OBJETO.
FONTE: KWON (1998)

O ponto P localiza-se no espaço objeto. Sua imagem P' pertence ao plano de projeção, na FIGURA 07 representado pelo diapositivo, chamado espaço imagem. O ponto O é o centro de projeção da imagem. Logo, dois sistemas de referência são definidos na FIGURA 07:

- Sistema de referência do espaço objeto (X, Y, Z);
- Sistema de referência do espaço imagem (x,y).
-

O sistema óptico da câmera projeta o ponto P do espaço objeto no ponto P' no plano da imagem. As coordenadas X, Y, Z são as coordenadas do ponto P no espaço objeto, enquanto x e y são suas coordenadas no espaço imagem. Os pontos P', O e P são supostamente colineares. Esta é a razão da condição de colinearidade na qual se baseia a DLT.

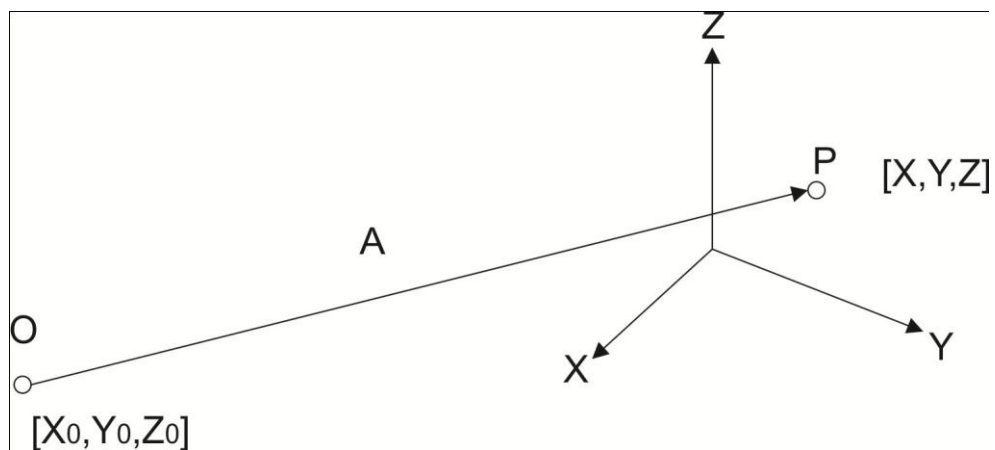


FIGURA 08 – RELAÇÃO ENTRE O CENTRO DE PROJEÇÃO E O ESPAÇO OBJETO.
 FONTE: KWON (1998)

Ao assumir que a posição do centro de projeção (O) no sistema de referência do espaço objeto é X_0 , Y_0 , Z_0 (FIGURA 08), o vetor A com origem no centro de projeção até o ponto P é dado por:

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (05)$$

O eixo z é adicionado ao sistema de referência do espaço imagem como um terceiro eixo a fim de transformá-lo em um sistema tridimensional, como mostra a FIGURA 09:

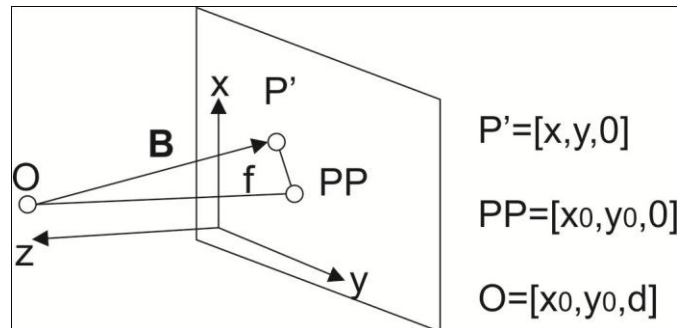


FIGURA 09 – SISTEMA DE REFERÊNCIA DO ESPAÇO IMAGEM TRIDIMENSIONAL.
FONTE: KWON (1998)

A linha que une o centro de projeção O ao plano da imagem em diapositivo, paralela ao eixo z e perpendicular ao plano da imagem é chamada de eixo principal e o ponto principal PP é a interseção do eixo principal com o plano da imagem.

A distância focal f é a distância entre os pontos PP e O.

Assumindo as coordenadas no plano da imagem do ponto principal como $(x_0, y_0, 0)$, a posição do ponto O no sistema de referência do plano da imagem é (x_0, y_0, d) . O vetor B que parte do ponto O ao P' é mostrado a seguir:

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -d \end{bmatrix} \quad (06)$$

Quando os pontos P', O e P são colineares, os vetores A e B formam uma única linha. A condição de colinearidade é equivalente à forma vetorial:

$$\vec{B} = c * \vec{A} \quad (07)$$

Onde c é um escalar. Os vetores A e B são originalmente descritos no sistema de referência do espaço objeto e no sistema de referência do espaço imagem respectivamente.

Para relacionar diretamente as coordenadas é necessário descrevê-las em um sistema de referência comum. Um dos caminhos pode ser transformando o vetor

A no sistema de referência do espaço imagem através da aplicação da matriz de transformação R (equação 03), como segue:

$$A' = R * A = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} * A \quad (08)$$

Onde:

A' é o vetor A descrito no sistema de referência do espaço imagem;

A é o vetor A descrito no sistema de referência do espaço objeto;

Aplicando os valores de B (obtido na equação 06), R (obtido na equação 03) e A' (obtido na equação 08) na equação 07, tem-se:

$$\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -d \end{bmatrix} = c * \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (09)$$

Ou

$$x - x_0 = c * (r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)) \quad (10)$$

$$y - y_0 = c * (r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)) \quad (11)$$

$$-d = c * (r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)) \quad (12)$$

Da equação 12, obtém-se:

$$c = \frac{-d}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (13)$$

Substituindo o valor de c obtido na equação 13 nas equações 10 e 11, obtém-se:

$$\begin{aligned}
x - x_0 &= -d * \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\
y - y_0 &= -d * \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}
\end{aligned} \tag{14}$$

As unidades de medida das coordenadas x , y , x_0 , y_0 no sistema de coordenadas do espaço imagem geralmente é o milímetro. Entretanto como este trabalho utiliza imagens digitais, a unidade de medida será o pixel, tem-se:

$$\begin{aligned}
x - x_0 &\Rightarrow \lambda_x(x - x_0) \\
y - y_0 &\Rightarrow \lambda_y(y - y_0) \\
x - x_0 &= \frac{-d}{\lambda_x} * \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\
y - y_0 &= \frac{-d}{\lambda_y} * \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}
\end{aligned} \tag{15}$$

Onde, λ_x e λ_y são os fatores de conversão entre distintos sistemas de unidades nos eixos x e y , respectivamente. Como resultado, x , y , x_0 e y_0 podem ser especificados em qualquer sistema de unidades.

Desenvolvendo a equação 15 e reagrupando os termos para explicitar x e y , temos:

$$\begin{aligned}
x &= \frac{L_1 * X + L_2 * Y + L_3 * Z + L_4}{L_9 * X + L_{10} * Y + L_{11} * Z + 1} \\
y &= \frac{L_5 * X + L_6 * Y + L_7 * Z + L_8}{L_9 * X + L_{10} * Y + L_{11} * Z + 1}
\end{aligned} \tag{16}$$

Onde:

$$L_1 = \frac{x_0 * r_{31} - d_x * r_{11}}{D};$$

$$L_2 = \frac{x_0 * r_{32} - d_x * r_{12}}{D};$$

$$L_3 = \frac{x_0 * r_{33} - d_x * r_{13}}{D};$$

$$L_4 = \frac{(d_x * r_{11} - x_0 * r_{31}) * X_0 + (d_x * r_{12} - x_0 * r_{32}) * Y_0 + (d_x * r_{13} - x_0 * r_{33}) * Z_0}{D};$$

$$L_5 = \frac{y_0 * r_{31} - d_y * r_{21}}{D};$$

$$L_6 = \frac{y_0 * r_{32} - d_y * r_{22}}{D};$$

$$L_7 = \frac{y_0 * r_{33} - d_y * r_{23}}{D};$$

$$L_8 = \frac{(d_y * r_{21} - y_0 * r_{31}) * X_0 + (d_y * r_{22} - y_0 * r_{32}) * Y_0 + (d_y * r_{23} - y_0 * r_{33}) * Z_0}{D};$$

$$L_9 = \frac{r_{31}}{D};$$

$$L_{10} = \frac{r_{32}}{D};$$

$$L_{11} = \frac{r_{33}}{D}$$

$$[d_x, d_y] \equiv \left[\frac{d}{\lambda_x}, \frac{d}{\lambda_y} \right];$$

$$D = -(X_0 * r_{31} + Y_0 * r_{32} + Z_0 * r_{33});$$

Os coeficientes L_1 a L_{11} são os parâmetros da DLT que permitem relacionar o sistema de referência do espaço objeto e o sistema de referência do espaço imagem.

2.4 MÉTODO DAS PARALAXES

A paralaxe refere-se ao deslocamento aparente das posições relativas de imagens de objetos estacionários, contra um referencial, causada por uma mudança na posição de observação.

Tomando como referencial o satélite utilizado para Sensoriamento Remoto, percebe-se que tal fenômeno ocorre de maneira que para elevações mais altas, o movimento em relação ao sensor aparentará ser maior que para elevações mais baixas.

Conforme ilustrado pela FIGURA 10, sabendo-se a altitude de vôo (H) ou a altitude da estação, a base aérea (B) (distância entre as estações no sentido da linha de vôo), a distância focal da câmara utilizada (f) e a paralaxe do ponto (p_a), suas coordenadas X , Y , Z são calculadas conforme ilustrado nos itens seguintes:

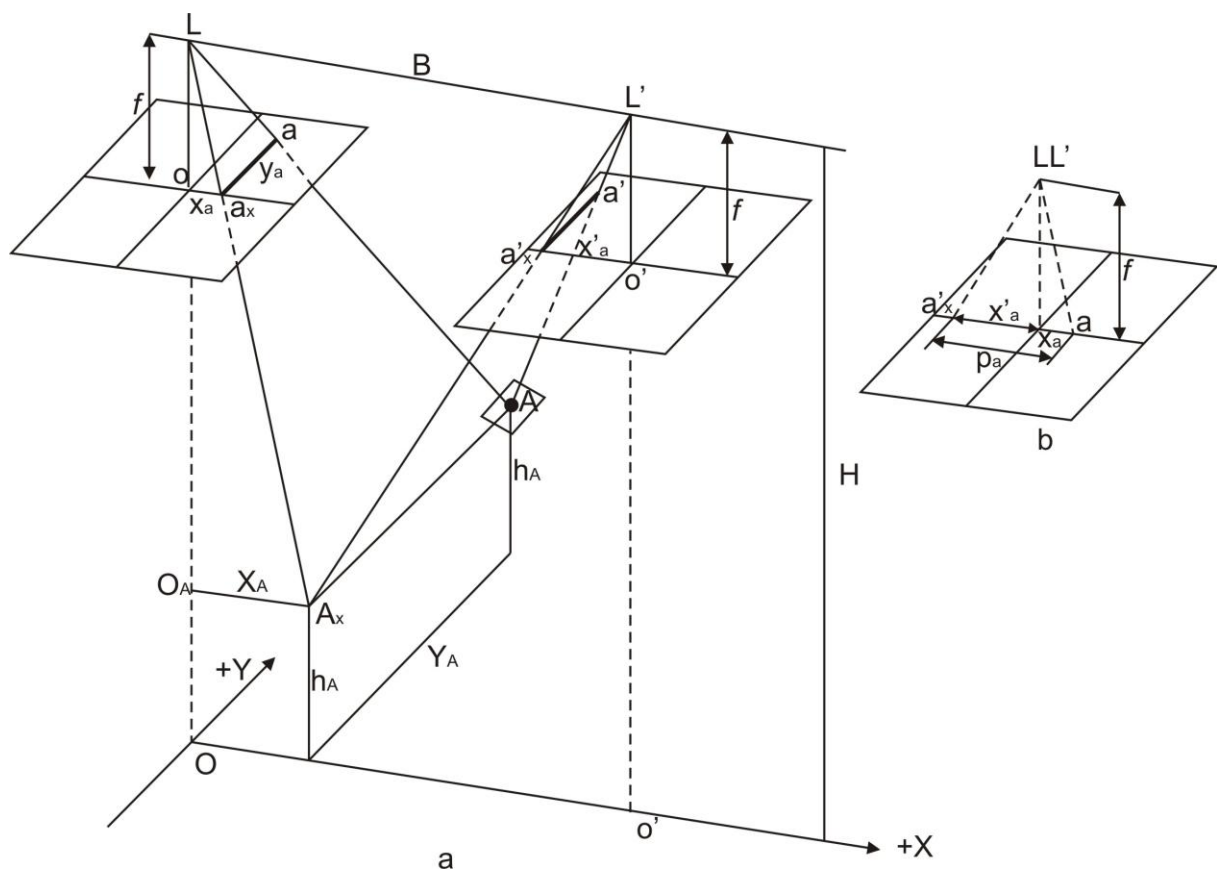


FIGURA 10 – PARALAXES DE UM PONTO A NO TERRENO
 FONTE: LILLESAND, KIEFER (2004).

2.4.1 Cálculo das coordenadas planimétricas

Por semelhança de triângulos (FIGURA 10), calculam-se as coordenadas X_A e Y_A , no espaço objeto, através das equações 17 e 18, respectivamente:

$$X_A = \frac{x_a}{f}(H - h_a) \quad (17)$$

$$Y_A = \frac{y_a}{f}(H - h_a) \quad (18)$$

Onde:

x_a = coordenada x do ponto A no espaço imagem, em milímetros;

y_a = coordenada y do ponto A no espaço imagem em milímetros;

f = distância focal em milímetros;

H=altitude do satélite em metros;

h_a = altura do ponto A em metros.

2.4.2 Cálculo das coordenadas altimétricas

As diferenças de paralaxe entre dois pontos distintos são causadas pelas diferenças de altitude entre estes dois pontos (WOLF, 2000), como ilustra a FIGURA 11:

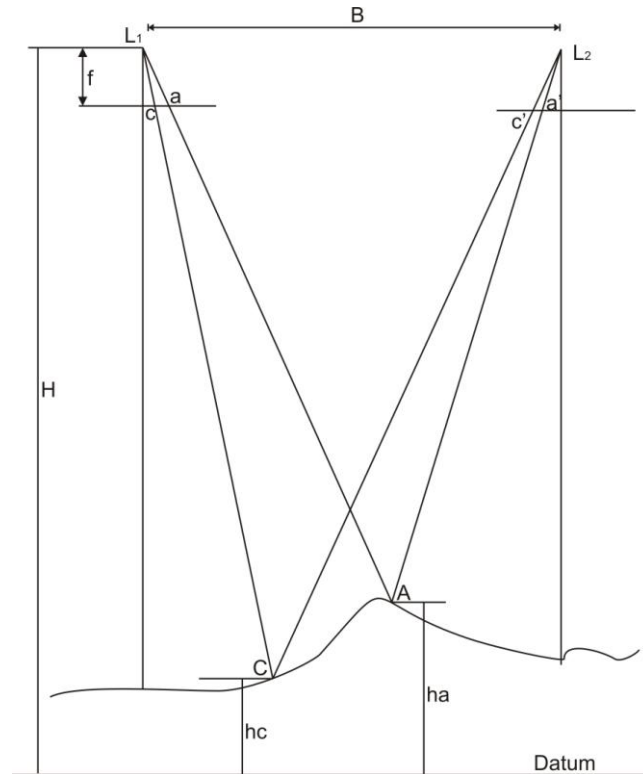


FIGURA 11 – DIFERENÇAS DE PARALAXE ENTRE DOIS PONTOS
 FONTE: WOLF (2000).

Na posse das coordenadas no espaço objeto de pontos de controle, as coordenadas iniciais dos pontos fotogramétricos podem ser determinadas reescrevendo as equações de paralaxe, para explicitar o valor de suas paralaxes absolutas (WOLF, 2000).

$$p_a = (x_a - x'_a) = \frac{B * f}{(H - h_a)} \quad (19)$$

Onde:

p_a = paralaxe do ponto fotogramétrico;

f = distância focal;

H = altitude do satélite;

h_a = altitude do ponto A

B = base.

Para os pontos de controle, a paralaxe é dada por:

$$p_c = (x_c - x'_c) = \frac{B * f}{(H - h_c)} \quad (20)$$

Onde

h_c = altitude do ponto de controle.

Fazendo-se a diferença entre as equações anteriores, chega-se à equação

21:

$$h_a = h_c + \frac{(p_a - p_c)}{p_a} (H - h_c) \quad (21)$$

3 MATERIAIS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende parte do município de Campo Magro, região metropolitana de Curitiba, estado do Paraná, com latitude 25° 22' S e longitude 49° 26' W.

Esta área foi escolhida, pois possui terreno acidentado e áreas planas, além de possui edificações (FIGURA 12).

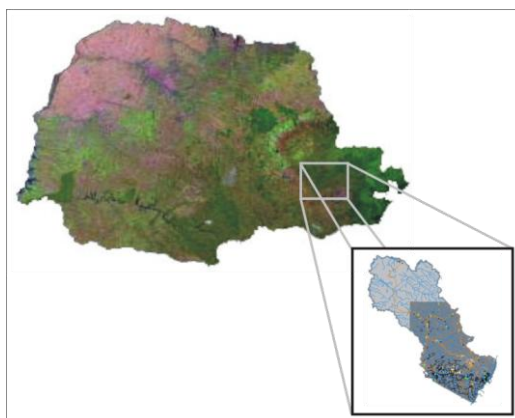


FIGURA 12 – ÁREA DE ESTUDOS
FONTE: ADAPTADO DE IBGE (2009).

Para este trabalho, serão utilizados três recortes, com dimensões 1000 x 1000 pixels, das imagens *backward*, *nadir* e *forward* do sensor PRISM do satélite ALOS, datadas de 25 de maio de 2007, tomadas com órbita do satélite descendente, ou seja, com o sentido de voo de norte para sul. Sua resolução espacial é de 2,5 metros no terreno, aproximadamente.

A FIGURA 13 mostra a proporção entre o tamanho total da imagem e o recorte, representado pelo quadrado vermelho.

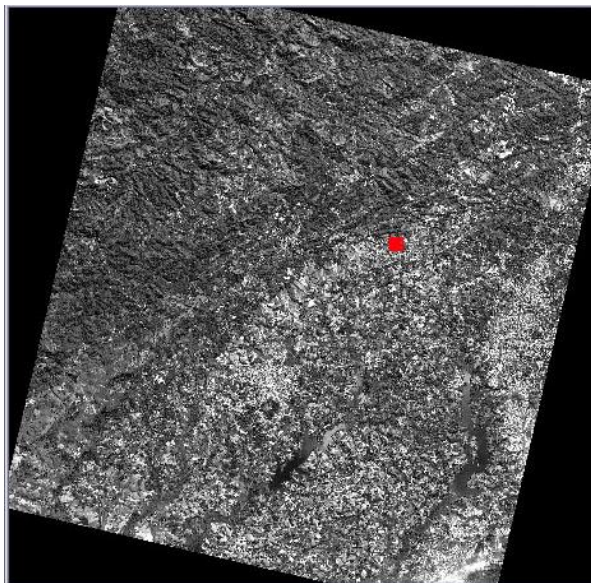


FIGURA 13 – RECORTE EM RELAÇÃO À IMAGEM TOTAL.
FONTE: IBGE (2007).

O nível de correção das imagens utilizadas é 1B2G. As imagens são mostradas abaixo, na seqüência *forward*, nadir e *backward*, respectivamente (FIGURA 14). O Sistema de Projeção das imagens é o UTM, fuso 22S, e o Sistema de Referência WGS84.

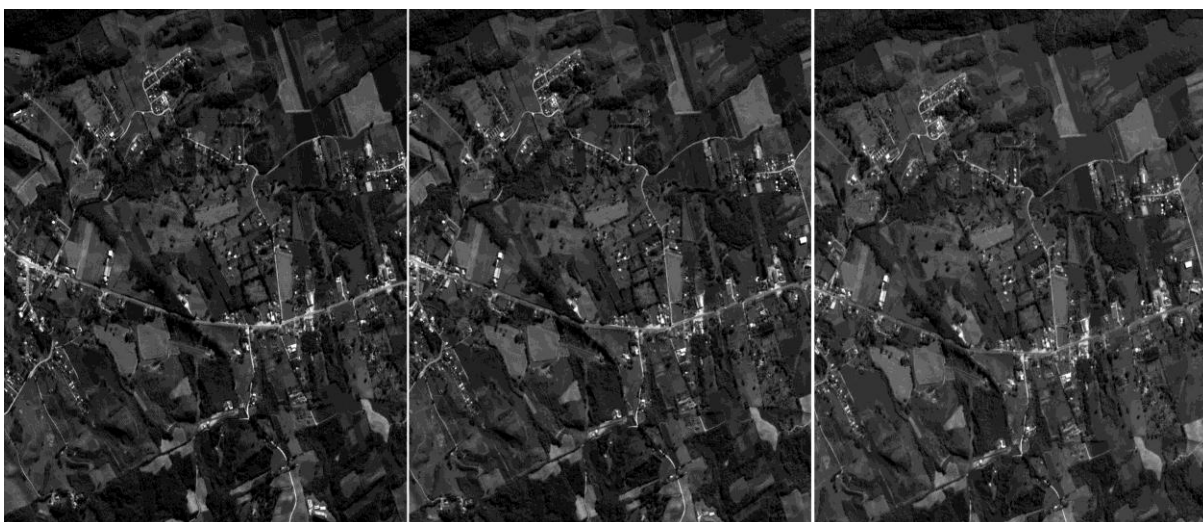


FIGURA 14 – TRIPLET – IMAGEM FORWARD, NADIR E BACKWARD.
FONTE: IBGE (2007).

As coordenadas dos pontos de apoio e verificação, no terreno, foram obtidas através de uma ortofotocarta escala 1:10.000 (FIGURA 15).



FIGURA 15 – ORTOFOTOCARTA EM ESCALA 1:10.000.
FONTE: ITCG (2000).

O voo foi realizado em junho de 2000. Cada pixel desta carta representa 0,84 m no terreno. Seu Sistema de Projeção é o UTM, fuso 22S. O Sistema de Referência SAD 69. Esta ortofotocarta atende a classe A do PEC.

Os dados altimétricos foram retirados de uma carta digital na escala 1:2.000 (FIGURA 16).

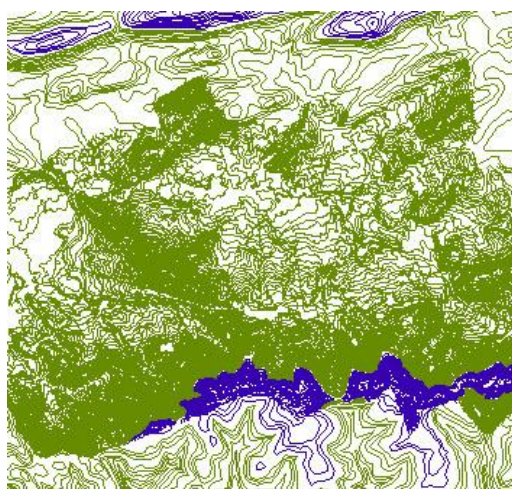


FIGURA 16 – CURVAS DE NÍVEL
FONTE: ITCG (2000).

As curvas de nível apresentadas em verde possuem altitudes até 1000m e as curvas de nível representadas em azul possuem altitudes acima de 1000m. As curvas estão espaçadas a cada metro. Seu Sistema de Projeção é o UTM, fuso 22S. O Sistema de Referência SAD 69. Esta carta atende á classe B do PEC.

Tanto a ortofotocarta em escala 1:10.000, quanto a carta 1:2.000 foram fornecidos pelo Instituto de Terras, Cartografia e Geociências – ITCG.

4 MÉTODOS

A fim de alcançar os objetivos específicos, a metodologia apresentada segue o diagrama abaixo apresentado pela FIGURA 17:

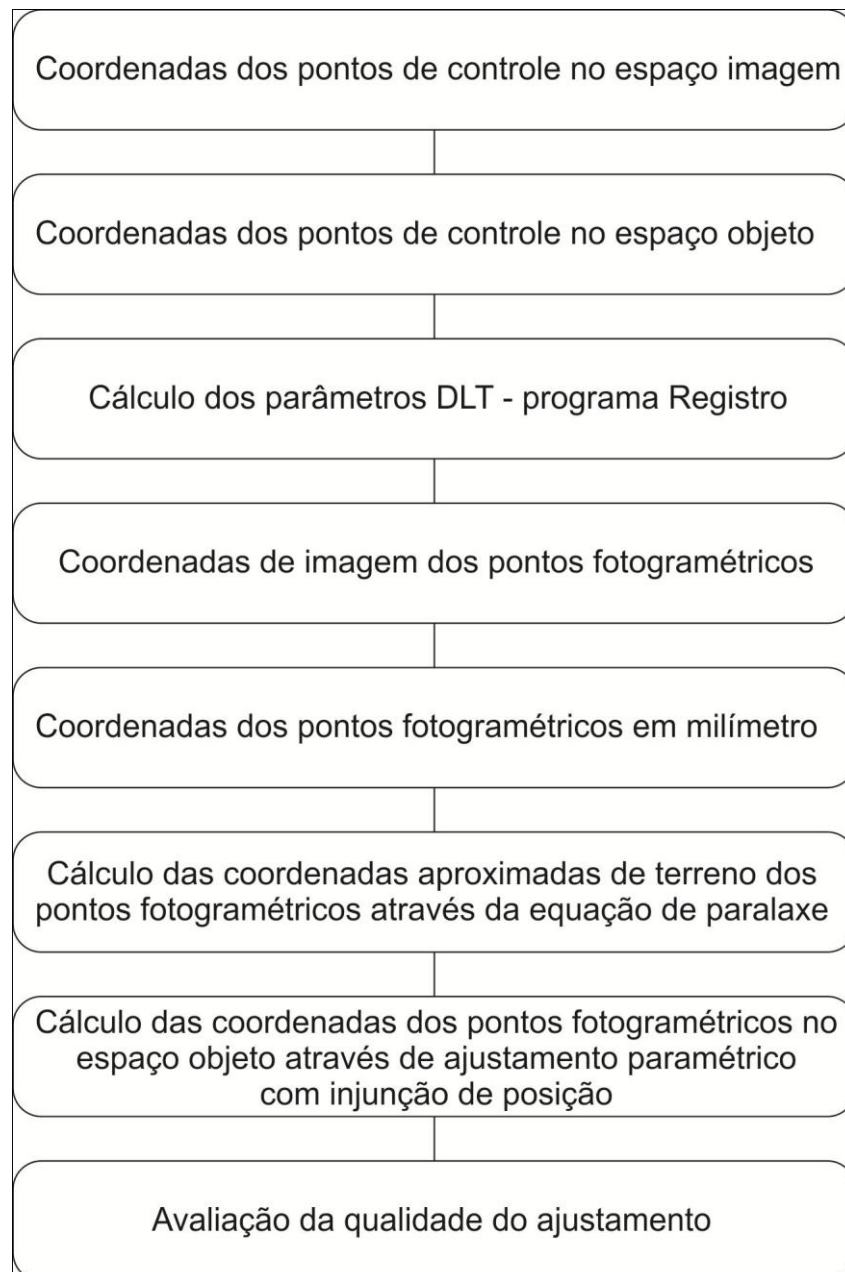


FIGURA 17 – ORGANOGAMA DA METODOLOGIA APLICADA
FONTE: O AUTOR (2010).

O processo inicia-se na observação das coordenadas no espaço imagem de 16 pontos de controle, os quais têm suas coordenadas conhecidas no espaço objeto.

Com os valores das coordenadas dos pontos de controle foram calculados os 11 parâmetros da Transformação Linear Direta (DLT) para cada imagem do triplet ALOS, através do programa REGISTRO, totalizando 33 parâmetros calculados..

Outros 34 pontos, chamados pontos fotogramétricos, também tiveram suas coordenadas observadas no espaço imagem.

Para a realização da fototriangulação fez-se necessária a obtenção dos valores das coordenadas aproximadas no espaço objeto dos pontos fotogramétricos. Para isso, as coordenadas dos pontos de controle e dos pontos fotogramétricos em milímetros foram inseridas nas equações de paralaxe, e assim obtidas as coordenadas aproximadas para a realização do cálculo das coordenadas dos pontos fotogramétricos no espaço objeto.

Assim, todos os dados foram ajustados através do método paramétrico com injunção de posição, desenvolvido em uma rotina Matlab, fazendo-se uso dos parâmetros da DLT calculados anteriormente, e das coordenadas iniciais dos pontos fotogramétricos.

Para avaliar a precisão do ajustamento, foi realizada a comparação dos valores de sigma a priori e sigma a posteriori obtido.

O teste de Qui-quadrado também foi utilizado para verificar a significância da diferença entre estes valores.

4.1 PONTOS DE CONTROLE

As coordenadas dos 16 pontos de controle no triplet de imagens do satélite ALOS apresentam-se distribuídas conforme ilustra a FIGURA 18.



FIGURA 18 – POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE
 FONTE: O AUTOR (2009).

Os valores das coordenadas dos pontos de controle no espaço imagem foram lidas nas imagens *forward*, *nadir* e *backward* do triplet, através do programa ENVI.

Estas coordenadas apresentam seu valor em pixel, coluna (x) e linha (y), respectivamente, conforme mostrado no QUADRO 02 abaixo, com precisão de 0,5 pixel:

P	x Nadir	y Nadir	x Forward	y Forward	x Backward	y Backward
01	958	303	908	348	996	299
02	145	267	95	307	182	268
03	236	203	188	246	274	203
04	349	142	299	188	386	137
05	135	645	86	687	172	645
06	297	905	246	961	338	892
07	436	844	383	901	476	828
08	740	819	687	874	779	807
09	772	586	722	631	810	581
10	356	593	307	638	394	588
11	802	201	753	246	840	200
12	813	561	763	607	851	557
13	593	323	545	365	630	323
14	562	253	513	296	600	252
15	524	291	475	333	562	290
16	663	205	614	250	701	202

QUADRO 02 – COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE NO TRIPLET ALOS.
 FONTE: O AUTOR (2010).

As coordenadas planimétricas dos pontos de controle no espaço objeto foram obtidas através da ortofotocarta digital 1:10.000. Já suas coordenadas altimétricas foram extraídas da carta digital 1:2.000. Todas as coordenadas foram lidas com o auxílio do programa ArcGIS e são mostradas no QUADRO 03, abaixo:

P	E (UTM)	N (UTM)	h (m)
01	658299	7193709	953
02	656266	7193803	933
03	656494	7193963	938
04	656774	7194117	958
05	656238	7192860	937
06	656646	7192217	1005
07	656990	7192363	1010
08	657744	7192427	999
09	657828	7193006	960
10	656794	7192990	952
11	657909	7193963	949
12	657931	7193066	958
13	657382	7193662	938
14	657306	7193836	940
15	657214	7193743	940
16	657557	7193957	954

QUADRO 03 – COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE NO TERRENO.
FONTE: O AUTOR (2009).

As coordenadas planialtimétricas foram obtidas com precisão de 0,5 metro.

4.2 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DLT

Para o cálculo dos parâmetros da transformação DLT, foi utilizado o programa REGISTRO. O programa REGISTRO foi desenvolvido por professores da pós-graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, em linguagem Delphi (MACHADO e MITISHITA, 2007).

Nele, é possível o cálculo dos parâmetros da DLT através das coordenadas dos pontos de controle medidas no espaço imagem e conhecidas no espaço objeto.

As incógnitas são os parâmetros da DLT. Os valores conhecidos são as coordenadas dos pontos de controle no espaço imagem x_n e y_n , em pixel, e X_n , Y_n , Z_n no espaço objeto, em metros.

Cada imagem, nadir, *forward* e *backward*, possuem seus próprios parâmetros DLT, ou seja, 11 parâmetros para cada imagem do triplet, totalizando 33 parâmetros calculados pelo programa REGISTRO.

Estes 33 parâmetros serão utilizados no cálculo das coordenadas dos pontos fotogramétricos no espaço objeto, sendo, neste ajustamento, considerados valores conhecidos, ou seja, seus valores não serão novamente ajustados.

4.3 COORDENADAS DOS PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS NO ESPAÇO IMAGEM

Para a fototriangulação, nas 3 imagens (nadir, *forward* e *backward*) foram escolhidos 34 pontos fotogramétricos, como ilustrado na FIGURA 19.



FIGURA 19 – POSICIONAMENTO DOS PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS
FONTE: O AUTOR (2009).

As coordenadas em pixel dos pontos fotogramétricos no espaço imagem foram lidas no software ENVI, conforme ilustra o QUADRO 04:

P	x Nadir	y Nadir	x Forward	y Forward	x Backward	y Backward
17	127	425	078	467	164	426
18	424	079	374	124	462	075
19	834	570	784	616	873	565
20	921	824	868	882	962	807
21	565	794	513	849	605	779
22	634	433	585	476	672	432
23	208	327	159	368	245	328
24	128	426	079	468	165	427
25	191	814	141	859	228	810
26	677	938	625	995	719	923
27	646	571	604	617	692	567
28	554	587	505	634	593	584
29	819	249	768	294	856	246
30	725	198	677	241	764	194
31	675	071	625	118	714	066
32	468	270	418	313	504	270
33	480	040	431	088	519	032
34	559	226	510	270	596	224
35	331	186	282	231	368	184
36	225	523	176	569	263	520
37	525	511	475	555	563	508
38	461	443	411	488	499	441
39	414	477	364	523	453	472
40	347	291	298	329	385	290
41	928	539	878	584	967	535
42	746	250	698	293	785	247
43	888	316	840	360	927	314
44	639	467	590	510	677	466
45	870	357	820	401	907	355
46	241	155	191	199	279	154
47	097	541	048	582	134	541
48	072	341	023	381	109	343
49	879	127	830	173	917	123
50	231	249	182	292	269	249

QUADRO 04 – COORDENADAS DOS PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS NA IMAGEM
 FONTE: O AUTOR (2010).

Os parâmetros da transformação DLT obtidos foram aplicados na transformação das coordenadas dos pontos fotogramétricos, a fim de obter suas coordenadas no espaço objeto.

4.3.1 Cálculo das coordenadas do espaço imagem em milímetros

Nos arquivos digitais das imagens ALOS PRISM 1B2G, não consta o tamanho do pixel no sensor, para o cálculo das coordenadas x e y em milímetros. Para contornar este problema, admitindo o pixel quadrado e como se conhece a

altura média da órbita, o valor da distância focal e o valor do pixel no terreno, o tamanho do pixel no sensor aproximado foi obtido conforme a equação 22 (FIGURA 20):

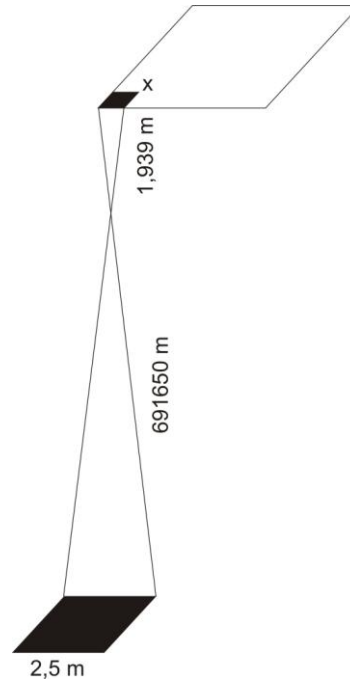


FIGURA 20 – CÁLCULO DO TAMANHO DO PIXEL
 FONTE: O AUTOR (2010).

$$\frac{x}{f} = \frac{p}{H} \quad (22)$$

Onde:

$x = 0,007$ milímetros que é o tamanho do pixel no sensor;

$f = 1,939$ milímetros que é o valor da distância focal;

$p = 2,5$ metros que é tamanho do pixel no terreno;

$H = 691650$ metros que é a altura do satélite.

As coordenadas de imagem em um referencial em milímetro, com origem no centro da imagem, foram obtidas utilizando a equação 23:

$$\begin{aligned} x_{mm} &= \left(x_{px} - \frac{n_{col} + 1}{2} \right) * p_x \\ y_{mm} &= \left(\frac{n_{lin} + 1}{2} - y_{px} \right) * p_y \end{aligned} \quad (23)$$

Onde,

x_{px} , y_{px} = coordenadas x e y em pixel;

n_{lin} = número de linhas da imagem;

n_{col} = número de colunas da imagem;

$p_x = p_y$ = tamanho do pixel em x e y, neste caso iguais.

4.4 VALORES APROXIMADOS – MÉTODO DAS PARALAXES

Para a formação do par estereoscópico foram utilizadas as imagens *forward* e *backward*, as quais formam uma maior base.

Cada estereopar tem seu próprio sistema de coordenadas no espaço objeto. Este sistema é considerado paralelo ao sistema de coordenadas da imagem *backward*, com o eixo X na direção da órbita do satélite, o eixo Z coincidente com o eixo óptico da imagem da *backward* e a origem em um datum vertical arbitrário (TOMMASELLI, 2009).

No ENVI, foram lidas as coordenadas no espaço objeto do centro dos recortes das imagens no Sistema de Coordenadas WGS84, as quais posteriormente foram convertidas para o Sistema de Referência SAD69, como mostra o QUADRO 05:

Sistema	E Nadir	N Nadir	E Forward	N Forward	E Backward	N Backward
WGS84	650783	7189847	651739	7190727	649940	7188922
SAD69	650833	7189891	651789	7190771	649990	7188966

QUADRO 05 – COORDENADAS DO CENTRO DAS IMAGENS NO ESPAÇO OBJETO
 FONTE: O AUTOR (2010).

Utilizando as coordenadas no espaço objeto no sistema de coordenadas SAD69, o valor da base, devido à trajetória descendente do satélite, é dado por:

$$B = N_{SAD69_Backward} - N_{SAD69_Forward} \quad (24)$$

As distâncias entre os pontos de controle e os pontos fotogramétricos, foram calculadas conforme ilustra a equação 25:

$$dPC = \sqrt{(x_c - x_p)^2 + (y_c - y_p)^2} \quad (25)$$

Onde:

dPC = distância entre o ponto fotogramétrico p e o ponto de controle c;

x_c = coordenada x do ponto de controle;

x_p = coordenada x do ponto fotogramétrico;

y_c = coordenada y do ponto de controle;

y_p = coordenada y do ponto fotogramétrico.

Para o cálculo das altitudes, foi escolhido o ponto de controle mais próximo do ponto fotogramétrico, devido ao terreno ser acidentado.

4.5 CÁLCULO DAS COORDENADAS NO ESPAÇO OBJETO DOS PONTOS FOTOGRAFAMÉTRICOS

Para o cálculo das coordenadas dos pontos fotogramétricos no espaço objeto, fez-se uso do ajustamento paramétrico com injunção de posição.

O modelo estocástico de ajustamento segue a equação 26:

$$L_a = F(X_a) \quad (26)$$

Onde:

L_a =observações ajustadas;

X_a =parâmetros ajustados.

Já o modelo linearizado, é mostrado na equação 27, sendo V o vetor dos resíduos.

$$V = AX + L \quad (27)$$

Onde a matriz das derivadas parciais A é dada pela equação 28:

$$A = \frac{\partial F}{\partial X} \quad (28)$$

Onde $X = X_a - X_0$, ou seja, a correção do valor aproximado.

A matriz das equações normais é dada pela equação 29:

$$N = A^T P A \quad (29)$$

$$U = A^T P L \quad (30)$$

$$L = L_0 - L_b \quad (31)$$

A matriz dos pesos utilizada no ajustamento é uma matriz diagonal dada pelo inverso da variância das fotocoordenadas, ou seja, $1/(0,004)^2$.

O cálculo de L_0 , ou seja, $F(X_a)$ foi realizado utilizando o método das paralaxes, descrito no item 4.4.1.

O vetor L_b é o vetor das observações.

Resulta então o vetor das correções aos parâmetros aproximados X_0 , como mostra a equação 32:

$$X = -(N + N_c)^{-1} (U + U_c) \quad (32)$$

Onde

$$N_c = C^T P^C C$$

P^C = peso das injunções;

$$C = \left. \frac{\delta G}{\delta X_a} \right|_{X_a = X_a^1}$$

$$U_c = C^T P^C \varepsilon$$

Sendo ε o erro de fechamento das injunções.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ERRO MÉDIO QUADRÁTICO

O erro total cometido por uma transformação é representado pelo Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error – RMS*), o qual é definido pelo somatório dos erros de todos os pontos de controle, conforme descrito na equação 33 a seguir:

$$RMS = \sqrt{\frac{(x_{obs} - x_{calc})^2 + (y_{obs} - y_{calc})^2}{n - 1}} \quad (33)$$

As coordenadas dos pontos de controle no espaço imagem foram lidas nas imagens ALOS. Suas coordenadas planimétricas no espaço objeto foram lidas em uma ortofotocarta 1:10.000, e as coordenadas altimétricas em uma carta 1:2.000.

Estes dados foram inseridos no programa REGISTRO, o qual forneceu os valores dos 11 parâmetros da DLT par cada imagem do triplet ALOS, o Erro Médio Quadrático total do ajustamento e sua Matriz Variância-Covariância.

O valor máximo esperado do Erro Médio Quadrático para as três imagens era de 1 pixel.

O Erro Médio Quadrático para a imagem Nadir foi de 1 pixel, o qual está dentro da faixa esperada. Todos os pontos apresentaram resíduos na faixa de um pixel.

O Erro Médio Quadrático para a imagem *Forward* foi de 1 pixel, o qual também encontra-se dentro da faixa esperada. Todos os pontos apresentaram resíduos na faixa de um pixel.

O Erro Médio Quadrático para a imagem *Backward* foi de 1 pixel, o qual encontra-se dentro da faixa esperada. Todos seus pontos apresentaram resíduos na faixa de um pixel.

A avaliação dos valores dos erros médio quadráticos obtidos traz resultados satisfatórios para os 16 pontos de controle escolhidos, tornando-os viáveis para o uso na transformação DLT.

5.2 PARÂMETROS DA DLT

Os valores dos parâmetros da DLT obtidos estão apresentados no QUADRO 06, a seguir:

DLT	Nadir	σ_N	Forward	σ_F	Backward	σ_B
L ₁	-0,0168810395	0,009	-0,0276110139	0,029	-0,0188296347	0,014
L ₂	-0,0000324669	0,000	0,00000021848	0,000	-0,0000276812	0,000
L ₃	0,0006110751	0,001	0,00395439750	0,005	-0,00092125904	0,001
L ₄	11305,307849	6074	18094,1415619	19219	12548,66251838	9156
L ₅	0,0000241908	0,000	0,00000141128	0,000	0,000001232771	0,000
L ₆	0,0168155673	0,009	0,02746143885	0,009	0,018741820233	0,014
L ₇	0,0008783055	0,001	-0,0153786927	0,015	0,010128674854	0,008
L ₈	-120995,8468	67721	-197568,25526	214686	-134855,086478	102401
L ₉	-0,000000017	0,000	-0,0000001319	0,000	-0,00000004007	0,000
L ₁₀	-0,000000143	0,000	-0,0000000136	0,000	-0,00000000142	0,000
L ₁₁	0,0000001178	0,000	0,00000001837	0,000	0,000000131124	0,000

QUADRO 06 – PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO DLT
 FONTE: PROGRAMA REGISTRO (2010).

Os únicos parâmetros que apresentaram desvio-padrão acima do aceito foram os parâmetros L4 e L8 para as três imagens. A discussão da ocorrência deste fato é apontada posteriormente no item 6, conclusões e recomendações.

5.3 COORDENADAS APROXIMADAS – MÉTODO DAS PARALAXES

Para o cálculo das coordenadas dos pontos fotogramétricos no espaço objeto, inicialmente foram calculadas suas coordenadas aproximadas, utilizando o método das paralaxes.

Para realizar uma comparação entre as coordenadas calculadas através do método das paralaxes, foram medidas as coordenadas planimétricas dos pontos fotogramétricos na ortofotocarta 1:10.000 e as coordenadas altimétricas na carta 1:2.000 a fim de avaliar o resultado obtido, conforme ilustra o QUADRO 07 a seguir:

Ponto	X (m)			Y (m)			Z (m)		
	Calculado	Lido	ΔX	Calculado	Lido	ΔY	Calculado	Lido	ΔZ
17	658177	656187	-1990	7193217	7193346	129	957	932	-25
18	656147	656952	805	7193319	7194268	949	934	956	22
19	656379	657985	1606	7193471	7193045	-426	954	960	6
20	656657	658278	1621	7193616	7192431	-1185	965	1014	49
21	656125	657320	1195	7192370	7192455	85	939	1011	72
22	656524	657478	954	7191686	7193400	1714	1016	942	-74
23	656866	656428	-438	7191836	7193656	1820	1002	932	-70
24	657625	656210	-1415	7191903	7193382	1479	989	932	-57
25	657713	656415	-1298	7192510	7192424	-86	956	956	0
26	656677	657595	918	7192493	7192133	-360	948	1010	62
27	657790	657533	-257	7193471	7193044	-427	943	955	12
28	657815	657282	-533	7192570	7193008	438	954	957	3
29	657271	657929	658	7193174	7193848	674	936	949	13
30	657191	657722	531	7193347	7193970	623	941	949	8
31	657096	657587	491	7193254	7194296	1042	940	965	25
32	657443	657069	-374	7193461	7193797	336	953	938	-15
33	656105	657104	999	7192920	7194372	1452	934	970	36
34	656844	657293	449	7193776	7193911	135	975	943	-32
35	657868	656729	-1139	7192548	7194005	1457	942	947	5
36	658077	656462	-1615	7191883	7193155	1272	1002	948	-54
37	657191	657251	60	7191966	7193199	1233	1015	950	-65
38	657371	657052	-319	7192897	7193369	472	939	944	5
39	656307	656934	627	7193167	7193280	113	946	960	14
40	656107	656763	656	7192917	7193740	823	933	934	1
41	656262	658217	1955	7191941	7193124	1183	1015	956	-59
42	657471	657771	300	7191601	7193846	2245	1005	948	-57
43	657418	658149	731	7192545	7193682	1137	944	949	5
44	657171	657488	317	7192503	7193369	866	956	943	-13
45	657828	658078	250	7193352	7193583	231	927	946	19
46	657600	656503	-1097	7193484	7194090	606	933	940	7
47	657471	656127	-1344	7193791	7193132	-659	937	932	-5
48	656954	656085	-869	7193304	7193621	317	919	930	11
49	656986	658098	1112	7193866	7194159	293	972	956	-16
50	657183	656481	-702	7193412	7193846	434	921	937	16

QUADRO 07 – COORDENADAS APROXIMADAS DOS PONTOS FOTOGRAFÉTRICOS
 FONTE: O AUTOR (2010).

As diferenças entre os valores calculados com as equações da paralaxe e os valores planimétricos lidos na ortofotocarta 1:10.000 e altimétricos lidos na carta 1:2.000 encontram-se representado no GRÁFICO 01, em módulo:

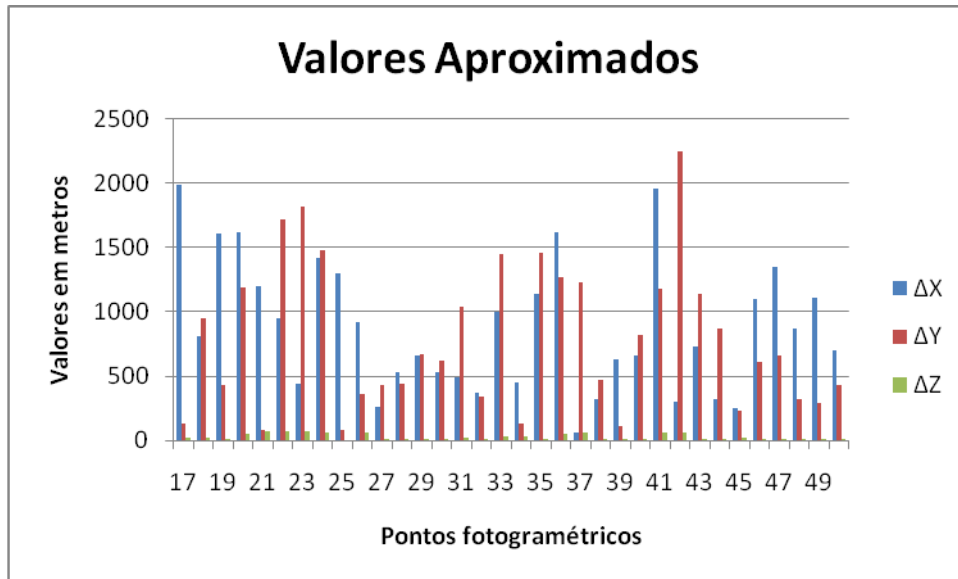


GRÁFICO 01 – DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS APROXIMADAS E LIDAS
 FONTE: O AUTOR (2010).

O gráfico acima mostra que as diferenças entre as coordenadas calculadas e lidas chegam até 2200 metros. Esta diferença não aparece em Z. Tal fato pode estar relacionado à inclinação do sensor, de $23,8^\circ$ para a imagem *forward* e de $-23,8^\circ$ para a imagem *backward*.

A aplicação deste método não gerou bons resultados, porém, os valores destas coordenadas foram obtidos a fim de servirem como parâmetros iniciais do ajustamento não-linear, o qual calcula as coordenadas no espaço objeto dos pontos fotogramétricos. Por se tratar de coordenadas aproximadas, são utilizadas, dando seqüência ao trabalho.

5.4 RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS

O GRAFICO 02 a seguir, mostra o resíduo das fotocoordenadas para os 16 pontos de controle utilizados nesta pesquisa.

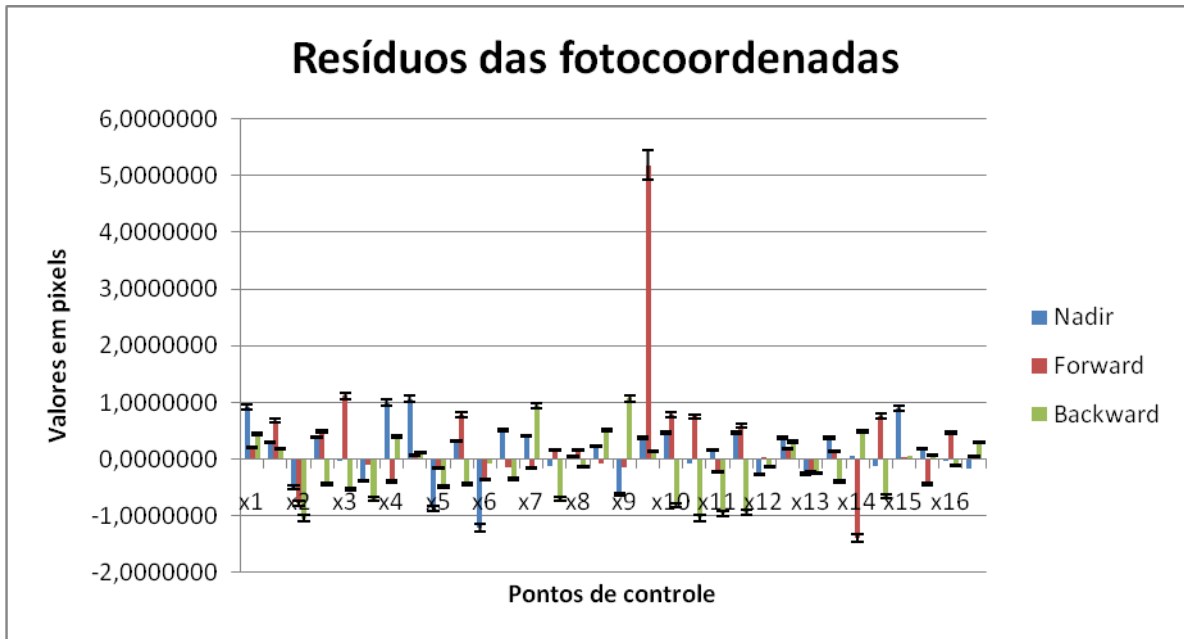


GRAFICO 02 – RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE
 FONTE: O AUTOR (2010).

O GRAFICO 03 a seguir, mostra o resíduo das fotocoordenadas para os 34 pontos fotogramétricos utilizados nesta pesquisa.

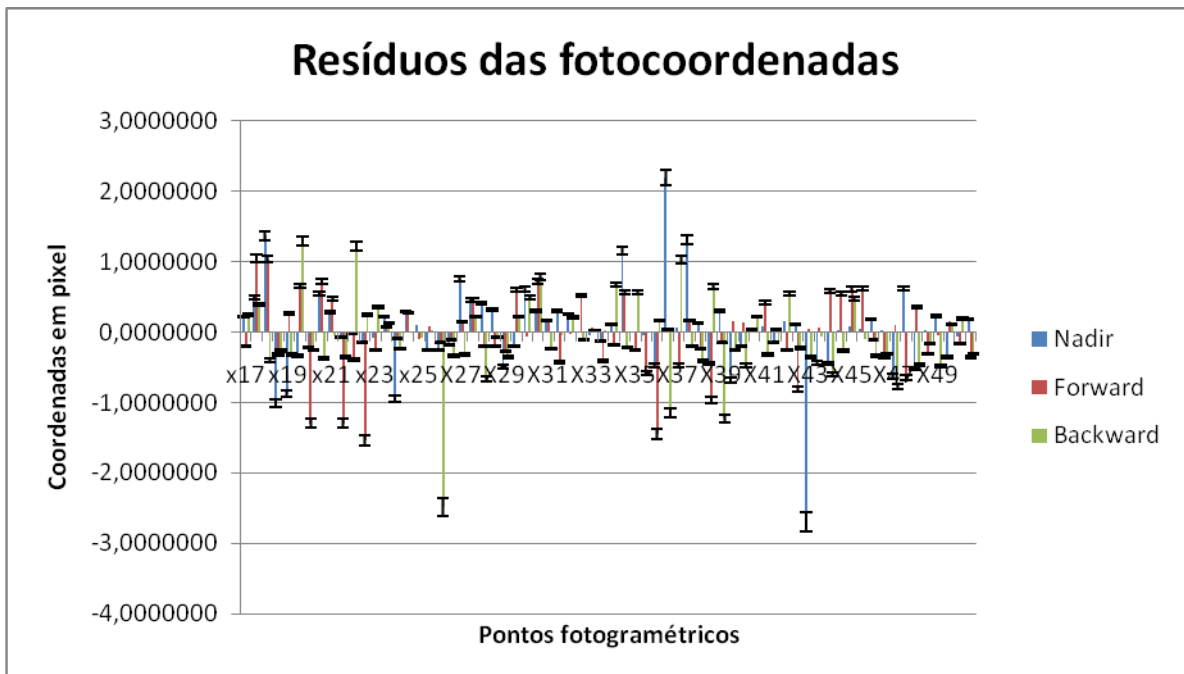


GRAFICO 03 – RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS DOS PONTOS FOTOGAMÉTRICOS
 FONTE: O AUTOR (2010).

Os valores dos resíduos das fotocoordenadas dos pontos ajustados apresentam valores satisfatórios, inferior a 1 pixel, como ilustrado no gráfico acima.

Seus valores, tanto para os pontos de controle, como para os pontos fotogramétricos foram obtidos no ajustamento onde foram calculadas as coordenadas tridimensionais dos pontos fotogramétricos.

5.5 COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS NO ESPAÇO OBJETO

Após o ajustamento, foram obtidas as coordenadas no espaço objeto tanto dos pontos de controle, como dos pontos fotogramétricos. Como os pontos de controle são utilizados como injeção de posição para o cálculo dos pontos fotogramétricos, estes não apresentam variações significativas, conforme demonstrado no item 5.5.1. Suas coordenadas planimétricas são comparadas com aquelas lidas em uma ortofotocarta 1:10.000, e suas coordenadas altimétricas são comparadas com aquelas lidas na carta 1:2.000.

Já a análise da qualidade das coordenadas dos pontos fotogramétricos é dada no item 5.5.2. Suas coordenadas planimétricas obtidas no ajustamento são comparadas com coordenadas lidas em uma ortofotocarta 1:10.000 e as coordenadas altimétricas comparadas com as coordenadas lidas em uma carta 1:2.000.

5.5.1 Pontos de controle

As coordenadas de terreno dos pontos de controle obtidas no ajustamento foram comparadas com as coordenadas lidas na carta 1:10.000, como mostrado no QUADRO 08:

	X Observado	X Calculado	Y Observado	Y Calculado	Z Observado	Z Calculado
1	658299	658298	7193709	7193709	953	953
2	656266	656265	7193803	7193803	933	932
3	656494	656493	7193963	7193962	938	938
4	656774	656774	7194117	7194116	958	957
5	656238	656238	7192860	7192860	937	936
6	656646	656646	7192217	7192216	1005	1004
7	656990	656989	7192363	7192363	1010	1010
8	657744	657744	7192427	7192426	999	999
9	657828	657828	7193006	7193005	960	959
10	656794	656793	7192990	7192990	952	952
11	657909	657908	7193963	7193963	949	948
12	657931	657930	7193066	7193065	958	957
13	657382	657382	7193662	7193661	938	937
14	657306	657306	7193836	7193836	940	940
15	657214	657213	7193743	7193742	940	940
16	657557	657557	7193957	7193956	954	953

QUADRO 08 – PONTOS DE CONTROLE NO ESPAÇO OBJETO
 FONTE: O AUTOR (2010).

Para os pontos de controle, não houve variação entre as coordenadas X, Y e Z acima de 1 metro, havendo pontos que não apresentaram nenhuma diferença entre suas coordenadas medidas e calculadas. Como a resolução espacial da imagem ALOS é de 2,5 metros no terreno, os valores comportaram-se como o esperado.

5.5.2 Pontos fotogramétricos

As coordenadas planimétricas de terreno dos pontos fotogramétricos obtidas no ajustamento foram comparadas com as coordenadas lidas na carta 1:10.000, e suas coordenadas altimétricas obtidas no mesmo ajustamento, foram comparadas com as coordenadas medidas em uma carta 1:2.000, como mostrado no QUADRO 09:

Ponto	Coordenadas X			Coordenadas Y			Coordenadas Z		
	X Calculado	X Lido	ΔX	Y Calculado	Y Lido	ΔY	Z Calculado	Z Lido	ΔZ
17	656220	656187	-33	7193407	7193346	-61	934	932	-2
18	656962	656952	-10	7194273	7194268	-5	954	956	2
19	657984	657985	1	7193044	7193045	1	960	960	0
20	658196	658278	82	7192412	7192431	19	1018	1014	-4
21	657311	657320	9	7192490	7192455	-35	1005	1011	6
22	657485	657478	-7	7193386	7193400	14	942	942	0
23	656421	656428	7	7193652	7193656	4	932	932	0
24	656222	656210	-12	7193405	7193382	-23	934	932	-2
25	656379	656415	36	7192441	7192424	-17	953	956	3
26	657590	657595	5	7192131	7192133	2	1012	1010	-2
27	657527	657533	6	7193041	7193044	3	956	955	-1
28	657286	657282	-4	7193000	7193008	8	956	957	1
29	657947	657929	-18	7193845	7193848	3	952	949	-3
30	657717	657722	5	7193976	7193970	-6	949	949	0
31	657591	657587	-4	7194292	7194296	4	961	965	4
32	657069	657069	0	7193793	7193797	4	940	938	-2
33	657104	657104	0	7194372	7194372	0	969	970	1
34	657299	657293	-6	7193904	7193911	7	946	943	-3
35	656729	656729	0	7194004	7194005	1	948	947	-1
36	656465	656462	-3	7193163	7193155	-8	952	948	-4
37	657212	657251	39	7193192	7193199	7	949	950	1
38	657053	657052	-1	7193361	7193369	8	949	944	-5
39	656936	656934	-2	7193278	7193280	2	958	960	2
40	656769	656763	-6	7193746	7193740	-6	930	934	4
41	658219	658217	-2	7193120	7193124	4	955	956	1
42	657769	657771	2	7193844	7193846	2	947	948	1
43	658123	658149	26	7193677	7193682	5	947	949	2
44	657498	657488	-10	7193301	7193369	68	942	943	1
45	658074	658078	4	7193574	7193583	9	947	946	-1
46	656504	656503	-1	7194082	7194090	8	945	940	-5
47	656145	656127	-18	7193120	7193132	12	933	932	-1
48	656082	656085	3	7193618	7193621	3	927	930	3
49	658102	658098	-4	7194151	7194159	8	956	956	0
50	656480	656481	1	7193846	7193846	0	939	937	-2

QUADRO 09 – PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS NO ESPAÇO OBJETO
 FONTE: O AUTOR (2010).

Para demonstrar a diferença entre as coordenadas lidas e calculadas, foi feito o GRÁFICO 04, a seguir:

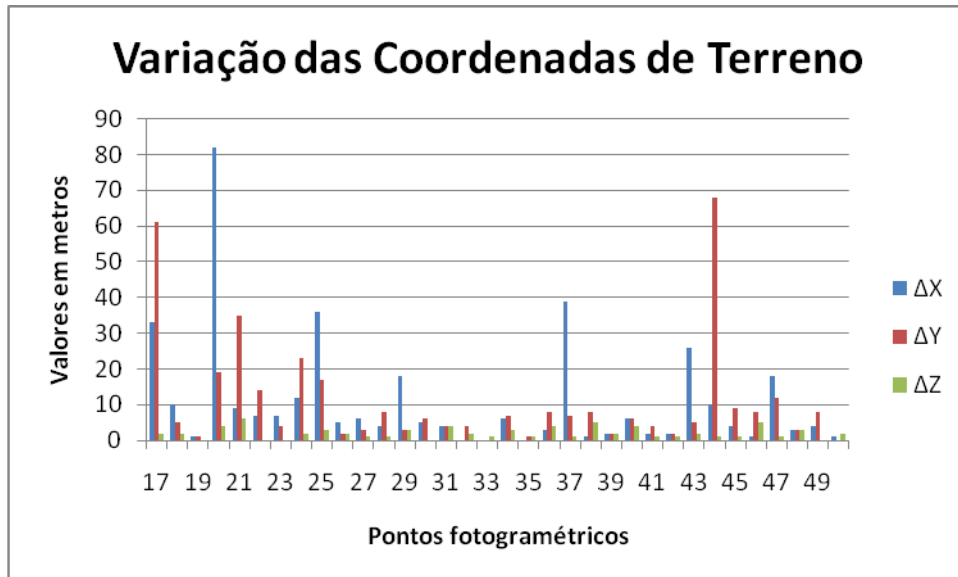


GRAFICO 04 – VARIAÇÃO DOS PONTOS FOTOGAMÉTRICOS
 FONTE: O AUTOR (2010).

Com exceção dos pontos 17, 20, 21, 24, 25, 37, 43, 44 e 47, todos os demais pontos apresentaram variação nas coordenadas de terreno inferiores a 10 metros, ou seja, 4 pixels.

5.5.3 Variância da unidade de peso a posteriori

A fim de seguir a análise dos resultados obtidos, calculou-se a variância da unidade de peso a posteriori, conforme indicado pela equação 34 a seguir:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^* P^* V}{n - u} \quad (34)$$

Onde:

V = vetor dos resíduos;

P = Matriz dos pesos;

n = número de equações;

u = número de incógnitas.

O valor da variância a posteriori encontrado foi de 220058. Seguindo a análise dos resultados, fez-se uma comparação entre a variância das unidades de peso a priori e a posteriori, como tem-se a seguir.

5.5.4 Comparação da variância de peso

A hipótese básica é testada.

$$H_0 : \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$$

Como o valor da variância a priori é 1, e o valor da variância a posteriori é diferente deste valor, a hipótese básica é rejeitada.

A fim de verificar se a diferença entre as variâncias a priori e a posteriori é significativa, aplica-se o teste estatístico de Qui-quadrado, pois este compara a variância da amostra com a variância da população.

O ajustamento realizado passa pelo teste, pois o valor amostral foi de 7481994 e o valor de tabela 7488359, ou seja, o valor amostral é inferior ao valor da tabela.

5.6 ERRO DE FECHAMENTO DAS COORDENADAS DE TERRENO

Para a análise da precisão das coordenadas de terreno obtidas, fez-se uso da análise do erro de fechamento, conforme indicado no GRÁFICO 05 a seguir:

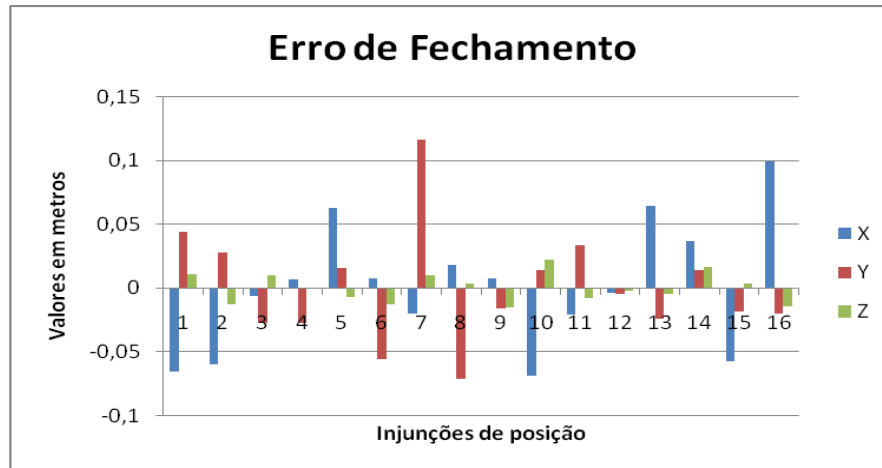


GRAFICO 05 – ERRO DE FECHAMENTO
 FONTE: O AUTOR (2010).

O erro de fechamento mostra que todos os valores das coordenadas X, Y e Z dos 16 pontos de controle encontram-se dentro da precisão esperada, ou seja, com valores inferiores a 2,5 metros, que é a resolução espacial da imagem.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao encerrar esta dissertação e analisar os resultados alcançados, tem-se as seguintes conclusões:

Os pontos de controle identificados nas imagens ALOS e suas coordenadas medidas no espaço imagem e observadas no espaço objeto apresentam qualidade para delas se obterem os parâmetros da transformação linear direta (DLT) utilizada neste trabalho.

Quanto aos parâmetros da transformação linear direta (DLT) calculados, somente os parâmetros L_4 e L_8 apresentaram discrepâncias quanto aos valores de seus desvios-padrão. Segundo o item 2.3.2.1, na equação 16, tanto o parâmetro L_4 quanto o parâmetro L_8 são os únicos que apresentam, em sua composição, as coordenadas do centro de perspectiva no referencial de terreno. Como o centro de perspectiva apresenta o mesmo valor para as três imagens, e as mesmas foram tomadas com inclinação de $+23^\circ$ e -23° , este fato pode estar influenciando os resultados, tanto que o desvio padrão é menor na imagem nadir (mas ainda assim, significativo). Recomenda-se uma investigação deste fato em estudos posteriores.

No cálculo das coordenadas aproximadas dos pontos fotogramétricos através das equações de paralaxe, há uma diferença entre as coordenadas planimétricas calculadas e as coordenadas lidas na ortofotocarta 1:10.000. Este fato pode estar associado à inclinação dos sensores *forward* e *backward*, a qual é de $23,8^\circ$ e $-23,8^\circ$, respectivamente. O mesmo problema não é encontrado na comparação entre as coordenadas altimétricas calculadas no ajustamento e lidas na carta 1:2.000.

Apesar da existência da diferença acima citada, testes realizados utilizando as coordenadas planimétricas aproximadas dos pontos fotogramétricos no espaço objeto lidas na carta 1:10.000 como parâmetros iniciais no ajustamento, mostram que as coordenadas dos pontos fotogramétricos calculadas não sofrem alterações de valores, ou seja, os valores das coordenadas tridimensionais dos pontos fotogramétricos obtidas são idênticos aos obtidos com o uso das coordenadas aproximadas calculada pelo método das paralaxes. O que diminui é o número de iterações, mas o valor ao qual converge o ajustamento é o mesmo.

As imagens do triplet ALOS sofreram uma série de correções, inclusive um alinhamento em relação ao Norte, às quais não se tem acesso. Por este motivo a transformação DLT foi escolhida. Recomenda-se que este estudo seja realizado em uma imagem ALOS 1B1, a qual possui somente correção radiométrica, e são fornecidos os parâmetros físicos da órbita do sensor, assim como os tempos de aquisição de imagem, para uma possível orientação exterior orbital. Além disso, como a imagem utilizada foi um recorte da original, recomenda-se um estudo com pontos em toda imagem, a fim de avaliar os resultados obtidos.

Este estudo traz o cálculo das coordenadas tridimensionais de pontos fotogramétricos a partir de pontos de controle, sem a necessidade de uma verificação em campo.

Os valores calculados das coordenadas no espaço objeto dos pontos fotogramétricos, apesar de apresentarem algumas diferenças entre as coordenadas planimétricas medidas nas cartas e calculadas superiores a 80 m, para as coordenadas altimétricas os valores encontrados foram satisfatórios. Este problema se restringe às coordenadas planimétricas dos pontos fotogramétricos 17, 20 21, 24, 25, 37, 43, 44 e 47. Como os resultados, foram promissores, recomenda-se o refinamento desta metodologia, a fim de que este possibilite trabalhos futuros de geração de Modelos Digitais de Superfície.

A análise dos gráficos gerados mostra que, a distribuição dos pontos fotogramétricos na imagem está diretamente relacionada com seu resultado para a imagem nadir, *forward e backward*. Os pontos acima citados com problemas nas coordenadas planimétricas, encontram-se na borda da imagem. Como as três imagens recortadas foram da mesma região, este comportamento aparece devido à inclinação dos sensores.

A relação entre o espaço imagem de um triplet de imagem ALOS e o espaço objeto através da transformação linear direta (DLT) foi realizada com resultados válidos. Com exceção de 9 pontos fotogramétricos, o erro médio obtido foi de aproximadamente 2,5 metros, demonstrando a validade do método. Estas variações não se devem ao método, que se mostrou válido, e sim à dificuldade da obtenção das coordenadas dos pontos no espaço imagem no triplet de imagem ALOS e a medida dos mesmos pontos nas cartas. Nesta pesquisa, este problema foi acentuado devido ao crescimento urbano da região desde a data da confecção da carta, até a tomada da imagem ALOS.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-AZIZ, Y. I., KARARA, H. M. **Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry.** American Society of Photogrammetry Symposium on Close-Range Photogrammetry. Urbana, 1971.

ABREU, F. C. S. **Monorrestituição de imagem de alta resolução quickbird ii apoiado no MDE obtido com dados do sistema laser scanner.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas. UFPR. Curitiba, 2005.

BALTSAVIAS, E. P., **Airbone Laser Scanning: Basic Relation and Formulas.** ISPRS Journal os Photogrammetry & Remote Sensing, vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam, 2001, pp 199-214.

BARDSLEY, D., LI, B. **3D Reconstruction Using the Direct Linear Transform with a Gabor Wavelet Based Correspondence Measure.** Technical Report. Cambridge. United Kingdom, 2007.

BRITO, J. N., COELHO, **Fotogrametria Digital.** Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2007.

DEBIASI, P. **Ortorretificação de imagens CBERS 2 através da transformação DLT.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto. UFRGS. Porto Alegre, 2008.

ELASHMAWY, N. ELMANADILI, Y., BARAKAT, H. **Comparative analysis and evaluation of various mathematical models for stereo IKONOS satellite images.** FIG Working week 2005 and VIII International Conference on the Global Spacial Data Infrastructure, Cairo, Egito, 2005.

FRASER, C., SHAO, J.. **Exterior orientation determination of MOMS-02 three-line imagery: Experiences with the Australian testfield area.** *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.XXXI, Part B3, 1996, pp. 207-214.

KOCAMAN, S., GRUEN, A. **Geometric modeling and validation of alos/prism imagery and products.** Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, CH-8092 Zurich, Switzerland, 2008.

KWON, Y. H. **Knows 3D notion analysis Web.** 1998. Disponível em <http://www.kwon3d.com> Acesso em 10/04/2009.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em www.ibge.gov.br. Acesso em 14/08/2008.

LILESSAND, T. M., KIEFER, R. W. CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and Image Interpretation.** 5ª edição. John Wiley & Sons. New York, 2004.

MACHADO, A. M. L., MITISHITA, E. A. **Programa REGISTRO.** Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, 2007.

MENDONÇA, M. **Apostila de Fotogrametria.** Instituto Militar de Engenharia, 2006.

MITISHITA, E. A., SARAIVA, C. C. S., MACHADO, A. M. L. **Monorestituição de imagens de satélite de alta resolução IKONOS 2 (Geo), utilizando-se da transformação DLT e Modelo Digital de Terreno.** XI SBSR. Belo Horizonte, 2003.

OKAMOTO, A., FRASER, C., HATTORI, S. HASEGAWA, H., ONO, T. **An alternative approach to the triangulation of SPOT imagery.** IAPRS. Vol. 32/4, ISPRS Comission. IV Symposium on GIS. Stuttgart, Germany, 1998.

SCHNEIDER, M., LEHNER, M., MÜLLER, R., REINARTZ, P. **Stereo evaluation of ALOS/PRISM data on esa-ao test sites – first DLR results.** German Aerospace Center (DLR), Remote Sensing Technology Institute.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**. Apostila do curso de engenharia Cartográfica. Capítulo V. UNESP, 2009

WESER, T., ROTTENSTEINER, F., WILLNEFF, J., FRASER, C. **A generic pushbroom sensor model for high-resolution satellite imagery applied to SPOT 5, Quickbird and ALOS data sets**. International Architectural of Photogrammetry, Remote Sensing. & Spatial Information. Sc. (Eds. C. Heipke, K. Jacobsen & M. Gerke), Hannover, Germany, Vol. 36, Part I/W51, 6 p, 2007.

WESER, T., ROTTENSTEINER, F., WILLNEFF, J., POON, J., FRASER, C. **Development and testing of a generic sensor model for pushbroom satellite imagery..** The Photogrammetric Record, Vol. 123, 21 p., Melbourne, Australia, 2008.

WOLF, P. R; DEWITT, B. A. **Elements of photogrammetry**: with applications in GIS. 3.ed. McGraw-Hill, 2000. 608p.

WOLFF, K., GRUEN, A. **DSM generation from early ALOS/PRISM data using SAT-PP**. ISPRS Proceedings. Pequim, 2009

Japan Aerospace Exploration Agency 2006.

http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about_index.htm. Acesso em 18/09/2009.

Japan Aerospace Exploration Agency 2005. <http://god.tksc.jaxa.jp/al/orbit.html>. Acesso em 03/10/2009.