

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E  
METEOROLOGIA CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO  
REMOTO**

**Geração e Avaliação de Ortoimagem ALOS/PRISM 1B1.**

**Estudo de caso para São Gabriel-RS**

Mestranda: Angela Akemi Goto Nakahori

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Sérgio Florêncio de Souza

Porto Alegre/RS, Brasil

Março de 2010

**ANGELA AKEMI GOTO NAKAHORI**

**Geração e Avaliação de Ortoimagem ALOS/PRISM 1B1.  
Estudo de caso para São Gabriel-RS**

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

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Sérgio Florêncio de Souza

Porto Alegre/RS, Brasil

Março de 2010

DEFESA DE DISSERTAÇÃO de ANGELA AKEMI GOTO NAKAHORI,  
realizada no dia 31/04/2010.

**Geração e Avaliação de Ortoimagem ALOS/PRISM 1B1.  
Estudo de caso para São Gabriel - RS**

BANCA EXAMINADORA

-----  
Prof. Dr<sup>o</sup>. Mário Luiz Lopes Reiss  
Departamento de Geodésia – UFRGS

-----  
Prof. Dr<sup>a</sup> Andrea Lopes Iescheck  
Departamento de Geodésia – UFRGS

-----  
Prof. Dr<sup>a</sup> Silvia Beatriz Alves Rolim  
Departamento de Geodésia – UFRGS

“Grandes realizações não são feitas por impulso,  
mas por uma soma de pequenas realizações.”

*Vicent Van Gogh*

## AGRADECIMENTOS

Os mais sinceros agradecimentos ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza, pelo voto de confiança, pela paciência e por compartilhar seus conhecimentos.

Ao Programa de Pós-Graduação – CEPSRM, Professores, funcionários e todos os colegas do curso. Agradecimento em especial à Coordenadora, Prof. Dr<sup>a</sup> Sílvia Beatriz Alves Rolim, pelo voto de confiança ao ter aceitado meu pedido de reingresso.

A CAPES pelo apoio financeiro. Ao setor de Cartografia do INCRA – SR 11, pelo fornecimento dos dados de campo para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa. À Sulsoft pelo fornecimento de licença do software ENVI, pelo suporte técnico, pela geração do mosaico e, principalmente, pela atenção de qualidade prestada.

À amiga, Maria Hisami Torii, pelos conselhos, conversas sérias e descontraídas entre um café e outro.

Agradecimento mais que especial ao Rodrigo, pelo carinho, amor, incentivo, paciência e por me fazer acreditar que nada é impossível. À família do Rodrigo, pelos mais variados tipos de apoio.

Aos meus queridos pais, Mário e Elza, pelo amor, dedicação, ensinamentos e exemplos de vida. À minha irmã preferida, Luciana, que mesmo distante sempre me apoiou em todas as minhas escolhas.

À minha família, a vocês dedico este trabalho.

# **<sup>1</sup> Geração e avaliação de ortoimagem ALOS/PRISM 1B1. Estudo de caso para região de São Gabriel-RS**

Autora: Angela Akemi Goto Nakahori

Orientador: Prof. Dr<sup>o</sup>. Sérgio Florêncio de Souza

## **RESUMO**

O objetivo deste trabalho foi a geração e avaliação de ortoimagens ALOS/PRISM, utilizando-se para isso MDEs (Modelos Digitais de Elevação) obtidos através das diferentes combinações de visadas desse sensor de uma imagem com nível de processamento 1B1. Na primeira etapa foram gerados os MDEs a partir das combinações das três visadas, utilizando-se para isso pontos de controle obtidos através de levantamento de campo, onde foram testados a quantidade mínima necessária de pontos de controle para geração de MDE e outros parâmetros tais como nível de processamento, tamanho de janela, entre outros. Na etapa seguinte, comparou-se o resultado da extração com os Modelos Digitais de Elevação do ASTER (GDEM) e o SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), este gerado a partir do Projeto TOPODATA do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Na etapa final avaliaram-se os MDEs com os pontos de checagem. Através de análises estatísticas selecionaram-se os melhores MDEs para ortorretificação. Os resultados demonstraram que, para este caso específico, todos os MDES da combinação de visada *Backward – Forward* (gerados a partir de 6 pontos de controle) seriam aprovados por apresentarem os menores valores de RMS (entre 2,94 e 3m) e que, ao se utilizar outros MDEs oriundos de outras combinações, as ortoimagens obtidas também atendem ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) Classe A para escala 1:25.000, bem como as ortoimagens geradas com os Modelos de Elevação Globais SRTM e GDEM. A área de estudo escolhida foi uma região rural do município de São Gabriel – RS, que possui relevo com média altimétrica de 160m, podendo ser considerado plano, o que justifica o bom desempenho do SRTM em conjunto com os MDEs gerados a partir do PRISM

Palavras-chave: ALOS/PRISM, 1B1, MDE, GDEM, SRTM, Ortorretificação

---

1 Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto pela Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (131p), março de 2010.

# **<sup>1</sup>Generation and evaluation of orthoimage ALOS/PRISM 1B1. Study of case to São Gabriel-RS**

Author: Angela Akemi Goto Nakahori

Advisor: PhD. Sérgio Florêncio de Souza

## **ABSTRACT**

The aim of this work was the generation and evaluation of orthoimages ALOS / PRISM, using the MDEs (Digital Elevation Models) obtained using different combinations of sensor views of an image with 1B1 processing level. In the first step the MDEs were created from combinations of three views, using for it the ground control points obtained by field survey, where the minimum amount necessary of control points for DEM generation and other parameters as processing level, size of the windows, among others were tested. In the further step, the result of extraction was compared to Digital Elevation Models from ASTER (GDEM) and SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), this one generated from the Project TOPODATA from INPE (National Institute for Space Research). In the final step, the MDEs were evaluated with the checkpoints. Through statistical analysis the best MDEs were selected for orthorectification. The results showed that, for this specific case, all MDEs combination of Backward - Forward (generated from 6 control points) would be approved by submitting the lowest values of RMS (between 2.94 and 3 m) and, when using other MDEs from another combinations, obtained orthoimages also satisfies the Cartographic Accuracy Standard (PEC) for Class A 1:25,000 scale, as the orthoimages generated from the SRTM and GDEM. The chosen study area was a rural region of São Gabriel - RS, which has average altitude of 160 m, can be considered plane, which explains the good performance of the SRTM in conjunction with the MDEs generated from PRISM.

Keywords: ALOS / PRISM, 1B1, MDE, GDEM, SRTM, orthorectification

---

<sup>1</sup> Master Degree Dissertation in Remote Sensing, State Center of Researches in Remote Sensing and Meteorology (CEPSRM), Post-Graduation Course in Remote Sensing of Federal University of Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (131p), March of 2010.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADEOS: *Advanced Earth Observing Satellite*

ALOS: *Advanced Land Observing Satellite*

AOCS: *Attitude Orbit Control System*

APM: *Affine Projection Model*

ASF: *Alaska Satellite Facility*

ASI: *Agência Espacial Italiana*

ASPRS: *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*

ASTER: *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

AVNIR-2: *Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer – Type 2*

CCD: *Charged–Coupled Device*

CCRS: *Canadian Centre of Remote Sensing*

CBERS-2: *China-Brazil Earth Resource Satellite -2*

CONCAR: *Comissão Nacional de Cartografia*

CP: *Centro Perspectivo*

DLT: *Direct Linear Transformation*

DLR: *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Agência Espacial Alemã)*

DGR: *Direct Georeferencing Model*

DP: *Desvio-Padrão*

DRTS: *Data Relay and Tracking Satellite*

EGM96: *Earth Gravitational Model 1996*

EMQ: *Erro Médio Quadrático*

EORC: *Earth Observation Research Center*

EOS: *Earth Observing System*

EP: *Erro Padrão*

GDEM: *Modelo Digital de Elevação do ASTER*

GPS: *Global Positioning System*

GNSS: *Global Navigation Satellite System*

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFOV: *Instantaneous Field of View*

IGS: *International GNSS Service*

IMU: *Inertial Measurement Unit*

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

JAXA: *Japan Aerospace Exploration Agency*

LIDAR: *Light Detection and Ranging*

MDE: Modelo Digital de Elevação

NASA: *National Aeronautics and Space Administration*

NIMA: *National Imagery and Mapping Agency*

NOAA: *National Oceanic & Atmospheric Administration*

OE: Orientação Exterior

PALSAR: Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar

PEC: Padrão de Exatidão Cartográfica

POE: Parâmetros de Orientação Exterior

PPM: *Piecewise Polynomial Model*

PRISM: *Pacromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping*

RBMC: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RESTEC: *Remote Sensing Technology Center of Japan*

RMS: *Root Mean Square* (Erro Médio Quadrático)

RPC: *Rational Polynomial Coefficients*

RFM: *Rational Function Model*

RFC: *Rational Function Coefficients*

SGB: Sistema Geodésico Brasileiro

SIRGAS: Sistema de Referência Geodésico para as Américas

SPOT: *Satellite Pour l'Observation de la Terre*

SPS: *Standart Positioning Service*

SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*

TIN: *Triangular Irregular Network*

TLS: *Tri Linear Scanner*

UTM: *Universal Transversal Mercator*

WGS-84: *World Geodetic System-84*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Princípio de funcionamento de um sensor <i>pushbroom</i> .....	16
Figura 02 - Princípio da geometria de um sensor trilinear .....	17
Figura 03 - ALOS e seus sistemas sensores .....	18
Figura 04 - Visualização do imageamento do Sensor PRISM.....	21
Figura 06 - Geometria do imageamento no modo Triplet .....	22
Figura 05 - Ilustração do Sensor PRISM .....	22
Figura 07 - Efeito de erros nas imagens orbitais em sensores de quadro e linear .....	27
Figura 08 - Configuração do modelo de sensor para sensor de quadro (a) e sensor <i>pushbroom</i> (b).....	29
Figura 09 - Princípio de colinearidade.....	30
Figura 10 - Processo de geração de ortoimagem através da associação do MDE e da matriz da ortoimagem .....	43
Figura 11 - Modelos de grades para geração de MDE .....	47
Figura 12 - GDEM obtido através do ASTER.....	49
Figura 13 - Nave Espacial Endeavour.....	52
Figura 14 - Localização da área de estudo: Município de São Gabriel – RS.....	59
Figura 15 - Distribuição espacial dos pontos de controle (PCs) no mosaico Nadir.....	62
Figura 16 - Recorte GDEM para região da área de estudo.....	63
Figura 17 – Recorte SRTM – TOPODATA para região da área de estudo .....	64
Figura 18 - Fluxograma de Execução da Dissertação.....	66
Figura 19 – Fluxograma para geração de MDE.....	69
Figura 20 - Recorte ilustrativo dos MDEs gerados a partir das combinações de visadas para 11 PCs.....	80
Figura 21 - Visualização dos Pontos de Controle utilizados para ortorretificação .....	82
Figura 22 - Erro Planimétrico entre o SRTM e GDEM.....	84
Figura 23 - Erro Planimétrico entre B-F11PCs e N-F06PCs.....	86
Figura 24 – Erro Planimétrico entre N-B07GCPS e N-F11GCPS .....	88
Figura 25 - Erro Planimétrico Geral .....	88
Figura 26 - Deslocamento devido ao relevo.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Características do Sensor AVNIR-2 .....	19
Tabela 02 - Características do imageamento do sensor PALSAR .....	20
Tabela 03 - Características do Sensor PRISM .....	23
Tabela 04 – Acurácia Absoluta PRISM 1B2. Dados obtidos entre junho de 2007 e junho de 2009. .....	24
Tabela 05 - Calibração PRISM 1B2. Acurácia Relativa em junho de 2009.....	25
Tabela 06 - Classificação das cartas Segundo PEC.....	54
Tabela 07 - PEC para Escala 1:25.000 .....	55
Tabela 08 - Especificação da Imagem PRISM – Triplet.....	60
Tabela 09 - Lista dos pontos de controle com suas respectivas acurácias .....	61
Tabela 10 - Lista de Equipamentos e Softwares utilizados .....	65
Tabela 11 - Parâmetros de Orientação Exterior para os mosaicos.....	68
Tabela 12 - Resultados de paralaxe e quantidade de TPs utilizados.....	71
Tabela 13 - Combinação de PCs utilizados para extração dos MDEs .....	71
Tabela 14 - Resultados comparativos entre o GDEM e SRTM-TOPODATA .....	72
Tabela 15 - Resultados da extração do MDE com parâmetros padrão em metros.....	73
Tabela 16 - Resultados da nova extração de MDE com nível de Processamento 7 .....	74
Tabela 17 - Valores de altitude ortométrica obtida para a combinação B-F .....	76
Tabela 18 - Valores de altitude ortométrica obtida para a combinação B-N.....	77
Tabela 19 - Valores de altitude ortométrica obtida para a combinação N-F .....	77
Tabela 20 - Resultados para combinação B-F .....	78
Tabela 21 - Resultados para Combinação B-N .....	78
Tabela 22 - Resultados para Combinação N-F.....	79
Tabela 23 - Valores altimétricos obtidos para o SRTM e GDEM .....	80
Tabela 24 - Resultados estatísticos para SRTM e GDEM .....	81
Tabela 25 - Discrepância entre as coordenadas da ortoimagem geradas pelo SRTM e GDEM dos pontos de checagem .....	83
Tabela 26 - Tabela comparativa entre os MDEs do PRISM .....	85
Tabela 27 - Tabela comparativa entre a combinação B-N07PCs e a NF11PCs.....	87
Tabela 28 - Média, desvio-padrão e variância do Erro Planimétrico para os MDEs analisados.	89
Tabela 29 - Resultados do Teste de t-Student .....	90
Tabela 30 - Resultados do Teste do Qui-quadrado .....	91

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	i
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	ii
LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	vi
SUMÁRIO .....	vii
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 - Objetivos .....	12
1.2 - Estrutura do trabalho .....	13
<b>CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1 – Sensores Digitais <i>Pushbroom</i> .....	15
2.2 - Satélite ALOS e seus sensores.....	17
2.3 - Distorções geométricas em imagens.....	25
2.4 - Modelagem geométrica das distorções.....	27
2.5 – GPS - Sistema de Posicionamento Global.....	38
2.6 - Ortorretificação de Imagens.....	42
2.7 – Modelos Digitais de Elevação .....	45
2.7.1- MDE gerados a partir de dados de Sensoriamento Remoto .....	48
2.7.1.1 - GDEM a partir do ASTER .....	48
2.7.1.2 - SRTM – <i>Shuttle Radar Topographic Mission</i> .....	52
2.8 – Avaliação da Qualidade de Produtos Cartográficos - Padrão de Exatidão Cartográfica.....	53
2.9 – Análise Estatística .....	55
<b>CAPÍTULO 3 – ÁREA DE ESTUDO E MATERIAIS .....</b>	<b>58</b>
3.1 - ÁREA DE ESTUDO.....	58
3.2 –Imagem ALOS/PRISM .....	59
3.3 – Pontos de Controle obtidos por levantamento geodésico.....	60
3.4 – Modelo Digital de Elevação do ASTER (GDEM).....	63

3.5 – Modelo Digital de Elevação SRTM -TOPODATA .....	64
3.6. Equipamentos e Softwares.....	65
3.7 – Métodos : Diagrama de Execução da Dissertação .....	66
<b>CAPÍTULO 4 – MÉTODOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>67</b>
4.1 - Mosaicagem da Imagem .....	67
4.2 – Geração de RPCs .....	67
4.3 – Extração de MDE.....	69
4.4 - Avaliação dos MDEs.....	71
4.4.1 - Comparação dos MDEs gerados com Modelos Globais .....	72
4.4.2 - Avaliação dos MDEs com pontos de checagem.....	75
4.4.2.1 – MDEs do Sensor PRISM.....	75
4.4.2.2 - Avaliação do SRTM e do GDEM com Pontos de Checagem .....	80
4.5 – Ortorretificação e Avaliação .....	81
4.5.1 - Ortoimagens geradas a partir dos Modelos Globais SRTM e GDEM.....	82
4.5.2 – Ortoimagens geradas a partir dos MDEs obtidos pelo PRISM .....	84
4.5.3 – Ortoimagens obtidas pelos MDEs gerados pelas combinações B-N e N-F .....	86
4.5.4 - Análise Estatística para avaliação da qualidade da ortoimagem .....	89
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>104</b>
ANEXO A - Relatório de Ajustamento da Rede Geodésica.....	104
ANEXO B - Exemplo de Monografia de Ponto de Controle .....	130
ANEXO C - Carta-imagem SH-21-Z-B-III-3-SE .....	131

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Sabe-se que o Brasil é um país que possui deficiências em termos de mapeamento cartográfico e que dependendo da região, não possui sequer cartas topográficas na escala 1:50000 ou maiores. Sabe-se também que o custo de um aerolevante em grande escala seria demasiadamente elevado, considerando-se toda a extensão territorial do país. Dessa forma, o uso das imagens obtidas a partir dos sensores transportados pelo satélite ALOS – *Advanced Land Observing Satellite* - para mapeamento sistemático torna-se uma alternativa interessante, quando se analisa a relação custo-benefício, pela excelente qualidade de posicionamento oferecida e pelas características das imagens obtidas. Estes sensores são: AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer – Type 2*), PRISM (*Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping*) e PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) (JAXA, 2009).

As imagens do sensor pancromático PRISM, cuja resolução espacial é de 2,5m, possuem a característica interessante de imageamento estereoscópico obtido pela tomada, quase que instantânea, de três visadas distintas: *Backward* (para trás), Nadir (ortogonal) e *Foward* (para frente) possibilitando a geração de MDE (Modelo Digital de Elevação) a partir das combinações possíveis entre essas visadas (EORC/JAXA, 2008). Outros sensores também possuem esta característica de geração de pares estereoscópicos, com pequenas diferenças quanto ao modo de aquisição, tais como o francês SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*), o sino-brasileiro CBERS-2 (*China-Brazil Earth Resource Satellite*), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), IKONOS e Quickbird, EROS A1, FORMOSAT-2, entre outros (COSTA e VERGARA, 2009).

Em 25 de outubro de 2006, o IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - e a ASF - *Alaska Satellite Facility* -, assinaram um acordo de cooperação científica, estabelecendo uma parceria através da qual o IBGE tornou-se o responsável pela distribuição das imagens ALOS para os Órgãos do Governo Federal, Instituições de Pesquisa e demais usuários não-comerciais do Brasil (IBGE, 2009a).

As imagens orbitais obtidas pelo sensor de média resolução TM (*Thematic Mapper*), presente nos do satélites Landsat 4 e 5, possuíam resolução espacial de 30 m por pixel, possibilitando o monitoramento e registro contínuo de grandes áreas para fins ambientais e de planejamento rural. Com o surgimento de imagens de alta resolução espacial, com o pixel representando um metro ou até menos no terreno, surgiu a possibilidade de utilizá-las em aplicações urbanas, aumentando-se a necessidade do controle geométrico mais rigoroso e criterioso (MEDEIROS, 2007).

Com o surgimento de sensores orbitais capazes de coletar imagens da superfície da Terra com as mais variadas resoluções e, em alguns casos, com custos reduzidos aos usuários, tornou-se interessante o mapeamento através dessas imagens, requerendo-se então o controle da qualidade geométrica e demais correções antes da extração de quaisquer informações. Neste sentido, diversas metodologias vêm sendo desenvolvidas para orientação de imagens orbitais, avaliação geométrica, classificação e extração de feições, com o objetivo de certificar a qualidade, e principalmente, indicar o uso adequado de tais imagens.

Para efetuar tais correções foram desenvolvidos modelos matemáticos rigorosos, também conhecidos na literatura como modelos físicos, que são baseados na Equação de Colinearidade, ou nos modelos generalizados (não paramétricos), que se utilizam de transformações geométricas baseadas apenas em pontos de controle do terreno (MEDEIROS, 2007). Os princípios da Fotogrametria, primeiramente aplicados as fotografias aéreas, podem ser utilizados, desde que adaptados, para as imagens orbitais. As técnicas de orientação de imagens, aerotriangulação, geração de modelos digitais de elevação, entre outras, permitem a obtenção de vários produtos cartográficos, tais como mapas topográficos, mapas temáticos, ortoimagens, entre outros. As imagens orbitais, dependendo da sua resolução espacial, podem ser utilizadas para produção cartográfica.

## 1.1 - Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliação da qualidade geométrica de uma ortoimagem obtida a partir de uma imagem triplet ALOS/PRISM, com nível de processamento 1B1, quanto ao PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica - para escala 1:25.000, utilizando-se dos Modelos Digitais de Elevação extraídos através das combinações das visadas do próprio sensor (*Backward*, *Nadir* e *Foward*). A primeira etapa é a avaliação estatística do melhor MDE numa primeira comparação com os modelos globais de elevação disponíveis – SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) e GDEM (*Global Digital Elevation Map*) – e em seguida, com os pontos coletados em campo através de levantamento geodésico reservados como pontos de checagem. A segunda etapa é a ortorretificação do mosaico nadir com o melhor MDE, apontado por testes estatísticos, e com o SRTM e GDEM. A terceira etapa é ortorretificar também com MDEs gerados das outras visadas no intuito de avaliar se as combinações têm algum tipo de influência no

resultado final deste processo. E ao final, avaliar estatisticamente as ortoimagens produzidas.

O objetivo específico é a avaliação da qualidade geométrica do produto final, neste caso a ortoimagem, quanto ao PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) para escala 1:25000. Paralelamente tenta-se desenvolver uma metodologia para ortorretificação, apontando as melhores combinações, quantidade mínima de pontos de controle e influência dos parâmetros de processamento para extração do MDE e para geração da ortoimagem.

Em termos de cartografia nacional, este trabalho apresenta a possibilidade de geração de um produto cartográfico sem necessidade de alto investimento, contribuindo com mapeamento sistemático, podendo ser utilizado para fins de planejamento, monitoramento e atualização cartográfica (dentro da escala adequada), sem contar que se trata de uma solução para um problema de engenharia, inexistência de base cartográfica em grande escala, posto atualmente para a sociedade. Nesta perspectiva, este trabalho explora o desenvolvimento e teste de procedimentos para geração de MDE (Modelo Digital de Elevação) a partir da combinação de visadas do sensor e posterior ortorretificação. Pretende-se também testar e comparar a ortorretificação utilizando-se o GDEM e o SRTM gerado a partir do Projeto TOPODATA do INPE devido a disponibilidade gratuita desses dados.

Sabe-se que a Coordenação de Cartografia do IBGE planeja utilizar as imagens ALOS/PRISM para geração de uma base cartográfica de referência, formada por imagens de qualidade geométrica compatível com a exatidão esperada para os produtos do Sistema Cartográfico Nacional (IBGE, 2009c). Desta forma, este trabalho objetivou avaliar planimetricamente uma imagem PRISM 1B1 da região rural do município de São Gabriel – RS, utilizando-se das recomendações propostas no Relatório de Avaliação do ALOS/PRISM divulgado pelo IBGE (IBGE, 2009c). Assim, buscou-se, avaliar se as imagens do sensor PRISM poderiam suprir de alguma maneira, o vazio de mapeamento existente para escala 1:25000.

## **1.2 - Estrutura do trabalho**

A presente dissertação encontra-se estruturada em 5 Capítulos. No Capítulo 1, apresenta-se sucintamente uma descrição geral da proposta da dissertação e as justificativas para o seu desenvolvimento. No Capítulo 2, faz-se o embasamento teórico dos temas que envolvidos, tais como: Princípios de Sensoriamento Remoto e de Fotogrametria; sistemas sensores, métodos de imageamento; orientação de imagens, geração de Modelos

Digitais de Elevação e ortorretificação de imagens digitais, entre outros. No Capítulo 3, relata-se de forma sucinta, a área de estudo da dissertação, os materiais e softwares utilizados, e a descrição da sequência das etapas que foram desenvolvidas. No Capítulo 4, apresentam-se os resultados finais obtidos para extração do MDE e da ortoimagem obtida. No Capítulo 5 é apresentada uma análise conclusiva a respeito dos problemas abordados e algumas recomendações para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

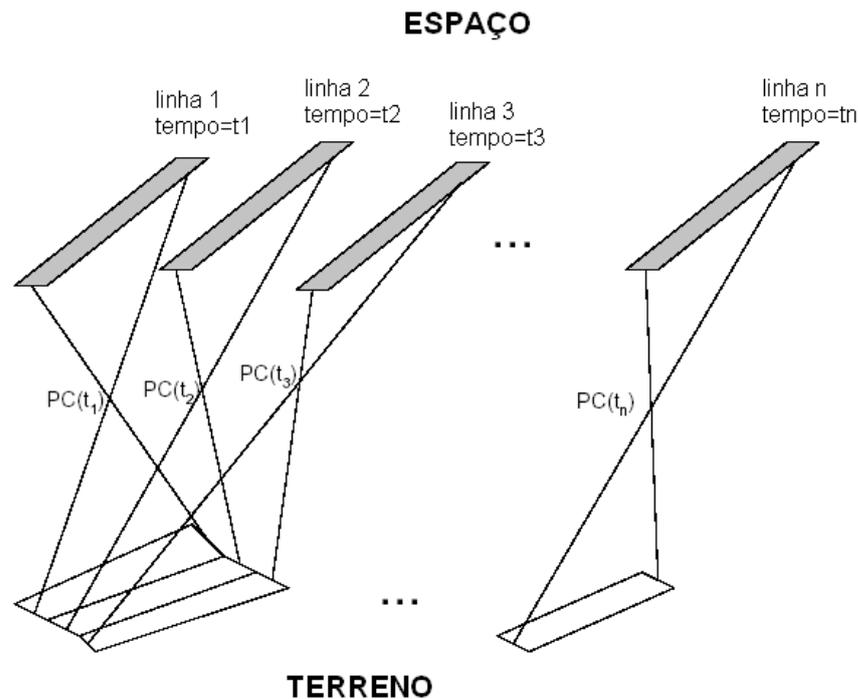
Este capítulo tem por objetivo introduzir os principais e importantes conceitos que fazem parte desenvolvimento do tema desta dissertação.

### 2.1 – Sensores Digitais *Pushbroom*

Os sensores digitais são arranjos retangulares de fotodetectores, em estado sólido, que captam a energia refletida e a quantifica como uma imagem. O tipo mais comum de detector é o CCD (*Charge-Coupled Devide* – Dispositivo de Carga Acoplada), que é composto de elementos sensores pontuais de silício, que armazena carga elétrica proporcional à intensidade de luz incidente (WOLF e DEWITT, 2000).

Com relação à classificação dos sensores com relação à geometria de imageamento, isto é, em função da disposição dos fotodetectores, faz-se uma descrição dos sensores lineares *pushbroom*, especialmente os trilineares.

Um sensor linear *pushbroom* é um arranjo linear de fotodetectores que imageia de forma dinâmica a superfície terrestre, sendo que a cada intervalo de tempo uma linha da imagem é formada. A Figura 01 ilustra o princípio de imageamento deste sensor. Os seis Parâmetros de Orientação Exterior (POE) são gerados para cada linha, isto é, as coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) do Centro Perspectivo (CP) no espaço objeto e os ângulos de altitude: rolagem ou *roll* ( $\omega$ ), arfagem ou *pitch* ( $\varphi$ ) e guinada ou *yaw* ( $\kappa$ ), que são as rotações que representam os possíveis movimentos sofridos pela da plataforma orbital. (GRODECKI e DIAL, 2001; DEBIASI, 2008) Os parâmetros de orientação interior, isto é, distância focal, posição do ponto principal, os coeficientes de distorção das lentes e outros parâmetros diretamente ligados a descrição dos parâmetros físicos do sensor são geralmente os mesmos para toda a imagem (GRODECKI e DIAL, 2001). Pode-se citar como exemplos os sensores lineares encontrados nos satélites IKONOS, QuickBird, SPOT, CBERS, entre outros.

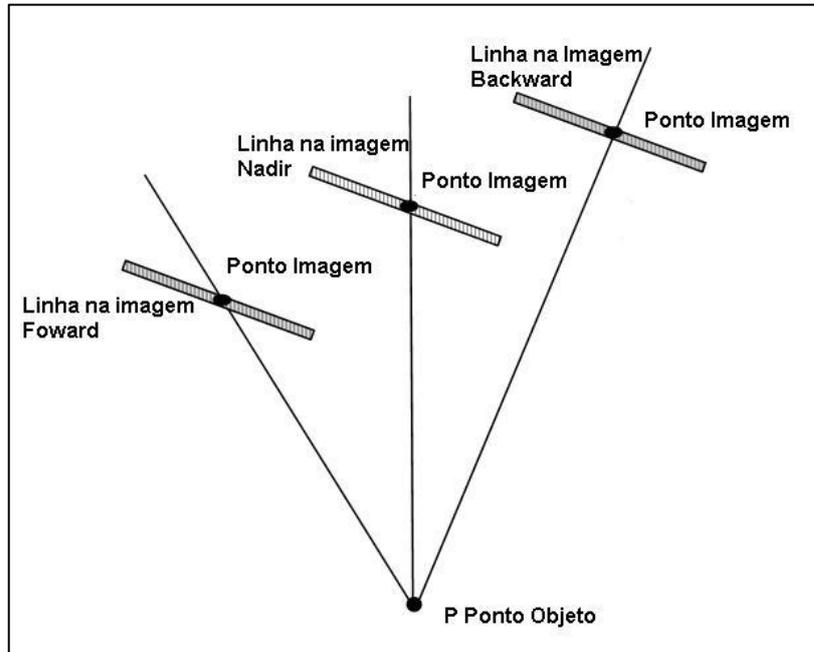


**Figura 01** - Princípio de funcionamento de um sensor *pushbroom*  
Adaptado de Grodecki e Dial (2001)

Um sensor trilinear, também chamado de TLS (*Tri Linear Scanner*), é um sistema baseado no uso simultâneo de três sensores lineares. Cada um destes registra uma faixa no terreno nas direções nadir (perpendicular), à frente (*foward*) e outra para trás (*backward*). Com o deslocamento da aeronave e aquisição contínua, cada ponto no terreno é imageado três vezes, o que é importante em termos de recuperação da posição tridimensional (TOMMASELLI et al, 2000). As três linhas adquiridas pelo sensor trilinear podem ser comparadas a três linhas de uma imagem de quadro com os mesmos parâmetros geométricos, ou seja, os Parâmetros de Orientação Exterior podem ser considerados os mesmos para essas três linhas capturadas simultaneamente (MEDEIROS, 2007). Como exemplo, pode-se citar o sensor PRISM do satélite ALOS.

A maior vantagem deste tipo de sensor seria a tomada quase que instantânea das imagens para geração de MDE, pois desta forma, teoricamente, as condições de iluminação da cena são mantidas, ao contrário dos sensores que geram pares estereoscópicos fazendo visada *across-track*, onde os estereopares são obtidos em órbitas laterais à área a ser imageada, com intervalos de dias entre as aquisições, acarretando diferenças radiométricas e espectrais entre os alvos (COSTA e VERGARA, 2009).

A Figura 02 ilustra o princípio de imageamento de um sensor trilinear:



**Figura 02** - Princípio da geometria de um sensor trilinear  
Adaptado de Cheng et al, 2004.

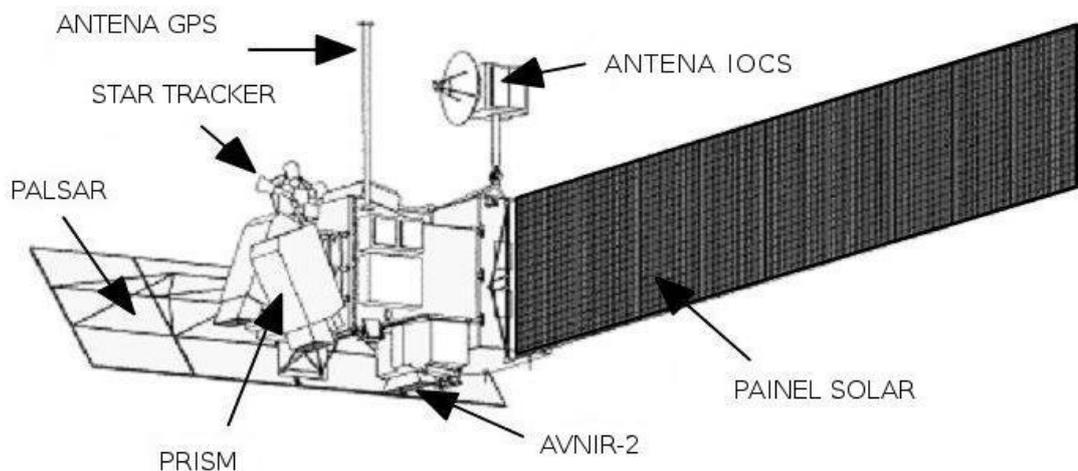
## 2.2 - Satélite ALOS e seus sensores

O programa japonês de satélites de observação da Terra consiste em duas séries: aqueles usados principalmente para observações marítimas e atmosféricas e outro para observação da superfície terrestre. O satélite japonês ALOS ou *Daichi* (Grande Primeiro Filho ou Grande Terra) foi lançado pela Agência Espacial Japonesa (JAXA - *Japan Aerospace Exploration Agency*) no dia 24 de janeiro de 2006 do Complexo de Yoshinobu, na ilha de Tanegashima, sul do Japão. Sua missão é de observar e obter imagens de todo o planeta, para fins de monitoramento de desastres ambientais, levantamento de recursos naturais e, em especial, de suporte à Cartografia. A sua vida útil foi estimada em cinco anos. Sabendo-se da lacuna de mapeamento mundial, o ALOS surgiu com a missão de preencher esses vazios, gerando dados topográficos de infraestrutura espacial. Os dados captados são redirecionados para o satélite geoestacionário DRTS (*Data Relay and Tracking Satellite - Kodama*), que os transmite, para a estação de recepção no Japão, a uma taxa de 240 Mbps. Devido ao grande volume de dados produzidos, cerca de um *TeraByte* por dia, a

JAXA montou um esquema descentralizado de distribuição de dados, através dos chamados *ALOS Data Nodes*. Cada nó de distribuição é responsável pelo recebimento em fita, processamento e distribuição dos dados, em uma área de abrangência pré-definida. Assim, a ASF e a *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA) dos Estados Unidos ficaram responsáveis pelas Américas; a Agência Espacial Européia (ESA), pela Europa e África; a *Geoscience Austrália* pela Oceania, e a JAXA pela Ásia.

O ALOS descreve uma órbita circular heliossíncrona descendente à 692 km de altitude, com um período de revisita de 46 dias (resolução temporal).

Na Figura 03, visualizam-se os sistemas sensores e os demais componentes do satélite ALOS. O painel solar (*Solar Array Paddle*) possui 3m de largura por 22m de comprimento, sendo capaz de gerar mais de 7000W ao final de sua vida útil (EORC - *Earth Observation Research Center/JAXA*, 2008). Possui também um moderno subsistema de Controle de Órbita e Altitude (AOCS), que é composto de diferentes equipamentos, tais como: Star Tracker Triplo, GPS de dupla-fase (L1/L2), RRA (dispositivo para *laser ranging*), torqueador magnético e computador 64 bits (KAMIYA, 2007; BARROS et al, 2009). Os dados obtidos por estes equipamentos tornam possível a aquisição de uma imagem com alta qualidade geométrica.



**Figura 03** - ALOS e seus sistemas sensores

Adaptado de EORC/JAXA, 2008.

O Satélite ALOS possui 3 sensores: o multiespectral AVNIR-2, o pancromático PRISM e o Radar PALSAR.

O **AVNIR-2** (*Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer – Type 2*) é um sensor óptico com 4 bandas espectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo) com resolução espacial de 10m (nadir), tendo sido projetado para observação de regiões terrestres e costeiras. Trata-se do *upgrade* do ADEOS-2 (*Advanced Earth Observing Satellite*) ou Midori, que significa verde em japonês. Possuía também 4 bandas espectrais, mas com resolução espacial de 16m (nadir) (EORC/JAXA, 2008). As imagens AVNIR-2 são úteis para o mapeamento do uso e cobertura do solo para fins de monitoramento ambiental regional. Este sensor é capaz de variar a inclinação da visada lateralmente, com ângulos que variam de  $\pm 44^\circ$ , tornando possível imagear rapidamente situações de desastres naturais, mas, no entanto, não é capaz de observar áreas de latitudes superiores a  $88.4^\circ$  N e  $88.5^\circ$  S (IBGE, 2009b).

As características deste sistema sensor podem ser resumidas na **Tabela 01**, a seguir:

**Tabela 01** - Características do Sensor AVNIR-2

<b>Características do AVNIR -2</b>	
Bandas Espectrais/ Comprimento de onda (microns)	1: 0.42-0.50 2: 0.52-0.60 3: 0.61-0.69 4: 0.76-0.89
Resolução Espacial	10m
Largura da Faixa	70km (nadir)
Sinal/Ruido	>200
Função de Transferência de Modulação	Bandas 1~3: > 0.25 Banda 4: >0.20
Número de detectores	7000 por banda
Limite de Inclinação Lateral da Visada	+/- $44^\circ$ (direita/esquerda)

Fonte: JAXA, 2009.

O **PALSAR** (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) é um radar imageador de abertura sintética que opera na banda L (23cm), com resolução espacial que varia de 10 a 100 metros. Possui um modo Polarimétrico que é capaz de gerar imagens com polarizações HH, HV, VV e VH. O radar do ALOS também possui um modo de observação ScanSAR, que adquire imagens com uma larga faixa de observação (250-350 km),

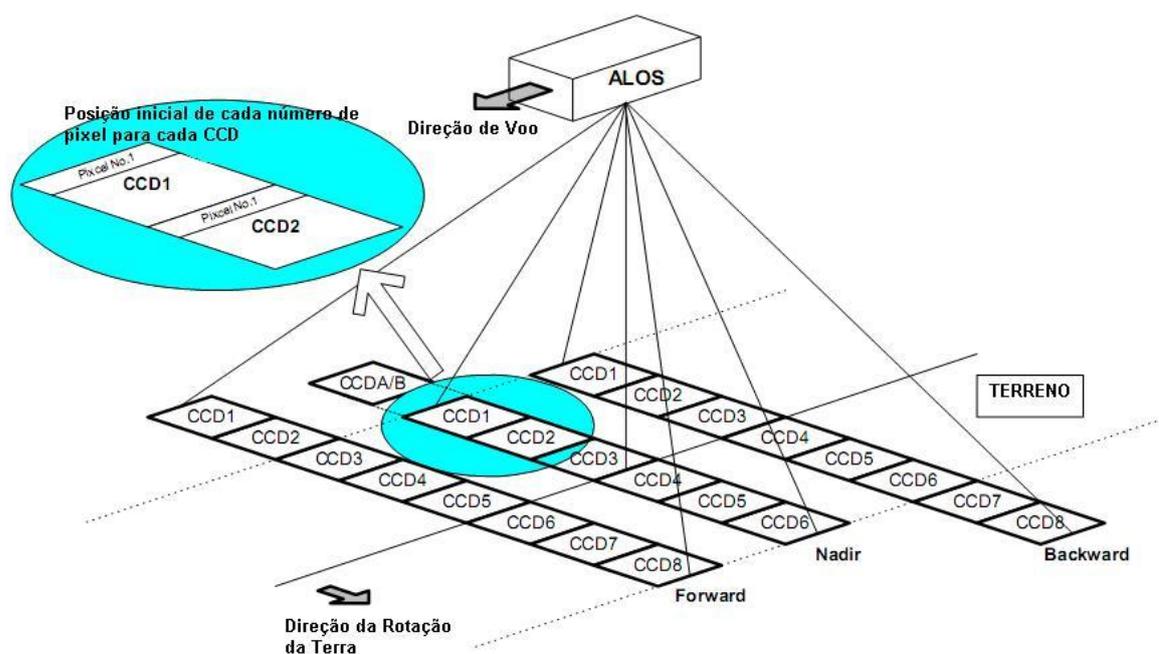
especialmente útil para imageamento de grandes áreas de florestas (EORC/JAXA, 2009a). Suas características podem ser resumidas na Tabela 02:

**Tabela 02** - Características do imageamento do sensor PALSAR

MODO	FINO		ScanSAR	POLARIMÉTRICO
Frequência	1270 MHz (Banda L)			
Polarização	HH ou VV	HH+HV ou VV+VH	HH OU VV	HH+HV+VH+VV
Incidência	8° a 60° (34,3°)	8° a 60° (34,3°)	18° a 43°	8° a 30° (21,5°)
Resolução (Range)	7 a 44m (10 m)	14 a 88m (20 m)	100m (multi-look)	24 a 89m (30 m)
Faixa	40 a 70 km (65 km)	40 a 70 km (65 km)	250 a 350 km (350 km)	20 a 65 km (25 km)

Fonte: EORC/JAXA, 2008.

O sensor **PRISM** (*Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping*) opera na faixa do visível com uma banda pancromática e resolução espacial de 2,5 m. Pode operar basicamente em 2 modos: Nadir e *Triplet*. No primeiro modo apenas a visada nadir é utilizada, com os 6 CCDs que a compõe, imageando uma faixa de 70km. No modo *Triplet* as 3 visadas são utilizadas, cada uma com 4 CCDs, imageando estereoscopicamente uma faixa de 35km (Figura 04). Neste modo 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 (EORC/JAXA, 2008; IBGE, 2009b). Essa variação do ângulo de proa (*pitch*), capaz de proporcionar a geração de imagens estereoscópicas, tem a vantagem de reduzir para aproximadamente um minuto o intervalo de aquisição, reduzindo a possibilidade de diferenças radiométricas e espectrais nos alvos. Além da inclinação da visada, o sensor pode ser inclinado lateralmente em +/-1,5°. Exemplos de outros sensores que utilizam mesma técnica: ASTER, IKONOS-2, CARTOSAT-1 E FORMOSAT-2.



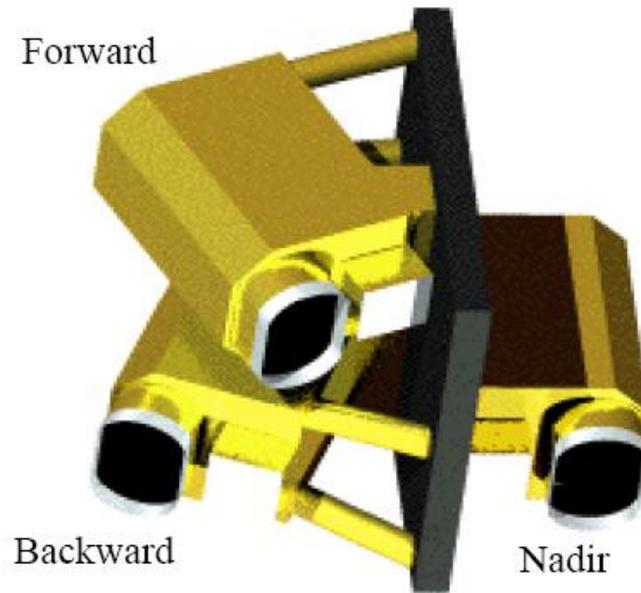
**Figura 04** - Visualização do imageamento do Sensor PRISM

Adaptado de EORC/JAXA, 2008

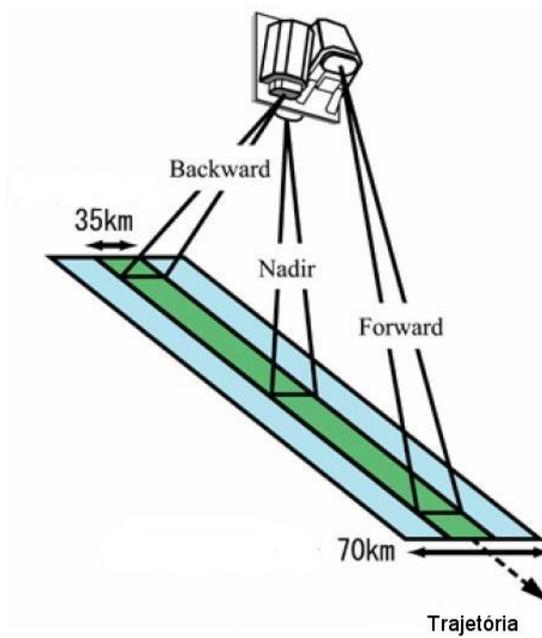
A estratégia de imageamento deste sensor é recobrir completamente o globo terrestre no modo Triplet coletando imagens estereoscópicas. Como a faixa do PRISM no modo Triplet cobre apenas 35km, não sendo possível imagear completamente áreas extensas em um único ciclo. Por isso, para realizar uma cobertura contínua entre as faixas é necessário adquirir imagens em 2 ciclos, inclinando a visada do sensor  $-1,2^\circ$  (*cross-track*) no primeiro ciclo e  $+1,2^\circ$  no segundo ciclo. 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 (IBGE, 2009a).

O satélite ALOS apresenta um avançado Sistema de Controle da Órbita e Atitude da plataforma (AOC) que o torna especialmente interessante para a Cartografia, pois, segundo a JAXA, com as informações geradas pelo sistema AOC torna-se possível gerar imagens com alta qualidade geométrica sem a necessidade de uso de pontos de controle medidos no terreno (EORC/JAXA, 2008).

A Figura 05 ilustra o sensor com as respectivas visadas e a Figura 06, inclui a visualização da faixa imageada no terreno.



**Figura 05** - Ilustração do Sensor PRISM



Fonte: JAXA, 2009.

**Figura 06** - Geometria do imageamento no modo Triplet

Fonte: Adaptado de JAXA, 2009.

As características do sensor PRISM podem ser resumidas na Tabela 03:

**Tabela 03** - Características do Sensor PRISM

Número de bandas	1 - Pancromática
Comprimento de onda	0,52~0,77 microns
Número de sensores	3 (nadir/para frente e para trás)
Relação Base/Altura (B/H)	1,0 (entre as visadas para frente e para trás)
Resolução Espacial	2,5 m (nadir)
Largura da Faixa	35 km (modo triplet) 70 km (apenas nadir)
Relação Sinal/Ruído	>70
Função de Transferência de Modulação	>0.2
Número de detectores	28000/banda (faixa de 70km) 14000/banda (faixa de 35km)
Inclinação da visada	De -1,5 a + 1,5° (transversal à trajetória no modo Triplet)
Resolução Radiométrica	8 bits

Fonte: EORC/JAXA, 2008

Outra característica interessante deste sensor é que a faixa imageada é cortada em cenas, possibilitando uma sobreposição entre si. Com isso, pode-se solicitar que o enquadramento da cena seja deslocado ao longo da trajetória, em incrementos de aproximadamente 7 km de distância.

As cenas PRISM podem ter deslocamentos de -2, -1, 0 (sem deslocamento), 1 ou 2, sendo o valor positivo indicativo que o deslocamento será para frente, considerando o sentido da trajetória, e um valor negativo indica um deslocamento para trás (IBGE, 2008).

A JAXA fornece as imagens PRISM com os seguintes níveis de processamento: 1A, 1B1, 1B2R, 1B2G. As imagens no nível 1A não são calibradas. São dados de sinal não-comprimido e reconstruídos, com coeficientes de calibração radiométrica e geométrica anexados, mas não aplicados. O usuário recebe um arquivo de imagem para cada um dos CCDs que compõem cada visada. No nível 1B1, as imagens são corrigidas radiometricamente adicionando-se os coeficientes de calibração absoluta. Possuem os coeficientes de calibração geométrica anexados, mas não aplicados. As imagens são fornecidas em arquivos individualizados para cada CCD de cada visada. As imagens fornecidas no nível 1B2 são calibradas radiométrica e geometricamente, e os CCDs de cada

visada são mosaicados. O usuário passa a receber um arquivo de imagem para cada visada. No nível 1B2R a imagem tem seus pixels alinhados em relação à trajetória do satélite e possui suas coordenadas representadas na projeção UTM (Universal Transversal Mercator), sendo necessário aplicar uma rotação para orientar a imagem para o Norte. No nível 1B2G, a imagem já vem com a rotação aplicada e conseqüentemente georreferenciada, sendo que seus pixels estão alinhados com a grade da projeção UTM (IBGE, 2009b).

A calibração do sensor PRISM é dada através da evolução do alinhamento entre as unidades CCDs (Orientação Interior) e fornecimento de parâmetros apropriados de compensação. Em agosto de 2007, o sistema operava utilizando versão de três parâmetros, até então atingindo precisão geométrica relativa de 4m ou menos em todos os três radiômetros. A precisão (acurácia) geométrica absoluta é conseguida através da atualização dos parâmetros de alinhamento pontual (AP) e pela constante evolução destes (EORC/JAXA, 2009b).

A JAXA publica periodicamente os resultados da evolução da precisão geométrica dos RPCs (*Rational Polynomial Coefficients* – Coeficientes Polinomiais Racionais), obtido pelo software de processamento desenvolvido pela JAXA/EORC/RESTEC (*Remote Sensing Technology Center of Japan*). No processamento dos RPCs, o modelo físico do sensor PRISM é calibrado e aplicado, aguardando-se que a acurácia dos RPCs seja validada com testes de campo. Os RPCs são testados individualmente para cada visada ou radiômetro (Nadir, *Backward* e *Foward*), e para a cena completa através de um modelo rigoroso desenvolvido pela JAXA. A evolução destes parâmetros pode ser acompanhada através dos endereços eletrônicos presentes em EORC/JAXA, 2009b. A acurácia da calibração geométrica – considerando-se as imagens 1B2 - para cada radiômetro é chamada de Acurácia Absoluta, e pode ser visualizada na Tabela 04:

**Tabela 04** – Acurácia Absoluta PRISM 1B2. Dados obtidos entre junho de 2007 e junho de 2009.

<b>Radiômetros</b>	<b>Direção do pixel (<i>cross-track</i>) em metros</b>	<b>Direção da linha (<i>along-track</i>) em metros</b>	<b>Distância em metros</b>
Nadir (EMQ)	5.6	5.3	7.8
Foward (EMQ)	4.9	6.1	7.8
Backward (EMQ)	5.0	7.1	8.7

Fonte: EORC/JAXA, 2009b

Os valores da Tabela 04 são obtidos através evolução dos PCs (*Pontos de Controle*) e pelo cálculo do EMQ (*Erro Médio Quadrático*), este obtido através da diferença entre a posição dos PCs, que são identificados em cada cena do PRISM, e as coordenadas medidas por GPS, juntamente com a observação da geometria do sensor.

Os valores de EMQ acima foram obtidos através da análise de 586 cenas para o Nadir, e 225 cenas para as visadas *Foward* e *Backward*. Ao todo foram analisados 5.499 PCs para a visada Nadir; 1.771 PCs para a *Foward* e 4.869 PCs para a *Backward*.

A Acurácia Relativa, que considera as três visadas, tem como medida a média do desvio-padrão (EMQ) dos erros geométricos dentro de uma cena, derivados da Acurácia Absoluta, que é apresentada na Tabela 05:

**Tabela 05** - Calibração PRISM 1B2. Acurácia Relativa em junho de 2009

	<b>Direção do pixel (<i>cross-track</i>) em metros</b>	<b>Direção da linha (<i>along-track</i>) em metros</b>	<b>Distância em metros</b>
Acurácia Relativa Desvio-Padrão dentro de uma cena ( $1 \sigma$ )	1.4	1.8	2.4

Fonte: EORC/JAXA, 2009b

### 2.3 - Distorções geométricas em imagens

As imagens brutas produzidas, seja por sensores remotos, aerotransportados ou orbitais, possuem erros e distorções sistemáticos que são introduzidos no momento da aquisição, e são geralmente relacionados com diversos fatores, entre eles: rotação e curvatura da Terra; movimento do espelho durante o imageamento; variação da altitude, posição e velocidade da plataforma; distorções panorâmicas; e distorções devido ao relevo topográfico. Tais erros podem ser corrigidos, eliminados ou reduzidos, aplicando-se modelos matemáticos de correção geométrica, assunto que será apresentado posteriormente.

O movimento de rotação da Terra durante o imageamento causa o efeito conhecido como *skew*, que nada mais é que o deslocamento apresentado entre as varreduras sucessivas.

As distorções panorâmicas ocorrem devido ao IFOV (*Instantaneous Field of View*) do sensor ter um ângulo fixo e cobrir diferentes dimensões do terreno, dependendo da sua inclinação. Nas visadas *off-nadir*, neste caso, o pixel que representa as extremidades do imageamento, passa a representar uma área maior no terreno. (RICHARDS, 1999; TOUTIN, 2004).

O efeito da curvatura da Terra causa o mesmo efeito da distorção panorâmica, afetando de forma similar o tamanho do pixel. Este efeito é mais significativo para aqueles sensores que possuem largos campos de visada. (TOUTIN, 2004).

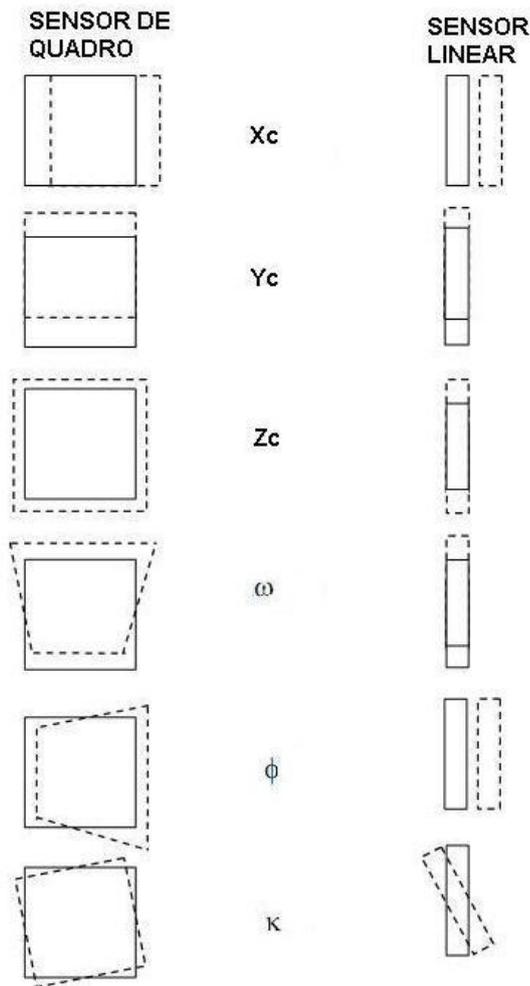
O relevo topográfico gera deslocamento na posição das feições por causa do efeito de paralaxe na direção do imageamento. Esse efeito é corrigido mediante o processo de ortorretificação, posteriormente apresentado no Capítulo 2, seção 6.

As variações de altitude da plataforma ocasionam mudança de posição, escala e campo de visada do IFOV. Essas variações são nomeadas como:  $\kappa$  - yaw (guinada),  $\varphi$  - pitch (arfagem) e  $\varpi$  - roll (rolamento).

Da mesma forma a mudança de velocidade acarreta uma variação de escala ao longo da direção de imageamento, bem como pode modificar a linha imageada criando buracos ou sobreposições.

As imagens obtidas por sensores de quadro e sensores lineares apresentam os mesmos erros, com algumas pequenas variações. Quando obtidas por sensores lineares, as imagens possuem seis Parâmetros de Orientação Exterior por linha:  $X_c$ ,  $Y_c$ ,  $Z_c$ ,  $\kappa$ ,  $\varphi$ ,  $\varpi$ . Sendo que  $(X_c, Y_c, Z_c)$  representam as coordenadas do Centro de Perspectivo do espaço objeto (terreno) e os ângulos  $(\kappa, \varphi, \varpi)$  representam as rotações necessárias para tornar os referenciais paralelos. (DEBIASI, 2008; MEDEIROS, 2007)

Na Figura 07 visualizam-se os efeitos relacionados à variação de altitude e plataforma.



**Figura 07** - Efeito de erros nas imagens orbitais em sensores de quadro e linear

Fonte: Adaptada de MEDEIROS, 2007.

## 2.4 - Modelagem geométrica das distorções

Na modelagem geométrica das distorções em imagens orbitais são aplicados princípios da Fotogrametria no que tange a correspondência de feições entre o espaço-imagem e o espaço objeto (terreno).

Segundo Andrade (1998), a Fotogrametria pode ser definida como sendo a ciência e tecnologia capaz de obter informações confiáveis através de processos de registro, interpretação e mensuração de imagens.

A Fotogrametria Digital teve seu início nos anos 80, devido ao avanço tecnológico a partir da utilização de imagens digitais adquiridas diretamente de uma câmera digital (CCDs), ou mediante digitalização (escaneamento) de fotografias analógicas.

Segundo Ribeiro *apud* Silva (2002), define-se a Fotogrametria Digital como parte da fotogrametria que trata dos aspectos geométricos do uso de fotografias, com a finalidade de obter valores precisos de comprimentos, alturas e formas, baseando-se no uso de imagens digitais, armazenadas em meio magnético, na forma de pixels, sendo totalmente baseada no princípio da estereoscopia e na orientação analítico-digital das fotos.

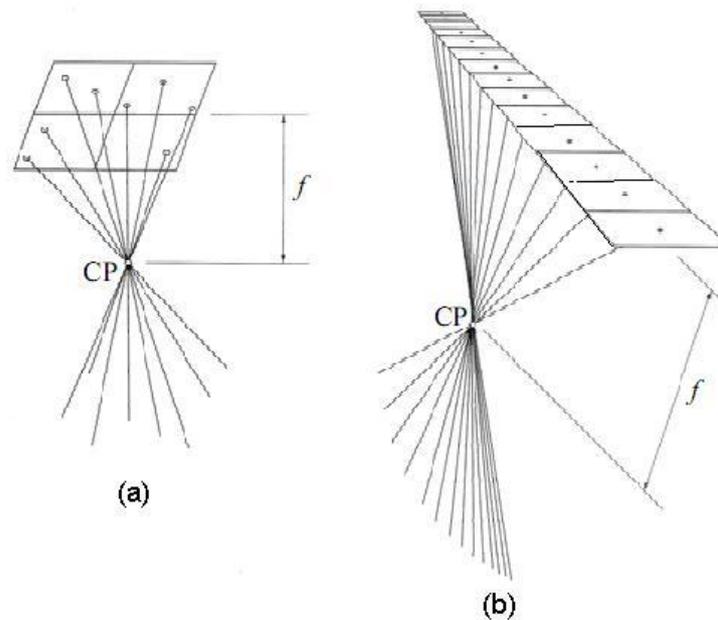
O principal objetivo da Fotogrametria é reconstrução automática do espaço tridimensional (espaço objeto) a partir de imagens bidimensionais (espaço imagem), no entanto, não há a automação total devido à complexidade da transformação do espaço 3D em 2D. As técnicas fotogramétricas de orientação de imagens, aerotriangulação e geração de modelos digitais de elevação são realizadas por meio de operador humano.

A orientação interior define o sensor ou as características de câmera necessárias para reconstrução dos feixes de raios do espaço-objeto a partir dos pontos-imagem correspondentes. (BRITO e COELHO, 2007; MIKHAIL et al, 2001).

Essas características são: a distância focal ( $f$ ), a localização do ponto principal no plano da imagem e a descrição das distorções das lentes. Esses parâmetros são determinados durante a calibração da câmara e geralmente são determinados em condições ideais em laboratório (MIKHAIL et al, 2001).

As imagens orbitais – estereoscópicas ou não - também necessitam de correções tais como as fotografias digitais obtidas pelas plataformas aerotransportadas, e por isso devem ser aplicadas técnicas fotogramétricas adaptadas, para que as medidas realizadas no produto final (carta-imagem, ortoimagem ou ortofotocarta) sejam acuradas.

A Figura 08 ilustra a diferença entre geometria de um sensor de quadro e um sensor *pushbroom*, quanto a representação da distância focal ( $f$ ).



**Figura 08** - Configuração do modelo de sensor para sensor de quadro (a) e sensor *pushbroom* (b)

Fonte: Adaptado de Mikhail et al , 2001.

Comumente é utilizada a Transformação Afim Geral, que modela seis parâmetros como não-ortogonalidade dos eixos, rotação na imagem, translação em x e y e diferenças de escala em x e y. (BRITO e COELHO, 2007).

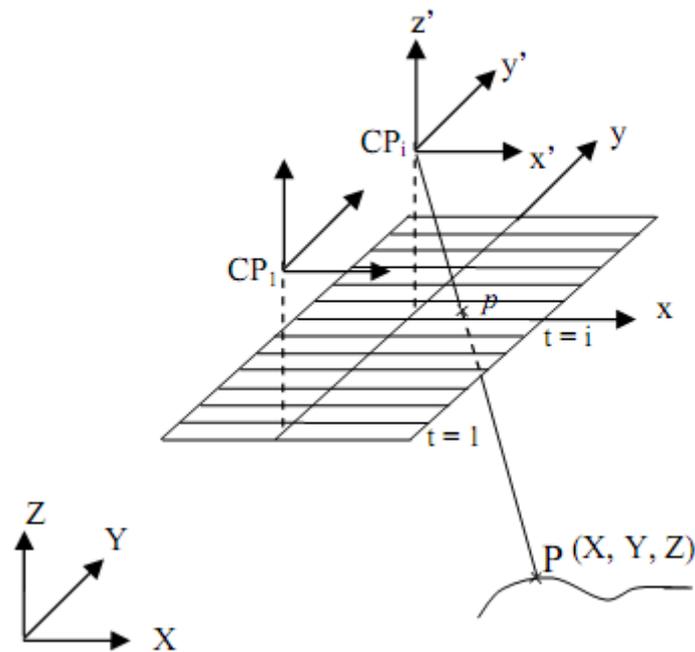
A Orientação Exterior tem como objetivo a obtenção da posição e das rotações do sensor em relação ao referencial do espaço-objeto. No caso dos sensores lineares, cada linha imageada define um novo conjunto de parâmetros a serem determinados, que são as três incógnitas de posição ( $X_c$ ,  $Y_c$  e  $Z_c$ ) e as três de rotação ( $\kappa, \varphi, \omega$ ).

Os modelos aplicados para orientação exterior são divididos em duas categorias: os modelos rigorosos ou físicos e os não rigorosos, também chamados de paramétricos (ou generalizados).

Os modelos rigorosos visam descrever as propriedades físicas e partem do princípio de colinearidade, isto é, que um ponto no espaço-imagem ( $p$ ), o seu respectivo ponto no espaço-objeto ( $P$ ) e o centro perspectivo ( $CP$ ) sejam colineares.

Para desenvolver tais modelos matemáticos faz-se necessário o conhecimento de dados de calibração do sensor, informações da órbita e altitude, que nem sempre estão disponíveis.

O princípio de colinearidade pode ser visualizado na Figura 09:



**Figura 09** - Princípio de colinearidade.

Fonte: Adaptado de Wolf e Dewitt, 2000

As equações de colinearidade (01) podem ser descritas por (WOLF e DEWITT, 2000):

$$\begin{aligned}
 x_i &= -f \frac{m_{11} * (X_i - X_0) + m_{12} * (Y_i - Y_0) + m_{13} * (Z_i - Z_0)}{m_{31} * (X_i - X_0) + m_{32} * (Y_i - Y_0) + m_{33} * (Z_i - Z_0)} \\
 y_i &= -f \frac{m_{21} * (X_i - X_0) + m_{22} * (Y_i - Y_0) + m_{23} * (Z_i - Z_0)}{m_{31} * (X_i - X_0) + m_{32} * (Y_i - Y_0) + m_{33} * (Z_i - Z_0)}
 \end{aligned}
 \tag{01}$$

Onde:

- $(x_i, y_i)$ : são as coordenadas no referencial fotogramétrico;;
- $(X_0, Y_0, Z_0)$ : coordenadas do centro perspectivo;
- $(X_i, Y_i, Z_i)$ : coordenadas do ponto no referencial do terreno;
- $m_{ij}$ : são os elementos da matriz de rotação em função de  $\kappa, \varphi, \omega$ ;
- $f$ : distância focal do sensor.

A matriz de rotação (M) é dada pela equação 02 (WOLF e DEWITT, 2000):

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \kappa & \sin \varpi \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa + \cos \varpi \cdot \sin \kappa & -\cos \varpi \cdot \sin \varphi - \cos \kappa + \sin \varpi \cdot \sin \kappa \\ -\cos \varphi \cdot \sin \kappa & -\sin \varpi \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa + \cos \varpi \cdot \cos \kappa & \cos \varpi \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa + \sin \varpi \cdot \cos \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \varpi \cdot \cos \varphi & \cos \varpi \cdot \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (02)$$

Sendo:

- $\omega$ : rotação em torno do eixo x;
- $\varphi$ : rotação em torno do eixo y; e
- $\kappa$ : rotação em torno do eixo z.

Para os sensores lineares, faz-se necessária uma adaptação na Equação de Colinearidade, conforme descrita pela Equação 03, a seguir (ORUN e NATARAJAN, 1994 apud MEDEIROS, 2007):

$$0 = x_i = -f \frac{r_{11} * (X_i - X_s) + r_{12} * (Y_i - Y_s) + r_{13} * (Z_i - Z_s)}{r_{31} * (X_i - X_s) + r_{32} * (Y_i - Y_s) + r_{33} * (Z_i - Z_s)} \quad (03)$$

$$y_i = -f \frac{r_{21} * (X_i - X_s) + r_{22} * (Y_i - Y_s) + r_{23} * (Z_i - Z_s)}{r_{31} * (X_i - X_s) + r_{32} * (Y_i - Y_s) + r_{33} * (Z_i - Z_s)}$$

O valor de  $x_i$  é considerado nulo porque se considera que cada vetor linear tem seu próprio centro perspectivo e não tem dimensão na coordenada x.

A posição S ( $X_s, Y_s, Z_s$ ) do satélite em determinado instante t pode ser relacionada linearmente a localização O ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) do satélite, correspondente ao vetor central ( $X_0, Y_0, Z_0$ ). Como essa relação matemática não é linear, tem-se desta forma:

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1 x_i + b_1 x_i^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2 x_i + b_2 x_i^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_{13} x_i + b_3 x_i^2 \end{aligned} \quad (04)$$

Onde

- $x_i$  é a linha da imagem;
- $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2$  e  $b_3$  são os parâmetros a serem determinados

A matriz de rotação é dada por (ORUN e NATARAJAN, 1994 apud MEDEIROS, 2007):

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\kappa_0 + a_4x_i + b_4x_i^2) & \cos \varpi \sin(\kappa_0 + a_4x_i + b_4x_i^2) & \sin \varpi \sin(\kappa_0 + a_4x_i + b_4x_i^2) \\ -\sin(\kappa_0 + a_4x_i + b_4x_i^2) & \cos \varpi \cos(\kappa_0 + a_4x_i + b_4x_i^2) & \sin \varpi \cos(\kappa_0 + a_4x_i + b_4x_i^2) \\ 0 & -\sin \varpi & \cos \varpi \end{bmatrix} \quad (05)$$

Onde:

- $\varpi$  : rotação em torno do eixo x;
- $\kappa_0, a_4, b_4$  : são determinados em um ajustamento por feixe de raios, para um ângulo de inclinação do espelho específico,  $\varpi_i$ , do satélite quando a imagem é adquirida

Existem ainda, os Modelos Paramétricos ou não-rigorosos, neste caso, os parâmetros de orientação são modelados como termos polinomiais de uma equação. Usualmente utilizam-se pontos de controle coletados no campo (espaço-objeto) para realizar a correspondência com a imagem.

A principal razão da implementação desses modelos generalizados é o fato das empresas distribuidoras de imagens nem sempre fornecerem as informações técnicas detalhadas para o usuário final a respeito da plataforma, ou sobre as características do sensor, que são as variáveis necessárias para implementar os modelos rigorosos.

Os métodos não-paramétricos mais frequentemente usados são baseados nos Polinômios Racionais 3D, que na literatura são conhecidos como Modelo de *Função Racional (RFM- Rational Function Model)* ou *Rational Polynomial Camera (RPC) – Rational Function Coefficients (RFC) – Coeficientes Polinomiais Racionais* (TOUTIN, 2004).

Cheng et al (2004) pesquisaram a respeito da aplicação de métodos não-rigorosos como a metodologia utilizando Polinômios Simples e os Polinômios Racionais (RPC). Apesar da similaridade, a principal diferença entre ambos os polinômios se refere no fato de que o Método Polinomial Racional envolve um quociente de transformações polinomiais e também leva em conta a elevação do terreno, conseguindo assim modelar

terrenos que apresentem maior variabilidade altimétrica. Os polinômios simples podem ser considerados desatualizados para correção de imagens, no entanto, mostraram-se adequados a limitadas áreas, pequenas e planas. Esses métodos ditos não-paramétricos são considerados simples e sua principal vantagem seria não levar em conta as informações das efemérides, elevação do satélite e do sensor.

Para orientação das imagens PRISM, Kocaman e Gruen (2008) testaram dois modelos rigorosos baseados um algoritmo de ajustamento em bloco modificado, com a possibilidade de usar dois modelos diferentes de trajetória: DGR (*Direct Georeferencing Model*) e PPM (*Piecewise Polynomial Model*) para modelar geometricamente e validar as imagens do sensor PRISM. No modelo DGR os parâmetros de altitude e posição são modelados usando 9 parâmetros de correção de erros sistemáticos. No modelo PPM os parâmetros de orientação exterior (OE) são descritos em funções polinomiais de tempo. A solução do ajustamento em bloco determina os coeficientes de OE. O DGR se mostrou melhor com poucos pontos de controle, e apresentando resultados mais consistentes nos campos de testes observados, atingindo valores entre meio e um terço do pixel de acurácia vertical.

A seguir, apresentam-se alguns dos modelos matemáticos comumente encontrados na literatura, que fazem o relacionamento direto entre o espaço imagem e o espaço objeto, tais como: Transformação Afim Geral 2D, Transformação Afim Geral 3D, Transformação Afim Paralela, Polinômios de 2º grau, DLT- *Direct Linear Transformation* e Funções Racionais.

### - Transformação Afim 2D

A transformação 2D relaciona diretamente as coordenadas do espaço-imagem ao espaço-objeto através da expressão (MITISHITA e SARAIVA, 2002):

$$\begin{aligned}x &= a_1X + a_2Y + x_0 \\y &= a_3X + a_4Y + y_0\end{aligned}\tag{06}$$

Onde:

- $x, y$ : coordenadas do espaço-imagem;
- $a_1, a_2, a_3, a_4, x_0, y_0$ : parâmetros de transformação
- $X, Y$ : coordenadas do espaço-objeto

Os seis parâmetros que definem esta transformação podem ser obtidos utilizando-se o número mínimo de 3 pontos de controle. Para obter uma solução através do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) serão necessários, no mínimo, 4 pontos para que se tenha grau de liberdade para o ajustamento.

### - Transformação Projetiva 2D

Nesta transformação matemática, oito parâmetros relacionam o espaço-imagem ao espaço objeto e é descrita pelas equações (07), a seguir (PINO e FIRKOWSKI, 2009):

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_1X + a_2Y + a_3}{a_4X + a_5Y + 1} \\ y &= \frac{a_6X + a_7Y + a_8}{a_4X + a_5Y + 1} \end{aligned} \tag{07}$$

Onde:

- $a_1, a_2, \dots, a_8$ : são os parâmetros de transformação
- $x, y$ : são as coordenadas do espaço-imagem
- $X, Y$ : são as coordenadas do espaço-objeto

Esta transformação não é linear, e para estimar os oito parâmetros são necessários, no mínimo 4 pontos de controle para se obter uma solução única. Pelo MMQ são necessários 5 pontos.

### - Polinômios de 2<sup>o</sup> Grau

A transformação utilizando-se polinômios de 2<sup>o</sup> pode ser expressa na forma (PINO e FIRKOWSKI, 2009):

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \\ Y &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \end{aligned} \quad (08)$$

Onde:

- $a_0, a_1, \dots, a_5, b_0, b_1, \dots, b_5$ : são os parâmetros de transformação
- $x, y$ : são as coordenadas do espaço-imagem
- $X, Y$ : são as coordenadas do espaço-objeto

Nesta transformação tem-se doze parâmetros para serem resolvidos, sendo assim, serão necessários, no mínimo seis pontos de controle para se obter uma solução única. Pelo MMQ serão necessários, no mínimo sete pontos de controle.

### - Transformação APM (Affine Projection Model)

O APM – *Affine Projection Model* – Modelo Projetivo Afim, amplamente pesquisado por Fraser et al (2001) é, segundo Okamoto et al (1999), derivado da Equação de Colinearidade Convencional. Segundo Lugnani (1987), o modelo matemático APM é também conhecido como Equação de Projeção Paralela do Espaço 3D para o plano 2D, e é um caso particular da projeção central onde o centro de projeção é deslocado para o infinito.

Este modelo tem sido utilizado por necessitar de poucos pontos de controle e por ser capaz de trazer resultados com precisão ao nível de sub-pixel (FRASER et al, 2004). É expresso, na forma padrão, pelas equações (09), a seguir:

$$\begin{aligned} x &= A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 \\ y &= A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8 \end{aligned} \quad (09)$$

Onde:

- $A_1, A_2, \dots, A_8$ : são os parâmetros do modelo APM
- $x, y$ : são as coordenadas do espaço-imagem
- $X, Y$ : são as coordenadas do espaço-objeto

Para obter uma solução convergente para os oito parâmetros, serão necessários no mínimo quatro pontos de controle. No caso de se utilizar o MMQ, o número mínimo de pontos passa a ser cinco.

Este modelo matemático foi utilizado por Pedro (2005) para ortorretificação de imagens Quickbird e IKONOS, e por Cerqueira et al (2003) para ortorretificar uma imagem IKONOS GEO.

#### - Transformação DLT (Direct Linear Transformation)

A DLT – *Direct Linear Transformation* – é derivada da Equação de Colinearidade e foi apresentada pela primeira vez por ABDEL-AZIZ e KARARA (1971) com o objetivo de calibrar câmeras não-métricas. É amplamente utilizada porque permite eliminar a orientação interior e exterior, normalmente realizada numa aplicação das equações de colinearidade (MITISHITA et al, 2003). A DLT generalizada é expressa através das equações (10), a seguir:

$$\begin{aligned} x &= \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \\ y &= \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \end{aligned} \tag{10}$$

Onde:

- $x, y$ : coordenadas do espaço-imagem
- $X, Y, Z$ : coordenadas do espaço-objeto
- $L_1, L_2, \dots, L_{11}$ : Parâmetros de transformação da DLT

O detalhamento do desenvolvimento matemático da DLT pode ser visto em Kwon (1998) e em Debiasi (2008), que utilizou o modelo para ortorretificar imagem do sensor CBERS-2.

São necessários, no mínimo, seis pontos de controle para se obter uma solução utilizando-se a DLT. A vantagem desta transformação, quando linear, é a não-necessidade de realizar-se iterações utilizando-se o MMQ, no entanto, a desvantagem seria que seus parâmetros não possuem nenhum significado físico.

### **- Modelo de Função Racional (*Rational Polynomial Functions*)**

Os Modelos de Função Racional (RFM) são formas especiais de funções polinomiais, sendo comum o uso em modelos não-paramétricos, que são implementados na sua totalidade e maioria em todos os pacotes de softwares de processamento de imagens de satélite. Esse tipo de aproximação é usada para que o usuário final possa obter produtos com valor, como a ortoprojeção sem a necessidade de ter o modelo do sensor, mas somente tendo os coeficientes da relação entre as coordenadas da imagem e as coordenadas do solo.

Os dados do modelo RPC são ajustado para os dados do grid gerado usando o modelo físico da câmera, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Desde o lançamento dos primeiros satélites de alta resolução, e mesmo antes, muita atenção tem sido dada no uso de modelos geométricos alternativos, especialmente RPCs para restituição, ortorretificação e modelagem de terreno. O modelo matemático é expresso pela Equação 11, a seguir (DOWMAN e TAO, 2002; GRODECKI e DIAL, 2001; WANG et al, 2008):

$$x = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} \tag{11}$$

$$y = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)}$$

Onde:

- $x, y$ : coordenadas do espaço imagem
- $X, Y, Z$ : coordenadas tridimensionais do espaço objeto
- $P_i(X, Y, Z)$  é a função polinomial do ponto  $(X, Y, Z)$ , normalmente um polinômio de 3ª ordem com 20 coeficientes para cada função:

$$\begin{aligned}
 P_i(X, Y, Z) = & a_{i0} + a_{i1}X + a_{i2}Y + a_{i3}Z + a_{i4}X^2 + a_{i5}XY + a_{i6}Y^2 + \dots \\
 & \dots + a_{i7}YZ + a_{i8}XZ + a_{i9}X^3 + a_{i10}X^3 + a_{i11}X^2Y + a_{i12}X^2Z + \dots \\
 & \dots + a_{i13}XY^2 + a_{i14}XZ^2 + a_{i15}Y^3 + a_{i16}Y^2Z + a_{i17}YZ^2 + a_{i18}Z^3 + a_{i19}XYZ
 \end{aligned} \tag{12}$$

Onde:

- $i = 1, 2, 3$  ou  $4$ , representando 4 diferentes polinômios.

O modelo RPC relaciona as coordenadas do espaço-objeto (latitude, longitude e altitude) com as coordenadas do espaço-imagem (linha, coluna). O modelo funcional do RPC é simplesmente uma divisão de duas funções cúbicas das coordenadas do espaço-objeto (DIAL e GRODECKI, 2005).

Segundo Celestino (2007), no processo de correção geométrica das imagens existem quatro elementos que influenciam na qualidade final do produto: modelo aplicado na correção; qualidade, quantidade e distribuição dos pontos de controle; relevo da área de estudo e qualidade do modelo altimétrico do terreno (MDE) utilizados para ortorretificação.

De acordo com Merchant (1982), os pontos de controle devem ter distribuição homogênea sobre a imagem para garantir rigidez geométrica.

## 2.5 – GPS - Sistema de Posicionamento Global

O GPS ou NAVSTAR-GPS (*NAVigation Satellite with Time and Ranging*) é um sistema de radionavegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos - DoD (*Department of Defense*) - com o intuito de ser o principal sistema de navegação das forças armadas americanas. Resultante da fusão de dois programas financiados pelo governo norte-americano para desenvolver um sistema de navegação de abrangência

global: *Timation* e *621B*, sob responsabilidade da Marinha e da Força Aérea, respectivamente (MONICO, 2008).

O GPS oferece dois tipos de serviços: o SPS (*Standart Positioning Service* - Serviço de Posicionamento Padrão) que está disponível a todos os usuários do globo sem cobrança de qualquer taxa. O outro modo é o PPS (*Precise Positioning Service* - Serviço de Posicionamento Preciso) que proporciona melhores resultados embora seja restrito ao uso militar e a usuários autorizados.

O princípio básico da navegação pelo GPS consiste na medida de distâncias entre o usuário e quatro satélites no mínimo. Conhecendo as coordenadas dos satélites em um sistema de referência apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites. Do ponto de vista geométrico, apenas três distâncias, desde que não pertencentes ao mesmo plano, seriam suficientes. A quarta medida é necessária em razão do não-sincronismo entre os relógios dos satélites e do usuário (MONICO, 2008).

Atualmente, cada satélite GPS transmite em duas ondas portadoras: L1 e L2, geradas a partir da frequência fundamental ( $f_0$ ) de 10,23 MHz, que ao ser multiplicada por 154 e 120, geram as seguintes frequências e respectivos comprimentos de onda ( $\lambda$ ):

$$\begin{aligned} L1 &= 154 * f_0 = 1575,42 \text{ MHz e } \lambda = 19\text{cm} \\ L2 &= 120 * f_0 = 1227,60 \text{ MHz e } \lambda = 23\text{cm} \end{aligned} \tag{13}$$

Ainda há a L5 (presente nos satélites do bloco IIF):  $L5 = 115 * f_0 = 1176,45 \text{ MHz}$  e  $\lambda = 25,5\text{cm}$ . O Código L2C, que está sendo incorporado aos satélites do Bloco IIR-M deverá apresentar melhor sensibilidade que o código C/A, disponível na L1. Ele usa um código CM (Código de Comprimento Moderado) com 10.230 bits e um código CL (Código de Comprimento Longo) com 767.250 bits. É transmitido com frequência de 511,5 KHz. Logo, o código CM se repete a cada 20ms e o Código CL se repete a cada 1,5s. CM é o código que transporta os dados e o CL é considerado o sinal piloto, não tendo dados modulados sobre ele.

As observáveis do sistema GPS permitem determinar a posição, velocidade e tempo e podem ser identificadas como:

- pseudodistância a partir do código C/A: utilizada para levantamentos em que não há necessidade de alta precisão, com erros superiores a um metro e;

- fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora: utilizada em levantamentos com necessidade de alta precisão, com erros que variam de decímetros a poucos milímetros.

O sistema GPS é dividido em três segmentos:

- O segmento espacial: tem como função principal gerar e transmitir os sinais do Sistema GPS. Consiste atualmente em 32 satélites distribuídos em seis planos orbitais (nomeados de A a F), inclinados  $55^\circ$  em relação ao plano do Equador, estando a uma altitude de aproximadamente 20.200 km acima da superfície terrestre, perfazendo um período de revolução de 12 horas siderais. Dessa forma, a posição dos satélites se repete a cada dia, aproximadamente 4 minutos antes em relação ao dia anterior. Esta configuração garante que, no mínimo, 4 satélites GPS sejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre, a qualquer hora (MONICO, 2008).

- Segmento Controle: é composto por cinco estações de monitoramento (Hawaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia e Colorado Springs). As principais atribuições são: monitorar e controlar continuamente o sistema de satélites, determinar o sistema de tempo GPS, prever as efemérides dos satélites, calcular as correções dos relógios dos satélites e atualizar periodicamente as mensagens de navegação de cada satélite.

- Segmento Usuário: Este segmento está diretamente associado aos receptores, os quais devem ser apropriados para os propósitos que se destinam, como navegação, geodésia, agricultura ou outra atividade. Os receptores GPS podem ser classificados de acordo com vários critérios. De acordo com a comunidade usuária, podem ser classificados em receptores de uso militar ou de uso civil. Normalmente são classificados de acordo com a aplicação, basicamente em três tipos (de acordo com os sinais armazenados): navegação (Código C/A), topográfico (Código C/A e Portadora L1) e geodésico (Código C/A, Portadora L1 e Portadora L2). MONICO (2008) classifica da seguinte forma:

- receptor de navegação;
- receptor geodésico;
- estação de referência;
- receptor para SIG (Sistema de Informações Geográficas);
- receptor de aquisição de tempo.

MONICO (2008) ainda classifica os receptores de acordo com as observáveis coletadas:

- código C/A;
- Código C/A e Portadora L1;
- Código C/A e Portadoras L1 e L2;
- Código C/A e P, Portadoras L1 e L2;
- Código C/A e P1 e P2, Portadoras L1 e L2; e
- Código C/A, L2C e P2, Portadoras L1 e L2.

Há outros sistemas de posicionamento global como o russo GLONASS, o europeu GALILEO, o chinês COMPASS, entre outros.

### **2.5.1- Métodos de Posicionamento**

Posicionar um objeto na superfície terrestre significa determinar suas coordenadas em relação a um referencial específico (MONICO, 2008). Os métodos de levantamento podem ser classificados, de uma maneira bem simples, como: posicionamento absoluto e posicionamento relativo, pós-processado ou em tempo real.

No posicionamento absoluto, também chamado de posicionamento por ponto preciso (PPP), as coordenadas do ponto estão referenciadas ao geocentro terrestre e podem ser obtidas através do pós-processamento utilizando-se as Efemérides Precisas fornecidas pelo IGS (*International GNSS Service*), ou utilizar os serviços PPP online oferecidos por instituições como, por exemplo, o IBGE.

No método de posicionamento relativo, pode-se classificar os levantamentos como estáticos, semi-cinemáticos ou cinemáticos. Neste tipo de levantamento, dois ou mais receptores rastreiam simultaneamente os satélites visíveis por um período de tempo que pode variar de dezenas de minutos até algumas horas. A observável adotada neste tipo de posicionamento é a fase de batimento da onda portadora, muito embora se possa utilizar também a pseudodistância, ou ambas (MONICO, 2008). Este método também é conhecido popularmente como “transporte de coordenadas”. Quando se utiliza a RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – vincula-se assim o levantamento ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). A RBMC é um conjunto de estações GNSS ativas distribuídas pelo território nacional e que rastream dados GNSS 24 horas por dia. Neste trabalho o

transporte de coordenadas foi efetuado utilizando-se as estações de Santa Maria e Porto Alegre, ambas no RS.

O método de posicionamento cinemático é aquele em que um receptor permanece fixo em uma estação de referência e um segundo receptor move-se coletando as feições de interesse. A observável é a fase de batimento da portadora, embora a pseudodistância seja importante para resolver problemas de ambiguidade.

Maiores detalhes com relação as características dos métodos de posicionamento podem ser pesquisados em Monico (2008). Neste trabalho foram realizados os levantamentos relativo estático e relativo cinemático.

## 2.6 - Ortorretificação de Imagens

Há vasta literatura de Fotogrametria abordando os problemas de orientação interior e relativa e as equações de colinearidade, que são o fundamento da ortorretificação.

A ortofoto é uma fotografia ou uma imagem, quando apresentada na forma digital, que representa as feições projetadas ortogonalmente, com uma escala constante, corrigida do deslocamento devido ao relevo e da inclinação da câmara sendo, por isso, geometricamente equivalente a uma carta.

Segundo Wolf e Dewitt (2000), uma ortofoto é uma fotografia que mostra imagens de objetos em suas posições ortográficas verdadeiras. Portanto, as ortofotos são geometricamente equivalentes a mapas convencionais planimétricos de linhas e símbolos, os quais também mostram as posições ortográficas verdadeiras dos objetos.

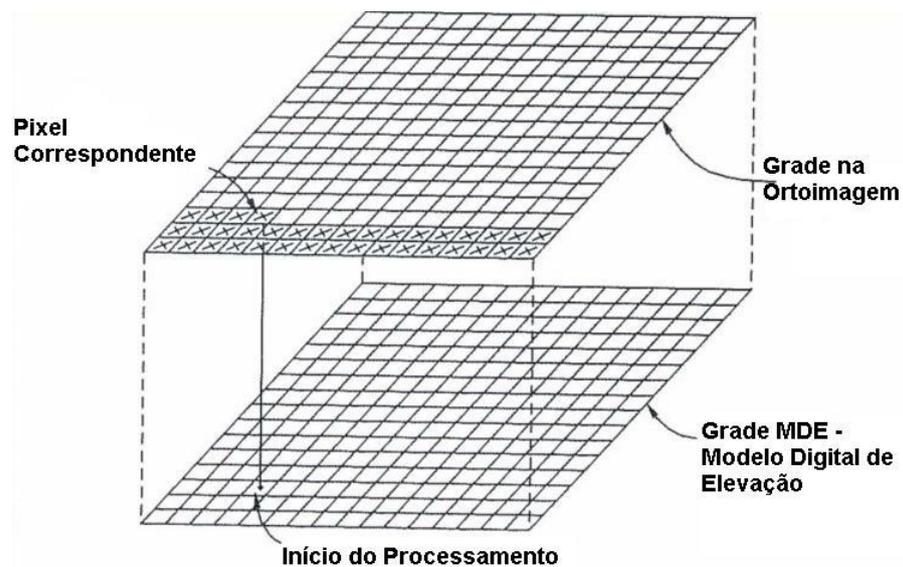
Volotão (2001) apresentou um procedimento computacional detalhada para geração de ortoimagens para um par de fotografias aéreas, obtidas por câmaras métricas ou não-métricas, ou para câmara cujos parâmetros não sejam conhecidos, através da implementação em IDL (*Interactive Data Language*) da DLT.

As vantagens do uso das ortofotos são a possibilidade de medição direta de ângulos, distâncias, áreas, pois possuem escala constante (como na carta, que é uma projeção ortogonal do terreno sobre um plano de referência); são fotografias em projeção ortogonal; possuindo riqueza pictorial que permite a fácil interpretação (como na foto); apresentam todos os dados cartográficos de uma carta, e o preparo é mais rápido quando comparado com uma restituição, principalmente em áreas de planimetria mais densa.

Em função destas características é de grande utilidade em aplicações como projetos de estradas, cadastro urbano, atualização cartográfica, projetos geofísicos, projetos hidrelétricos, dentre outros.

O princípio consiste na transferência dos tons de cinza da imagem digital de entrada para a ortofoto. Os dados de entrada são a matriz de tons de cinza (imagem digital), os parâmetros intrínsecos das câmaras, os parâmetros de Orientação Exterior e o Modelo Digital do Terreno (MDT) ou Modelo Digital de Elevação (MDE). O dado de saída é a matriz de tons de cinza da ortofoto ou ortoimagem.

O processo de ortorretificação pode ser visualizado na Figura 10:



**Figura 10** - Processo de geração de ortoimagem através da associação do MDE e da matriz da ortoimagem

Fonte: Adaptado de Wolf e Dewitt (2000)

Os modelos matemáticos para geração de ortofotos são as Equações de Colinearidade na forma direta e inversa. O modelo de colinearidade na forma inversa realiza a projeção dos pontos no referencial da imagem para o referencial do terreno (Equação 01). Na forma direta realiza a projeção dos pontos do terreno para o referencial da imagem, conforme Equação 15:

$$\begin{aligned}
 X_i &= X_0 + (Z - Z_0) * \left( \frac{m_{11} * (x - x_0) + m_{21} * (y - y_0) - (m_{31} * f)}{m_{13} * (x - x_0) + m_{23} * (y - y_0) - (m_{33} * f)} \right) \\
 Y_i &= Y_0 + (Z - Z_0) * \left( \frac{m_{12} * (x - x_0) + m_{22} * (y - y_0) - (m_{32} * f)}{m_{13} * (x - x_0) + m_{23} * (y - y_0) - (m_{33} * f)} \right)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Onde:

- $(x_i, y_i)$ : são as coordenadas no referencial fotogramétrico;;
- $(X_0, Y_0, Z_0)$ : coordenadas do centro perspectivo;
- $(X_i, Y_i, Z_i)$ : coordenadas do ponto no referencial do terreno;
- $m_{ij}$ : são os elementos da matriz de rotação em função de  $\kappa$ ,  $\varphi$ ,  $\omega$ ;
- $f$ : distância focal do sensor.

Determinam-se as coordenadas tridimensionais conhecidas do centro de cada pixel. Para isso, é indispensável o conhecimento do Modelo Digital de Elevação (MDE). A partir dessas coordenadas, por intermédio das equações de colinearidade (Parâmetros da Orientação Exterior conhecidos), determinam-se as coordenadas no espaço imagem para aquele ponto. Através dos parâmetros da orientação interior, chega-se ao pixel correspondente, e conseqüentemente, ao seu nível de cinza (ou de cor). Essa tonalidade é, então, reamostrada na imagem vazia.

O grande problema da reamostragem encontra-se na determinação do tom de cinza a ser destinado aos pixels da nova imagem. A reamostragem, neste caso, faz-se necessária para que os novos pixels tenham a cor que deveriam ter por estarem em determinada posição. Vários métodos de interpolação foram desenvolvidos para realizar esta determinação. Os mais utilizados: vizinho mais próximo, interpolação bilinear, *splines* bicúbicas e Polinômios de Lagrange, conforme citado em Andrade (1998). No caso de imagens de satélite, onde não obtemos as informações de calibração, distância focal, entre outros, e com isso os processos de orientação interior e exterior ficam comprometidos, e conseqüentemente a ortorretificação. Para solucionar este problema, deve-se escolher o modelo matemático adequado para realização deste processo.

O Modelo de Polinômios Racionais é um modelo matemático simplificado, que relaciona o espaço imagem (posição da linha e coluna) para latitude, longitude, e altitude da superfície, sendo este implementado na maioria dos softwares comerciais, como por exemplo, no ENVI. Usando-se a imagem de satélite, determinando-se seus Coeficientes de Polinômios Racionais (RPCs) a partir de pontos de controle medidos no terreno, e um MDT

(Modelo Digital de Terreno) ou MDE (Modelo Digital de Elevação) que represente os valores de elevação, pode-se produzir uma imagem ortorretificada.

## 2.7 – Modelos Digitais de Elevação

O Modelo Digital de Terreno (MDT, do inglês DTM – *Digital Terrain Model*) é o termo utilizado para representar matematicamente a distribuição espacial da característica de um fenômeno vinculada à uma superfície real. A superfície é geralmente contínua e o fenômeno representado pode ser variado (FELGUEIRAS, 2007).

Miller e Laflamme (1958) foram os primeiros a definir o termo original: “MDT é uma representação estatística da superfície contínua do terreno por um número elevado de pontos selecionados com coordenadas (XYZ) conhecidas em um sistema de referência arbitrário”. Desde então, surgiram algumas variações de terminologia, tais como: MDE – Modelo Digital de Elevação (DEM – *Digital Elevation Model*), Modelo Digital de Altitudes (MDA ou DHM -*Digital Height Models*), MNT (Modelo Numérico de Terreno), mas no entanto, por vezes, são tratadas como sinônimos. O termo MDT é mais amplo e contempla, além da informação altimétrica, outras feições tais como topologias. Neste trabalho será utilizado o termo MDE ou DEM, pois será considerada pura e simplesmente, a informação altimétrica. Outro motivo para utilizar tal terminologia é o fato do IBGE designar o MDT como MDE.

Andrade (1998) afirma que modelar um terreno significa reproduzir a sua forma e que existem muitas formas de se fazer esta modelagem, principalmente mediante o processo de interpolação de altitudes.

Sendo assim, o MDE tenta representar o mais fielmente possível as feições do relevo da superfície terrestre, sendo um dos dados de entrada para ortorretificar uma imagem (aérea ou orbital), corrigindo erros relativos aos deslocamentos devido ao relevo. O Modelo Digital de Terreno ou o Modelo Numérico de Elevação (MNE ou DEM) não precisa necessariamente coincidir com a área da imagem ou o tamanho da célula (área em comum de ambos para ortorretificar). Para se obter melhores resultados, no entanto, o tamanho da célula do DEM deve ser o mais próximo possível da imagem que esta sendo ortorretificada. A qualidade da ortorretificação está profundamente associada à qualidade do MDT/DEM. Quanto melhor a modelagem do terreno, melhor será o resultado final e as correções obtidas.

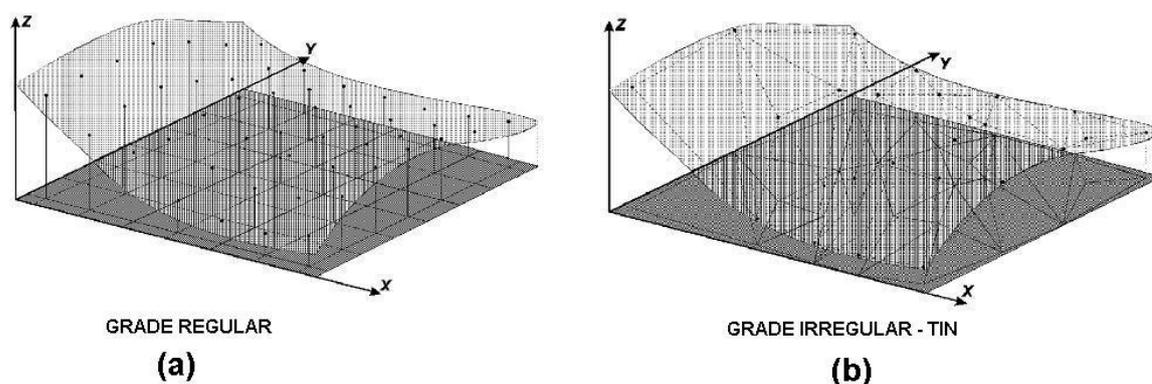
Para a representação de uma superfície real no computador é indispensável a criação de um modelo digital, podendo ser por equações analíticas ou por uma rede de pontos na forma de uma grade de pontos regulares e ou irregulares. A partir dos modelos pode-se calcular volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e exposição, gerar fatiamentos em intervalos desejados e perspectivas tridimensionais (FELGUEIRAS, 2007).

No processo de modelagem numérica de terreno podemos distinguir três fases: aquisição dos dados, geração de grades e elaboração de produtos representando as informações obtidas.

Para a geração do MDE, faz-se uso de grades que podem ser retangulares ou triangulares (TIN – *Triangular Irregular Network*) para interpolação do conjunto de amostras selecionado (FELGUEIRAS, 2007).

A grade regular é um modelo que aproxima superfícies através de um poliedro de faces retangulares, como mostrado na Figura 11 (a). Os vértices desses poliedros podem ser os próprios pontos amostrados, caso estes tenham sido adquiridos nas mesmas localizações xy que definem a grade desejada. O espaçamento da grade, ou seja, a resolução em x ou y deve ser menor ou igual à menor distância entre duas amostras com cotas diferentes. Ao se gerar uma grade muito fina (densa), com distância entre os pontos muito pequena, existirá um maior número de informações sobre a superfície analisada, porém necessitará maior tempo para sua geração. Ao contrário, considerando distâncias grandes entre os pontos, será criada uma grade grossa, que poderá acarretar perda de informação. Desta forma para a resolução final da grade, deve haver um compromisso entre a precisão dos dados e do tempo de geração da grade. Uma vez definida a resolução e conseqüentemente as coordenadas de cada ponto da grade, pode-se aplicar um dos métodos de interpolação para calcular o valor aproximado da elevação (FELGUEIRAS, 2007).

Uma malha triangular é o conjunto de poliedros cujas faces são triângulos, como ilustrado na Figura 11 (b). Os vértices do triângulo são geralmente os pontos amostrados da superfície. Esta modelagem, considerando as arestas dos triângulos, permite que as informações morfológicas importantes, como as discontinuidades representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas durante a geração da grade triangular, possibilitando assim, modelar a superfície do terreno preservando as feições geomórficas da superfície.



**Figura 11** - Modelos de grades para geração de MDE

Fonte: FELGUEIRAS, 2007

O processo de interpolação pode ser entendido como uma estimativa da informação em locais não observados a partir de informações tomadas em sua vizinhança (VALERIANO e ROSSETI, 2008).

Os interpoladores geralmente são classificados em duas categorias: globais e locais. Os mais comuns, além dos citados anteriormente, são: médias ponderadas, inverso do quadrado da distância, além da Krigagem.

O método do vizinho mais próximo deve ser utilizado quando se deseja manter os valores das cotas das amostras na grade sem gerar valores intermediários (FELGUEIRAS, 2007). Neste caso, para cada ponto  $(x,y)$  da grade, é atribuída a cota da amostra mais próxima ao ponto.

A krigagem pode ser definida como um interpolador em que a variabilidade espacial dos dados condiciona a função que relaciona os pesos das amostras às suas distâncias. (VALERIANO e ROSSETI, 2008)

As técnicas disponíveis para geração de MDE são: topografia convencional, levantamento geodésico, a Fotogrametria (restituição) e Sensoriamento Remoto através de imagens estereoscópicas (usando o efeito paralaxe), Interferometria de Radar (SRTM, PALSAR) e LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

O LIDAR é um sensor ativo, similar ao radar, que transmite pulsos de laser para o alvo, gravando o tempo que se leva para que este retorne para o sensor receptor. Esta tecnologia começou a ser desenvolvida no final dos anos sessenta e a partir de 1993, iniciou-se o mapeamento topográfico de alta resolução com o uso desta tecnologia, através do uso integrado com GPS e Sistema Inercial (IMU - *Inertial Measurement Unit*) pela NOAA visando o levantamento de regiões costeiras (NOAA, 2009). A precisão altimétrica esperada é de 15 cm, a planimétrica de menos de um metro e a resolução espacial é de 75cm. Este sensor opera no comprimento de onda entre 1.045 e 1.065 $\mu\text{m}$  (Infravermelho Próximo).

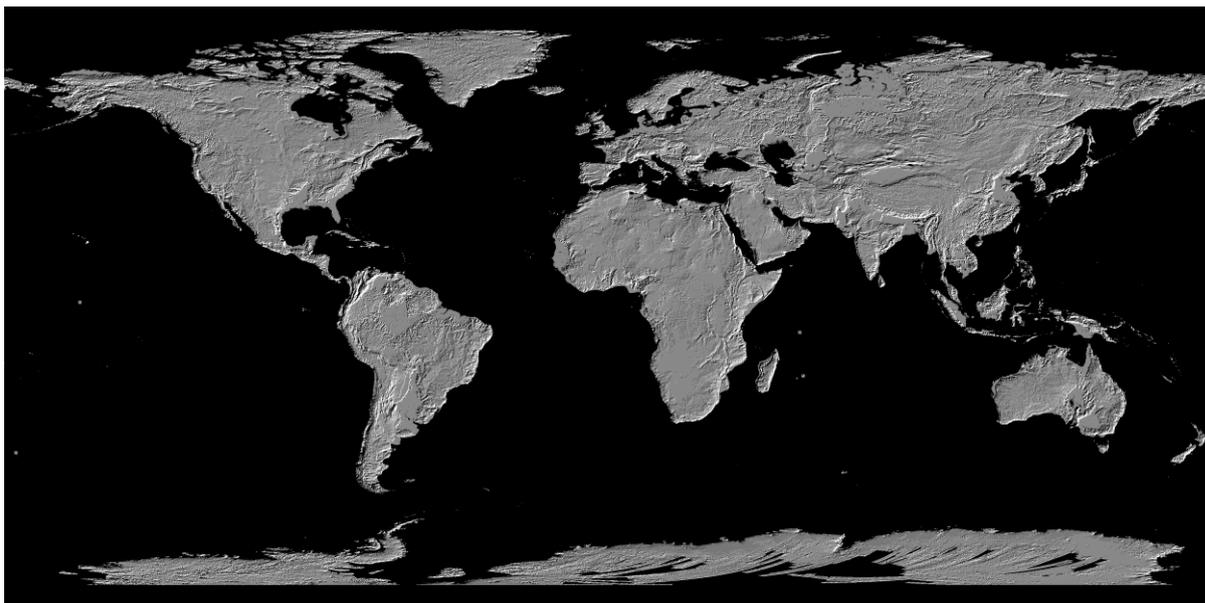
### **2.7.1- MDE gerados a partir de dados de Sensoriamento Remoto**

Os MDE gerados a partir de imagens estereoscópicas de Sensoriamento Remoto orbital ou aerotransportado têm como princípio o efeito de estereoscopia, isto é, o efeito paralaxe. Um objeto quando visto sob dois ângulos distintos possui variação no posicionamento em um par de imagens, e a determinação de sua altitude depende da determinação de seu deslocamento comparando-se uma imagem à outra.

Os MDE obtidos a partir de dados de Sensoriamento Remoto são interessantes, se comparados com os métodos tradicionais de geração a partir de dados pontuais, porque possuem baixo custo, são automatizados e rápidos.

#### **2.7.1.1 - GDEM a partir do ASTER**

O Modelo Digital de Elevação do ASTER (GDEM) foi produzido a partir do processamento automático de mais de 1,5 milhões de cenas deste sensor em arquivo, incluindo as estereoscópicas, para produzir 1.264,118 cenas individuais baseadas nos MDEs gerados pelo ASTER. Valores residuais ruins foram corrigidos antes de se particionar os dados em tiras de 1º em 1º. A resolução deste modelo é dada como sendo de 30m, e está referenciada ao sistema WGS-84/EGM96. A ilustração do GDEM é dada pela Figura 12:



**Figura 12** - GDEM obtido através do ASTER

Fonte: METI/NASA, 2009.

O sensor ASTER está a bordo do satélite EOS - TERRA (*Earth Observing System*) lançado em dezembro de 1999 pela NASA. Este sensor é constituído de três subsistemas de imageamento independentes, os quais coletam dados em 14 bandas do espectro eletromagnético: entre o visível e o Infravermelho Próximo (VNIR) são 3 bandas (resolução espacial de 15m), Infravermelho Médio (SWIR) com seis bandas (resolução de 30m) e Infravermelho Termal (TIR) com 6 bandas (resolução de 90m).

A geração de MDE é possível a partir da banda 3 do VNIR, que permite a geração de estereo-imagens na direção *along-track*. O VNIR consiste em dois telescópios independentes que operam visando o nadir (3N) com um arranjo linear de 5000 CCDs, e backward (3B) com arranjo de 4100 CCDs, este último com inclinação de  $27.6^\circ$  *off-nadir*. O tempo de imageamento de um mesmo ponto na superfície pelos radiômetros 3N e 3B é de 64 segundos, com a relação B/H de 0.6. Cada cena possui 4100x4200 pixels, cobrindo uma área na superfície de aproximadamente 60km x 60km (POLI, 2004).

O processo de geração de MDE a partir de estereo-imagens é baseado no processo de correlação, isto é, na determinação de pontos homólogos nas imagens digitais. Desse modo, o mesmo objeto (ou feição) deverá estar presente em duas ou mais imagens ao mesmo tempo. Nos softwares de processamento de imagens, o mecanismo de localização de pontos homólogos é geralmente automatizado, mas ainda depende de supervisão humana para ser plenamente eficiente.

O coeficiente de correlação de Pearson pode ser entendido como uma medida do grau de relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias, logo, o coeficiente de correlação tem ênfase na predição do grau de dependência entre duas variáveis aleatórias.

O cálculo da correlação é realizado através da Equação 15 (BRITO e COELHO, 2007):

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (15)$$

Onde:

- $\rho$ : correlação entre duas variáveis;
- $\sigma_{xy}$ : covariância entre as duas variáveis
- $\sigma_x$ : desvio-padrão da variável X;
- $\sigma_y$ : desvio-padrão da variável Y;

O coeficiente de correlação pode levar qualquer valor entre -1 e 1. O processo de determinação de pontos homólogos em duas imagens pode ser descrito a seguir: um recorte (*template*) é definido na imagem de referência. O programa (ou rotina) utilizado grava numa matriz os valores dos números digitais do pixel central e de vários outros adjacentes a ele. Esses valores são arranjados em uma coluna e equivalerão à variável X. Normalmente os *templates* são números ímpares, para que o ponto de interesse esteja em seu centro. Em geral, são usadas matrizes 5x5, 7x7, 9 x 9 ou 11 x 11 (BRITO e COELHO, 2007).

O próximo passo é varrer a área de procura, região na qual se espera encontrar a ocorrência de um ou mais padrões similares ao *template* recortado. A partir de então, dentro da janela de procura, um *template* equivalente em tamanho ao da primeira imagem corre pixel a pixel, da esquerda para a direita e de cima para baixo. Os valores armazenados neste segundo recorte serão equivalentes à variável Y. Assim, calcula-se o coeficiente de correlação entre X e cada um dos valores assumidos por Y. Aquela combinação que possuir o maior valor para o coeficiente de correlação será equivalente aos pontos homólogos. As coordenadas para esse ponto serão as coordenadas do pixel central de ambos os *templates* (X e Y) (BRITO e COELHO, 2007).

Considerando as visadas Nadir e Backward, uma vez determinada a correlação entre as imagens, então, para cada pixel de coordenadas  $x_n$  e  $y_n$  da visada Nadir,

relacionada com as coordenadas  $x_b$  e  $y_b$  da visada Backward, pode-se calcular o deslocamento entre elas através da relação (16) (DRUZINA, 2007):

$$\Delta = \sqrt{(x_b - x_n)^2 + (y_b - y_n)^2} \quad (16)$$

Para o ASTER e para o PRISM esse deslocamento devido à paralaxe acontece exclusivamente na direção da órbita e sendo assim,  $y_b$  menos  $y_n$  é nulo.

Com a determinação da paralaxe, a altura de qualquer ponto dentro das visadas pode ser aproximada pela relação (17) (DRUZINA, 2007):

$$h_p = \Delta x \frac{H}{B} \quad (17)$$

Onde:

$h_p$ : altura do ponto;

$\Delta x$ : paralaxe em x

H: altitude da órbita do satélite em relação a superfície de referência

B: base

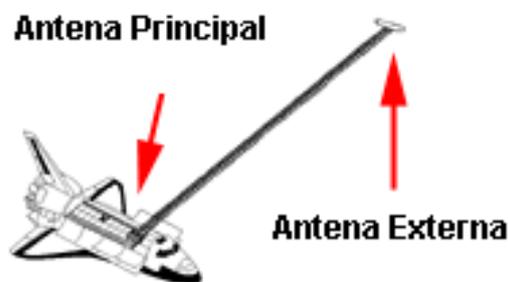
Para as imagens do satélite ASTER o quociente (B/H) é aproximadamente 0.6, sendo que esta relação determina a resolução altimétrica. Sendo assim, um deslocamento de  $\Delta x$  de um pixel, 15m banda 3N, corresponde a uma diferença de elevação de 25m (STEINMAYER, 2003 apud DRUZINA, 2007).

Para as imagens do sensor PRISM, o quociente (B/H), considerando as visadas *Backward* e *Foward*, é igual a um. Analogamente, o deslocamento de  $\Delta x$  de um pixel (2,5m) corresponde a uma elevação de 2,5m. Considerando-se as combinações Nadir-*Backward* ou Nadir-*Foward*, o quociente (B/H) passa a ser 0.64, e a diferença de elevação seria de aproximadamente 3,9m.

### 2.7.1.2 - SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission

Os dados SRTM são o resultado de uma missão espacial da NASA, NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), DLR (Agência Espacial Alemã) e ASI (Agência Espacial Italiana) com o objetivo de gerar um Modelo Digital de Elevação da Terra usando a técnica de interferometria. A coleta de dados da missão espacial SRTM aconteceu entre os dias 11 e 22 de fevereiro de 2000, cobrindo 80% da superfície terrestre, entre as latitudes 60°N e 56°S com resolução de um arco de segundo, o que equivale a 30m (NASA, 2008).

O projeto SRTM teve como veículo espacial a nave Endeavour. O equipamento de interferometria utilizado foi o radar imageador SIR-C/X-SAR, usado duas vezes na Endeavour no ano de 1994. A técnica de interferometria compara duas imagens de radar tomadas de pontos ligeiramente diferentes para obter elevação ou informação de mudanças na superfície. Este método possuiria maior acurácia em relação à técnica de estereoscopia, segundo a CCRS – *Canadian Centre of Remote Sensing* (2009). Para coletar os dados numa única órbita, o equipamento usava um mastro de 60 metros com as antenas de radar banda C ( $\lambda=3\text{cm}$ ) e banda X ( $\lambda=5,6\text{cm}$ ), instaladas na ponta que se estendia pelo lado de fora. A antena principal emitia e recebia sinal, e as antenas auxiliares somente recebendo, conforme visualizado na Figura 13:



**Figura 13** - Nave Espacial Endeavour

Fonte: Adaptada de NASA, 2008.

Os dados SRTM da banda C, disponibilizada para os usuários da América do Sul de forma gratuita, é de três arcos de segundo, isto é, 90m. Podem ser obtidos pelo sítio da CGIAR – *Consortium for Spatial Information* (2009). No Brasil podem-se obter os dados SRTM através da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) – 2009a, ou através do Projeto TOPODATA do INPE. Os dados SRTM representam uma parte da

solução do problema devido à sua cobertura por todo o continente sob condições uniformes de aquisição e pré-processamento. Esta condição relativamente recente motivou a criação de um banco de dados topográficos unificado por todo o território nacional. O projeto TOPODATA oferece dados topográficos e suas derivações básicas em cobertura nacional, elaborados a partir dos dados SRTM disponibilizados pela internet (VALERIANO e ROSSETI, 2008).

Os dados SRTM-TOPODATA possuem resolução de 30m e gerados a partir de interpolação por Krigagem, sendo os dados estruturados em quadrículas compatíveis com a articulação 1:250.000, portanto, em folhas de 1° de latitude por 1,5° de longitude (INPE, 2009b).

## **2.8 – Avaliação da Qualidade de Produtos Cartográficos - Padrão de Exatidão Cartográfica**

Assim como toda e qualquer medida deve ser acompanhada de sua precisão ou acurácia, todo produto cartográfico, seja uma carta, planta ou imagem, oriunda de levantamento topográfico, geodésico ou orbital, deve também ser avaliado de acordo com esses parâmetros.

Primeiramente faz-se necessária a definição de precisão e acurácia. Segundo Gemael (1994), o termo acurácia está relacionado com os erros sistemáticos e aleatórios e diz respeito à dispersão de valores em relação ao valor exato da observação, enquanto que, o termo precisão está somente vinculado aos erros aleatórios, referindo-se à dispersão de valores em relação à média das observações.

Toda e qualquer medida está sujeita aos mais variados tipos de erros, quer seja de natureza grosseira, sistemática ou aleatória (randômica). Tais erros podem ser atribuídos à falibilidade humana, à imperfeição do equipamento ou à influencia das condições ambientais (GEMAEL, 1994).

Os erros grosseiros podem ser facilmente identificados, mas, muitas vezes somente um teste estatístico pode justificar ou não a rejeição de uma variável suspeita de abrigar tal tipo de erro. Os erros sistemáticos, produzidos por causas conhecidas, podem ser evitados e corrigidos posteriormente mediante modelos matemáticos. Já os erros acidentais tendem a ser neutralizados conforme o número de observações cresce.

Monico et al (2009) revisam e exemplificam as diferenças conceituais entre precisão e acurácia e consideram que a análise da acurácia de um documento cartográfico

é realizada em termos de tendência e precisão, quando citam o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC).

O Decreto Lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984, estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Comissão de Cartografia do Brasil (CONCAR), estabelecendo o PEC, que visa avaliar estatisticamente um produto cartográfico de acordo com a sua exatidão posicional. Assim, 90% dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior o Erro Planimétrico ou Altimétrico do que o estabelecido. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão, ou seja:  $PEC = 1,6449 EP$ . O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica. Este Decreto-Lei considera equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

Assim sendo, resumidamente, pode-se reproduzir a Legislação do PEC na Tabela 06:

**Tabela 06** - Classificação das cartas Segundo PEC

CLASSE	PLANIMETRIA		ALTIMETRIA	
	PEC	EP	PEC	EP
A	$0.5 \text{ mm} * E_c$	$0.3 \text{ mm} * E_c$	$1/2 * E_q$	$1/3 * E_q$
B	$0.8 \text{ mm} * E_c$	$0.5 \text{ mm} * E_c$	$3/5 * E_q$	$2/5 * E_q$
C	$1.0 \text{ mm} * E_c$	$0.6 \text{ mm} * E_c$	$3/4 * E_q$	$1/2 * E_q$

Fonte: Brasil, 1984.

Onde:

- PEC= Padrão de Exatidão Cartográfica
- $E_c$  = Escala da carta
- EP= Erro Padrão ou EMQ (Erro Médio Quadrático)
- $E_q$ = Equidistância entre as curvas-de-nível

Desta forma, considerando-se a escala 1:25.000, esperada para as imagens do sensor ALOS/PRISM, têm-se os valores do PEC e EP resumidos na Tabela 07:

**Tabela 07** - PEC para Escala 1:25.000

CLASSE	PLANIMETRIA		ALTIMETRIA	
	PEC	EP	PEC	EP
A	12.5m	7.5m	5m	3.3m
B	20m	12.5m	6m	4m
C	25m	15m	7.5m	5m

Fonte: Adaptado de Brasil, 1984.

O procedimento de análise da exatidão cartográfica é baseado na análise das discrepâncias entre as coordenadas do ponto na imagem e as coordenadas de referência (que podem ser obtidas através de observações realizadas no campo ou através de uma carta de referência). Os pontos de controle devem ser bem distribuídos pela cena, ou nas regiões de maior interesse.

## 2.9 – Análise Estatística

Uma variável aleatória é descrita pela sua distribuição de probabilidade, e esta por sua vez, é descrita através de seus parâmetros. Na Distribuição Normal, os parâmetros são a média ( $\mu$ ) e o desvio-padrão ( $\sigma$  ou  $S$ ) (GEMAE, 1994). A estimativa dos parâmetros populacionais é feita a partir de uma amostra representativa da população, que pode ser pontual ou descrita através de um Intervalo de Confiança (IC), isto é, dois números que definem, com certa probabilidade, incluir o parâmetro populacional estimado. Quanto maior a amplitude deste intervalo, maior a probabilidade de estimar corretamente o verdadeiro parâmetro populacional.

Assim, o valor do IC é definido através da expressão (18) dada por Gemael (1994):

$$IC = 100 \times (1 - \alpha)\% \quad (17)$$

Onde:

- IC: Índice de Confiança;
- $(1-\alpha)$ : Nível de confiança, probabilidade de que os parâmetros estejam dentro do intervalo; e
- $\alpha$ : Probabilidade de erro, isto é, do intervalo não conter os parâmetros.

Considerando-se uma variável aleatória normal com média e variância desconhecidas, e se uma amostra com  $n$  valores indica a média ( $X$ ) e desvio-padrão ( $S$ ), o IC pode ser calculado a partir da distribuição de Student (t-Student):

$$\mu = X + (t_{\alpha}) \cdot \left( \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (19)$$

Onde  $(t_{\alpha})$  é o valor tabelado da distribuição t-Student

Considerando o PEC, o intervalo de confiança a ser adotado é de 90%. O valor de  $t_{calc}$  é determinado através da expressão 20 (GEMAEL, 1994):

$$t_{calc} = \frac{(X - \mu_0)}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (20)$$

Onde  $\mu_0$  é o valor da média populacional esperada

Deve-se aplicar um teste de hipótese com nível de significância de 10%, com o objetivo de validação da exatidão da Distribuição t-Student. Para isso deve-se considerar o valor do erro máximo admissível de acordo com o PEC. Considerando a escala 1:25.000, PEC Classe A, o erro planimétrico máximo admissível é de 12,5m ( $1/2 \cdot \text{Escala}$ ). Desta forma, o teste de hipótese:

$$\begin{aligned} H_0: \mu &\leq x \\ H_1: \mu &> x \end{aligned} \quad (21)$$

Onde  $x=12.5m$ .

Se  $t_{calc} \leq t_{\alpha_{n-1}}$ , aceita-se a  $H_0$ , o que significa que tem-se 90% de confiança que a média populacional dos erros é igual ou inferior ao erro máximo admissível, neste exemplo, seria menor ou igual à 12.5m.

Considerando uma variável aleatória Normal com média e variância desconhecidas. Para obter-se o IC através desses parâmetros, utiliza-se a Distribuição do Qui-Quadrado, dada por:

$$\sigma^2 = \frac{((n-1)\chi^2 \cdot S^2)}{(\chi^2)_{1-\alpha, n-1}} \quad (22)$$

Onde:

- $S^2$  é a variância amostral;
- $\chi^2$  : valor tabelado da Distribuição Qui-Quadrado

Reescrevendo a expressão 22:

$$(\chi^2)_{calc} = \frac{[(n-1) \cdot S^2]}{(\sigma_0)^2} \quad (23)$$

Aplicando-se o teste de hipótese com nível de significância de 10%, considerando o valor do Erro Padrão máximo admissível de acordo com o PEC. Considerando a escala 1:25.000, PEC Classe A, o valor do erro máximo admissível é de  $x=7,5m$  ( $1/3 \cdot Escala$ ). Desta forma, o teste de hipótese:

$$H_0: \sigma \leq x \quad (24)$$

$$H_1: \sigma > x$$

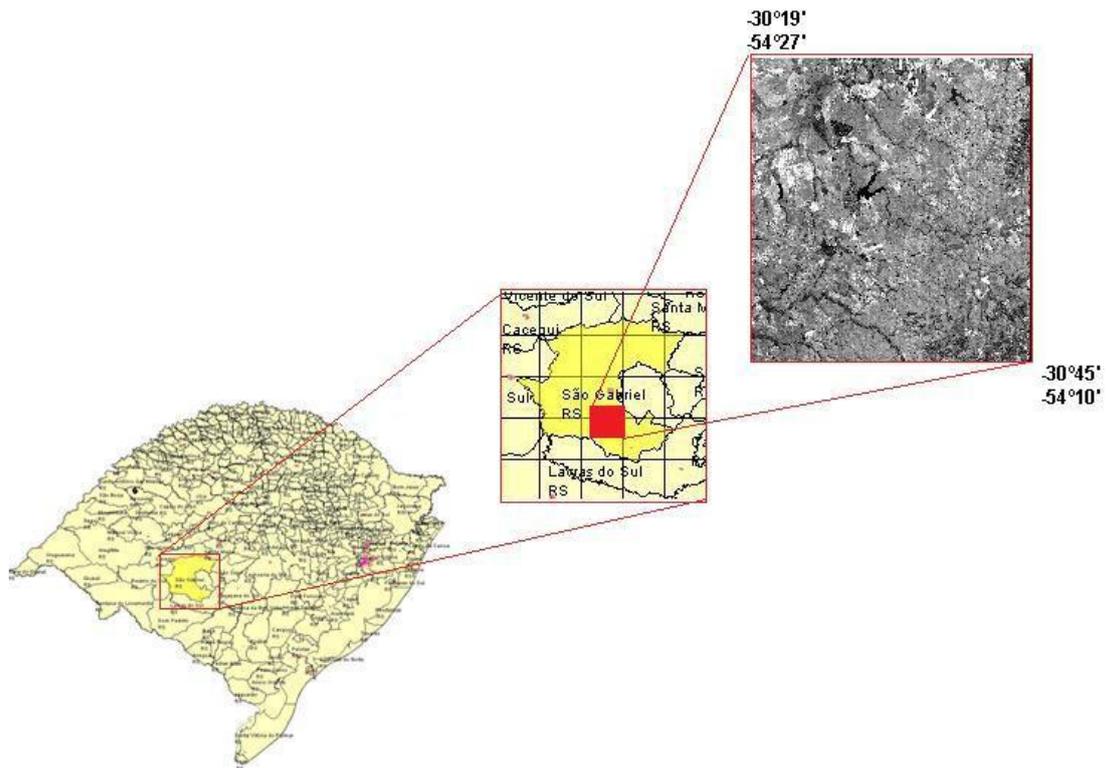
Se  $\chi^2 \leq \chi^2_{calc}$ , aceita-se a  $H_0$ , o que significa que tem-se 90% de confiança que o desvio-padrão populacional dos erros é igual ou inferior ao erro máximo admissível, neste exemplo, seria menor ou igual à 7,5m.

## **CAPÍTULO 3 – ÁREA DE ESTUDO E MATERIAIS**

### **3.1 - ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo desta pesquisa está localizada na região sul do município de São Gabriel – RS, sendo cortada pelas rodovias BR-473 e RS-630. São Gabriel é uma cidade moderna, localizada na fronteira-oeste do Rio Grande do Sul, às margens da BR 290, Rota do Mercosul. Situada num corredor de importação e exportação, está a 320 quilômetros de Porto Alegre, 290 quilômetros do Porto Internacional de Rio Grande, 300 quilômetros de Uruguaiana/Argentina e 170 quilômetros de Livramento/Uruguai. A região da campanha apresenta a existência de pradarias, relevo tipicamente de coxilhas. Na região onde se encontra São Gabriel é conhecida como Depressão Central, onde os terrenos de baixa altitude ligados de leste a oeste, beirados por terras baixas, não passando de 400 metros de altitude. (Prefeitura Municipal de São Gabriel - RS)

O motivo para escolha desta área foi pela disponibilidade de dados de levantamento de campo e também pelo fato de fazer parte um projeto dentro da Superintendência Regional do Rio Grande do Sul (SR-11). Foi acordado um termo de cooperação visando auxiliar o Setor de Cartografia desenvolver uma metodologia para utilização de imagens do sensor PRISM/ALOS. A área ainda é rural, conforme ilustração presente na Figura 14:



**Figura 14** - Localização da área de estudo: Município de São Gabriel – RS

### 3.2 –Imagem ALOS/PRISM

A imagem ALOS adquirida é a ALPSMN065714215, nível de processamento 1B1, datada de 19/04/2007. Neste nível de processamento, as imagens são fornecidas em arquivos separados para cada CCD (4 ao todo) e para cada visada (3 ao todo), totalizando 12 faixas a serem mosaicadas antes dos processos de geração de RPCs, extração de MDE e ortorretificação.

Os dados referentes à imagem adquirida podem ser resumidos na **Tabela 08**

:

**Tabela 08** - Especificação da Imagem PRISM – Triplet

Identificador	ALPSMN065714215
Data de aquisição	19/04/2007
Modo de aquisição	Triplet
Largura da faixa (nominal)	35 km
Nível de processamento	1B1
Versão do processador	4.01
Latitude do centro (imagem nadir)	-30°32'
Longitude do centro (imagem nadir)	-54°19'

Fonte: Dados gerados pela JAXA/ASF/IBGE

### 3.3 – Pontos de Controle obtidos por levantamento geodésico

A obtenção de pontos de controle (PCs) foi realizada através do uso combinado de receptores GPS L1L2 modelo Hiper de fabricação Topcon e L1, modelo Promark 3 de fabricação da *Thales Navigation*. Os pontos base da rede geodésica foram coletados com receptor Hiper, com taxa de 15s, em duas seções de aproximadamente 9 horas de rastreamento contínuo. Utilizaram-se as bases de Santa Maria (SMAR) e Porto Alegre (POAL) para o transporte de coordenadas. O levantamento de campo foi realizado em janeiro de 2009, onde foram coletados 24 pontos em esquinas bem definidas, distribuídos pela área. Foi realizado o transporte de coordenadas para dois pontos, nomeados como Base 01 e Base 02, e a partir destes, utilizando-se o método de levantamento relativo estático, determinaram-se as coordenadas dos 24 PCs com precisão centimétrica, conforme pode ser observado na Tabela 09:

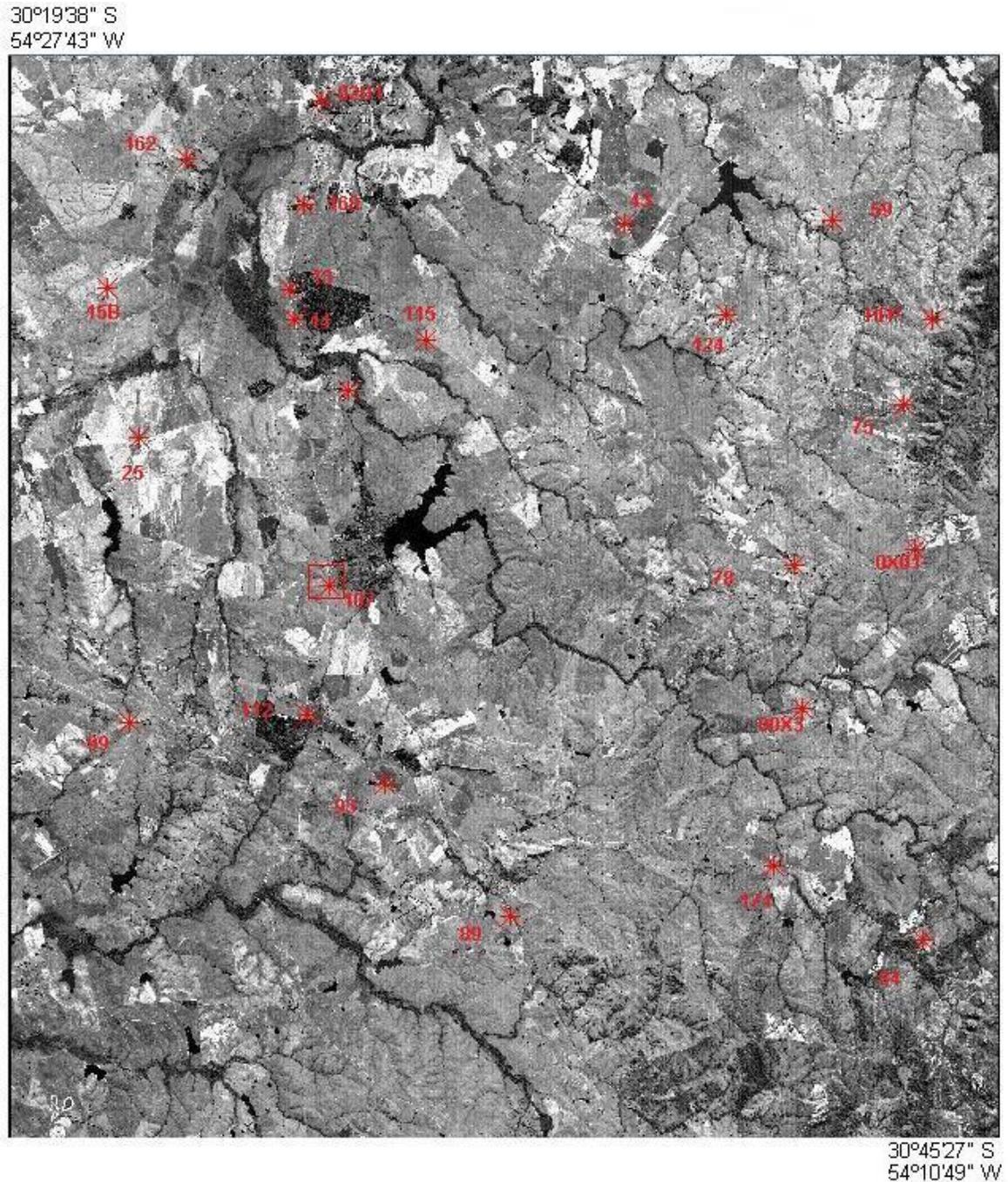
**Tabela 09** - Lista dos pontos de controle com suas respectivas acurácias

PONTO	E(m)	N(m)	H(m)	EMQ-N(m)	EMQ-E(m)	EMQ-H (m)	Solução
13	751.958.227	6.631.139.652	103.808	0.008	0.024	0.019	Fixa
14	751.875.807	6.629.967.967	101.002	0.008	0.024	0.018	Fixa
0015B	745.342.611	6.632.898.025	128.452	0.008	0.024	0.018	Fixa
25	745.096.999	6.627.161.150	120.706	0.008	0.024	0.018	Fixa
43	764.731.270	6.630.409.791	153.987	0.015	0.023	0.036	Fixa
59	772.325.957	6.628.585.400	207.169	0.019	0.022	0.028	Fixa
75	773.204.916	6.621.281.158	317.092	0.013	0.021	0.027	Fixa
78	772.268.918	6.615.918.902	271.836	0.014	0.024	0.031	Fixa
84	768.956.975	6.601.683.055	286.739	0.009	0.021	0.017	Fixa
89	754.209.950	6.606.338.395	177.345	0.008	0.024	0.018	Fixa
93	750.850.213	6.612.283.480	155.865	0.008	0.024	0.018	Fixa
00X3	766.709.506	6.611.218.629	207.781	0.025	0.025	0.044	Fixa
107	750.665.533	6.620.051.544	160.535	0.008	0.024	0.018	Fixa
112	748.681.292	6.615.515.843	168.534	0.008	0.024	0.018	Fixa
115	756.470.015	6.628.024.515	130.318	0.012	0.025	0.024	Fixa
124	767.547.289	6.626.175.355	212.353	0.009	0.021	0.018	Fixa
162	749.420.447	6.636.805.956	117.599	0.010	0.024	0.020	Fixa
168	753.285.194	6.634.070.888	106.761	0.008	0.024	0.018	Fixa
174	764.250.422	6.605.728.994	202.382	0.009	0.021	0.017	Fixa
02B1	754.862.002	6.637.675.928	98.205	0.009	0.024	0.019	Fixa
0X01	775.552.403	6.613.754.378	279.578	0.010	0.021	0.019	Fixa
BASE01	753.136.618	6.626.948.034	120.143	0.008	0.024	0.018	Flutuante
BASE02	767.737.705	6.616.480.637	282.559	0.007	0.020	0.015	Flutuante
HFP	775.012.078	6.624.078.665	304.002	0.013	0.021	0.022	Fixa
P099	742.155.571	6.616.874.184	217.923	0.008	0.024	0.018	Fixa

As coordenadas acima listadas estão referenciadas ao SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), compatível com o WGS-84 (*World Geodetic System-84*) e estão ajustadas em rede geodésica, conforme Relatório de Ajustamento apresentado no Anexo A. Foram levantados os eixos de algumas estradas pelo método cinemático com o objetivo de servir de apoio à validação do processo de ortorretificação da

imagem. Maiores detalhes relacionados ao procedimento efetuado em campo pode ser verificado em Salomoni (2009).

Os pontos acima listados podem ser visualizados na Figura 15:



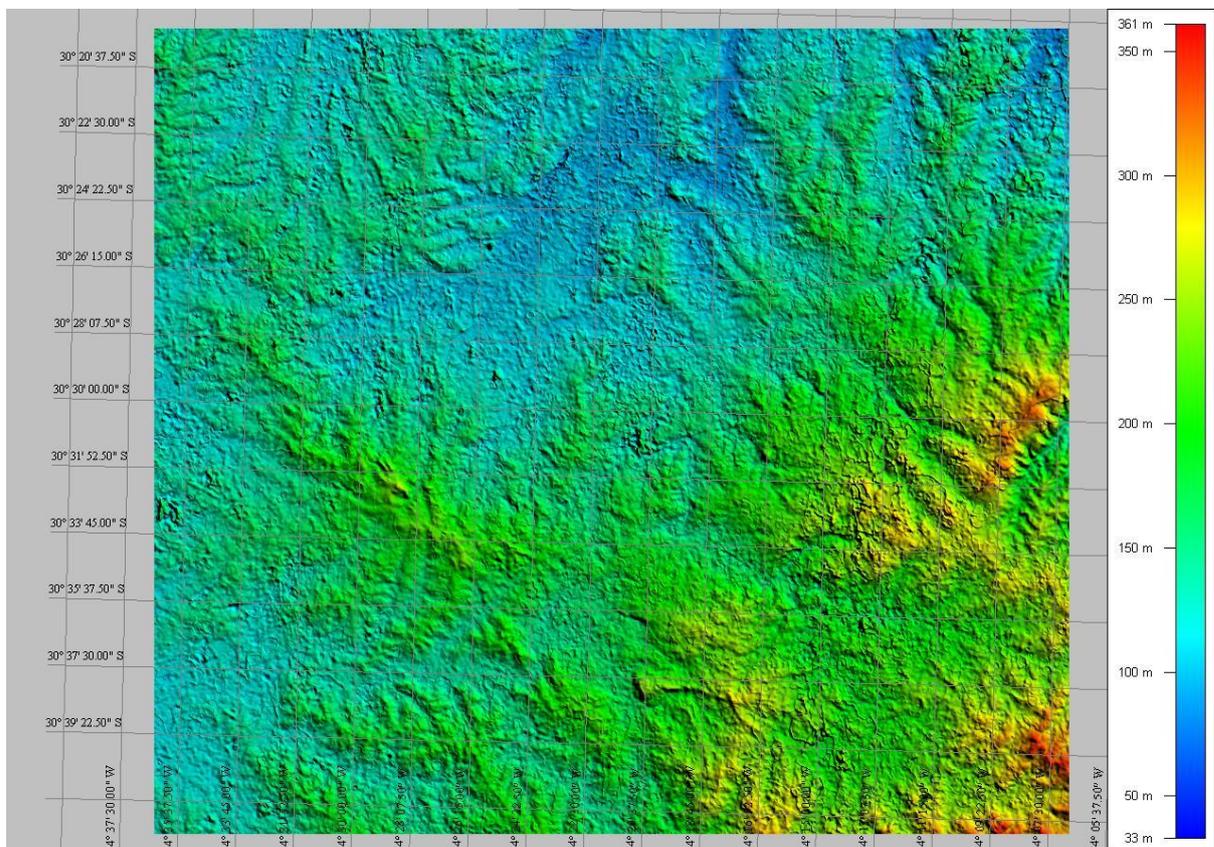
**Figura 15** - Distribuição espacial dos pontos de controle (PCs) no mosaico Nadir

Cada ponto de controle possui uma monografia própria, onde constam as coordenadas, precisões, fotos e toda a informação necessária para identificação inequívoca

e precisa. É de suma importância a correta identificação, pois a qualidade posicional dos pontos de controle é fator que possui grande peso na geração dos RPCs e na extração do MDE. Um exemplo de monografia utilizada está presente no Anexo B.

### 3.4 – Modelo Digital de Elevação do ASTER (GDEM)

Como dado para validação dos MDEs gerados a partir das combinações de visada do sensor PRISM, optou-se por utilizar o MDE gerado a partir do ASTER - GDEM - da região: ASTGTM\_S31W055 que foi obtido gratuitamente através do endereço eletrônico da NASA (2009a). O arquivo é fornecido no formato GeoTiff, com resolução de 30m e com a altitude referenciada ao EGM-96 (altitude ortométrica - H), podendo ser visualizado na Figura 16:



**Figura 16 - Recorte GDEM para região da área de estudo**

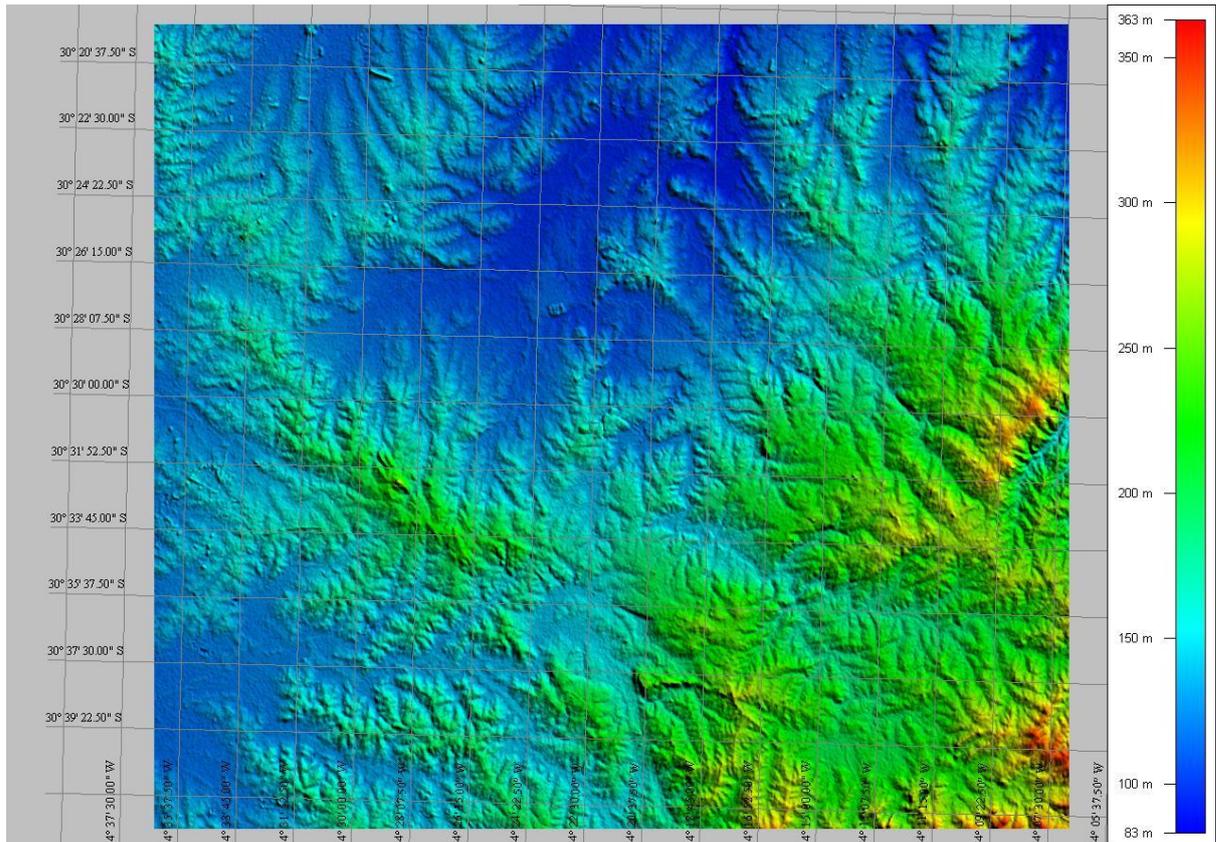
Uns dos motivos para utilização deste modelo global de elevação é a facilidade para aquisição dos dados, assim como os dados do SRTM. Os dados deste modelo

começaram a ser disponibilizados a partir de junho de 2009, e conta com um esforço coletivo para realização de testes de validação.

### 3.5 – Modelo Digital de Elevação SRTM -TOPODATA

O modelo Digital de Elevação do SRTM, utilizado neste trabalho, foi o gerado pelo Projeto TOPODATA, obtido através do endereço eletrônico do INPE (2009b). Trata-se da segunda versão de processamento dos dados disponibilizado pelo Instituto.

O SRTM-TOPODATA é baseado na versão 3.0 do SRTM. Foi reamostrado pelo método de Krigagem para resolução de 30m, sendo fornecido no formato \*.grd do software Surfer. Os dados estão estruturados em quadrículas compatíveis com a articulação 1:250.000, portanto, em folhas de 1° de latitude por 1,5° de longitude (INPE, 2009b). A quadrícula onde está inserida a área de estudo é a 30\_555. Na Figura 17 pode-se visualizar o recorte do SRTM para a região da área de estudo:



**Figura 17 – Recorte SRTM – TOPODATA para região da área de estudo**

### 3.6. Equipamentos e Softwares

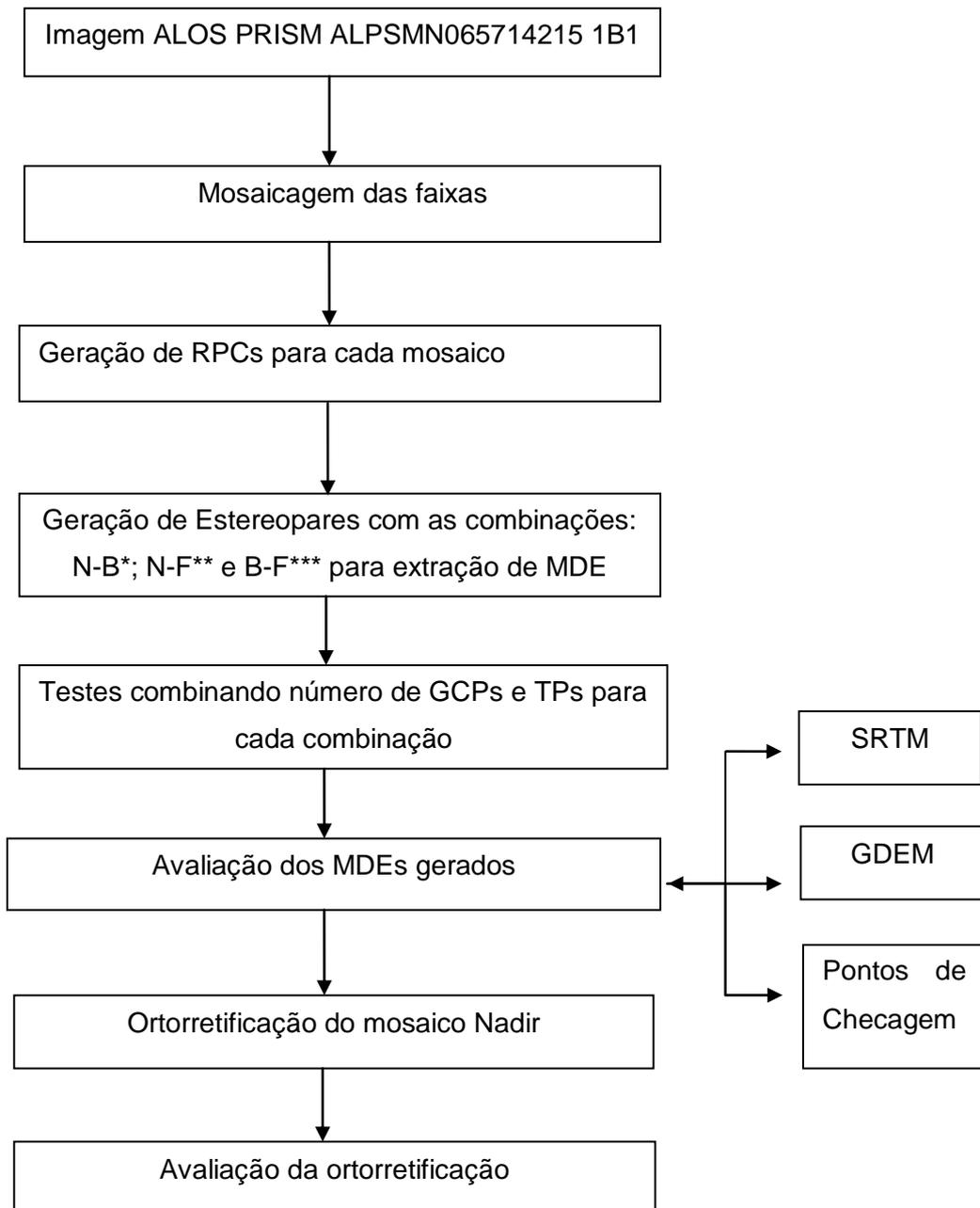
Os equipamentos e softwares utilizados e suas aplicações podem ser visualizados na Tabela 10, de forma sintetizada:

**Tabela 10** - Lista de Equipamentos e Softwares utilizados

<b>Equipamento /Software</b>	<b>Modelo/Versão/Fabricante</b>	<b>Aplicação</b>
Software EZSurv L1L2	Versão 2.20 e 2.40, <i>VGI Solutions</i>	Processamento do transporte de coordenadas e ajustamento dos dados GPS
Software ENVI	Versão 4.7, ITT	Geração de RPCs (POE), extração de MDE, <i>Band Math</i> (Matemática de Bandas) e ortorretificação do mosaico
Software Global Mapper	Versão 8.0	visualização, edição, conversão para a adequação de dados do SRTM-TOPODATA e do GDEM
Software SURFER	Versão 8.0	Visualização, edição e manipulação de dados. Utilização das ferramentas <i>Residuals</i> e <i>Statistics</i> para as análises estatísticas dos MDEs

### 3.7 – Métodos : Diagrama de Execução da Dissertação

Foram feitas diversas investigações a respeito da geração de MDE a partir da combinação das visadas *Backward*, Nadir e *Foward*. O diagrama apresentado na Figura 18 sintetiza os processos executados nesta dissertação:



**Figura 18** - Fluxograma de Execução da Dissertação

N-B\*:Nadir-Backward

N-F\*\*: Nadir Foward

B-F\*\*\*: Backward-Foward

## CAPÍTULO 4 – MÉTODOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 - Mosaicagem da Imagem

As imagens 1B1 são fornecidas com correções geométricas aplicadas, sendo disponibilizadas em 12 arquivos separados para cada CCD (4 ao todo) e para cada uma das três visadas, totalizando 12 faixas ou tiras a serem mosaicadas. Neste processo de junção das faixas, contou-se com o suporte da Empresa Sulsoft para adaptação de uma rotina em linguagem IDL ainda não implementada no software ENVI, para correta mosaicagem. O princípio deste é o pseudo-georreferenciamento das coordenadas de canto de cada uma das faixas, onde há um *overlap* de 32 pixels entre cada CCD (EORC/JAXA, 2008).

Ao final deste processo, tem-se os mosaicos para das três visadas: *Backward*, Nadir e *Foward*, que serão os dados de entrada para os demais processos.

### 4.2 – Geração de RPCs

Nesta etapa procurou-se gerar os RPCs a partir dos pontos de controle (PCs), obtidos através de levantamento geodésico, para cada mosaico (*Backward*, Nadir e *Foward*), obtendo ao final, os Parâmetros de Orientação Exterior que serão associados ao cabeçalho da imagem para cada mosaico (\*.hdr). Optou-se por escolher o Modelo Matemático Polinomial de Primeira Ordem, do tipo genérico, para a determinação dos seis POE. (ENVI, 2009):

$$XS(i) = a_0 + a_1x_i \quad (25)$$

Onde:

- $a_0, a_1$ : são os parâmetros de transformação
- $x$ : coordenada do espaço-imagem
- $XS$ : coordenada do espaço-objeto

Este modelo é o padrão oferecido pelo software ENVI, e tem um relacionamento linear entre a coordenada y da câmera, visto que o alinhamento do sensor é na direção x. São necessários, no mínimo seis pontos de controle para se obter uma solução, sete pontos no caso do MMQ. Polinômios de ordens superiores necessitam de mais pontos de controle para modelar uma superfície com relevo mais acidentado, e também são recomendados para cenas onde há variação dos POE entre as linhas do sensor, que geralmente são derivadas de plataformas menos estáveis, como as aerotransportadas (Adaptado de ENVI, 2009). Para este caso em específico, tendo conhecimento de que o relevo da área de estudo é plana, optou-se por utilizar polinômios de grau 1.

Em um primeiro teste foram utilizados 6 e 7 pontos de controle para cada mosaico, visando gerar os POE com o número mínimo de pontos de controle, na tentativa de manter o valor do EMQ baixo, em torno de 0.003. O resultado foi a extração de um MDE de qualidade incompatível para ser utilizado para ortorretificação. Esta constatação pode ser feita sobrepondo-se as curvas de nível geradas sobre o mosaico. Os pontos de controle utilizados neste teste preliminar: 025, 084, 112, 015, 089, 043 e 124.

No segundo teste foram utilizados mais pontos de controle (18 para Backward, 17 para Nadir e 15 para Foward). Notou-se que houve uma ligeira alteração nos valores do POE ( $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $Z_s$ ,  $\kappa$ ,  $\varphi$ ,  $\omega$ ). Desta vez tentou-se ignorar o valor do EMQ– Erro Médio Quadrático- durante o processo e, desta forma, pode-se verificar que muito mais importante que o valor final do EMQ, é a correta identificação dos pontos de controle na cena.

Como resultado deste procedimento, têm-se os parâmetros para realização de orientação exterior do sensor, bem como a estimativa de altitude do momento da tomada da imagem para cada visada. A Tabela 11 traz, de forma resumida, os parâmetros e resultados obtidos nesta etapa para cada uma das visadas:

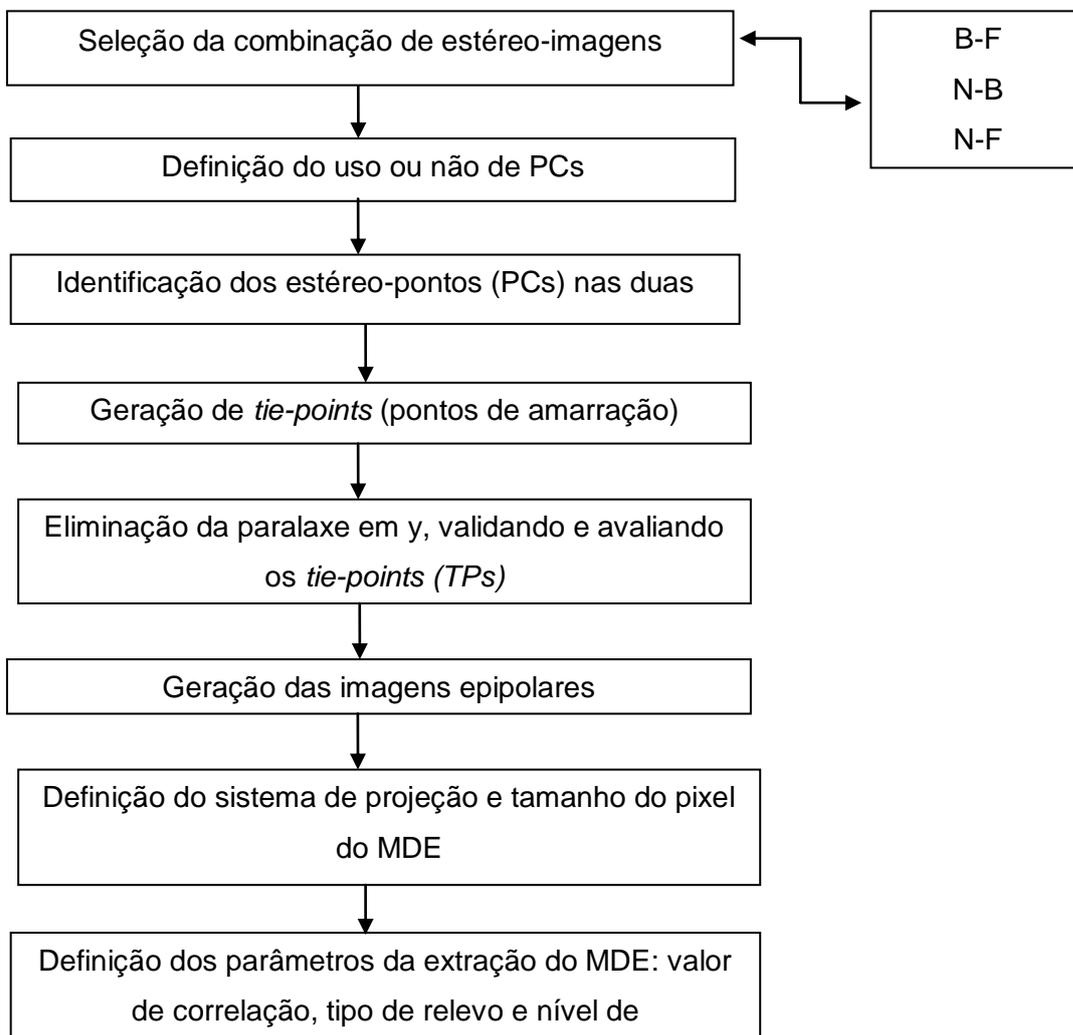
**Tabela 11** - Parâmetros de Orientação Exterior para os mosaicos

<b>Parâmetros de Orientação Exterior</b>	<b>Mosaico Backward</b>	<b>Mosaico Nadir</b>	<b>Mosaico Foward</b>
XS (m)	747520.0406	754026.3012	762220.7340
YS (m)	6339081.674	6621994.6701	6901954.6860
ZS (m)	720988.2836	707392.7804	717812.3655
Omega (graus)	23.542826	0.360319	-23.98950
Phi (graus)	-0.002514	0.436105	-0.346173
Kappa (graus)	-11.437283	-12.935287	-11.645718
EMQ (pixel)	5.449909	1.586281	6.560487
Número de PCs	19	17	15

Na Tabela 11 têm-se as coordenadas do Centro Perspectivo para cada visada (XS, YS e ZS) e os ângulos (Phi, Kappa e Omega) são as rotações necessárias para tornar os referenciais paralelos. Nota-se que foram utilizados menos pontos para a visada Foward, justifica-se por causa da dificuldade na identificação precisa dos pontos. Nesta etapa, somente foram utilizados aqueles pontos que puderam ser identificados com precisão melhor que 4 pixels.

### 4.3 – Extração de MDE

Esta etapa envolve a determinação dos pontos conjugados em combinações disponíveis entre as três visadas. A geração do MDE foi feita a partir da combinação dos mosaicos *Backward* (B), Nadir (N) e *Foward* (F), cujas etapas são descritas na Figura 19:



**Figura 19** – Fluxograma para geração de MDE

Primeiramente foram feitos testes visando avaliar a influência da quantidade de pontos de controle para geração do MDE. Do conjunto de pontos disponíveis, selecionou-se a metade (11 pontos) como número máximo, chegando-se até o mínimo de 6 PCs (Etapa 3). O restante dos pontos foi destinado a serem os pontos de checagem. Procurou-se fazer uma boa distribuição espacial dos pontos e que o PC 75, que contém a maior cota altimétrica, estivesse presente em todas as combinações geradas.

Os Pontos de Amarração, *Tie-Points* (TPs), foram gerados automaticamente, optando-se por gerar 25, número recomendado pelo manual do software ENVI. Nesta etapa procura-se diminuir a paralaxe em y para um valor menor ou igual a um pixel, o que só foi possível na combinação B-N.

A janela de procura utilizada foi 81 e janela móvel de 11 (padrão do software). Procurou-se testar uma combinação de janelas maiores: 181 (procura) e 110 (busca). Neste teste, para a combinação N-B, o valor de paralaxe é quase dez vezes menor, no entanto, não se consegue diminuir este valor inserindo ou excluindo TPs, ficando o valor estável. Para as combinações em que uma das visadas era a Forward, este procedimento foi benéfico para se obtivessem valores de paralaxe menores, entretanto, estes não foram menores que o valor estipulado de um pixel. Esta visada (F) apresenta variações de ordem radiométrica e geométrica que dificultam a plena e inequívoca posição dos pontos com precisão melhor que 4 pixels.

Tentou-se avaliar a quantidade mínima de TPs necessários para manter o valor de paralaxe próximo dos valores considerados ideais. Chegou-se a um valor mínimo de 11 pontos, sendo que o software aceita como número mínimo 8 TPs.

Os TPs são importantes para tornar o MDE mais coeso, e mais importante que sua quantidade, seria sua distribuição pela cena. Os outros parâmetros para extração do MDE: correlação de 0.70, janela de 5x5, nível de processamento 4 e tamanho do pixel de 2,5m.

Para todas as combinações procurou-se utilizar os mesmos GCPs nos testes de quantidade de pontos. Com relação ao número de TPs, houve uma variação de acordo com a combinação das visadas, conforme demonstrado na Tabela 12, que resume os resultados desta etapa.

**Tabela 12** - Resultados de paralaxe e quantidade de TPs utilizados

<b>COMBINAÇÃO</b>	<b>PARALAXE INICIAL (pixels)</b>	<b>PARALAXE FINAL (pixels)</b>	<b>QUANTIDADE DE TPs (unidades)</b>
B-N	60	0.87	25
N-F	51	1.18	28
B-F	51	1.56	29

Os pontos de controle (PCs) que fizeram parte da extração do MDEs podem ser visualizados na Tabela 13:

**Tabela 13** - Combinação de PCs utilizados para extração dos MDEs

<b>QUANTIDADE</b>	<b>PCs</b>
11	13, 15B, 25, 59, 75, 84, 89, 99, 107, 43 e 162
10	15B, 25, 59, 75, 84, 89, 99, 107, 43 e 162
09	25, 59, 75, 84, 89, 99, 107, 43 e 162
08	25, 59, 75, 84, 99, 107, 43 e 162
07	25, 59, 75, 84, 99, 43 e 162
06	25, 75, 84, 99, 43 e 162

#### 4.4 - Avaliação dos MDEs

Desta forma gerou-se para cada uma das três combinações, no mínimo, 6 MDEs distintos, totalizando 24 MDEs com resolução de 2.5m. Finalizada esta etapa, decidiram-se quais seriam os critérios para avaliação do MDE a partir dos dados disponíveis para a área de estudo. Optou-se por utilizar, num primeiro teste, os dados SRTM disponibilizados pelo TOPODATA-INPE e o Modelo Digital de Elevação GDEM, gerado a partir do ASTER. A segunda etapa foi a avaliação dos MDEs com os pontos reservados para checagem. Avaliaram-se também o SRTM e o GDEM com os pontos de checagem.

#### 4.4.1 - Comparação dos MDEs gerados com Modelos Globais

Primeiramente comparou-se os dois modelos globais na tentativa de identificar as possíveis variações entre ambos. Tanto SRTM como GDEM possuem resolução de 30m, mas são obtidos por métodos diferentes: interferometria e estereoscopia, respectivamente.

Ao se realizar a operação de *Band Math (Matemática de Bandas)*, identificou-se que mais de 50% dos pontos apresentavam variação altimétrica menor que 9m. Considerando-se que o erro máximo permitido é de 1/3 do valor do pixel, isto é, 10m, pode-se considerar que ambos modelos são muito próximos, embora visualmente o SRTM pareça possuir melhor resolução.

Os resultados podem ser sintetizados na Tabela 14:

**Tabela 14** - Resultados comparativos entre o GDEM e SRTM-TOPODATA

<b>SRTM-GDEM</b>	<b>Mínimo (m)</b>	<b>Máximo (m)</b>	<b>Média (m)</b>	<b>Desvio-Padrão (m)</b>	<b>EMQ(m)</b>
	-100	84	-1.737697	6.576347	0.004438

Os MDE foram gerados com correlação de 0.70, janela de 5x5, nível de processamento 4 e interpolador bilinear, isto é, pelo padrão oferecido pelo software. Selecionou-se uma área comum para todos os MDEs e dados de referência (SRTM e GDEM), compatibilizando-se os dados para o de menor resolução. Os resultados finais podem ser resumidos na Tabela 15:

**Tabela 15** - Resultados da extração do MDE com parâmetros padrão em metros

COMBINAÇÃO	SRTM-TOPODATA					GDEM - ASTER				
	Mín (m)	Máx (m)	Média (m)	Desvio Padrão (m)	EMQ (m)	Mín (m)	Máx (m)	Média (m)	Desvio Padrão (m)	EMQ (m)
N-F11PCs	- 1 1 6	3 6 3	1.110	42.147	0.035	- 1 1 4	361	2.848	42.187	0.036
N-F06PCs	- 9 8	3 6 3	4.023	41.543	0.035	- 1 0 3	361	5.762	41.639	0.035
N-B11PCs	- 1 2 4	5 5 0	0.506	45.893	0.039	- 1 3 0	556	2.245	45.860	0.039
N-B06PCs	- 1 1 9	5 5 0	1.431	45.302	0.038	- 1 2 5	556	3.170	45.336	0.038
B-F11PCs	- 1 2 9	3 5 4	-5.224	29.729	0.025	- 1 2 3	355	-3.487	30.060	0.025
B-F06PCs	- 1 3 0	3 5 4	-1.824	29.390	0.025	- 1 2 5	355	-0.087	29.714	0.025

Com esta configuração, o MDE eleito seria o gerado a partir da NB com 11 PCs para ortorretificação da visada nadir do mosaico.

Numa segunda etapa, visando-se confirmar a melhor combinação entre as visadas que geraria o MDE com menor EMQ (Erro Médio Quadrático). Refez-se o processo de extração de MDE utilizando-se a janela padrão de 5x5, nível de processamento 7, interpolação bilinear e fator de correlação entre as imagens de 0.70. Os resultados obtidos podem ser resumidos na Tabela 16:

**Tabela 16** - Resultados da nova extração de MDE com nível de Processamento 7

COMBI NAÇÃO	SRTM-TOPODATA					GDEM - ASTER				
	Mín (m)	Máx (m)	Média (m)	Desvio Padrão (m)	EMQ (m)	Mín (m)	Máx (m)	Média (m)	Desvio Padrão (m)	EMQ (m)
N-F 11PCs	-106	362	0.5730	41.3541	0.0349	-118	361	2.3089	41.4217	0.0344
N-F 06PCs	-113	362	3.4948	40.7055	0.0343	-118	361	5.2307	40.8299	0.0401
N-B 11PCs	-101	354	1.6375	47.2371	0.0398	-116	355	3.3734	47.5133	0.0366
N-B 06PCs	-149	363	1.6724	43.2888	0.0365	-148	361	3.4101	43.4014	0.0375
B-F 11PCs	-352	641	- 8.0925	49.2509	0.0415	-108	676	2.2056	44.4940	0.0400
B-F 06PCs	-387	353	- 11.906 1	42.9456	0.0362	-354	641	- 7.0694	47.4306	0.0349

Este processamento foi feito visando avaliar a influência do nível de processamento e na qualidade final do MDE gerado. Notou-se que houve uma alteração quanto a combinação com menor desvio-padrão. Avaliando-se somente pelo desvio-padrão, a combinação com menor valor seria a B-F gerada a partir de 11 ou 06PCs ou a N-B11PCs.

Testaram-se também janelas 11x11, 9x9 e 7x7. Notou-se que quanto maior a janela, o resultado do desvio-padrão aumenta, e a imagem final fica com aspecto mais claro, mais suavizado. Conforme se aumenta a janela, recomenda-se diminuir o valor da correlação para até 0,5. Desta forma, níveis de processamento maiores e janelas de correlação também maiores não melhoram de forma significativa os resultados finais.

Procurou-se também gerar as curvas de nível dos MDEs com o propósito de verificar a sua consistência em comparação com os modelos globais e cartas da região em formato raster.

A próxima etapa é a avaliação dos MDEs gerados com os modelos globais SRTM-TOPODATA e GDEM utilizando a ferramenta *Residuals* do Software Surfer versão 8.0, onde foram calculadas as diferenças entre os MDEs (listagem de coordenadas X, Y e Z) e os dados do SRTM em formato grid (.grd).

As três combinações de visadas foram divididas em três regiões distintas, que representam área plana (recorte 01), área acidentada (recorte 02) e área mista (recorte 03). Esta operação de recorte foi realizada no Software *Global Mapper*, versão 8.0, onde cada área selecionada foi salva num arquivo no formato XYZ, com extensão \*.dat, sendo foi comparado com o mesmo recorte do SRTM e GDEM, ambos no formato \*.grid (grd). Desta forma, ao utilizar-se este tipo de análise, faz-se com que para um mesmo pixel, sejam calculados diversos resíduos, tantos quantos existirem pontos coincidentes com a área de cada pixel. Os valores dos resíduos podem ser negativos ou positivos. Se o valor Z no arquivo de dados (MDEs ALOS/PRISM) for maior que o - Z derivado da superfície de referência (SRTM ou GDEM), o valor é positivo. Um valor negativo significa que o valor de Z do arquivo de dados é menor que o valor de Z interpolado para aquele ponto. Neste teste foram testados modelos gerados a partir de 06, 07 e 11 PCs para as combinações B-F, B-N e N-F.

Nestes 9 MDEs foram recortadas as três áreas de estudo: plana, mista e acidentada, sendo comparadas ao SRTM e GDEM. Ao todo foram 54 recortes analisados. Os resíduos apresentados foram analisados estatisticamente. Neste teste, independente da área, todos os valores de EMQ ficaram entre 0.002 e 0.003 m, o que significa que a área é homogênea em termos altimétricos.

#### **4.4.2 - Avaliação dos MDEs com pontos de checagem**

##### **4.4.2.1 – MDEs do Sensor PRISM**

Após a avaliação dos MDEs ALOS/PRISM com os Modelos Digitais de Elevação Globais, estes com as vantagens de serem de fácil aquisição e distribuídos de forma gratuita, fez-se a avaliação utilizando-se os pontos que não participaram de nenhuma etapa do processo. Estes foram denominados Pontos de Checagem, sendo ao todo 13, também bem distribuídos pela imagem.

Optou-se por coletar o valor altimétrico em cada combinação disponível utilizando-se a ferramenta *Pixel Locator* (Localizador de Pixel) do Software ENVI 4.7. Para este teste utilizaram-se as combinações B-F, B-N e N-F gerados a partir de 6, 7 e 11 PCs, feitos com parâmetros de processamento padrão: janela de correlação 5x5 e nível 4. No

software Surfer 8.0 utilizou-se a ferramenta *Statistics* para obter os valores de média, desvio-padrão e EMQ. Ainda assim, para validar os resultados obtidos, utilizou-se a ferramenta *Residuals* do Software Surfer. Os pontos de checagem foram armazenados em um arquivo com coordenadas XYZ em formato \*.dat e os MDEs foram convertidos em formato grid através do Software *Global Mapper*.

Na Tabela 17, apresentam-se os valores altimétricos coletados nos MDEs, obtidos na combinação B-F gerada a partir de 06, 07 e 11 PCs.

**Tabela 17** - Valores de altitude ortométrica obtida para a combinação B-F

<b>Ponto de checagem</b>	<b>E(m)</b>	<b>N(m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>B-F06(m)</b>	<b>B-F07(m)</b>	<b>B-F11(m)</b>
14	751.875.807	6.629.967.967	101.002	84.000	84.000	92.000
78	772.268.918	6.615.918.902	271.836	286.000	287.000	289.000
93	750.850.213	6.612.283.480	155.865	148.000	149.000	154.000
00X3	766.709.506	6.611.218.629	207.781	195.000	196.000	198.000
112	748.681.292	6.615.515.843	168.534	167.000	169.000	174.000
115	756.470.015	6.628.024.515	130.318	111.000	111.000	118.000
124	767.547.289	6.626.175.355	212.353	211.000	211.000	216.000
168	753.285.194	6.634.070.888	106.761	117.000	117.000	125.000
174	764.250.422	6.605.728.994	202.382	191.000	193.000	194.000
02B1	754.862.002	6.637.675.928	98.205	102.000	102.000	110.000
BASE01	753.136.618	6.626.948.034	120.143	103.000	103.000	110.000
BASE02	767.737.705	6.616.480.637	282.559	285.000	285.000	288.000
HFP	775.012.078	6.624.078.665	304.002	306.000	305.000	309.000

Na tabela 18 são apresentados os valores obtidos para a combinação B-N:

**Tabela 18** - Valores de altitude ortométrica obtida para a combinação B-N

<b>Ponto de checagem</b>	<b>E(m)</b>	<b>N(m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>B-N06(m)</b>	<b>B-N07(m)</b>	<b>B-N11(m)</b>
14	751.875.807	6.629.967.967	101.002	86.000	83.000	88.000
78	772.268.918	6.615.918.902	271.836	268.000	274.000	275.000
93	750.850.213	6.612.283.480	155.865	161.000	149.000	153.000
00X3	766.709.506	6.611.218.629	207.781	169.000	169.000	169.000
112	748.681.292	6.615.515.843	168.534	165.000	152.000	156.000
115	756.470.015	6.628.024.515	130.318	107.000	106.000	110.000
124	767.547.289	6.626.175.355	212.353	203.000	210.000	212.000
168	753.285.194	6.634.070.888	106.761	95.000	95.000	101.000
174	764.250.422	6.605.728.994	202.382	185.000	180.000	181.000
02B1	754.862.002	6.637.675.928	98.205	86.000	89.000	94.000
BASE01	753.136.618	6.626.948.034	120.143	96.000	92.000	96.000
BASE02	767.737.705	6.616.480.637	282.559	252.000	254.000	255.000
HFP	775.012.078	6.624.078.665	304.002	271.000	280.000	281.000

E na Tabela 19 são apresentados os valores para a última combinação, N-F:

**Tabela 19** - Valores de altitude ortométrica obtida para a combinação N-F

<b>Ponto de checagem</b>	<b>E(m)</b>	<b>N(m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>N-F06(m)</b>	<b>N-F07(m)</b>	<b>N-F11(m)</b>
14	751.875.807	6.629.967.967	101.002	83.000	82.000	92.000
78	772.268.918	6.615.918.902	271.836	271.000	268.000	264.000
93	750.850.213	6.612.283.480	155.865	142.000	143.000	151.000
00X3	766.709.506	6.611.218.629	207.781	176.000	178.000	197.000
112	748.681.292	6.615.515.843	168.534	184.000	182.000	158.000
115	756.470.015	6.628.024.515	130.318	129.000	127.000	136.000
124	767.547.289	6.626.175.355	212.353	201.000	200.000	203.000
168	753.285.194	6.634.070.888	106.761	99.000	97.000	110.000
174	764.250.422	6.605.728.994	202.382	208.000	207.000	197.000
02B1	754.862.002	6.637.675.928	98.205	105.000	103.000	106.000
BASE01	753.136.618	6.626.948.034	120.143	95.000	94.000	89.000
BASE02	767.737.705	6.616.480.637	282.559	287.000	286.000	281.000
HFP	775.012.078	6.624.078.665	304.002	328.000	324.000	320.000

O resultado final da análise estatística para a combinação B-F, considerando-se a quantidade de PCs utilizados na geração do MDE, pode ser visualizado na Tabela 20. Nota-se que os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) ou Erro Padrão são inferiores ao valor máximo estabelecido pelo PEC para Classe A considerando-se a escala 1:25.000, que é de 3,3 m. Neste caso, todas as combinações apresentadas poderiam ser utilizadas para o processo final de ortorretificação. Esta visada em ângulos opostos de 23.8° consegue delinear melhor – com muito mais nitidez – principalmente a rede de drenagem.

**Tabela 20** - Resultados para combinação B-F

<b>COMBINAÇÕES</b>	<b>B-F06</b>	<b>B-F07</b>	<b>B-F11</b>
Número de Pontos	13	13	13
Soma	-55.741	-49.741	15.259
Mínimo (m)	-19.318	-19.318	-12.318
Máximo(m)	14.164	15.164	18.239
Média	-4.28777	-3.82623	1.17377
Mediana	-1.534	-1.353	3.647
Erro Padrão (EMQ)	3.00201	2.99352	2.94315
Desvio-Padrão	10.8239	10.7933	10.6117

Para a combinação B-N, os resultados estatísticos finais são apresentados na Tabela 21. Nota-se que, utilizando-se o mesmo critério anteriormente apresentado, o único MDE aprovado seria o gerado a partir de 7 PCs (B-N07), por apresentar EMQ menor que 3,3 m.

**Tabela 21** - Resultados para Combinação B-N

<b>COMBINAÇÕES</b>	<b>B-N06</b>	<b>B-N07</b>	<b>B-N11</b>
Número de Pontos	13	13	13
Soma	-217.741	-228.741	-190.74
Mínimo (m)	-38.781	-38.781	-38.781
Máximo (m)	5.135	2.164	3.164
Média (m)	-16.7493	-17.5955	-14.672
Mediana	-15.002	-18.002	-13.002
Erro Padrão (EMQ)	3.54647	3.23549	3.43641
Desvio-Padrão	12.787	11.6657	12.3902

Dando sequência a análise, utilizando-se dos mesmos critérios, o único MDE aprovado para a combinação N-F seria aquele gerado a partir de 11PCS (N-F11), conforme ilustrado na Tabela 22:

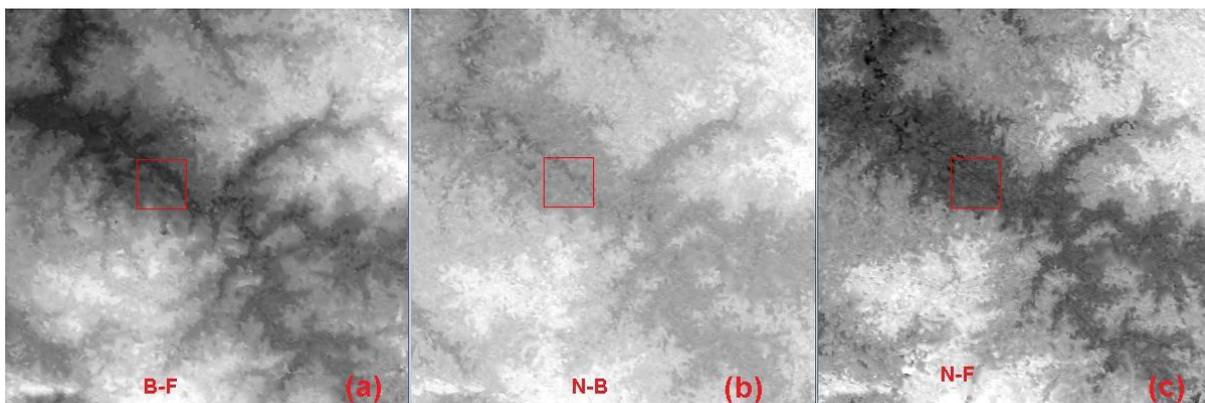
**Tabela 22** - Resultados para Combinação N-F

<b>COMBINAÇÕES</b>	<b>N_F06</b>	<b>N_F07</b>	<b>N-F11</b>
Número de Pontos	13	13	13
Soma	-53.741	-70.741	-57.741
Mínimo (m)	-31.781	-29.781	-31.143
Máximo (m)	23.998	19.998	15.998
Média (m)	-4.13392	-5.44162	-4.4416
Mediana	-1.318	-6.382	-5.382
Erro Padrão (EMQ)	4.41477	4.10051	3.18759
Desvio-Padrão	15.9177	14.7846	11.493

Levando-se em consideração que o melhor MDE é aquele que apresenta menor EMQ, o **MDE B-F11**, com EMQ de 2.943, será o utilizado para ortorretificação do mosaico Nadir. Os MDEs **B-F07** (EMQ=2.99), **MDE B-F06** (EMQ=3.00), **B-N07** (EMQ=3.235), bem como o **N-F11** (EMQ=3.187), também poderiam ser utilizados para geração da ortoimagem.

Desta forma, nota-se que todas as combinações B-F, independente do número de pontos de controle - a partir de 6 -, estariam selecionadas para o processo de ortorretificação.

A visada B-F é a que apresenta também a melhor nitidez em termos visuais quando comparada com as demais combinações, conforme pode ser comprovado na Figura 20 (a):



**Figura 20** - Recorte ilustrativo dos MDEs gerados a partir das combinações de visadas para 11 PCs

#### 4.4.2.2 - Avaliação do SRTM e do GDEM com Pontos de Checagem

A mesma metodologia foi aplicada para avaliação do MDEs do SRTM e GDEM no intuito de avaliar a qualidade dos modelos com os Pontos de Checagem. Na Tabela 23, apresentam-se os valores altimétricos coletados:

**Tabela 23** - Valores altimétricos obtidos para o SRTM e GDEM

Pontos de checagem	E(m)	N(m)	H (m)	SRTM (m)	GDEM(m)
14	751.875.807	6.629.967.967	101.00	105.00	96.00
78	772.268.918	6.615.918.902	271.84	276.00	284.00
93	750.850.213	6.612.283.480	155.87	160.00	163.00
00X3	766.709.506	6.611.218.629	207.78	210.00	203.00
112	748.681.292	6.615.515.843	168.53	173.00	182.00
115	756.470.015	6.628.024.515	130.32	132.00	133.00
124	767.547.289	6.626.175.355	212.35	213.00	220.00
168	753.285.194	6.634.070.888	106.76	109.00	107.00
174	764.250.422	6.605.728.994	202.38	206.00	188.00
02B1	754.862.002	6.637.675.928	98.21	100.00	98.00
BASE01	753.136.618	6.626.948.034	120.14	123.00	123.00
BASE02	767.737.705	6.616.480.637	282.56	283.00	290.00
HFP	775.012.078	6.624.078.665	304.00	307.00	308.00

Obtiveram-se os resultados estatísticos finais, que são apresentados na Tabela 24:

**Tabela 24 - Resultados estatísticos para SRTM e GDEM**

<b>COMBINAÇÕES</b>	<b>SRTM</b>	<b>GDEM</b>
Número de Pontos	13	13
Soma	35.259	33.259
Mínimo (m)	0.441	-14.382
Máximo (m)	4.466	13.466
Média	2.712	2.5584
Mediana	2.857	2.857
EMQ (m)	<b>0.3719</b>	<b>2.1109</b>
Desvio-Padrão (m)	1.341	7.6109

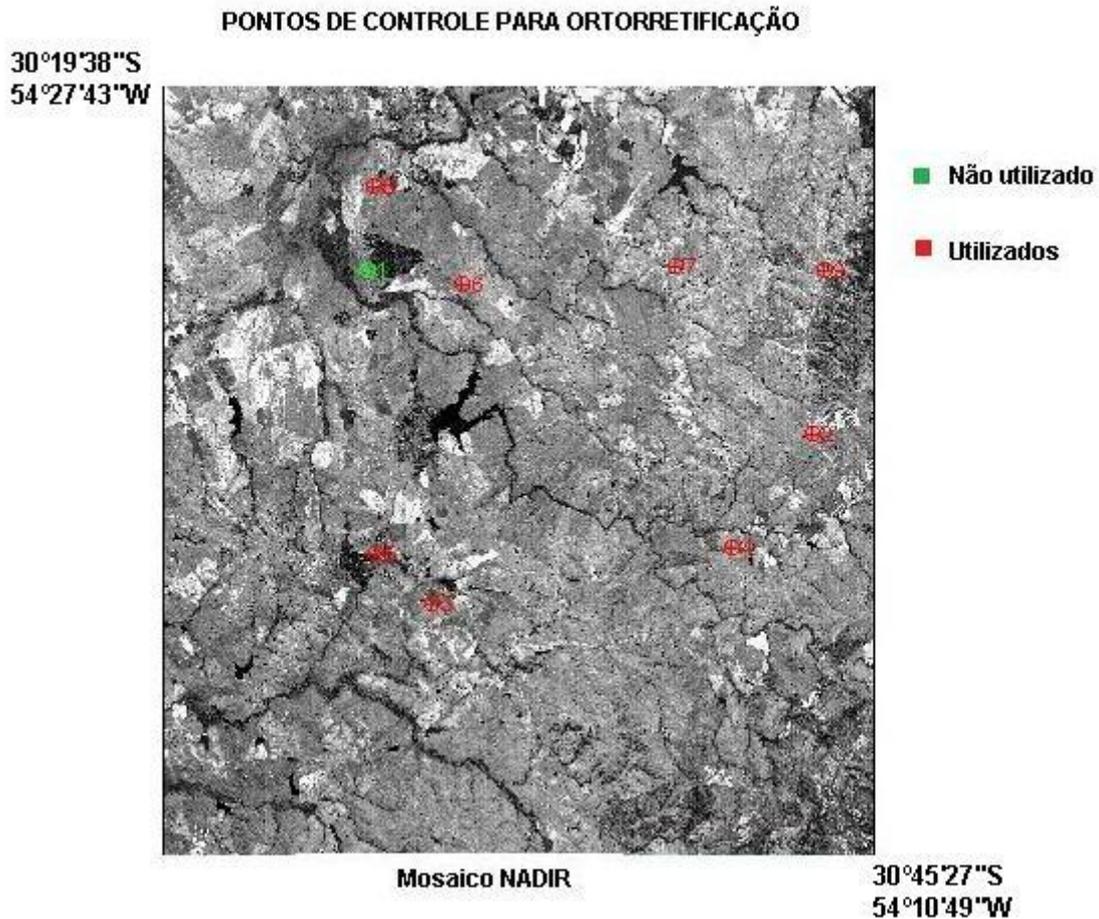
Com base nestes resultados, pode-se observar que o modelo SRTM possui valores de elevação muito próximos aos pontos de checagem. Pode-se assim afirmar que o SRTM é, inusitadamente, o melhor MDE. Este bom desempenho do SRTM pode ser explicado pelo fato de que a área de estudo apresenta pouca variação altimétrica e que a resolução de 30m confere um aspecto mais homogêneo para o relevo da área. O GDEM também apresentou valor de EMQ baixo, no entanto é cerca de quatro vezes maior que o resultado obtido pelo SRTM.

#### **4.5 – Ortorretificação e Avaliação**

Nesta etapa, finalizado processo de avaliação do MDE, fez-se a orrorretificação do mosaico Nadir utilizando-se 8 pontos de controle, que são aqueles que não participaram da etapa de extração do MDE. O processo de avaliação da ortoimagem foi feito através da análise estatística de acurácia dos pontos de checagem através dos testes de t-Student e Qui-quadrado para classificação quanto ao PEC.

A distribuição espacial dos PCs utilizados para a orrorretificação pode ser visualizada na Figura 21. O ponto 01 foi retirado (desligado) do conjunto porque apresentava alto valor de EMQ. De acordo com IBGE (2009c), o número mínimo de pontos de controle necessários para orrorretificação seria 7. Com 8 pontos, o EMQ obtido foi de 0,93. Para

ortorretificação foi utilizado o modelo polinomial de primeiro grau, pois foram utilizadas as informações dos POE gerados para o mosaico.



**Figura 21** - Visualização dos Pontos de Controle utilizados para ortorretificação

#### 4.5.1 - Ortoimagens geradas a partir dos Modelos Globais SRTM e GDEM

Fez-se também a ortorretificação utilizando os modelos globais SRTM e GDEM com o objetivo de avaliar se a ortorectificação gerada a partir desses modelos com resolução de 30m, atenderia ao PEC Classe A, considerando-se a escala 1:25000.

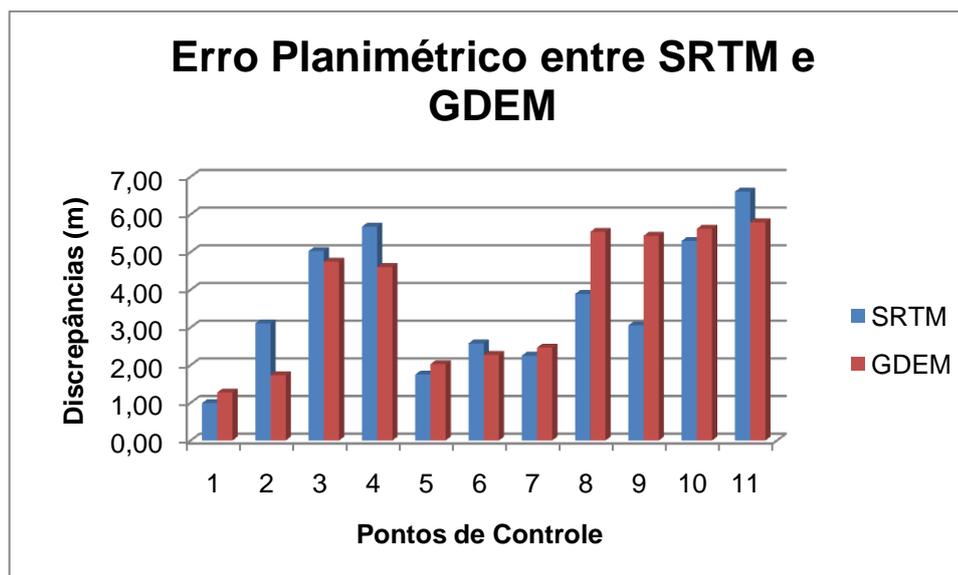
Na Tabela 25, apresentam-se as diferenças planimétricas encontradas nas ortorectificações geradas a partir dos modelos SRTM e GDEM com relação aos pontos de checagem. As coordenadas dos pontos estão referenciadas ao Sistema Geodésico SIRGAS e na Projeção UTM.

**Tabela 25** - Discrepância entre as coordenadas da ortoimagem geradas pelo SRTM e GDEM dos pontos de checagem

PONTO	SRTM			GDEM		
	dx (m)	dy (m)	Erro Plan (m)	dx (m)	dy (m)	Erro Plan (m)
13	0.6500	-0.7500	0.9925	0.2500	1.2500	1.2748
15	-1.9750	-2.4000	3.1082	-1.2000	-1.2500	1.7328
25	-5.0250	0.2000	5.0290	-3.5500	-3.1500	4.7461
43	-0.0750	-5.6750	5.6755	0.9750	-4.5000	4.6044
59	-1.2750	1.2000	1.7509	-2.0250	0.0750	2.0264
75	-0.8000	2.4500	2.5773	-1.0750	2.0000	2.2706
84	-0.3500	-2.2250	2.2524	-1.2500	-2.1250	2.4654
89	1.1250	3.7250	3.8912	3.7500	4.0750	5.5379
99	-1.7250	-2.5250	3.0580	-4.8500	-2.4500	5.4337
107	5.2250	0.8750	5.2978	5.4250	1.4750	5.6219
162	4.2000	5.1000	6.6068	3.5500	4.5750	5.7908
Média	-0.0023	-0.0023	<b>3.6581</b>	0.0000	0.0750	<b>4.6044</b>
Variância	8.1149	9.7988	3.1937	10.1493	8.7533	3.2422
Desvio- Padrão	1.7849	1.7201	1.3419	3.1858	2.9586	1.8006

Nota-se que a média do Erro Planimétrico (Erro Plan) do GDEM é maior que a média obtida pelo SRTM, e que o valor de Desvio -Padrão do SRTM é menor.

Comparando-se o Erro Planimétrico entre o SRTM e GDEM, nota-se que o último apresenta erros planimétricos maiores em quase todos os pontos de checagem, conforme constatado na Figura 22:



**Figura 22** - Erro Planimétrico entre o SRTM e GDEM

#### 4.5.2 – Ortoimagens geradas a partir dos MDEs obtidos pelo PRISM

O MDE B-F11PCs foi utilizado para ortorretificação por ter apresentado o menor valor de EMQ, e por este valor ser inferior ao Erro Padrão máximo permitido para o PEC Classe A, considerando-se a escala 1:25.000.

Optou-se também por selecionar o MDE que apresentou o maior valor de EMQ para fins de análise, neste caso o MDE N-F06PCs, que não atenderia a especificação quanto ao PEC. Complementando esta etapa de investigação, selecionou-se o melhor MDE da combinação B-N (B-N07PCs), e o melhor da combinação N-F(N-F11PCs) com o intuito de avaliar se a geometria da visada chegaria a afetar de alguma forma a qualidade final da ortomagem.

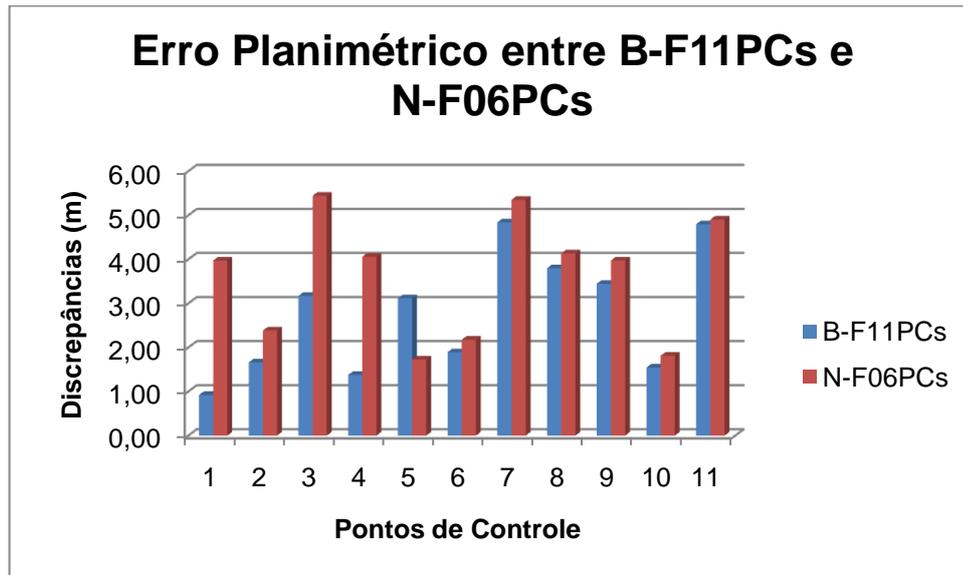
Os valores das diferenças planimétricas do MDE N-F06PCs e do B-F11PCs podem ser comparados e observados na Tabela 26:

**Tabela 26** - Tabela comparativa entre os MDEs do PRISM

PONTO	B-F11PCs			N-F06PCs		
	dx (m)	dy (m)	Erro Plan (m)	dx (m)	dy (m)	Erro Plan (m)
13	0.2000	0.9000	0.9220	3.3250	2.1750	3.9732
15	-1.0000	-1.3250	1.6600	0.2000	-2.3750	2.3834
25	-2.5000	-1.9500	3.1706	-4.7250	-2.7000	5.4420
43	1.3750	0.0750	1.3770	0.5250	-4.0250	4.0591
59	-2.1000	-2.3000	3.1145	-1.7250	-0.0500	1.7257
75	-0.9250	1.6500	1.8916	-1.3250	1.7250	2.1751
84	4.6750	1.2500	4.8392	4.9000	2.1500	5.3509
89	3.5000	1.4750	3.7981	3.5750	2.0750	4.1336
99	2.6500	2.2000	3.4442	1.0750	3.8250	3.9732
107	-1.1750	-1.0000	1.5429	-1.1500	-1.4000	1.8118
162	-4.7000	-0.9500	4.7950	-4.7000	-1.4000	4.9041
Média	0.0000	0.0023	<b>2.7777</b>	-0.0023	0.0000	<b>3.6302</b>
Variância	7.9045	2.4867	1.9038		6.4319	1.9144
Desvio-Padrão	2.8115	1.5769	1.3798		2.5361	1.3836

De modo análogo, buscando-se visualizar as discrepâncias encontradas, gerou-se o Gráfico 04, que ilustra essas diferenças para o B-F11PCs:

Comparando-se os erros planimétricos nas duas combinações, na Figura 23, têm-se que o erro planimétrico apresentado pela combinação N-F06PCs é cerca de um metro maior, embora os valores de desvio-padrão sejam muito próximos.



**Figura 23** - Erro Planimétrico entre B-F11PCs e N-F06PCs

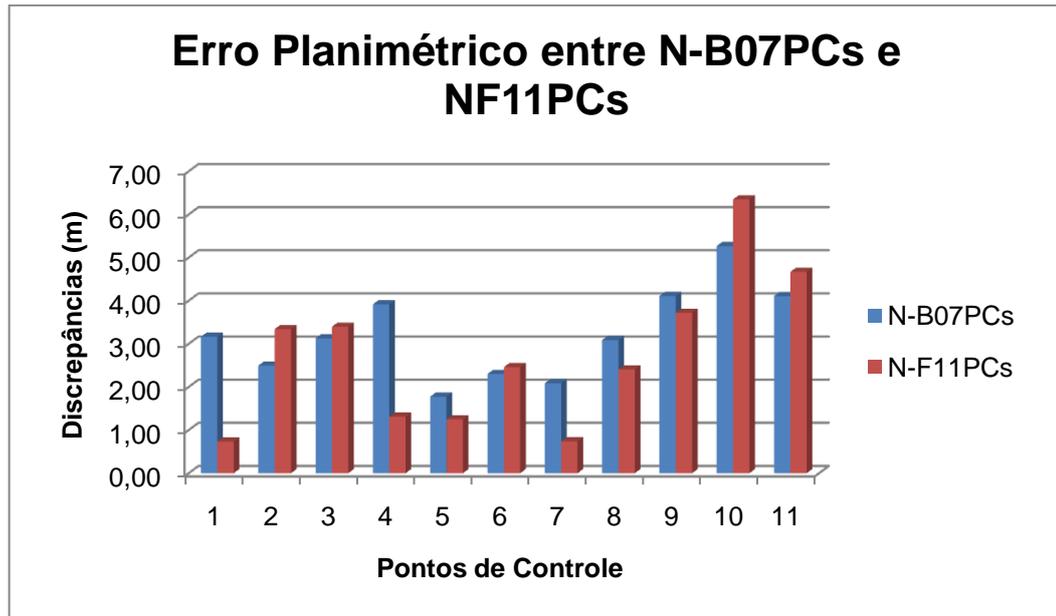
#### 4.5.3 – Ortoimagens obtidas pelos MDEs gerados pelas combinações B-N e N-F

Analisando o MDE da combinação B-N (B-N07PCs) e o da N-F(N-F11PCs) com o intuito de gerar e analisar ortimagens com MDEs oriundos da combinação dessas visadas, obtiveram-se os erros planimétricos, sintetizados na Tabela 27:

**Tabela 27** - Tabela comparativa entre a combinação B-N07PCs e a NF11PCs

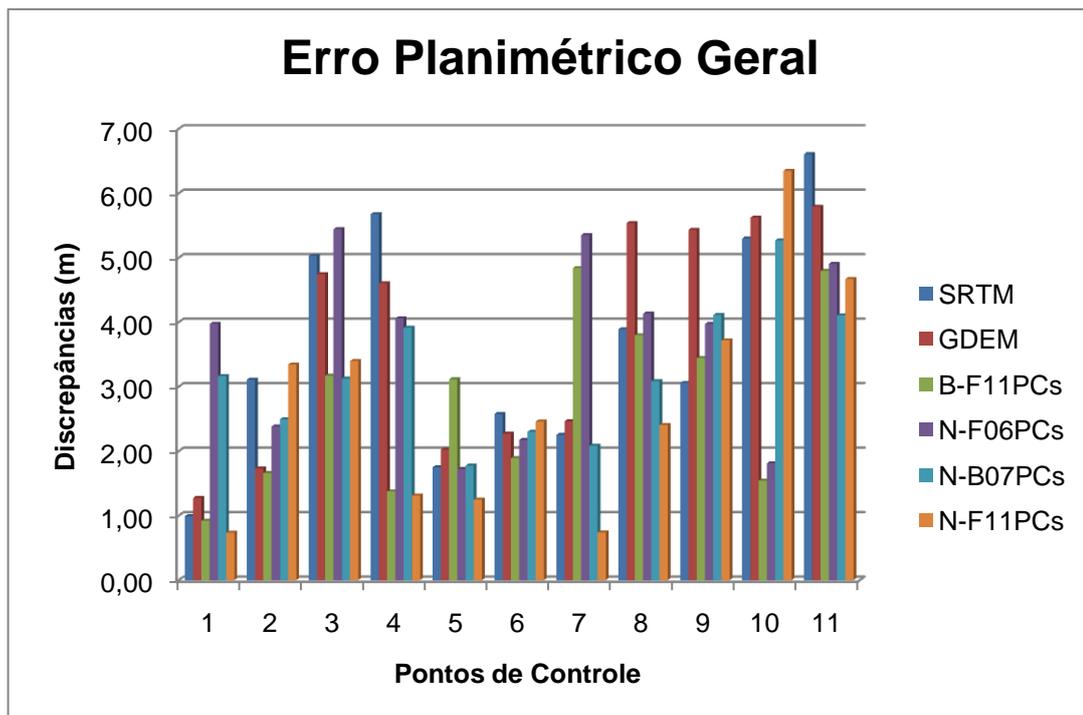
PONTO	NB07			NF11		
	dx (m)	dy (m)	Erro Plan (m)	dx (m)	dy (m)	Erro Plan (m)
13	3.1250	-0.5000	3.1647	0.7000	0.2250	0.7353
15	-1.9750	-1.5250	2.4952	-3.3000	-0.5250	3.3415
25	-2.6250	-1.7000	3.1274	-2.1250	-2.6500	3.3968
43	-1.3500	-3.6750	3.9151	0.8500	-1.0000	1.3124
59	-1.7750	-0.0500	1.7757	-1.0500	-0.6750	1.2482
75	0.6750	2.2000	2.3012	-2.1750	1.1500	2.4603
84	-1.4500	-1.5000	2.0863	-0.1500	-0.7250	0.7404
89	2.5250	1.7750	3.0865	1.3750	1.9750	2.4065
99	-3.9000	-1.3000	4.1110	-3.6750	0.5750	3.7197
107	4.7750	2.2250	5.2679	6.1500	-1.5750	6.3485
162	1.9750	3.6000	4.1062	3.4000	3.2000	4.6690
<b>Média</b>	0.0000	-0.0409	<b>3.2216</b>	0.0000	-0.0023	<b>2.7617</b>
<b>Variância</b>	7.6375		1.1027	8.7253	2.7604	3.0960
<b>Desvio-Padrão</b>	2.7636		1.0501	2.9539		1.7596

Na Figura 24 é apresentado o Erro Planimétrico de ambas combinações, onde nota-se que a combinação N-B07PCs apresenta discrepâncias com valores maiores em quase todos os pontos de checagem.



**Figura 24** – Erro Planimétrico entre N-B07GCPS e N-F11GCPS

Por fim, na Figura 25, apresentam-se visualmente os Erros Planimétricos para todos os MDEs testados.



**Figura 25** - Erro Planimétrico Geral

#### 4.5.4 - Análise Estatística para avaliação da qualidade da ortoimagem

Objetivando analisar a acurácia da ortoimagem, efetuaram-se os testes estatísticos t-Student e Qui-quadrado. Para isso utilizaram-se como parâmetros os valores de média, desvio-padrão e variância do Erro Planimétrico, que podem ser resumidamente visualizados na Tabela 28:

**Tabela 28** - Média, desvio-padrão e variância do Erro Planimétrico para os MDEs analisados

<b>COMBINAÇÃO</b>	<b>SRTM</b>	<b>GDEM</b>	<b>B_F11PCs</b>	<b>N-F06PCs</b>	<b>N-B07PCs</b>	<b>N-F11PCs</b>
Média (m)	3.6581	4.6044	2.7777	3.6302	3.2216	2.7617
Variância (m)	3.1937	3.2422	1.9038	1.9144	1.1027	3.0960
Desvio-Padrão (m)	1.3419	1.8006	1.3798	1.3836	1.0501	1.7596

#### - Teste de t-Student

Considerando os 11 pontos de checagem analisados, totalizando 10 graus de liberdade, e utilizando-se as expressões (18) e (19) do item 2.9.2, procura-se determinar a média populacional esperada para cada conjunto de medidas, isto é, para cada ortoimagem, considerando o Intervalo de Confiança (IC) de 90% conforme PEC.

$$(t_{\alpha,10}) = 1.372, \text{ valor tabelado}$$

Os resultados de tcalc podem ser observados na Tabela 29:

**Tabela 29** - Resultados do Teste de t-Student

	SRTM	GDEM	B-F11PCs	N-F06PCs	N-B07PCs	N-F11PCs
$t\alpha_{10}$	1.372	1.372	1.372	1.372	1.372	1.372
$\mu_0$	4.213	5.349	3.348	4.202	3.656	3.489
$t_{calc}$	-1.372	-1.372	-1.372	-1.372	-1.372	-1.372

Aplicando-se o teste de hipótese com nível de significância de 10%, considerando a escala 1:25.000, PEC Classe A, o Erro Planimétrico máximo admissível é de 12.5m. Desta forma, o teste de hipótese:

$$H_0: \mu \leq 12.5m$$

$$H_1: \mu > 12.5m$$

Como  $t_{calc} \leq t\alpha_{n-1}$ , aceita-se a  $H_0$ , o que significa que tem-se 90% de confiança de que a média populacional dos erros é igual ou inferior ao erro máximo admissível de 12.5m.

#### - Teste do Qui-Quadrado

Neste teste, procura-se avaliar se os valores dos desvios-padrão estão dentro do IC de 90%. Os parâmetros para o cálculo são o desvio-padrão ( $\sigma$ ) e variância ( $S^2$ ). As expressões (21) e (22) do item 2.9.2 foram utilizadas para os cálculos:

$$\chi^2 = 4.87 \text{ valor tabelado da Distribuição Qui-Quadrado para 10 graus de liberdade}$$

Considerando os mesmos pontos de checagem, os resultados do teste podem ser resumidos na Tabela 30:

**Tabela 30** - Resultados do Teste do Qui-quadrado

	SRTM	GDEM	B_F11PCs	N-F06PCs	N-B07PCs	N-F11PCs
$t_{\alpha_{10}}$	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87
$\chi^2_0$	10.87	10.87	10.87	10.87	10.87	10.87
$\sigma$	2.56	2.58	1.98	1.98	1.50	2.52
$\chi^2$	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87

Aplicando-se o teste de hipótese com nível de significância de 10%, considerando o valor do Erro Padrão máximo admissível de acordo com o PEC para a escala 1:25.000 Classe A sendo de 7.5m, tem-se o seguinte teste de hipótese:

$$H_0: \sigma \leq 7.5m$$

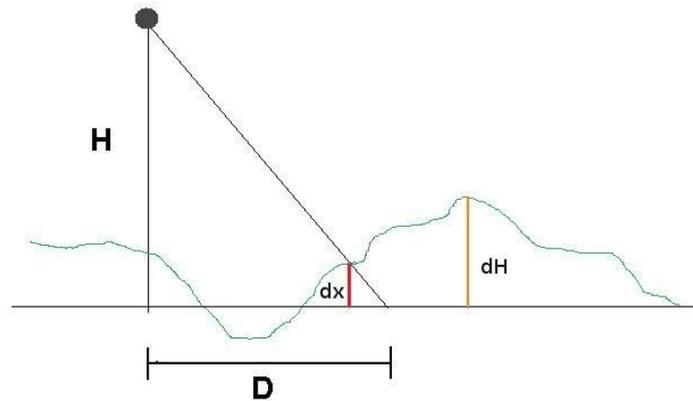
$$H_1: \sigma > 7.5m$$

Como  $\chi^2 \leq \chi^2_{calc}$ , aceita-se a  $H_0$ , o que significa que tem-se 90% de confiança de que o desvio-padrão populacional dos erros é igual ou inferior ao erro máximo admissível.

De acordo com os testes de hipótese efetuados, pode-se afirmar que todas as ortoimagens geradas a partir dos MDEs, sejam os modelos globais SRTM e GDEM, ou aqueles extraídos a partir das combinações das visadas (Nadir, Backward e Foward) atendem a escala 1:25000, PEC Classe A.

Cabe ressaltar que os MDEs gerados a partir das combinações das visadas, em especial a combinação B-F, os valores médios do erro planimétrico encontrados foram inferiores aos valores médios obtidos pelo SRTM e GDEM. Todos os modelos extraídos a partir do PRISM possuem erro padrão inferiores aos modelos globais. Cabe salientar também que a resolução dos modelos globais é quase dez vezes superior ao MDE do PRISM/ALOS, mas no caso específico desta área de estudo, que é praticamente plana, possuindo variação de relevo de no máximo 400 m, o SRTM conseguiu um bons resultados devido a essas características. Ao se efetuar o cálculo do efeito do deslocamento do relevo desta cena considerando-se a escala 1:25000 PEC A, verificou-se que variações altimétricas de até 247 m podem ser consideradas planas.

O cálculo do deslocamento devido ao relevo pode ser melhor visualizado na Figura 26:



**Figura 26** - Deslocamento devido ao relevo

Fonte: Adaptado de DEBIASI (2008)

Desta forma, por semelhança de triângulos, tem-se que:

$$dH = \left( \frac{H}{D} \right) dx \quad (26)$$

Considerando a escala 1:25000 PEC A, o Erro Padrão máximo é de 12,5m (dx). Considerando o valor de H= 692 km; D= 35 km; o valor de dH (deslocamento devido ao relevo) encontrado foi de 247m. Assim, comprova-se que o relevo da área de estudo é plano.

Ao analisar os resultados da ortorretificação das outras visadas, em especial da ortoimagem gerada a partir do MDE NF-11PCs, que mesmo não sendo a que teve melhor resultado na etapa de avaliação do modelo de elevação, obteve ao final um Erro Planimétrico menor, embora muito pequeno se comparado com a B-F11PCs, considerando os pontos de checagem utilizados. Desta forma, os melhores resultados foram obtidos com as combinações de visadas B-F11PCs e N-F11PCs. O SRTM teve bom desempenho devido às características do relevo da área de estudo.

Como produto final, para o mosaico da imagem adquirida, foi elaborada uma carta-imagem ilustrativa (São Gabriel - MI 2981-3 ou SE/SH-21-Z-B-III-3-SE) na escala 1:25000, apresentada no Anexo C. Ainda para este mosaico, seria possível gerar ainda mais duas cartas: Suspiro 2944-1-NO e Suspiro 2944-1-NE.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação teve como objetivo testar as combinações de visadas do sensor ALOS/PRISM para extração de MDEs e posterior ortorretificação da cena nadir. Após inúmeros testes avaliando quantidade de pontos de controle, níveis de processamento, tamanhos de janela de correlação, entre outros parâmetros; pode-se concluir de acordo com os dados disponíveis e característica do relevo da área testada, que:

1 – O Modelo Digital de Elevação gerado a partir das combinações de visadas é compatível com os modelos globais existentes;

2 – Ao compararmos os MDEs globais, nota-se que o SRTM-TOPODATA obteve resultados melhores que o GDEM, supondo-se que o principal motivo seja pelo fato dos dados serem oriundos de interferometria de radar, e teoricamente, serem considerados melhores quando comparados aos sensores imageadores na faixa do visível, que são dependentes das condições atmosféricas, presença de nuvens e suas sombras, bem como outros fatores que influenciam na qualidade da imagem.

3 – Os melhores MDEs são aqueles gerados a partir da combinação B-F, que possuem relação  $B/H=1$ , o que confirma na prática, para este caso, esta teoria. Aparentemente o fato de não ter conseguido reduzir a paralaxe da combinação B-F não casou problemas, pois a combinação foi eleita a melhor.

4 – Os parâmetros utilizados para o processamento foram os considerados “padrão” pelo software. Utilizar níveis de processamento maiores não trouxe, para este caso em específico, nenhuma melhoria para a qualidade do MDE gerado. Níveis mais elevados de processamento exigem maior esforço computacional e o tempo de processamento é cerca de seis à dez vezes mais demorado.

5 – As ortomagens geradas atendem a escala proposta para esta pesquisa, 1:25000, para o Padrão Classe A do PEC.

6 - Este trabalho atingiu seu objetivo ao testar o método e as recomendações aplicadas pelo IBGE para as imagens do sensor PRISM nos níveis de processamento 1B2R e 1B2G, contribuindo assim para a avaliação da imagem 1B1 para escala sistemática de 1:25000

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se não utilizar janelas de correlação muito grandes, isto é, superiores a 9x9 pixels. Quanto aos níveis de processamento, dependendo do caso, podem ser úteis na geração de MDE, mas neste estudo em específico, não acrescentou nenhuma melhoria significativa que justificasse sua utilização.

Seria interessante prosseguir com testes de avaliação das imagens do sensor, e neste ponto, fazer testes em regiões com maior variação altimétrica e com dados de altimetria com escalas maiores, objetivando testar a escala máxima as quais estas imagens poderiam ser utilizadas.

Outra sugestão seria utilizar RPCs obtidos através de efemérides e fornecidos pela JAXA, no entanto esta opção é, para usuários comerciais, dispendiosa.

## REFERÊNCIAS

ABDEL-AZIZ, Y.I., e KARARA, H.M. **Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range Photogrammetry. *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry (pp. 1-18)***. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry. 1971.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1998.

BARROS, R.S. et al. **Avaliação Geométrica de imagens ALOS/PRISM níveis 1B2G e 1B2R ortorretificada – estudo de caso: Itaguaí-RJ**. Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, p. 1731-1738.

BRASIL, **Decreto Lei nº 89.817, de 20 de junho de 1984**. Comissão Nacional de Cartografia: Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em: <<http://www.concar.ibge.gov.br>>. Acesso em: 12 mar. 2009.

BRITO, J.; COELHO, L. **Fotogrametria Digital**. 1ª Ed. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2007. Disponível em: <<http://www.efoto.eng.uerj.br/>>. Acesso em: 03 jun 2007

CCRS – *Canadian Centre of Remote Sensing*. 2009. **SAR Methods**. Disponível em: <[http://ccrs.nrcan.gc.ca/sarrso/index\\_e.php](http://ccrs.nrcan.gc.ca/sarrso/index_e.php)>. Acesso em: 13 mai 2009

CELESTINO, V. S. **Padrão de Exatidão de Mapeamento para Imagens do Sensor QuickBird**. 2007. 105 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA –

CEPSRM/ UFRGS, Porto Alegre. Disponível em:  
<[http://www.ufrgs.br/srm/novo/diss\\_v.html](http://www.ufrgs.br/srm/novo/diss_v.html)>. Acesso em: 11 jun. 2009.

CERQUEIRA, J. D.M; CANDEIAS, A. L. B; SILVA, D. C. **Orientação de imagens IKONOS utilizando a Transformação Matemática APM – *Affine Projection Model*** XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, Belo Horizonte – MG, 2003. Disponível em:  
<[http://www.cartografia.org.br/xxi\\_cbc.htm#TEC5](http://www.cartografia.org.br/xxi_cbc.htm#TEC5)>. Acesso em: 11 jun. 2009.

CHENG, T. et al. **Triplet Matching for DEM Generation with PRISM, ALOS – A Case Study using Air-Borne Three Line Scanner Data**. Istanbul, 2004 Disponível em:  
<<http://www.isprs.org/congresses/istanbul2004/comm3/papers/258.pdf>>.. Acesso em: mar. 2009.

CGIAR – *Consortium for Spatial Information* 2009. **SRTM**. Disponível em:  
<<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/listImages.aspl>>. Acesso em: jun. 2009

COSTA, F. A. L. C., VERGARA, O.R. 2009. **Geometria de aquisição de estereopares em câmeras de imageamento linear de sensores orbitais passivos**. Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, p. 1983-1991.

DEBIASI, P. **Ortorretificação de imagens CCD CBERS-2 através da Transformação DLT**. 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA – CEPSRM/ UFRGS, Porto Alegre.. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/13763>>. Acesso em: 21 jun. 2009.

DIAL, G.; GROCECKI, J. **RPC Replacement Camera Models**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, VOL 34, Part XXX, 2005

DOWMAN, I.; TAO, V. *An Update on the Use of Rational Function For Photogrammetric Restitution*. ISPRS Highlights, p. 22-29, 2002

DRUZINA, A. G. S. **Integração de dados altimétricos obtidos através de diferentes técnicas para geração de um novo Modelo Digital de Elevação**. 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA – CEP SRM/ UFRGS, Porto Alegre. Disponível em: <[http://www.ufrgs.br/srm/novo/diss\\_a.html](http://www.ufrgs.br/srm/novo/diss_a.html)>. Acesso em: 20 out. 2008

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Relatório de Avaliação Planialtimétrica de dados ALOS/PRISM. 2009c. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/alos/relatorios.php>>. Acesso em: ago. 2009

ENVI - 2009 – **Manual do ENVI** – Versão 4.7, 2009.

EORC/JAXA - *Earth Observation Research Center/Japan Aerospace Exploration Agency*. 2008. **Alos Data Users Handbook. Revision C**. Disponível em: <[http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/alos\\_userhb\\_en.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/alos_userhb_en.pdf)>. Acesso em: 12 mai. 2009.

EORC/JAXA - *Earth Observation Research Center/Japan Aerospace Exploration Agency*. 2009a. **Palsar** Disponível em: <<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>> Acesso em: 12 mai 2009.

EORC/JAXA – *Earth Observation Research Center/Japan Aerospace Exploration Agency*. 2009b. **Calibration and Validation**. Disponível em: <[http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/calval/calval\\_index.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/calval/calval_index.htm)>. Acesso em: 22 out. 2009.

FELGUEIRAS, C.A. **Modelagem Numérica de Terreno**. Disponível em: <[http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis\\_ambiente/4mnt.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/4mnt.pdf)>. Acesso em: 02 mar. 2007.

FRASER, C.S., HANLEY, H. B., YAMAKAWA, T. **Sub-metre geopositioning with IKONOS GEO Imagery**. 2001. Joint ISPRS Workshop “High Resolution Mapping from Space 2001”, Hannover - Germany, September, 2001.

FRASER, C.S., DARE, P. M., YAMAKAWA, T. **Digital Surface Modelling from SPOT 5 HRS Imagery using the Affine Projective Model**. 2004. ISPRS, Istanbul, 2004. Disponível em: <<http://www.isprs.org/hrs/PDF/71.pdf>> Acesso em: 02 ago. 2009

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba Ed UFPR, 1994.

GRODECKI, J.; DIAL, G. **Ikonos Geometry Accuracy**. *Proceeding of ISPRS Joint Workshop “High Resolution Mapping from Space”*. Hannover, Germany, 19-21 set. 2001.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2009a **Imagens do Satélite ALOS**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/alos/>>. Acesso em: 22 mar. 2009

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2009b. **Sensores do Satélite ALOS**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/alos/sensores.php>. Acesso em: 22 mar. 2009

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Relatório de Avaliação Planialtimétrica de dados ALOS/PRISM. 2009c. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/alos/relatorios.php>>. Acesso em: ago. 2009

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2009a. **SPRING. Tutorial de Geoprocessamento.** Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html>>. Acesso em: 20 jun. 2009

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2009b. **TOPODATA: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil.** Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/dados.php>>. Acesso em: 20 jun. 2009

JAXA – *Japan Aerospace Exploration Agency*. 2009. ALOS. Disponível em: <[http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index\\_e.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_e.html)>. Acesso em: 02 mai. 2009.

KAMIYA, I. **Geometric characteristics of the early products of ALOS PRISM.** *Bulletin of the Geographical Survey Institute*. Vol. 54, March, 2007. Disponível em: <<http://gisstar.gsi.go.jp/ALOS/papers/bulletin54.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2009

KWON, Y-H. Direct Linear Transformation – DLT, 1998. Disponível em: <<http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html#3d>>. Acesso em: 12 mai. 2008.

KOCAMAN, S.; GRUEN, A. **Geometric Modeling and Validation of ALOS/PRISM Imagery and Products.** The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol XXXVII, Part B1-2. Beijing, 2008 China. Disponível em: <[http://www.photogrammetry.ethz.ch/general/persons/AG\\_pub/08\\_Kocaman\\_AG\\_Beijing\\_geometric.pdf](http://www.photogrammetry.ethz.ch/general/persons/AG_pub/08_Kocaman_AG_Beijing_geometric.pdf)>. Acesso em: 05 ago. 2009.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação.** Curitiba, Universidade Federal Paraná, 134p (1987).

MEDEIROS, N. G. **Orientação exterior de imagens orbitais usando modelos rigorosos com feições retas.** 2007. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – FCT/UNESP. Presidente Prudente, 2007.

MERCHANT, D.C. ***Spatial accuracy standards for large scale line maps.*** *American Congress on Surveying and Mapping.* Denver, 1982

METI/NASA ASTER – Disponível em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>> e <<https://wist.echo.nasa.gov/wist-bin/api/ims.cgi?mode=MAINSRCH&JS=1>>. Acesso em: 23 jun. 2009

MILLER, C.; LAFLAMME, R. A. ***The digital modeling – theory and applications.*** *Photogrammetry Engineering*, v.24, 1958. P. 433-422.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry.** New York: John Wiley & Sons, 2001. 479p.

MITISHITA, E. A.; SARAIVA, C. S. **Modelos Matemáticos para fins de Monorrestituição de Imagens de Alta Resolução IKONOS2 – GEO.** Anais do Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente – SP, p. 278-286, 2002.

MITISHITA, E. A.; SARAIVA, C. S.; MACHADO, A. L. **Monorrestituição de Imagens do Satélite de Alta Resolução IKONOS 2 (GEO), utilizando-se a Transformação DLT e Modelo Digital de Terreno.** Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte – MG, p. 357-364, 05-10 de abril de 2003.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações.** São Paulo, 2ª Ed., Editora Unesp, 2008

MONICO, J. F. G. et al. Acurácia e Precisão: revendo os conceitos de forma acurada. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v.15, nº3, p.469-483, abril-jun, 2009. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/view/15513>>. Acesso em: 02 set. 2009.

NASA – *National Aeronautics and Space Administration* 2008. **SRTM**. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>>. Acesso em: out. 2008

NASA – *National Aeronautics and Space Administration* 2009. **GDEM**. Disponível em: <<https://wist.echo.nasa.gov/wist-bin/api/ims.cgi?mode=MAINSRCH&JS=1>>. Acesso em: mai. 2009

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*. 2009 **LIDAR**. Disponível em: <<http://www.csc.noaa.gov/products/sccoasts/html/tutlid.htm>>. Acesso em: jun. 2009.

OKAMOTO, A., ONO, T., AKAMATSU, S. **Geometric Characteristics of Alternative Triangulation Models for Satellite Imagery**. 1999 - Proceedings of ASPRS, Annual Conference, 1999.

ORUN, A. B.; NATARAJAN, K. **A Modified Bundle Adjustment Software for SPOR Imagery and Photography: Tradeoff**. 1994. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, pp.1431-1437.

PEDRO, P. C. **Ortorretificação de imagens de alta resolução IKONOS e QuickBird utilizando os modelos APM (Affine Projection Model)**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – UFPR, Curitiba, 2005

PINO, L. G. M.; FIRKOWSKI, H. **Avaliação de Modelos de Transformação Bidimensional para a Compatibilização de Bases Cartográficas associadas a diversos Sistemas Geodésicos de Referência**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v.15, nº2, p.259-276, abril-jun, 2009. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/view/14610/9808>>. Acesso em: 02 set. 2009.

POLI, D. **Orientation of satellite and airborne imagery from multi-line pushbroom sensors with a rigorous sensor model** . 2004 International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 35, Part B1, Istanbul, pp.130-135. Disponível em: <[http://www.photogrammetry.ethz.ch/general/persons/daniela\\_pub.html](http://www.photogrammetry.ethz.ch/general/persons/daniela_pub.html)> . Acesso em: 02 mai. 2009.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO GABRIEL -  
<<http://www.saogabriel.rs.gov.br/portal/index.php?Conteudo=localizacao>> Acesso em: jun. 2009.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis – An introduction**. The Australian National University, 185p. Australia, 1999

RIBEIRO, J.C. **Fotogrametria Digital**. Universidade Federal de Viçosa, 2002. <<http://www.ufv.br/nugeo/ufvgeo2002/resumos/jcribeiro.pdf>>. Acesso em: 02 mar. 2009.

SILVA, I. Curso de Fotogrametria Digital; Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, USP; ExpoGEO; 1999.

SALOMONI, R. **Relatório das atividades de campo efetuadas em São Gabriel – RS em 20 e 21/01/2009**. INCRA – SR 11, Porto Alegre, RS, 2009.

STEINMAYER, M. **Extração de Modelos Digitais de Terreno com o Sensor ASTER**. 2003. InfoGeo, Curitiba, ano 5, n.30. Painel Tecnológico, pg 38-39.

TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M. **Modernas Tecnologias de Aquisição de Imagens em Fotogrametria**. Boletim de Ciências Geodésicas, v.6, nº1, p.49-64, Curitiba, 2000.

TOUTIN, T. **Review article: Geometric Processing of Remote Sensing images: models, algorithms and methods**. International Journal of Remote Sensing, 2004.

VALERIANO, M. M; ROSSETTI, D. F. **TOPODATA: seleção de coeficientes geoestatísticos para refinamento unificado de dados SRTM**. 2008. INPE - São José dos Campos. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/documentos.php>>. Acesso em: 25 jun. 2009

VOLOTÃO, C.F.S. **Geração de Ortomosaico para Aplicações Urbanas: Desenvolvimento das Equações e Protótipo Experimental**. Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos, 2001. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/teses/volotao/>>. Acesso em: 21 jun. 2008.

WANG, Y. et al. An **Operational System for Sensor Modeling and DEM Generation of Satellite Pushbroom Sensor Images**. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol XXXVII, Part B1. Beijing, 2008 China. Disponível em: <[http://www.isprs.org/congresses/beijing2008/proceedings/2\\_pdf/128.pdf](http://www.isprs.org/congresses/beijing2008/proceedings/2_pdf/128.pdf)>. Acesso em: 22 jul. 2009.

WOLF, P. R., DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry: with applications in GIS**. 3ª Ed: MacGraw-Hill, New York, 2000.

**ANEXOS****ANEXO A - Relatório de Ajustamento da Rede Geodésica**

EZSurv Post Processor 2.40

RESUMO DO AJUSTE DE REDE

REDE: Rede 1

Projeto: D:\...\BCart\_SGab\obs\processamento\processado.spr [0qc]

Data de ajuste: 27/01/2009 15:05:21 (UTC)

Sistema de coordenadas:UTMSIRGAS [Universal Tran...]Datum: SIRGAS

Modelo de geóide: WORLD [C:\...\System\Geoid\ww15mgh.bin]Unidades: (metros)

## PARÂMETROS DE AJUSTE

-----  
Tipo da região de confiança: 2D+1D Nível de confiança: 68%

Número de Marcos: 15 Número de vetores: 24

Tipo de ajustamento: Distribuído

## RESULTADOS DE AJUSTE

-----  
Interações: 2 Valor crítico do resíduo: 2.876

Graus de liberdade: 30 Resíduo acima do Valor crítico: 0

Fator de variância estimado: 1.0000 Teste de Chi2:0.798 &lt; 1 &lt; 1.341 (PASSOU)

Coordenadas das estações de referência

-----  
Nota: O estado dos códigos são fixados pelo (U)suário ou fixados pelo (S)oftware.

A ordem de fixação é latitude, longitude e altura.

UUU BASE01

WGS84	(metros)	UTMSIRGAS (metros)
Lat: S 30 27 47.01586	+/- 0.008	X: 753136.618 +/- 0.024
Lon: O 54 21 48.69726	+/- 0.024	Y: 6626948.034 +/- 0.008
		SCF: 1.0003906
		CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 132.676 +/- 0.018

Ond: 12.533

NMM: 120.143

## FECHAMENTO

Vetor	DesvioPad		Fechamento por iteração	
	1	2		
0014-0089				
dx:	-4592.263 +/- 0.005	-0.001	-0.001	
dy:	11357.794 +/- 0.005	0.002	0.002	
dz:	-20330.006 +/- 0.004	0.000	0.000	
0014-0093				
dx:	-5705.295 +/- 0.003	-0.001	-0.001	
dy:	6908.445 +/- 0.003	0.000	0.000	
dz:	-15273.985 +/- 0.003	0.001	0.001	
0014-0168				
dx:	2289.154 +/- 0.003	0.001	0.001	
dy:	-939.816 +/- 0.002	-0.000	-0.000	
dz:	3561.321 +/- 0.003	-0.000	-0.000	
0015B-0025				
dx:	-1788.668 +/- 0.003	0.000	0.000	
dy:	2303.289 +/- 0.004	-0.002	-0.002	
dz:	-4944.345 +/- 0.003	0.000	0.000	
0015B-0107				
dx:	829.260 +/- 0.005	-0.000	-0.000	
dy:	8488.014 +/- 0.005	0.009	0.009	
dz:	-10977.387 +/- 0.006	-0.007	-0.007	
0093-0089				
dx:	1113.033 +/- 0.004	-0.001	-0.001	
dy:	4449.348 +/- 0.004	0.003	0.003	
dz:	-5056.016 +/- 0.003	-0.005	-0.005	

0093-0168

dx: 7994.450 +/- 0.004 0.001 0.001  
dy: -7848.260 +/- 0.004 -0.001 -0.001  
dz: 18835.305 +/- 0.004 -0.000 -0.000

0112-P099

dx: -4948.525 +/- 0.003 -0.000 -0.000  
dy: -4345.608 +/- 0.003 -0.000 -0.000  
dz: 1016.238 +/- 0.002 -0.001 -0.001

0168-0089

dx: -6881.418 +/- 0.008 -0.001 -0.001  
dy: 12297.607 +/- 0.007 0.005 0.005  
dz: -23891.326 +/- 0.006 -0.000 -0.000

02B1-0112

dx: -11149.815 +/- 0.007 -0.003 -0.003  
dy: 5838.985 +/- 0.009 0.003 0.003  
dz: -19247.933 +/- 0.004 0.003 0.003

BASE01-0013

dx: 183.716 +/- 0.004 -0.000 -0.000  
dy: -2445.222 +/- 0.005 -0.000 -0.000  
dz: 3596.075 +/- 0.002 -0.000 -0.000

BASE01-0014

dx: -208.549 +/- 0.002 0.000 0.000  
dy: -1992.545 +/- 0.002 0.001 0.001  
dz: 2586.197 +/- 0.002 0.000 0.000

BASE01-0015

dx: -4740.098 +/- 0.005 0.000 0.000  
dy: -6994.887 +/- 0.003 -0.000 -0.000  
dz: 4968.494 +/- 0.005 -0.000 -0.000

BASE01-0015B

dx: -4740.086 +/- 0.004 -0.001 -0.001  
dy: -6994.884 +/- 0.004 0.002 0.002  
dz: 4968.490 +/- 0.004 -0.002 -0.002

## BASE01-0025

dx: -6528.755 +/- 0.004 0.000 0.000  
dy: -4691.598 +/- 0.004 0.002 0.002  
dz: 24.144 +/- 0.004 -0.001 -0.001

## BASE01-0089

dx: -4800.814 +/- 0.003 0.001 0.001  
dy: 9365.256 +/- 0.003 -0.004 -0.004  
dz: -17743.812 +/- 0.002 0.003 0.003

## BASE01-0093

dx: -5913.847 +/- 0.003 0.002 0.002  
dy: 4915.902 +/- 0.004 -0.001 -0.001  
dz: -12687.782 +/- 0.003 -0.005 -0.005

## BASE01-0107

dx: -3910.829 +/- 0.003 0.002 0.002  
dy: 1493.145 +/- 0.004 -0.004 -0.004  
dz: -6008.907 +/- 0.003 0.001 0.001

## BASE01-0112

dx: -6788.709 +/- 0.004 0.001 0.001  
dy: 2286.081 +/- 0.004 -0.002 -0.002  
dz: -9956.331 +/- 0.003 -0.004 -0.004

## BASE01-0115

dx: 3032.318 +/- 0.012 -0.000 -0.000  
dy: 1444.564 +/- 0.010 -0.000 -0.000  
dz: 989.661 +/- 0.013 0.000 -0.000

## BASE01-0162

dx: -326.279 +/- 0.005 -0.000 -0.000  
dy: -6313.229 +/- 0.004 -0.000 -0.000

dz: 8422.928 +/- 0.008 -0.000 -0.000

#### BASE01-0168

dx: 2080.608 +/- 0.003 -0.002 -0.002

dy: -2932.362 +/- 0.003 0.002 0.002

dz: 6147.517 +/- 0.003 0.001 0.001

#### BASE01-02B1

dx: 4361.113 +/- 0.006 -0.003 -0.003

dy: -3552.912 +/- 0.008 0.003 0.003

dz: 9291.593 +/- 0.004 0.002 0.002

#### BASE01-P099

dx: -11737.234 +/- 0.004 0.001 0.001

dy: -2059.530 +/- 0.004 0.001 0.001

dz: -8940.100 +/- 0.003 0.002 0.002

#### COORDENADAS AJUSTADAS

---

0013

WGS84 (metros)

Lat: S 30 25 31.87926 +/- 0.008

Lon: O 54 22 36.48706 +/- 0.024

UTMSIRGAS (metros)

X: 751958.227 +/- 0.024

Y: 6631139.652 +/- 0.008

SCF: 1.0003832

CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 116.253 +/- 0.019

Ond: 12.445

NMM: 103.807

0014

WGS84 (metros)

Lat: S 30 26 09.96522 +/- 0.008

Lon: O 54 22 38.55553 +/- 0.024

UTMSIRGAS (metros)

X: 751875.807 +/- 0.024

Y: 6629967.967 +/- 0.008

SCF: 1.0003827

CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 113.477 +/- 0.018

Ond: 12.475

NMM: 101.002

0015

WGS84 (metros)

Lat: S 30 24 39.72877 +/- 0.009

Lon: O 54 26 45.72132 +/- 0.024

UTMSIRGAS (metros)

X: 745342.599 +/- 0.024

Y: 6632898.029 +/- 0.009

SCF: 1.0003426

CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 140.929 +/- 0.019

Ond: 12.482

NMM: 128.447

0015B

WGS84 (metros)

Lat: S 30 24 39.72889 +/- 0.008

Lon: O 54 26 45.72088 +/- 0.024

UTMSIRGAS (metros)

X: 745342.611 +/- 0.024

Y: 6632898.025 +/- 0.008

SCF: 1.0003426

CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 140.934 +/- 0.018

Ond: 12.482

NMM: 128.452

0025

WGS84 (metros)

Lat: S 30 27 46.09385 +/- 0.008

Lon: O 54 26 50.06590 +/- 0.024

UTMSIRGAS (metros)

X: 745096.999 +/- 0.024

Y: 6627161.150 +/- 0.008

SCF: 1.0003411

CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 133.328 +/- 0.018

Ond: 12.622

NMM: 120.706

0089

WGS84 (metros)  
Lat: S 30 38 55.00367 +/- 0.008  
Lon: O 54 20 50.30401 +/- 0.024

UTMSIRGAS (metros)  
X: 754209.950 +/- 0.024  
Y: 6606338.395 +/- 0.008  
SCF: 1.0003973  
CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 190.250 +/- 0.018  
Ond: 12.905  
NMM: 177.345

0093

WGS84 (metros)  
Lat: S 30 35 44.63478 +/- 0.008  
Lon: O 54 23 01.59851 +/- 0.024

UTMSIRGAS (metros)  
X: 750850.213 +/- 0.024  
Y: 6612283.480 +/- 0.008  
SCF: 1.0003763  
CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 168.721 +/- 0.018  
Ond: 12.856  
NMM: 155.865

0107

WGS84 (metros)  
Lat: S 30 31 32.68567 +/- 0.008  
Lon: O 54 23 15.28678 +/- 0.024

UTMSIRGAS (metros)  
X: 750665.533 +/- 0.024  
Y: 6620051.544 +/- 0.008  
SCF: 1.0003752  
CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 173.247 +/- 0.018  
Ond: 12.712  
NMM: 160.534

0112

WGS84 (metros)  
Lat: S 30 34 01.36703 +/- 0.008

UTMSIRGAS (metros)  
X: 748681.292 +/- 0.024

Lon: O 54 24 25.75582 +/- 0.024

Y: 6615515.843 +/- 0.008

SCF: 1.0003630

CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 181.356 +/- 0.018

Ond: 12.822

NMM: 168.534

0115

WGS84 (metros)

UTMSIRGAS (metros)

Lat: S 30 27 09.54112 +/- 0.012

X: 756470.015 +/- 0.025

Lon: O 54 19 44.77922 +/- 0.025

Y: 6628024.515 +/- 0.012

SCF: 1.0004115

CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 142.786 +/- 0.024

Ond: 12.468

NMM: 130.319

0162

WGS84 (metros)

UTMSIRGAS (metros)

Lat: S 30 22 29.89112 +/- 0.010

X: 749420.447 +/- 0.024

Lon: O 54 24 16.38934 +/- 0.024

Y: 6636805.956 +/- 0.010

SCF: 1.0003675

CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 129.915 +/- 0.020

Ond: 12.316

NMM: 117.599

0168

WGS84 (metros)

UTMSIRGAS (metros)

Lat: S 30 23 55.75294 +/- 0.008

X: 753285.194 +/- 0.024

Lon: O 54 21 49.35435 +/- 0.024

Y: 6634070.888 +/- 0.008

SCF: 1.0003915

CM: O 57

## Elevação (metros)

Alt: 119.114 +/- 0.018

Ond: 12.353

NMM: 106.761

## 02B1

WGS84 (metros)

Lat: S 30 21 57.56703 +/- 0.009

Lon: O 54 20 53.48550 +/- 0.024

UTMSIRGAS (metros)

X: 754862.002 +/- 0.024

Y: 6637675.928 +/- 0.009

SCF: 1.0004014

CM: O 57

## Elevação (metros)

Alt: 110.426 +/- 0.019

Ond: 12.221

NMM: 98.205

## P099

WGS84 (metros)

Lat: S 30 33 22.09648 +/- 0.008

Lon: O 54 28 31.63781 +/- 0.024

UTMSIRGAS (metros)

X: 742155.571 +/- 0.024

Y: 6616874.184 +/- 0.008

SCF: 1.0003235

CM: O 57

## Elevação (metros)

Alt: 230.790 +/- 0.018

Ond: 12.867

NMM: 217.924

## RESÍDUOS

-----

Vetor	DesvioPad	Resíduo (Limite 2.876)	Resíduo Padrão
-------	-----------	------------------------	----------------

## 0014-0089

dx: -4592.263 +/- 0.005 -0.001 -0.195

dy: 11357.794 +/- 0.005 0.002 0.488

dz: -20330.006 +/- 0.004 0.000 0.049

0014-0093

dx:	-5705.295 +/- 0.003	-0.001	-0.431
dy:	6908.445 +/- 0.003	0.000	0.185
dz:	-15273.985 +/- 0.003	0.001	0.237

0014-0168

dx:	2289.154 +/- 0.003	0.001	0.552
dy:	-939.816 +/- 0.002	-0.000	-0.012
dz:	3561.321 +/- 0.003	-0.000	-0.270

0015B-0025

dx:	-1788.668 +/- 0.003	0.000	0.034
dy:	2303.289 +/- 0.004	-0.002	-1.129
dz:	-4944.345 +/- 0.003	0.000	0.205

0015B-0107

dx:	829.260 +/- 0.005	-0.000	-0.105
dy:	8488.014 +/- 0.005	0.009	2.403
dz:	-10977.387 +/- 0.006	-0.007	-1.528

0093-0089

dx:	1113.033 +/- 0.004	-0.001	-0.296
dy:	4449.348 +/- 0.004	0.003	0.835
dz:	-5056.016 +/- 0.003	-0.005	-2.508

0093-0168

dx:	7994.450 +/- 0.004	0.001	0.277
dy:	-7848.260 +/- 0.004	-0.001	-0.471
dz:	18835.305 +/- 0.004	-0.000	-0.001

0112-P099

dx:	-4948.525 +/- 0.003	-0.000	-0.286
dy:	-4345.608 +/- 0.003	-0.000	-0.282
dz:	1016.238 +/- 0.002	-0.001	-0.946

0168-0089

dx:	-6881.418 +/- 0.008	-0.001	-0.117
-----	---------------------	--------	--------

dy:	12297.607 +/- 0.007	0.005	0.840
dz:	-23891.326 +/- 0.006	-0.000	-0.065

## 02B1-0112

dx:	-11149.815 +/- 0.007	-0.003	-0.720
dy:	5838.985 +/- 0.009	0.003	0.541
dz:	-19247.933 +/- 0.004	0.003	1.013

## BASE01-0013

dx:	183.716 +/- 0.004	0.000	0.000
dy:	-2445.222 +/- 0.005	-0.000	0.000
dz:	3596.075 +/- 0.002	0.000	0.000

## BASE01-0014

dx:	-208.549 +/- 0.002	0.000	0.028
dy:	-1992.545 +/- 0.002	0.001	0.435
dz:	2586.197 +/- 0.002	0.000	0.063

## BASE01-0015

dx:	-4740.098 +/- 0.005	-0.000	0.000
dy:	-6994.887 +/- 0.003	-0.000	0.000
dz:	4968.494 +/- 0.005	-0.000	0.000

## BASE01-0015B

dx:	-4740.086 +/- 0.004	-0.001	-0.355
dy:	-6994.884 +/- 0.004	0.002	0.670
dz:	4968.490 +/- 0.004	-0.002	-0.634

## BASE01-0025

dx:	-6528.755 +/- 0.004	0.000	0.042
dy:	-4691.598 +/- 0.004	0.002	1.137
dz:	24.144 +/- 0.004	-0.001	-0.262

## BASE01-0089

dx:	-4800.814 +/- 0.003	0.001	0.602
dy:	9365.256 +/- 0.003	-0.004	-1.890
dz:	-17743.812 +/- 0.002	0.003	2.520

## BASE01-0093

dx:	-5913.847 +/- 0.003	0.002	0.786
dy:	4915.902 +/- 0.004	-0.001	-0.361
dz:	-12687.782 +/- 0.003	-0.005	-2.483

## BASE01-0107

dx:	-3910.829 +/- 0.003	0.002	1.191
dy:	1493.145 +/- 0.004	-0.004	-2.162
dz:	-6008.907 +/- 0.003	0.001	1.133

## BASE01-0112

dx:	-6788.709 +/- 0.004	0.001	0.387
dy:	2286.081 +/- 0.004	-0.002	-0.696
dz:	-9956.331 +/- 0.003	-0.004	-1.817

## BASE01-0115

dx:	3032.318 +/- 0.012	-0.000	0.000
dy:	1444.564 +/- 0.010	0.000	0.000
dz:	989.661 +/- 0.013	-0.000	0.000

## BASE01-0162

dx:	-326.279 +/- 0.005	-0.000	0.000
dy:	-6313.229 +/- 0.004	-0.000	0.000
dz:	8422.928 +/- 0.008	0.000	0.000

## BASE01-0168

dx:	2080.608 +/- 0.003	-0.002	-0.820
dy:	-2932.362 +/- 0.003	0.002	0.797
dz:	6147.517 +/- 0.003	0.001	0.283

## BASE01-02B1

dx:	4361.113 +/- 0.006	-0.003	-0.723
dy:	-3552.912 +/- 0.008	0.003	0.518
dz:	9291.593 +/- 0.004	0.002	1.013

## BASE01-P099

dx: -11737.234 +/- 0.004	0.001	0.276
dy: -2059.530 +/- 0.004	0.001	0.279
dz: -8940.100 +/- 0.003	0.002	0.910

### CORREÇÕES DE MARCO

Coordenadas de início	Correção por iteração	
	1	2
0013		
X: 751958.228	-0.000	-0.000
Y: 6631139.653	-0.000	-0.000
Z: 116.253	-0.000	-0.000
0014		
X: 751875.807	0.000	0.000
Y: 6629967.967	-0.000	-0.000
Z: 113.478	-0.001	-0.001
0015		
X: 745342.599	-0.000	-0.000
Y: 6632898.029	0.000	0.000
Z: 140.929	-0.000	-0.000
0015B		
X: 745342.610	0.001	0.001
Y: 6632898.027	-0.002	-0.002
Z: 140.935	-0.001	-0.001
0025		
X: 745096.999	-0.000	-0.000
Y: 6627161.151	-0.001	-0.001
Z: 133.328	0.000	0.000
0089		
X: 754209.950	0.001	0.001
Y: 6606338.397	-0.001	-0.001
Z: 190.253	-0.003	-0.003

0093

X:	750850.213	0.000	0.000
Y:	6612283.481	-0.000	-0.000
Z:	168.723	-0.002	-0.002

0107

X:	750665.527	0.005	0.005
Y:	6620051.556	-0.012	-0.012
Z:	173.250	-0.003	-0.003

0112

X:	748681.293	-0.001	-0.001
Y:	6615515.843	0.000	0.000
Z:	181.365	-0.009	-0.009

0115

X:	756470.015	-0.000	-0.000
Y:	6628024.514	0.001	0.001
Z:	142.786	0.000	0.000

0162

X:	749420.446	0.000	0.000
Y:	6636805.956	0.000	0.000
Z:	129.915	0.000	0.000

0168

X:	753285.194	0.000	0.000
Y:	6634070.887	0.000	0.000
Z:	119.115	-0.001	-0.001

02B1

X:	754862.003	-0.001	-0.001
Y:	6637675.928	-0.000	-0.000
Z:	110.430	-0.004	-0.004

P099

X: 742155.572      -0.000   -0.000  
 Y: 6616874.187    -0.003   -0.003  
 Z: 230.786        0.004   0.004

#### REGIÕES DE CONFIANÇA 2D+1D

-----  
 Fator de expansão 2D:    1.510    Nível de confiança:            68%  
 Fator de expansão 1D:    0.994

Marco	Maior	Az.	Menor	Vert.
0013	0.036	90	0.013	0.019
0015	0.037	90	0.013	0.019
0015B	0.036	90	0.013	0.018
0025	0.036	90	0.013	0.018
0089	0.036	90	0.012	0.018
0093	0.036	90	0.012	0.018
0107	0.036	90	0.013	0.018
0112	0.036	90	0.012	0.018
0115	0.037	90	0.018	0.024
0162	0.037	91	0.015	0.020
0168	0.036	90	0.012	0.018
02B1	0.036	90	0.013	0.019
P099	0.036	90	0.012	0.018

Vetor	PPM	Distância	Maior	Az.	Menor	Vert.
0014-0089	0.1	23735.997	0.003	27	0.002	0.003
0014-0093	0.2	17707.954	0.003	33	0.002	0.002
0014-0168	0.7	4336.645	0.003	33	0.002	0.002
0015B-0025	0.7	5740.297	0.004	154	0.003	0.003
0015B-0107	0.4	13900.985	0.005	146	0.004	0.004
0093-0089	0.5	6826.340	0.003	27	0.002	0.003
0093-0168	0.2	21915.181	0.003	33	0.002	0.003

0112-P099	0.4	6663.704	0.003	167	0.002	0.004
0168-0089	0.1	27737.712	0.004	28	0.003	0.003
02B1-0112	0.2	22997.718	0.005	2	0.004	0.007
BASE01-0013	0.9	4352.542	0.004	131	0.003	0.006
BASE01-0014	0.8	3271.413	0.002	34	0.002	0.002
BASE01-0015	0.6	9802.189	0.006	117	0.004	0.005
BASE01-0015B	0.4	9802.177	0.004	142	0.003	0.003
BASE01-0025	0.5	8039.670	0.004	149	0.004	0.003
BASE01-0089	0.2	20630.039	0.003	24	0.002	0.003
BASE01-0093	0.2	14836.428	0.003	33	0.002	0.002
BASE01-0107	0.6	7323.318	0.004	158	0.003	0.003
BASE01-0112	0.3	12265.452	0.003	175	0.002	0.004
BASE01-0115	3.9	3501.592	0.014	176	0.008	0.016
BASE01-0162	0.8	10531.336	0.008	169	0.004	0.008
BASE01-0168	0.4	7121.772	0.003	33	0.002	0.002
BASE01-02B1	0.5	10861.685	0.005	1	0.004	0.007
BASE01-P099	0.2	14897.304	0.003	168	0.002	0.004

EZSurv Post Processor 2.40

RESUMO DO AJUSTE DE REDE

REDE: Rede 2

Projeto: D:\...\BCart\_SGab\obs\processamento\processado.spr [0qc]

Data de ajuste: 27/01/2009 15:05:21 (UTC)

Sistema de coordenadas:UTMSIRGAS [Universal Tran...]Datum: SIRGAS

Modelo de geóide: WORLD [C:\...\System\Geoid\ww15mgh.bin]Unidades: (metros)

## PARÂMETROS DE AJUSTE

-----  
Tipo da região de confiança: 2D+1D Nível de confiança: 68%

Número de Marcos: 11 Número de vetores: 13

Tipo de ajustamento: Distribuído

## RESULTADOS DE AJUSTE

-----  
Interações: 2 Valor crítico do resíduo: 2.431

Graus de liberdade: 9      Resíduo acima do Valor crítico: 0  
 Fator de variância estimado: 1.0000    Teste de Chi2: 0.689 < 1 < 1.824 (PASSOU)

#### Coordenadas das estações de referência

-----

Nota: O estado dos códigos são fixados pelo (U)usuário ou fixados pelo (S)oftware.  
 A ordem de fixação é latitude, longitude e altura.

#### UUU BASE02

WGS84	(metros)	UTMSIRGAS (metros)
Lat: S 30 33 15.27627	+/- 0.007	X: 767737.705 +/- 0.020
Lon: O 54 12 32.05959	+/- 0.020	Y: 6616480.637 +/- 0.007
		SCF: 1.0004844
		CM: O 57

#### Elevação (metros)

Alt: 295.152 +/- 0.015  
 Ond: 12.593  
 NMM: 282.559

#### FECHAMENTO

-----

Vetor	DesvioPad		Fechamento por iteração	
	1	2		
0124-0X01				
dx:	3141.617 +/- 0.004	-0.004	-0.004	
dy:	9845.437 +/- 0.003	0.001	0.001	
dz:	-10552.712 +/- 0.005	-0.004	-0.004	
0174-0084				
dx:	2768.017 +/- 0.003	-0.003	-0.003	
dy:	4374.395 +/- 0.003	0.002	0.002	
dz:	-3420.161 +/- 0.002	-0.002	-0.002	
BASE02-0043				
dx:	1326.864 +/- 0.008	0.000	0.000	
dy:	-7565.895 +/- 0.007	0.000	0.000	

dz: 11995.637 +/- 0.009 -0.000 -0.000

BASE02-0059

dx: 7061.123 +/- 0.009 -0.031 -0.031

dy: -2466.041 +/- 0.007 0.017 0.017

dz: 10558.857 +/- 0.013 -0.025 -0.025

BASE02-0075

dx: 5816.590 +/- 0.006 -0.000 -0.000

dy: 1070.578 +/- 0.005 0.000 -0.000

dz: 4231.989 +/- 0.006 -0.000 -0.000

BASE02-0078

dx: 3544.245 +/- 0.008 -0.000 -0.000

dy: 2849.954 +/- 0.008 -0.000 -0.000

dz: -380.428 +/- 0.004 -0.000 -0.000

BASE02-0084

dx: -3107.441 +/- 0.003 0.003 0.003

dy: 7021.094 +/- 0.003 -0.003 -0.003

dz: -12700.730 +/- 0.002 0.002 0.002

BASE02-00X3

dx: -2337.163 +/- 0.011 0.000 0.000

dy: 1707.811 +/- 0.014 -0.000 -0.000

dz: -4510.792 +/- 0.005 -0.000 -0.000

BASE02-0124

dx: 2490.653 +/- 0.003 -0.001 -0.001

dy: -4189.847 +/- 0.002 -0.000 -0.000

dz: 8377.792 +/- 0.003 -0.002 -0.002

BASE02-0174

dx: -5875.449 +/- 0.003 -0.004 -0.004

dy: 2646.691 +/- 0.003 0.003 0.003

dz: -9280.564 +/- 0.002 -0.002 -0.002

## BASE02-0X01

dx: 5632.261 +/- 0.004 0.004 0.004  
 dy: 5655.591 +/- 0.004 -0.001 -0.001  
 dz: -2174.933 +/- 0.005 0.007 0.007

## BASE02-HFP

dx: 8060.621 +/- 0.005 0.011 0.011  
 dy: 927.477 +/- 0.004 -0.007 -0.007  
 dz: 6686.632 +/- 0.005 0.004 0.004

## HFP-0059

dx: -999.557 +/- 0.007 0.017 0.017  
 dy: -3393.485 +/- 0.006 -0.009 -0.009  
 dz: 3872.183 +/- 0.009 0.013 0.013

## COORDENADAS AJUSTADAS

0043

WGS84 (metros)  
 Lat: S 30 25 45.70184 +/- 0.015  
 Lon: O 54 14 37.53525 +/- 0.023

UTMSIRGAS (metros)  
 X: 764731.270 +/- 0.023  
 Y: 6630409.791 +/- 0.015  
 SCF: 1.0004647  
 CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 166.296 +/- 0.036  
 Ond: 12.309  
 NMM: 153.987

0059

WGS84 (metros)  
 Lat: S 30 26 38.80209 +/- 0.019  
 Lon: O 54 09 51.45144 +/- 0.022

UTMSIRGAS (metros)  
 X: 772325.957 +/- 0.022  
 Y: 6628585.400 +/- 0.019  
 SCF: 1.0005150  
 CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 219.433 +/- 0.028

Ond: 12.264  
NMM: 207.169

0075

WGS84 (metros)  
Lat: S 30 30 35.07876 +/- 0.013  
Lon: O 54 09 11.63784 +/- 0.022

UTMSIRGAS (metros)  
X: 773204.916 +/- 0.022  
Y: 6621281.158 +/- 0.013  
SCF: 1.0005209  
CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 329.521 +/- 0.027  
Ond: 12.429  
NMM: 317.092

0078

WGS84 (metros)  
Lat: S 30 33 29.82771 +/- 0.014  
Lon: O 54 09 41.65077 +/- 0.024

UTMSIRGAS (metros)  
X: 772268.918 +/- 0.024  
Y: 6615918.902 +/- 0.014  
SCF: 1.0005146  
CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 284.389 +/- 0.031  
Ond: 12.553  
NMM: 271.836

0084

WGS84 (metros)  
Lat: S 30 41 14.42225 +/- 0.009  
Lon: O 54 11 32.48937 +/- 0.021

UTMSIRGAS (metros)  
X: 768956.975 +/- 0.021  
Y: 6601683.055 +/- 0.009  
SCF: 1.0004925  
CM: O 57

Elevação (metros)

Alt: 299.559 +/- 0.017  
Ond: 12.820  
NMM: 286.739

00X3

WGS84 (metros)  
 Lat: S 30 36 06.83961 +/- 0.025  
 Lon: O 54 13 05.73217 +/- 0.025

UTMSIRGAS (metros)  
 X: 766709.506 +/- 0.025  
 Y: 6611218.629 +/- 0.025  
 SCF: 1.0004776  
 CM: O 57

Elevação (metros)  
 Alt: 220.485 +/- 0.044  
 Ond: 12.704  
 NMM: 207.781

0124

WGS84 (metros)  
 Lat: S 30 28 00.86023 +/- 0.009  
 Lon: O 54 12 48.18067 +/- 0.021

UTMSIRGAS (metros)  
 X: 767547.289 +/- 0.021  
 Y: 6626175.355 +/- 0.009  
 SCF: 1.0004832  
 CM: O 57

Elevação (metros)  
 Alt: 224.734 +/- 0.018  
 Ond: 12.381  
 NMM: 212.353

0174

WGS84 (metros)  
 Lat: S 30 39 06.93047 +/- 0.009  
 Lon: O 54 14 32.92128 +/- 0.021

UTMSIRGAS (metros)  
 X: 764250.422 +/- 0.021  
 Y: 6605728.994 +/- 0.009  
 SCF: 1.0004615  
 CM: O 57

Elevação (metros)  
 Alt: 215.191 +/- 0.017  
 Ond: 12.809  
 NMM: 202.382

0X01

WGS84 (metros)  
 Lat: S 30 34 37.35359 +/- 0.010  
 Lon: O 54 07 36.47875 +/- 0.021

UTMSIRGAS (metros)  
 X: 775552.403 +/- 0.021  
 Y: 6613754.378 +/- 0.010  
 SCF: 1.0005368

CM: O 57

## Elevação (metros)

Alt: 292.137 +/- 0.019

Ond: 12.559

NMM: 279.579

## HFP

WGS84 (metros)

Lat: S 30 29 02.82745 +/- 0.013

Lon: O 54 08 06.58156 +/- 0.021

UTMSIRGAS (metros)

X: 775012.078 +/- 0.021

Y: 6624078.665 +/- 0.013

SCF: 1.0005331

CM: O 57

## Elevação (metros)

Alt: 316.345 +/- 0.023

Ond: 12.343

NMM: 304.002

## RESÍDUOS

Vetor	DesvioPad	Resíduo (Limite 2.431)	Resíduo Padrão
0124-0X01			
dx:	3141.617 +/- 0.004	-0.004	-0.487
dy:	9845.437 +/- 0.003	0.001	0.137
dz:	-10552.712 +/- 0.005	-0.004	-0.583
0174-0084			
dx:	2768.017 +/- 0.003	-0.003	-0.608
dy:	4374.395 +/- 0.003	0.002	0.559
dz:	-3420.161 +/- 0.002	-0.002	-0.455
BASE02-0043			
dx:	1326.864 +/- 0.008	-0.000	0.000
dy:	-7565.895 +/- 0.007	-0.000	0.000

dz: 11995.637 +/- 0.009      -0.000      0.000

BASE02-0059

dx: 7061.123 +/- 0.009      -0.031      -1.681  
dy: -2466.041 +/- 0.007      0.017      1.162  
dz: 10558.857 +/- 0.013      -0.025      -0.942

BASE02-0075

dx: 5816.590 +/- 0.006      0.000      0.000  
dy: 1070.578 +/- 0.005      -0.000      0.000  
dz: 4231.989 +/- 0.006      -0.000      0.000

BASE02-0078

dx: 3544.245 +/- 0.008      0.000      0.000  
dy: 2849.954 +/- 0.008      -0.000      0.000  
dz: -380.428 +/- 0.004      0.000      0.000

BASE02-0084

dx: -3107.441 +/- 0.003      0.003      0.583  
dy: 7021.094 +/- 0.003      -0.003      -0.672  
dz: -12700.730 +/- 0.002      0.002      0.441

BASE02-00X3

dx: -2337.163 +/- 0.011      -0.000      0.000  
dy: 1707.811 +/- 0.014      -0.000      0.000  
dz: -4510.792 +/- 0.005      0.000      0.000

BASE02-0124

dx: 2490.653 +/- 0.003      -0.001      -0.363  
dy: -4189.847 +/- 0.002      -0.000      -0.064  
dz: 8377.792 +/- 0.003      -0.002      -0.383

BASE02-0174

dx: -5875.449 +/- 0.003      -0.004      -0.743

dy:	2646.691 +/- 0.003	0.003	0.555
dz:	-9280.564 +/- 0.002	-0.002	-0.450

## BASE02-0X01

dx:	5632.261 +/- 0.004	0.004	0.548
dy:	5655.591 +/- 0.004	-0.001	-0.081
dz:	-2174.933 +/- 0.005	0.007	0.769

## BASE02-HFP

dx:	8060.621 +/- 0.005	0.011	2.015
dy:	927.477 +/- 0.004	-0.007	-1.302
dz:	6686.632 +/- 0.005	0.004	0.871

## HFP-0059

dx:	-999.557 +/- 0.007	0.017	1.720
dy:	-3393.485 +/- 0.006	-0.009	-1.170
dz:	3872.183 +/- 0.009	0.013	0.971

## CORREÇÕES DE MARCO

	Coordenadas de início		Correção por iteração	
	1	2		
0043				
X:	764731.269	0.000	0.000	
Y:	6630409.791	-0.000	-0.000	
Z:	166.296	-0.000	-0.000	
0059				
X:	772325.943	0.014	0.014	
Y:	6628585.371	0.029	0.029	
Z:	219.416	0.017	0.017	
0075				
X:	773204.916	-0.000	-0.000	
Y:	6621281.158	0.000	0.000	

Z: 329.521 0.000 0.000

0078

X: 772268.917 0.000 0.000

Y: 6615918.902 0.000 0.000

Z: 284.389 0.000 0.000

0084

X: 768956.977 -0.002 -0.002

Y: 6601683.063 -0.007 -0.007

Z: 299.564 -0.005 -0.005

00X3

X: 766709.506 0.000 0.000

Y: 6611218.629 0.000 0.000

Z: 220.486 -0.001 -0.001

0124

X: 767547.290 -0.002 -0.002

Y: 6626175.357 -0.002 -0.002

Z: 224.734 -0.000 -0.000

0174

X: 764250.423 -0.001 -0.001

Y: 6605728.998 -0.004 -0.004

Z: 215.194 -0.003 -0.003

0X01

X: 775552.407 -0.004 -0.004

Y: 6613754.385 -0.006 -0.006

Z: 292.138 -0.001 -0.001

HFP

X: 775012.073 0.005 0.005

Y: 6624078.656 0.009 0.009

Z: 316.337 0.008 0.008

## REGIÕES DE CONFIANÇA 2D+1D

-----

Fator de expansão 2D: 1.510 Nível de confiança: 68%

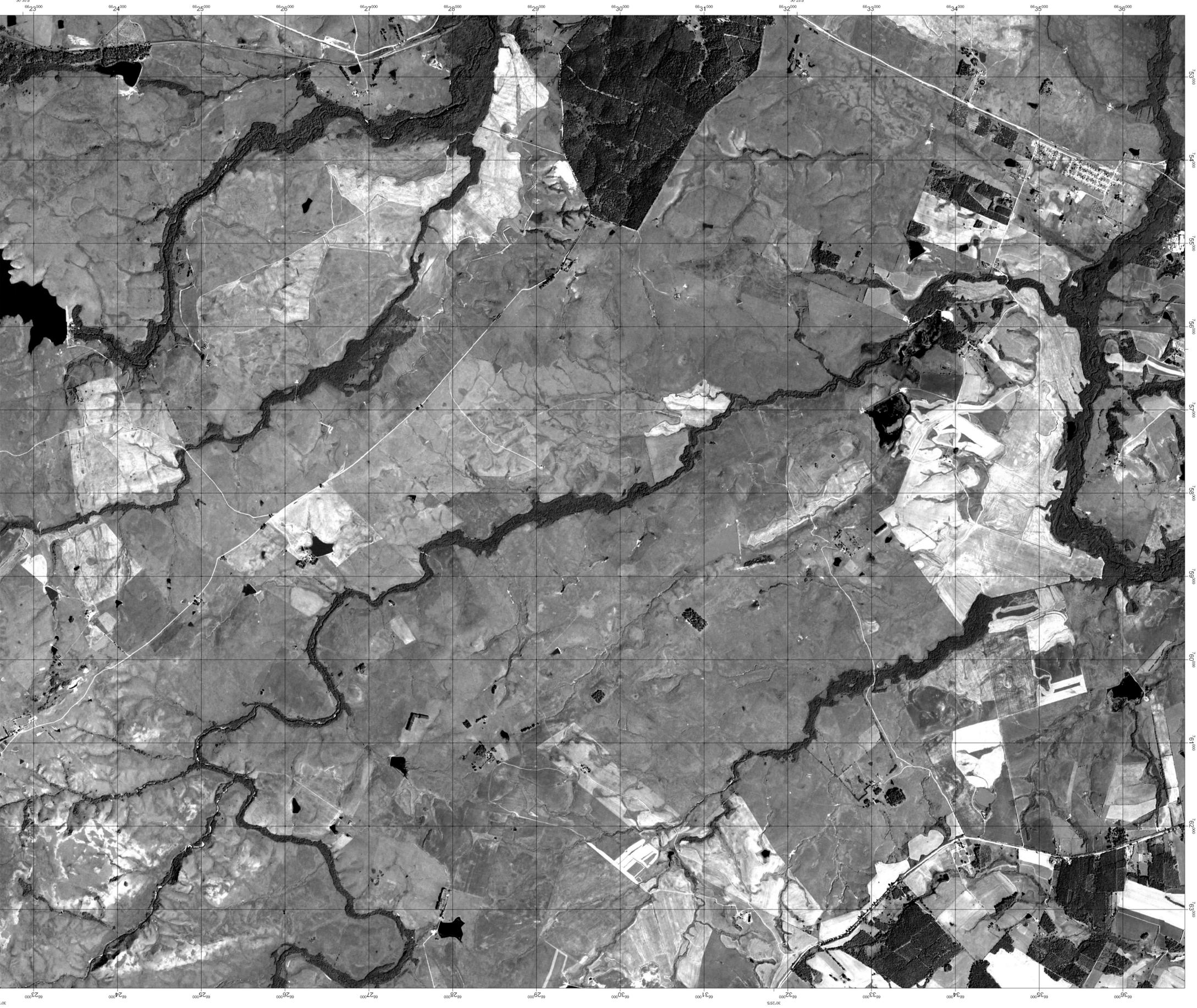
Fator de expansão 1D: 0.994

Marco	Maior	Az.	Menor	Vert.
0043	0.034	91	0.023	0.036
0059	0.033	95	0.028	0.028
0075	0.032	90	0.019	0.027
0078	0.036	92	0.022	0.031
0084	0.031	89	0.014	0.017
00X3	0.039	50	0.036	0.044
0124	0.031	90	0.013	0.018
0174	0.031	88	0.014	0.017
0X01	0.032	91	0.015	0.019
HFP	0.032	90	0.020	0.022

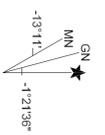
Vetor	PPM	Distância	Maior	Az.	Menor	Vert.
0124-0X01	0.8	14770.315	0.012	134	0.010	0.011
0174-0084	1.5	6204.415	0.009	29	0.006	0.007
BASE02-0043	1.4	14244.249	0.020	175	0.016	0.033
BASE02-0059	2.0	12939.445	0.026	177	0.014	0.024
BASE02-0075	2.2	7272.454	0.016	177	0.012	0.022
BASE02-0078	4.3	4563.840	0.020	134	0.018	0.027
BASE02-0084	0.6	14841.172	0.009	23	0.006	0.007
BASE02-00X3	6.8	5359.682	0.036	8	0.023	0.042
BASE02-0124	0.8	9692.551	0.008	114	0.007	0.010
BASE02-0174	0.9	11298.444	0.010	26	0.006	0.007
BASE02-0X01	1.4	8272.751	0.012	142	0.010	0.011
BASE02-HFP	1.6	10514.043	0.017	1	0.010	0.017
HFP-0059	4.6	5244.882	0.024	176	0.012	0.022

**ANEXO B - Exemplo de Monografia de Ponto de Controle**

**ANEXO C - Carta-imagem SH-21-Z-B-III-3-SE**



CEPSRM  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS  
EM SENSORIAMENTO REMOTO  
E METEOROLOGIA



Convergência Meridiana

**ESCALA 1:25.000**

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR

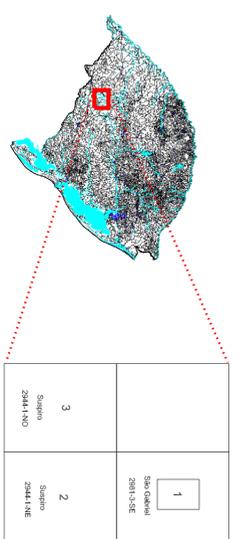
ORIGEM DAS COORDENADAS UTM

EQUADOR E MERIDIANO CENTRAL 51° W/GT

ACRESCIDAS DE 10000 km e 500 km, RESPECTIVAMENTE

SISTEMA GEODÉSICO DE REFERÊNCIA SIRGAS 2000

REFERÊNCIA VERTICAL: MARÉGRAFO DE IMBITUBA -SC



Localização da Área no Estado do Rio Grande do Sul

Dissertação:  
Geração e Avaliação de ortomagem ALOS PRISM 1B1  
Estudo de Caso para São Gabriel - RS

IMAGEM TRIFLET ALOS PRISM 1B1 ALPSMN065714215  
DATA DE AQUISIÇÃO: 19/04/2007

Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) CLASSE A  
Erro-Padrão Obtido: 2,94m  
Erro- Padrão Máximo: 3,3m  
Combinação de Visadas Backward-Forward com 11 Pontos de Controle