

LEILA FREITAS DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE GERADOS A PARTIR
DE IMAGENS DO SENSOR PRISM/ALOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

O48a
2011

Oliveira, Leila Freitas de, 1963-

Análise de modelos digitais de superfície gerados a partir
de imagens do sensor PRISM/ALOS / Leila Freitas de
Oliveira. – Viçosa, MG, 2011.

xviii, 163f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Nilcilene das Graças Medeiros.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 145-161

1. Cartografia. 2. Sensoriamento remoto. 3. Controle de
qualidade. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. cd. 526

LEILA FREITAS DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE GERADOS A PARTIR
DE IMAGENS DO SENSOR PRISM/ALOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 31 de outubro de 2011.

Prof. José Marinaldo Gleriani

Prof. Sergio Donizete Faria

Prof. Mauricio Galo
(Coorientador)

Prof^ª. Nilcilene das Graças Medeiros
(Orientadora)

A Deus, por tudo.

Aos meus queridos pais, Odilon e Rosa, pela dedicação.

Ao Leonardo, por todo apoio e cumplicidade.

“O valor das coisas não está no tempo em que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis.”

(Fernando Pessoa)

AGRADECIMENTOS

A realização dessa dissertação não teria sido possível sem a colaboração e o apoio de várias pessoas e instituições. Por isso, é com muita satisfação que deixo registrados aqui os meus mais sinceros agradecimentos àqueles que, de alguma forma, participaram dessa importante fase de minha vida.

À Diretoria de Geociências do IBGE, pela concessão das licenças para realização do curso de mestrado, assim como pelo apoio proporcionado ao longo do curso.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFV, pela oportunidade da realização do curso.

À Professora Nilcilene Medeiros, pela orientação dedicada, incansável, paciente e irrepreensível ao longo desse período.

Ao Professor Maurício Galo, da UNESP, por sua valiosa e sempre riquíssima contribuição como coorientador.

Ao Dr. José Duarte Correia, da Coordenação de Recursos Naturais do IBGE, grande incentivador e principal inspiração para realização desse trabalho, pelo total apoio ao desenvolvimento dessa pesquisa, pela cessão dos dados dos levantamentos GPS realizados para sua tese de doutorado, por sua inestimável participação nas atividades de campo, pela oportunidade do aprendizado que me proporcionou, e, principalmente, por sua inesgotável paciência.

Ao Professor Carlos Vieira e ao Prof. Afonso dos Santos, pelas ricas discussões em nossa disciplina CIV-794-Tópicos Especiais, sobre modelagem tridimensional de superfícies, que deram sustentação e que basearam a redação da Seção 2.1 dessa dissertação.

À Professora Naíse de Oliveira, da Coordenação de Geografia da UFRJ, por seu empenho e determinação em viabilizar a campanha para medição dos pontos de controle na área de estudo, com despesas custeadas pelo Instituto de Geociências da UFRJ.

Ao Dr. Takeo Tadono, da JAXA, pelo fornecimento gratuito do produto RPC PRISM/ALOS, por sua cordialidade e atenção demonstradas na troca de e-mails técnicos ao longo da pesquisa.

A empresa Threetek, pelo fornecimento de licença temporária do PCI Geomatica v.10.3, e especialmente aos funcionários Helton Thomaz e Edurado Tavares, pelo suporte técnico.

Ao Philip Cheng, da empresa PCI Geomatics, pelo suporte técnico.

A todos os Professores da Pós-graduação em Informações Espaciais da UFV, pelo aprendizado.

Ao Professor Nerilson Santos, do programa de Departamento de Estatística, por ter mudado minha visão da ciência estatística.

Aos amigos da UFV, Afonso, Inês, Graziela, Prata, Wellington, Leonardo, Marquinhos, Giovanni, Sandro, Poletto, Julierme, Marcos, Jonas, Wiener, além de minha querida amiga Tânia, quase UFV, e Professor Willian Dal Poz, pela ótima convivência, pelos bons momentos compartilhados e por tudo que aprendi com eles.

Ao José Carlos e André, da Diretoria de Recursos Humanos, ao Paulo Mithchel, da Diretoria Executiva, ao Luiz Louzada, da ENCE, ao Souza, do setor responsável pela administração da rede do Complexo de Parada de Lucas, todos do IBGE, que mesmo sem me conhecerem, prestaram todo o apoio e ajuda no momento em que precisei.

Ao Jaime Pitaluga, Moema Augusto e Cláudio João, da Coordenação de Cartografia do IBGE, pelo apoio à realização curso.

A Maria Amélia e Guiomar, da Coordenação de Cartografia do IBGE, incansáveis na solução das questões administrativas decorrentes de meu afastamento.

Ao Marcelo Maranhão, João Bosco, Aline, Mariléa e Eduardo Abrahão, da Coordenação de Cartografia do IBGE, pela amizade, pelas discussões técnicas, pelas palavras de apoio nos momentos mais difíceis e pela total confiança demonstrada durante toda essa fase.

Às minhas tias Leda, Maninha e Nicinha, aos meus sogros Lucy e Antônio, meus cunhados Luciana, Marcelo e Tuninho, sempre presentes e preocupados comigo.

Ao meu afilhado Lucas que, mesmo sem saber, muitas vezes me confortou com seus recadinhos *smiles* enviados pelo Skype.

Aos meus amigos de muitos anos, Klaus, Lenita, Lúcio, Márcia, Ubaldo e Telma. Estou voltando.

Aos meus pais, pelo exemplo de vida e ética, e pelo empenho por minha educação.

Ao meu querido companheiro de estrada e de vida, Leonardo, pelo apoio incondicional, pelo carinho, pela cumplicidade, pela confiança que sempre demonstrou. Desculpe pelas ausências. Amo você.

Por fim, agradeço Àquele que tudo determina, que zela por nós e ilumina nossos caminhos por esse mundo tão curioso. Obrigada Deus.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS	xiv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Estrutura do Trabalho.....	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Representação digital de superfícies do terreno.....	5
2.1.1 Descritores da superfície e estratégias de amostragem.....	9
2.1.2 Modelagem da superfície	10
2.1.2.1 Área de influência	12
2.1.2.2 Rede de triângulos.....	13
2.1.2.3 Grade regular quadrada	15
2.1.2.4 Comparação entre estruturas	18
2.1.3 Métodos de interpolação	19
2.1.3.1 Interpolação bilinear.....	22
2.1.3.2 ANUDEM	22
2.2 Sensoriamento remoto orbital.....	23
2.2.1 Sistemas sensores	24
2.3 Satélite ALOS	30
2.3.1 Sensor PRISM.....	32
2.3.1.1 Níveis de processamento	34
2.3.1.2 Calibração dos produtos PRISM 1B2 e especificações de acurácia	35
2.3.1.3 Produto PRISM 1B2- RPC	36
2.4 Distorções geométricas de imagens orbitais	37
2.5 Modelos de correção geométrica.....	39

2.5.1 Modelos rigorosos	40
2.5.1.1 Modelos baseados em posição-rotação	43
2.5.1.2 Modelos baseados em parâmetros de órbita e atitude	45
2.5.2 Modelos generalizados	49
2.5.2.1 Modelo polinomial simples (2D)	49
2.5.2.2 Modelo de funções racionais (3D)	50
2.5.3 Ortorretificação	54
2.6 Extração automática de MDT/MDS	55
2.6.1 Correlação de imagens	56
2.7 Sistema Geodésico de Referência	61
2.7.1 Posicionamento pelo GNSS	63
2.7.1.1 Técnicas de posicionamento	63
2.8 Controle de qualidade de produtos cartográficos	66
2.8.1 Acurácia posicional	67
2.8.2 Controle de qualidade de MDTs/MDSs	69
2.8.3 Análises Estatísticas	73
2.8.3.1 Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)	73
2.8.3.2 Erro linear e erro circular	76
2.8.3.3 Tendência e precisão	77
3 MATERIAL E MÉTODOS	79
3.1 Descrição da área de estudo	79
3.2 Materiais utilizados	81
3.2.1 Dados	82
3.2.1.1 Cenas PRISM/ALOS	82
3.2.1.2 Dados gerados em outras pesquisas	83
3.2.1.3 Dados gerados nessa pesquisa	84
3.2.1.4 Outros dados/produtos	84
3.2.2 Equipamentos e softwares	84
3.3 Metodologia	85
3.4 Aplicação da metodologia	88
3.4.1 Levantamento de campo	88
3.4.1.1 Planejamento e execução	88
3.4.1.2 Pós-processamento	97

3.4.2 Cálculo da ondulação geoidal	99
3.4.3 Correção geométrica visando à ortorretificação	100
3.4.3.1 Modelo rigoroso baseado em parâmetros de órbita e atitude	101
3.4.3.2 Modelo rigoroso baseado em parâmetros de posição-rotação	103
3.4.3.3 Modelo generalizado baseado no uso de RPCs	106
3.4.4 Correção geométrica visando à extração automática de MDSs	107
3.4.4.1 Abordagem MOA	108
3.4.4.2 Abordagem MPR	111
3.4.4.3 Abordagem MRPC	111
3.4.5 Avaliação da qualidade posicional das ortoimagens	114
3.4.6 Avaliação da qualidade posicional dos MDSs	116
3.4.6.1 Avaliação global altimétrica	117
3.4.6.2 Avaliação global planimétrica	118
3.4.6.3 Avaliação local altimétrica	119
4 RESULTADOS E ANÁLISES	122
4.1 Avaliação da qualidade posicional das ortoimagens	122
4.2 Modelos digitais de superfície	124
4.2.1 Abordagem MOA	124
4.2.2 Abordagem MPR	126
4.2.3 Abordagem MRPC	127
4.2.4 Avaliação da qualidade posicional dos MDSs	129
4.2.4.1 Avaliação global altimétrica	129
4.2.4.2 Avaliação global planimétrica	136
4.2.4.3 Avaliação local altimétrica	136
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
APÊNDICE A	162
ANEXO A	163

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formas para superfícies geradas pelos 4 primeiros termos individuais de uma função polinomial.....	12
Figura 2 - Superfície segundo uma distribuição discreta.	13
Figura 3 - Representação TIN de uma superfície: (a) rede de triângulos irregulares; (b) superfície TIN.	14
Figura 4 - Superfície TIN com <i>breakline</i> incorporada.....	15
Figura 5 - Modelo vetorial de uma estrutura baseada em grade regular quadrada.	16
Figura 6 - Representação de superfície contínua, modelada segundo a grade regular quadrada.	17
Figura 7 - Métodos de interpolação: (a) ajustada; (b) aproximada.	21
Figura 8 - Representação do IFOV.	25
Figura 9 - Geometria do sensor de arranjo matricial.....	26
Figura 10 - Geometria do sensor de varredura mecânica.....	27
Figura 11 - Geometria do sensor de arranjo linear tipo <i>pushbroom</i>	28
Figura 12 - Esquema de operação simultânea das câmeras do satélite ALOS com cada câmera (<i>forward</i> , <i>backward</i> , nadir) adquirindo uma linha da imagem no instante t ($t_3 - t_1 = t_5 - t_3 \approx 45''$).....	30
Figura 13 - Configuração das unidades de CCDs do sensor PRISM.....	33
Figura 14 - Instrumento PRISM (a) e geometrias de aquisição <i>triplet</i> e nadir (b).....	33
Figura 15 - Distorções de imagens orbitais devido a variações de atitude do satélite...	38
Figura 16 - Efeitos de variações ao longo dos eixos.....	38
Figura 17 - Efeito provocado pela rotação da Terra.	39
Figura 18 - Distorção devido à curvatura da Terra	39
Figura 19 - Princípio da colinearidade.	41
Figura 20 - Configuração dos sistemas do sensor e terrestre.	44
Figura 21 - Configuração dos sistemas do sensor, da órbita e terrestre.	46
Figura 22 - Representação esquemática da geração dos RPCs.....	52
Figura 23 - Resultado proporcionado pela ortorretificação da imagem.....	54
Figura 24 - Erro planimétrico na ortoimagem decorrente de erro altimétrico do MDT/MDS.....	55
Figura 25 - Correlação automática de imagens.....	57

Figura 26 - Par estereoscópico antes (a) e depois (b) da normalização.	58
Figura 27 - Efeito proporcionado pela normalização do estereopar (b).....	59
Figura 28 - Correspondência realizada ao longo da linha epipolar.....	59
Figura 29 - Pirâmide de Imagens.	60
Figura 30 - Criação de MDS a partir de pares estereoscópicos.	60
Figura 31 - Ondulação geoidal.....	65
Figura 32 - (a) dispersão (σ_p) das observações; (b) valor médio da amostra e tendência (b – <i>bias</i>); (c) acurácia, incorporando efeitos de tendência e a precisão da amostra (σ_p).	68
Figura 33 - Distribuição Normal.	69
Figura 34 - Vista em perspectiva da área no entorno de um ponto com suspeita de erro grosseiro.	71
Figura 35 - Localização da AER na articulação da Folhas 1:50.000 do IBGE.....	80
Figura 36 - Morfologia de “mar de morros” na AER.	80
Figura 37 - Esquema de localização da cena PRISM/ALOS na AER.	81
Figura 38 - Fluxograma correspondente à primeira etapa da metodologia: seleção de pontos de controle preexistentes, levantamento de campo e correção geométrica das imagens.	86
Figura 39 - Fluxograma para geração e classificação de ortoimagens e MDSs.	87
Figura 40 - Pontos e áreas utilizados de AEB e IBGE.....	90
Figura 41 - Detalhe da AEB: pontos e áreas levantadas.	91
Figura 42 - Identificação de um ponto: (a) em campo; (b) na imagem.....	93
Figura 43 - Pontos de controle determinados por levantamento relativo estático.	95
Figura 44 - Áreas determinadas pelo método relativo cinematográfico.....	96
Figura 45 - Levantamentos GPS considerados na pesquisa.....	97
Figura 46 - Modelagem MOA com uso de 6 (a), 7 (b), 9 (c) e 10 (b) pontos de controle.	102
Figura 47 - Imagem antes (a) e após (b) aplicação de contraste.	103
Figura 48: Modelagem MPR com uso de 6 (a), 9 (b) e 15 (c) pontos de controle.	105
Figura 49 - Refinamento do MRPC com 1 (a) e 2 (b) pontos de controle.....	107
Figura 50 - Distribuição dos pontos de controle e de referência utilizados na abordagem MOA.	115
Figura 51 - Distribuição dos pontos de controle e de referência utilizados na abordagem MPR.	115

Figura 52 - Distribuição dos pontos de controle e de referência utilizados na abordagem MRPC.....	116
Figura 53 - Distribuição dos pontos de referência altimétrica (determinados por posicionamento relativo estático).....	117
Figura 54 - Distribuição dos pontos de referência altimétrica (determinados por posicionamento relativo cinemático).	120
Figura 55: Indicadores do sucesso de correlação dos pares estereoscópicos NF, BN, BF e NF-BN-BF, abordagem MOA.....	125
Figura 56: Representação em tons de cinza dos MDSs gerados a partir das visadas NF, BN, BF e NF-BN-BF, abordagem MOA.	126
Figura 57: Resíduos (em <i>pixel</i>) observados nos pontos de controle usados na correção geométrica simultânea das visadas <i>backward</i> , <i>nadir</i> e <i>forward</i> (abordagem MPR).	127
Figura 58: Indicadores do sucesso de correlação dos pares estereoscópicos NF, BN, BF e NF-BN-BF, abordagem MRPC.....	128
Figura 59: Representação em tons de cinza dos MDS gerados a partir das visadas NF, BN, BF e NF-BN-BF, abordagem MRPC.	129
Figura 60: Erros altimétricos observados nos MDSs 3, 7, 10, 12 e 13.	133
Figura 61: Erros altimétricos observados no MDS 11.	134
Figura 62: Tipos de perfis topográficos na região de pontos de controle.	135
Figura 63: Erros altimétricos e altitudes (MDS 11).	136
Figura 64: Esquema do perfil do terreno na SUPV_PV18.	138
Figura 65: Vista panorâmica da SUPV_P05.....	139
Figura 66: Vista panorâmica da SUPV_B14.	139
Figura 67: Vista em perspectiva de ANFT_P13.	140
Figura 68: Vista de topo e perfil topográfico de ANFT_P13.	140
Figura 69: Gráfico de dispersão relacionando o erro altimétrico com a declividade em SUPV_P05.	141
Figura 70: Gráfico de dispersão relacionando o erro altimétrico com a declividade em ANFT_P13.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de relevo e declividade.....	10
Tabela 2 - Funções polinomiais usadas para modelagem da superfície.....	11
Tabela 3 - Comparação entre estruturas <i>Grid</i> e TIN.....	19
Tabela 4 - Níveis de processamento das imagens PRISM.....	34
Tabela 5 - Acurácia geométrica absoluta esperada após calibração de julho de 2009. ..	36
Tabela 6 - Acurácia geométrica relativa esperada após calibração de julho de 2009.....	36
Tabela 7 - Valores do PEC e EP.	73
Tabela 8 - Valores de EQM e PEC planimétricos por escala do mapeamento sistemático brasileiro.....	74
Tabela 9 - Valores do EQM e PEC altimétricos por escala do mapeamento sistemático brasileiro.....	75
Tabela 10 - Principais metadados das cenas PRISM/ALOS.....	83
Tabela 11 - Estatísticas das ondulações geoidais – EGM96 e MAPGEO2010.	100
Tabela 12 - Parâmetros de configuração dos modelos matemáticos para os sensores PRISM.....	104
Tabela 13: Resultado da avaliação posicional das ortoimagens para a abordagem MOA.	123
Tabela 14: Resultado da avaliação posicional das ortoimagens para a abordagem MPR.	123
Tabela 15: Resultado da avaliação posicional das ortoimagens para a abordagem MRPC.....	123
Tabela 16: Resultados dos MDSs na abordagem MOA.....	131
Tabela 17: Resultados dos MDSs na abordagem MRPC.....	131
Tabela 18: Resultados da análise planimétrica das ortoimagens com uso dos MDSs 5 e 11.....	136
Tabela 19: Resultado das avaliações locais do MDS 11.....	137

LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

ADS	<i>Angular Displacement Sensor</i>
AEB	<i>Área de Estudo Bananal</i>
AER	<i>Área de Estudo Resende</i>
ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
ANA	<i>Agência Nacional de Águas</i>
ANFT	<i>Anfiteatro</i>
ANUDEM	<i>Australian National University Digital Elevation Model</i>
AOCS	<i>Attitude and Orbit Control Subsystem</i>
ASF	<i>Alaska Satellite Facility</i>
ASPRS	<i>American Society of Photogrammetry and Remote Sensing</i>
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
ATE	<i>Automatic Terrain Extraction</i>
AVNIR-2	<i>Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer – Type 2</i>
CBERS	<i>China-Brazil Earth Resource Satellite</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CCRS	<i>Canada Centre for Remote Sensing</i>
CE90	<i>Circular Error 90</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
CP	<i>Centro Perspectivo</i>
DMA	<i>Defense Mapping Agency</i>
DSG	<i>Diretoria de Serviço Geográfico do Exército</i>
EMBRAPA	<i>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária</i>
EORC	<i>Earth Observation Research Center</i>
EQM	<i>Raiz quadrada do Erro Quadrático Médio</i>
ERSDAC	<i>Earth Remote Sensing Data Analysis Center</i>
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
FGDC	<i>Federal Geographic Data Committee</i>
FOV	<i>Field of View</i>
GDEM	<i>Global Digital Elevation Model</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>

GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
HRS	<i>High Resolution Stereoscopic</i>
IBGE	Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i>
IRU	<i>Inertial Reference Unit</i>
ISPRS	<i>International Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LE90	<i>Linear Error 90</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LPS	<i>Leica Photogrammetry Suite</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MNT	Modelo Numérico de Terreno
MOA	Modelo rigoroso baseado em parâmetros de Órbita e Atitude
MPR	Modelo rigoroso baseado em Posição-Rotação
MRPC	Modelo generalizado baseado no uso de Coeficientes Polinomiais Racionais fornecidos pela JAXA
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NGA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
NOAA	<i>National Oceanic & Atmospheric Administration</i>
PALSAR	<i>Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar</i>
PAP-PCD	Padrão de Acurácia e Precisão para Produtos Cartográficos Digitais
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
PDI	Processamento Digital de Imagens
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PRISM	<i>Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping</i>
RADAR	<i>Radio Detection And Ranging</i>
RESTEC	<i>Remote Sensing Technology Center of JAPAN</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>

RPC	<i>Rational Polynomial Coefficient</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
STT	<i>Star Tracker</i>
SUPV	Superfície V
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFV	Universidade Federal de Viçosa
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS	<i>World Geodetic System</i>

RESUMO

OLIVEIRA, Leila Freitas de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2011. **Análise de modelos digitais de superfície gerados a partir de imagens do sensor PRISM/ALOS**. Orientadora: Nilcilene das Graças Medeiros. Coorientadores: Maurício Galo e Carlos Antônio Oliveira Vieira.

O objetivo deste trabalho é a análise da qualidade de Modelos Digitais de Superfície (MDSs) gerados a partir de pares estereoscópicos de imagens do sensor PRISM/ALOS, considerando-se aspectos quanto a diferentes abordagens de correção geométrica, estratégias de correlação de imagens, espaçamento da grade e acurácia posicional. O padrão de acurácia esperado para os produtos avaliados considera as Normas Técnicas da Cartografia Nacional, através do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para a escala 1:25.000, classe A, do mapeamento sistemático brasileiro. Na etapa de correção geométrica são consideradas as abordagens do modelo rigoroso do sensor e do modelo generalizado com uso de *Rational Polynomial Coefficients* (RPCs). Os pontos de controle usados na correção geométrica, bem como para avaliação global da acurácia posicional de ortoimagens e MDSs, foram determinados por posicionamento GPS relativo estático. As avaliações locais, visando análise do comportamento dos MDSs segundo diferentes morfologias, são realizadas a partir de pontos de controle determinados por posicionamento GPS relativo cinemático, em superfícies de baixa declividade e em encostas de anfiteatros. Os resultados alcançados em nível global sinalizam que a modelagem geométrica utilizada, o número de pontos de controle considerados, assim como estratégias de correlação e espaçamento da grade influenciam a acurácia altimétrica dos MDSs, relativamente ao padrão de acurácia esperado. Os experimentos realizados para ortorretificar as imagens nadir com emprego de MDSs previamente selecionados, demonstram que variações quanto a esses fatores, além de acurácias altimétricas diferentes, não influenciam a qualidade planimétrica esperada para as ortoimagens, retratando, portanto, o mesmo padrão de qualidade planimétrica para os MDSs empregados na ortorretificação. Os testes estatísticos quanto à tendência e precisão confirmam a consistência relativa das ortoimagens e MDSs gerados, porém, a maioria desses produtos apresenta tendência, com exceção de alguns casos isolados. Quanto à avaliação local, os resultados indicam que diferentes morfologias influenciam a acurácia dos MDSs relativamente à análise global. De forma geral, áreas com menor

declividade apresentam resultados com maior acurácia. As análises locais indicam ainda que a variável declividade, associada a fatores como a falha na correlação e procedimentos de interpolação, proporciona degradação da acurácia altimétrica dos MDSs.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Leila Freitas de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2011. **Analysis of digital surface models generated from images of PRISM/ALOS sensor.** Adviser: Nilcilene das Graças Medeiros. Co-advisers: Maurício Galo and Carlos Antônio Oliveira Vieira.

The purpose of this study is the quality assessment of Digital Surface Models (DSMs) generated from stereo pairs of PRISM/ALOS images, considering aspects regarding different approaches of geometric correction, image matching strategies, grid distance and positional accuracy. The standard of accuracy expected for the products evaluated considers the Technical Standards of the National Cartography, defined by the Cartographic Accuracy Standard of the Brazilian systematic mapping for 1:25,000 scale, class A. In the geometric correction step are considered the approaches of rigorous sensor model and generalized model using Rational Polynomial Coefficients (RPCs). The ground control points used in geometric correction and in global assessment of the positional accuracy of orthoimages and DSMs, were determined by GPS relative static positioning. The local assessments, aiming the analysis of DSMs as to different morphologies, are performed from control points determined by relative kinematic GPS positioning in low-slope surfaces and on inclined surfaces. The global results achieved indicate that the geometric modeling, the number of control points considered, as well as the strategies for image matching and grid distance influence the vertical accuracy of the DSM, in relation to the expected accuracy standard. The experiments performed to orthorectify the nadir images using the DSMs previously selected, show that variations as to these factors, beyond different vertical accuracies, not affect the expected horizontal accuracy of the orthoimage, portraying, therefore, the same horizontal quality standard for the DSMs used in the orthorectification. The statistical tests for trend and precision detection, confirm the relative consistency on all orthoimages and DSMs generated. However, most of these products presents trend, except for some isolated cases. As to the local assessment, the results indicate that different morphologies influence the accuracy of the DSM, in relation to global assessment. In general, the results in low-slope areas present greater accuracy. The local analyses also indicate that the slope, associated with factors such as failure image matching and interpolation procedures, provides degradation of DSM vertical accuracy.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da superfície da Terra é de fundamental importância para estudos e análises em diversas disciplinas que lidam com questões relacionadas à organização, planejamento e gestão do espaço geográfico. Apesar de diferenças na ênfase e nos objetivos, especialistas de diversas áreas do conhecimento têm um interesse comum, ou seja, que a identificação e representação de elementos da superfície terrestre sejam feitas de forma fidedigna.

Neste contexto estão inseridos os documentos cartográficos, que dão suporte a diversas ações sobre o espaço geográfico em diferentes áreas de atuação, como por exemplo: gestão ambiental, exploração de recursos naturais, prevenção e mitigação de riscos, regularização fundiária, prestação de serviços de infraestrutura (transporte, comunicações, energia, saneamento, abastecimento de água), dentre outras.

O avanço tecnológico observado nas últimas décadas, relacionado ao desenvolvimento de sensores de imageamento, posicionamento e orientação bem como de sistemas de aquisição, transmissão e processamento de dados, tem revolucionado os métodos de produção e as formas de disponibilização de dados espaciais em formato digital. Esta evolução ampliou significativamente as possibilidades de análise, interpretação, distribuição e uso da informação espacial para diversas aplicações.

Nos processos destinados à representação tridimensional (3D) de fenômenos que ocorrem na superfície terrestre destaca-se a modelagem digital de superfície que, suportada pelo advento das novas tecnologias, surgiu como uma forma de representação e análise eficiente da variação contínua desses fenômenos. O objetivo dessa modelagem é representar superfícies de forma contínua utilizando para isto uma quantidade finita e discreta de amostras de pontos da superfície física da Terra com coordenadas tridimensionais conhecidas.

A aplicação da técnica de modelagem digital de superfície visando à geração de Modelos Digitais de Superfície (MDSs) aumenta não somente a qualidade e semelhança do modelo com a realidade, comparativamente às representações analógicas, como também possibilita novas abordagens ao estudo, constituindo assim um recurso para melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre.

A realização de procedimentos de análise sobre MDSs possibilita seus usos para geração de mapas de aspecto, declividade, hipsométricos e de curvas de nível, além de viabilizar o posicionamento de antenas receptoras e transmissoras de ondas

eletromagnéticas para diferentes aplicações, motivo pelos quais têm sido amplamente utilizados em aplicações cartográficas, geológicas, geomorfológicas, hidrográficas, florestais.

As amostras para geração de modelos de representação 3D da superfície podem ser obtidas considerando-se métodos tradicionais como: levantamentos topográficos e geodésicos, por métodos fotogramétricos e por digitalização de curvas de nível sobre mapas analógicos. Mais recentemente, as coordenadas tridimensionais também podem ser obtidas utilizando-se de técnicas fotogramétricas implementadas e disponibilizadas em sistemas fotogramétricos digitais, por sensoriamento remoto orbital (estereoscopia óptica e de RADAR – *Radio Detection And Ranging* e interferometria por RADAR) e varredura a LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) ou LASER *scanning*.

A utilização de imagens orbitais para obtenção de dados altimétricos vem ganhando importância desde o final dos anos 90, na medida em que passaram a ser oferecidas melhores resoluções espaciais, melhor qualidade na geometria de aquisição e melhores condições para obtenção de pares estereoscópicos (LI e GRUEN, 2004; BARROS, 2006; PETRIE, 2008; KAYADIBI, 2009). Desde então, esses avanços têm motivado iniciativas de pesquisa que têm por objetivo avaliar o potencial de uso dessas imagens como fonte de dados tridimensionais, conforme estudos já desenvolvidos por Coelho (2002), Jacobsen (2004), Poli *et al.* (2004), Toutin (2004a), Barros (2006), Correia (2008), Imai *et al.* (2008), Rees (2010), Papasaika e Baltsavias (2010), entre outros autores.

As imagens orbitais brutas apresentam distorções geométricas significativas, que impedem sua utilização direta como base de referência em diversas áreas de aplicação. Diante deste fato, a correção geométrica das imagens constitui uma etapa determinante para a geração de dados com a qualidade necessária à extração de informação para uma dada aplicação, incluindo geração de modelos de representação 3D da superfície para o atributo altitude. Os modelos de correção geométrica, normalmente utilizados, consideram desde simples transformações planas entre o espaço imagem e o espaço objeto, até complexos modelos matemáticos que modelam as distorções inerentes à formação das imagens proporcionando, dessa forma, maior rigor geométrico.

De acordo com Cheng e Toutin (2001), modelos rigorosos refletem a realidade física da geometria da visada e corrigem as distorções inerentes à plataforma, ao sensor, à Terra e, em alguns casos, as inerentes à projeção cartográfica. Assim, pressupõem o

conhecimento dos parâmetros físicos relacionados ao sensor e à plataforma do satélite (atitude e efemérides) nos instantes de aquisição das imagens, que nem sempre são disponibilizados aos usuários.

No entanto, certos provedores de imagens podem não disponibilizar os parâmetros físicos necessários à modelagem rigorosa das imagens. Ao invés disso, fornecem os coeficientes de polinômios racionais (*Rational Polynomial Coefficients – RPCs*) determinados a partir dos dados orbitais (TOMMASELLI e MEDEIROS, 2010). Ademais, apenas alguns *softwares* comerciais oferecem suporte ao processamento desses coeficientes de forma a realizar a correção geométrica das imagens.

Nesta pesquisa é enfocada a geração de modelos digitais para representação da topografia a partir de imagens ópticas *triplet* do sensor PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*), a bordo da plataforma orbital ALOS, fabricada pela Agência Espacial Japonesa (JAXA- *Japan Aerospace Exploration Agency*). A configuração denominada *triplet* (ou triplete) representa um conjunto de três imagens adquiridas ao longo da órbita do satélite segundo três visadas distintas (*backward, nadir e forward*), permitindo a geração de um modelo estereoscópico a partir destas imagens.

Essas imagens, em modo *triplet* de aquisição, possibilitam a extração de MDSs, considerados como produtos oriundos do sensoriamento remoto, que encontram aplicações em diversas áreas do conhecimento onde a informação tridimensional é requerida. Dentre as possibilidades de obtenção dos MDSs, a geração desses modelos por estereoscopia óptica, considerando-se sensores orbitais, tem se tornado uma solução atraente em termos de custo/benefício, em relação aos métodos tradicionais.

Neste sentido, este trabalho buscou avaliar alguns aspectos que influenciam a qualidade final dos MDSs, visto que, para utilização desses produtos deve-se considerar sua qualidade e limitações.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa consiste em analisar a qualidade de MDSs gerados a partir de imagens PRISM/ALOS considerando os aspectos quanto a diferentes modelos de correção geométrica, estratégias de correlação das imagens, espaçamento da grade e acurácia posicional planialtimétrica.

Os objetivos específicos são:

1. avaliar a influência do número de pontos de controle utilizados nos diferentes modelos de correção geométrica das imagens visando à ortorretificação e geração de MDSs;
2. estabelecer a influência da combinação de pares estereoscópicos e estratégias de correlação na geração e qualidade final dos MDSs;
3. avaliar globalmente a qualidade planialtimétrica de ortoimagens e MDSs;
4. avaliar localmente a qualidade altimétrica dos MDSs segundo áreas com diferentes morfologias;
5. classificar os produtos gerados de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica vigente.

1.2 Estrutura do Trabalho

Além da introdução, que apresenta algumas considerações sobre o assunto deste trabalho, os objetivos do estudo e a justificativa, esta dissertação está organizada em capítulos, conforme a descrição a seguir. A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica sobre os temas e assuntos que subsidiam a realização do estudo: representação digital de superfícies do terreno, sensoriamento remoto orbital, distorções geométricas de imagens orbitais, modelos de correção geométrica, ortorretificação, extração automática de MDT/MDS e controle de qualidade de produtos cartográficos. A Seção 3 descreve os materiais utilizados e a metodologia empregada para obtenção dos resultados: coleta de dados preexistentes, levantamento de campo, correção geométrica das imagens, ortorretificação, extração de MDSs e avaliação da qualidade posicional dos produtos gerados. Na Seção 4 os resultados são apresentados e analisados. Na Seção 5 encontram-se as conclusões e recomendações para futuros trabalhos de pesquisa. Os apêndices e anexos estão reunidos no CD (anexo a este volume da dissertação), contendo os relatórios do processamento GPS dos pontos de controle estáticos e os memoriais descritivos dos pontos de controle estáticos (apêndices), bem como os dados gerados em outras pesquisas, os metadados das imagens PRISM/ALOS e os memoriais descritivos das estações geodésicas do IBGE (anexos).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Representação digital de superfícies do terreno

Desde a metade do século passado, diversas técnicas de representação digital de superfícies do terreno têm sido desenvolvidas, acompanhando os avanços da tecnologia de computação, matemática e computação gráfica.

De acordo com Li *et al.* (2005) existem basicamente duas formas para a representação digital de superfícies: a matemática e a gráfica. Entretanto, a representação mais frequente para expressar a superfície de forma digital é a gráfica, podendo ser caracterizada por pontos, linhas e áreas, sendo essa representação compatível com análises realizadas em ambientes de Sistemas de Informação Geográfica – SIG (OKSANEN, 2006).

Na representação digital da superfície do terreno vale destacar a importância do conceito de modelo digital. Normalmente, a palavra modelo significa representação e pode ser considerado como uma abstração simplificada da realidade, envolvendo a descrição ou representação de algumas de suas propriedades, de tal forma que seja possível melhor compreendê-la (MEYER, 1985; JOLY, 2011).

Li *et al.* (2005) classificam os modelos em conceituais, físicos e matemáticos. De acordo com estes autores, modelos conceituais são criados a partir do conhecimento e experiência do analista de um determinado fenômeno e, frequentemente, este tipo de modelo corresponde a uma fase da modelagem e precede ou o modelo físico ou o modelo matemático. Os modelos físicos representam o objeto através de, pelo menos, um elemento físico real (uma maquete, por exemplo). Já o modelo matemático representa um fenômeno, objeto ou situação, segundo conceitos matemáticos, como constantes, variáveis, funções, equações etc.

A introdução de técnicas matemáticas, numéricas e digitais para modelagem do terreno ocorreu em meados do século XX, quando Miller e Laflamme introduziram o termo modelo digital de terreno (MDT), assim conceituado: “MDT é simplesmente uma representação estatística da superfície contínua do terreno por um número de pontos

selecionados com coordenadas X,Y,Z conhecidas” (MILLER e LAFLAMME¹, 1958 *apud* EL-SHEIMY *et al.*, 2005).

A partir da definição de Miller e Laflamme e da introdução do termo MDT como uma representação digital (numérica) do terreno, muitos outros termos surgiram. O termo Modelo Digital de Elevação (MDE) foi amplamente utilizado nos Estados Unidos, Modelo Digital de Altura ou Altimétrico (MDA) teve origem na Alemanha, Modelo Digital da Superfície do Terreno (MDST) foi utilizado na Inglaterra, e Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDET) foi introduzido pela USGS (*U. S. Geological Survey*) e DMA (*Defense Mapping Agency*), conforme Petrie e Kennie (1987).

Embora na prática esses termos sejam muitas vezes considerados sinônimos, normalmente se referem a diferentes produtos, em função das particularidades de cada um deles. Essas diferenças conceituais são discutidas por El-Sheimy *et al.* (2005) e por Li *et al.* (2005).

O termo “terreno” pode apresentar diferentes significados, o que leva a diferentes interpretações para o termo MDT. O interesse de cartógrafos e agrimensores, por exemplo, é o estudo do MDT segundo o ponto de vista da representação do relevo do terreno e de objetos sobre ele. Em outras áreas das Geociências esse termo é utilizado porque combina informações topográficas e não topográficas para se construir um MDT de acordo com especificidades de cada área do conhecimento (Geologia, Meteorologia, Geomorfologia etc.).

Com base neste raciocínio, Li *et al.* (2005, p. 8) propõem uma definição generalizada para MDT: “um MDT é um conjunto ordenado de pontos amostrais que representam a distribuição espacial de vários tipos de informações sobre o terreno”.

Sua expressão matemática pode ser dada por:

$$K_p = f(X_p, Y_p), \quad K = 1, 2, 3, \dots, m \text{ e } p = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

onde K_p é um valor do atributo da k -ésima propriedade do terreno em um local p ; X_p, Y_p são as coordenadas planimétricas do ponto p ; m ($m \geq 1$) é o número total dos tipos de informação sobre o terreno em p , e n é o número total de amostras.

Na Equação 1, quando $m = 1$ e a informação sobre o terreno for a elevação, tem-se a expressão matemática de um MDE. Assim, de acordo com Li *et al.* (2005), o MDE seria uma particularização do MDT, e o mais fundamental de seus componentes. Outros

¹MILLER, C.; LAFLAMME, R. A. **The digital terrain modeling-theory and applications.** Photogrammetric Engineering, 24(3): p. 433-422, 1958.

termos como MDA, MDST e MDET foram naturalmente substituídos por MDE por se referirem a modelos do terreno que incorporam apenas o atributo elevação.

Atualmente, apesar do uso continuado e difundido da técnica de modelagem digital do terreno, ainda não existe uma padronização quanto à terminologia. Na sequência, são apresentadas as terminologias mais utilizadas, bem como algumas das definições encontradas na literatura:

- **Modelo Digital de Terreno (MDT)** – termo mais antigo empregado para descrever a representação digital do terreno, e por isso tem muitas definições. Pode representar a distribuição espacial de uma característica qualquer do terreno, como descrevem Li *et al.* (2005) e Felicísimo (1994). Santos e Tommaselli (2002), Paparoditis e Polidori (2002), Linder (2006), Crosetto e Pasquali (2008), Jensen (2009), Krauss *et al.* (2009) e Hollaus *et al.* (2010), consideram-no como a representação da superfície efetiva do terreno para o parâmetro altitude, sem cobertura vegetal ou edificações, a exemplo do entendimento da empresa Spot Image (2004). Maune *et al.* (2001a), El-Sheimy *et al.* (2005) e Qiming *et al.* (2008) apresentam uma concepção mais complexa, pois entendem que o MDT também incorpora a elevação de feições características do terreno, como rios e linhas de cumeeada, para melhor caracterização da superfície.
- **Modelo Numérico do Terreno (MNT)** – modelo definido como “[...] a representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre” (FELGUEIRAS e CÂMARA, 2001, p. 1). Neste contexto, podem ser considerados dados de relevo, informações meteorológicas, informações geológicas, entre outras. Esta definição vai ao encontro daquela proposta por Li *et al.* (2005) e Felicísimo (1994).
- **Modelo Digital de Elevação (MDE)** – termo genérico usado por Maune *et al.* (2001a) para representação digital de superfícies topográficas e/ou batimétricas da terra nua, ou seja, sem cobertura vegetal e edificações. Na prática, corresponde a uma particularização dos modelos propostos por Felicísimo (1994), Felgueiras e Câmara (2001) e Li *et al.* (2005) para o atributo altitude da superfície efetiva do terreno. Em alguns países é considerado sinônimo de MDT (MAUNE *et al.*, 2001a). A empresa Spot Image (2004) utiliza o termo MDE

para descrever modelos que representem as elevações do terreno e de qualquer objeto existente sobre ele (cobertura vegetal, edificações etc). Paparoditis e Polidori (2002), assim como Jensen (2009), utilizam o termo MDE segundo um conceito mais genérico: pode se referir ao modelo que representa as elevações da terra nua, mas que também pode representar as elevações de qualquer objeto sobre ela. Segundo esses autores, o MDE se particulariza segundo os termos MDT e MDS (Modelo Digital de Superfície) para representar, respectivamente, as altitudes da terra nua, e as altitudes dos elementos da paisagem (terra nua, vegetação e edificações).

- **Modelo Digital de Superfície (MDS)** – segundo Correia (2008), a necessidade de distinguir as duas superfícies do terreno, efetiva e visível, surgiu em função da melhora da precisão altimétrica proporcionada pelo advento de sensores de alta resolução espacial. Sendo assim, MDS corresponderia ao modelo que também considera como parâmetro a altitude, porém é utilizado para descrever a superfície topográfica representada pelas elevações do terreno e de qualquer objeto existente sobre ele, como cobertura vegetal, edificações e outras estruturas antrópicas (PAPARODITIS e POLIDORI, 2002; LINDER, 2006; OKSANEN, 2006; TOUTIN, 2006; HABIB *et al.*, 2007; KRAUSS *et al.*, 2009, JENSEN, 2009; HOLLAUS *et al.*, 2010). Santos e Tommaselli (2002) utilizaram a terminologia Modelo Numérico de Elevações (MNE) para descrever o mesmo produto.

De acordo com as definições encontradas tem-se uma tendência do uso do termo MDS para descrever a representação das elevações da superfície efetiva do terreno e de qualquer objeto/feição existente sobre ele. Por outro lado, a terminologia utilizada para representar a superfície do terreno livre da influência de cobertura vegetal e demais elementos da paisagem ainda se confunde entre MDT e MDE, por vezes considerados sinônimos.

Tendo em vista a literatura consultada e considerando-se ainda a predominância de modelos tridimensionais para representação da superfície do terreno em relação a outras superfícies, optou-se por considerar nesse trabalho a abordagem proposta por Paparoditis e Polidori (2002) e Jensen (2009).

Assim, o termo MDE é utilizado para descrever, de forma genérica, os modelos que representam as elevações do terreno. De modo particular, é adotado o termo MDT

para representação das elevações (altitudes) da superfície do terreno sem cobertura vegetal ou edificações. Já o termo MDS é empregado para modelos que consideram as altitudes do terreno e de qualquer objeto acima dele, como edificações, cobertura vegetal e outras estruturas antrópicas.

2.1.1 Descritores da superfície e estratégias de amostragem

Ao utilizar um modelo digital para representar uma superfície física da terra pressupõe-se a aquisição de uma amostra de pontos que seja compatível com a superfície do terreno que será modelada, de forma que a altitude em qualquer ponto do modelo seja interpolada com a acurácia requerida para uma dada aplicação (AYENI², 1982 *apud* MAUNE *et al.*, 2001a).

As amostras podem ser coletadas a partir de diferentes técnicas, como digitalização de curvas de nível, de levantamentos topográficos e geodésicos, métodos fotogramétricos (sensores aerotransportados e orbitais), RADAR e LASER *scanning*.

De uma forma geral existem três fatores importantes que devem ser considerados na etapa da amostragem: acurácia, densidade e distribuição dos dados amostrais. A acurácia está diretamente relacionada à sua determinação, ou seja, ao processo de medição. Já a densidade e distribuição estão intimamente relacionadas às características da superfície do terreno.

Essas características podem ser estabelecidas a partir de parâmetros descritores. Li *et al.* (2005) subdividem esses parâmetros segundo duas classes:

- a) qualitativos: chamados de descritores gerais por expressarem características gerais da superfície, como cobertura e uso do solo (vegetação, solo exposto, corpos d'água, etc.), além do tipo de relevo (plano, ondulado, montanhoso, etc.), entre outros descritores;
- b) quantitativos: utilizados para descrever de forma mais precisa a complexidade da superfície, sendo expressos por descritores numéricos, como curvatura e declividade, entre outros.

De acordo com Felgueiras e Câmara (2001), a declividade é definida por um plano tangente a superfície em um dado ponto, sendo estabelecida segundo duas componentes: o gradiente e a orientação (ou aspecto). O gradiente, também chamado de

²AYENI, O. O. **Optimum sampling for digital terrain models: a trend towards automation.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48(11), p.1687-1694, 1982.

declividade, corresponde à razão de variação da altitude para uma dada distância horizontal, e a orientação é a direção dessa razão de variação. Neste trabalho é adotado o termo declividade para se referir ao gradiente em uma direção específica.

A superfície também pode ser descrita por sua curvatura (côncava, retilínea, convexa), que identifica uma mudança na declividade e aspecto em um determinado ponto da superfície. Assim, a curvatura equivale à primeira derivada da declividade, ou segunda derivada da altitude (CORREIA, 2008).

No contexto da geomorfologia, Mitasova e Hofierka (1993) destacam a altitude, declividade, aspecto e curvatura, chamadas de variáveis morfométricas, como os principais elementos para descrever a superfície do terreno. Entretanto, a declividade, associada às suas componentes gradiente e aspecto, ainda é o atributo de maior importância para a descrição da superfície.

Devido à importância da declividade como descritor da superfície, conclui-se que ela deve ser contemplada não somente no momento da amostragem, mas também na fase dedicada à avaliação da qualidade posicional do modelo. Adicionalmente, o uso do parâmetro declividade como um descritor assume maior importância uma vez que algumas pesquisas têm indicado uma alta correlação entre erros observados em MDTs/MDSs e regiões com declividade a partir da moderada (HYYPÄ *et al.*, 2005; ZALOTI-JUNIOR *et al.*, 2007; TOZ e ERDOGAN, 2008; SOUZA *et al.*, 2009).

As classes de relevo e declividade do terreno observadas nesse trabalho seguem o padrão sugerido pela EMBRAPA (1995), e estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Classes de relevo e declividade.

Classes de Relevo	Classes de Declividade	
	Graus	%
Plano/praticamente plano	0° a 3°	0 a 5%
Suave ondulado	3° a 8°	5 a 14%
Moderadamente ondulado	8° a 13°	14 a 23%
Ondulado	13° a 20°	23 a 36%
Forte ondulado	20° a 45°	36 a 100%
Escarpado	> 45°	> 100%

Fonte: EMBRAPA (1995).

2.1.2 Modelagem da superfície

A representação digital tridimensional do terreno está associada a um conjunto de dados amostrais representativos dessa superfície e a funções matemáticas para representá-la de acordo com um modelo específico. Essas funções, denominadas

funções de interpolação, permitem estimar os valores de pontos que não pertençam ao conjunto amostral.

De acordo com Li *et al.* (2005), o processo pelo qual a representação de uma superfície do terreno é obtida é conhecido por modelagem da superfície. Uma vez modelada, essa superfície pode ser considerada como a superfície do MDT, de forma que o valor do atributo para qualquer ponto nesse modelo pode ser extraído a partir de métodos interpoladores.

Conforme mencionado na Seção 2.1, um MDT é um modelo matemático da superfície do terreno. Uma expressão matemática geral, a exemplo do que foi apresentado na Equação 1 e particularizado para o atributo altitude (Z), pode ser definida como:

$$Z = f(x, y) \quad (2)$$

na qual f é função das coordenadas x e y de um ponto.

A função mais utilizada para a implementação dessa expressão é a função polinomial geral como mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 - Funções polinomiais usadas para modelagem da superfície.

Termos Individuais	Ordem	Termo Descritivo	N. de Termos
$Z = a_0$	Zero	Planar	1
$+a_1x+a_2y$	Primeira	Linear	2
$+a_3x^2+a_4y^2+a_5xy$	Segunda	Quadrática	3
$+a_6x^3+a_7y^3+a_8x^2y+a_9xy^2$	Terceira	Cúbica	4
$+a_{10}x^4+a_{11}y^4+a_{12}x^3y+a_{13}x^2y^2+a_{14}xy^3$	Quarta	Quártica	5

Fonte: Adaptada de Petrie e Kennie (1987).

A representação geométrica dos primeiros quatro termos está apresentada na Figura 1. Pode-se perceber que cada termo individual da função polinomial geral apresenta suas próprias características quanto à forma.

Uma superfície pode ser modelada com o uso de certos termos específicos. Quanto mais termos são utilizados para expressar uma superfície, mais complexa ela será. Na modelagem digital de superfícies do terreno, normalmente são empregadas funções polinomiais com termos até a terceira ordem (PETRIE e KENNIE, 1987; BURROUGH e McDONNELL, 2004; LI *et al.*, 2005).

Do ponto de vista da representação geométrica tridimensional de superfícies, as estruturas gráficas usuais baseiam-se em áreas de influência, rede de triângulos (termo

oriundo do inglês, *Triangular Irregular Network* – TIN) e grade regular quadrada (originado do termo *Grid*, em inglês).

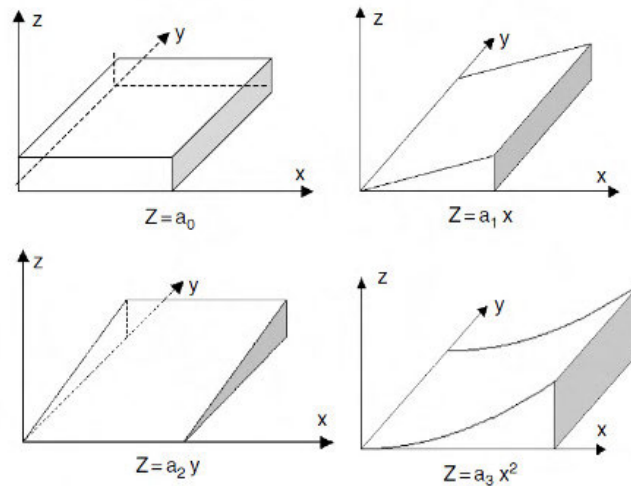


Figura 1 - Formas para superfícies geradas pelos 4 primeiros termos individuais de uma função polinomial.

Fonte: Li *et al.* (2005).

2.1.2.1 Área de influência

Considerando-se as funções polinomiais apresentadas na Tabela 2, se um polinômio de ordem zero ($Z = a_0$) for utilizado para representar uma superfície, o resultado é uma superfície plana horizontal para o termo $Z = a_0$ (Figura 1). Se uma superfície dessa natureza é construída para representar uma área ao redor de um ponto (área de influência do ponto no contexto geográfico), a superfície como um todo será formada por uma série de superfícies discretas contíguas (MAUNE *et al.*, 2001a).

Cada superfície plana horizontal pode ser expressa como:

$$Z_i = H_i \quad (3)$$

onde: Z_i é a elevação no nível da superfície plana para uma área em torno do ponto i e H_i é altitude do ponto i .

Teoricamente, essa modelagem pode ser usada para qualquer padrão de amostra, regular ou irregular, uma vez que trabalha com áreas de influência individuais. Entretanto, por questões de esforço computacional, a determinação de áreas segundo padrões regulares é de mais fácil implementação, inclusive pela dificuldade de se estabelecer áreas de influência para determinados fenômenos.

Um exemplo que pode ser considerado como uma superfície baseada em um padrão irregular de área de influência pode ser encontrado em aplicações

meteorológicas. Nesse modelo assume-se que em uma determinada área o índice de precipitação equivale ao registrado na estação meteorológica mais próxima (BURROUGH e McDONNELL, 2004).

Quando os dados amostrais estão regularmente espaçados, ou seja, distribuídos segundo uma distância fixa nas direções x e y , essa modelagem pode ser entendida e representada por uma estrutura matricial, organizada segundo linhas e colunas. Esta estrutura corresponde a uma distribuição discreta da superfície, onde cada elemento da matriz, chamado de célula, ou *pixel* corresponde a uma área na superfície do terreno. Nesta interpretação, a célula inteira assume um único valor, no caso um único valor de altitude, que muda apenas a partir da borda da célula (MAUNE *et al*, 2001a), conforme apresentado na Figura 2.

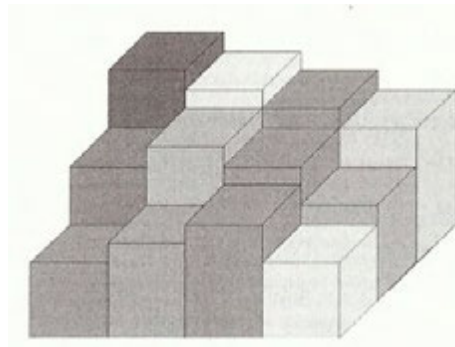


Figura 2 - Superfície segundo uma distribuição discreta.
Fonte: Maune *et al.* (2001a).

Na representação bidimensional, a estrutura discreta de dados normalmente é utilizada em análises que tratam da classificação da cobertura do solo, assim como corresponde à estrutura *raster* de imagens digitais, como as imagens obtidas por sensores de imageamento aerotransportados ou a bordo de satélites.

Na prática, os modelos tridimensionais baseados em área de influência regular, quando no formato *raster*, equivalem a uma imagem digital, onde a célula (ou *pixel*) representa o valor numérico da altitude, a exemplo dos MDSs SRTM.

Embora seja uma modelagem que apresenta descontinuidade da superfície, é uma alternativa eficiente para diversas aplicações, como para ortorretificação e cálculo de volumes. Além disso, seu armazenamento é feito com relativa facilidade, devido à evolução dos computadores e existência de métodos de compactação de imagens.

2.1.2.2 Rede de triângulos

A representação de uma superfície segundo uma função polinomial (Tabela 2) que reúna termos de polinômios de primeira ordem é dada por:

$$Z_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i \quad (4)$$

Para determinar os três coeficientes desse polinômio é necessário um mínimo de três pontos, que podem representar pontos de um triângulo no espaço 3D. Assim, uma superfície poderá ser formada por vários planos inclinados triangulares contíguos.

A rede triangular, usualmente chamada de TIN, corresponde a uma estrutura topológica de dados vetoriais, no qual pontos (nós) com coordenadas planialtimétricas conhecidas são ligados por linhas (arestas) formando triângulos irregulares (o mais próximo possível de equiláteros) e contíguos. Qualquer padrão de distribuição das amostras, seja regular ou irregular, pode permitir a estruturação de superfícies segundo uma rede de triângulos.

Dentre os métodos disponíveis para geração desses triângulos, a triangulação de *Delaunay* é a mais utilizada porque satisfaz a todas as características da rede TIN descritas no parágrafo anterior. Um dos princípios básicos da triangulação de *Delaunay* estabelece, por exemplo, que nenhum ponto da rede deve ser interior à circunferência determinada pelos três pontos de um triângulo pertencente a essa rede. Outros princípios relativos à triangulação de *Delaunay*, bem como possibilidades de implementação via algoritmos computacionais podem ser vistos em Li *et al* (2005).

Na Figura 3(a) é apresentado um modelo vetorial de uma estrutura TIN e na 3(b) a representação *raster* da superfície TIN correspondente.

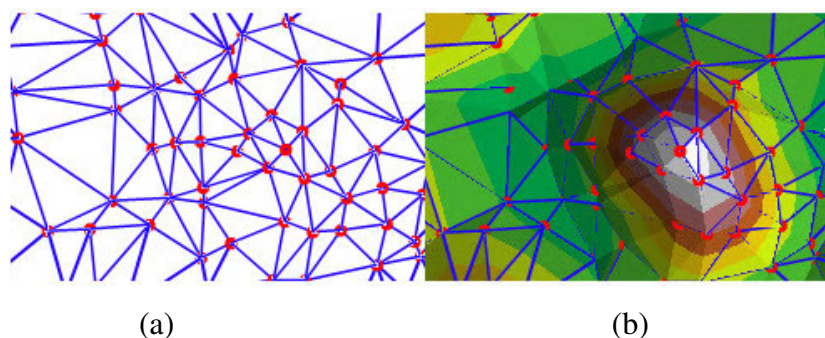


Figura 3 - Representação TIN de uma superfície: (a) rede de triângulos irregulares; (b) superfície TIN.
Fonte: ESRI (2009a).

Na modelagem TIN os vértices do triângulo (pontos amostrados da superfície do terreno) podem não ter a mesma elevação, o que leva cada triângulo a possuir um determinado declive, dado pelo ângulo de inclinação da face do triângulo, e uma

determinada orientação (ou aspecto), que pode ser obtida pela direção da projeção horizontal da normal a essa face. Como toda análise é realizada a partir do conjunto amostral considerando suas relações de vizinhança, ou seja, a topologia criada, parâmetros como declividade e aspecto podem ser rapidamente computados para cada triângulo (MAUNE *et al.*, 2001a).

Outra característica da modelagem TIN é a preservação das coordenadas tridimensionais dos pontos amostrados. Nenhuma transformação ou estrutura intermediária é criada. A obtenção do valor de altitude para qualquer ponto do modelo é realizada por interpolação, com base nas coordenadas dos vértices do triângulo onde o ponto está localizado. Segundo Costa (2006), embora a interpolação garanta a continuidade entre as superfícies de triângulos vizinhos, não garante uma suavidade na transição entre as superfícies.

Como triângulos apresentam grande flexibilidade em termos de sua forma e tamanho, e graças a sua estrutura vetorial, a modelagem TIN também pode facilmente incorporar vértices de feições lineares para representar mudanças bruscas ou descontinuidade na declividade do terreno, cursos d'água, linhas de cumeada, corpos d'água, entre outros. As amostras que representam feições lineares são chamadas de *breaklines* (Figura 4). Sua incorporação ao conjunto amostral possibilita aproximar o modelo das características morfológicas do relevo.

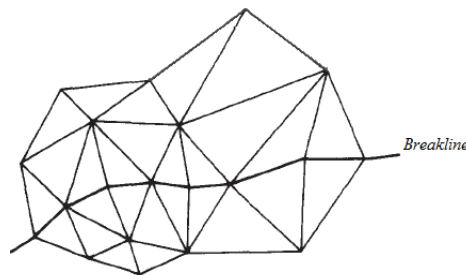


Figura 4 - Superfície TIN com *breakline* incorporada.
Fonte: Petrie e Kenzie (1987).

Devido a suas características, a modelagem TIN apresenta vantagens em relação a outras modelagens para representação de superfícies do terreno. Entretanto, a modelagem de superfícies com maior complexidade requer um maior número de amostras, elevando os custos para sua aquisição (MAUNE *et al.*, 2001a).

2.1.2.3 *Grade regular quadrada*

Quando os três primeiros termos, juntamente com o termo a_{3xy} do polinômio geral (Tabela 2), forem usados a função polinomial será dada por:

$$Z_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i \quad (5)$$

Para formar uma superfície é necessário então um mínimo de quatro pontos com coordenadas conhecidas. A superfície resultante é denominada como superfície bilinear. Teoricamente, qualquer quadrilátero pode ser usado. Entretanto, por motivos práticos, como a estrutura resultante dos dados amostrais e a representação final da superfície, a grade regular quadrada é a melhor alternativa (LI *et al.*, 2005). Assim, essa estrutura permite modelar a superfície segundo uma série de poliedros contíguos de faces quadradas

A grade regular quadrada, ou *Grid*, é uma rede vetorial discreta de pontos regularmente espaçados em x e y , organizados segundo linhas e colunas, a exemplo de uma matriz. Os vértices (nós) da rede correspondem à interseção das linhas e colunas e estão associados aos valores da altitude do terreno (Figura 5). Para pontos amostrais cujas altitudes foram obtidas por correlação de imagens (oriundas de sensores aerotransportados ou orbitais) o valor do nó pode ser determinado de forma direta; porém, para pontos amostrais distribuídos irregularmente, esses valores são obtidos por métodos de interpolação (construção indireta da superfície a partir de dados derivados).

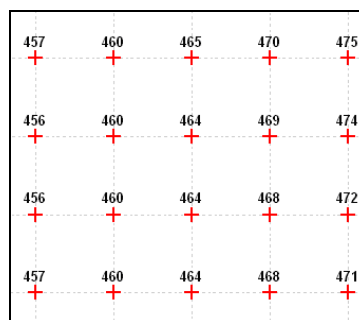


Figura 5 - Modelo vetorial de uma estrutura baseada em grade regular quadrada.

A resolução espacial de uma grade regular, equivalente ao tamanho da célula da matriz, é definida pelo espaçamento entre os pontos amostrais. Uma vez estabelecida a estrutura da rede, onde está implícita sua resolução e coordenadas de cada ponto amostral, pode-se aplicar um método de interpolação para estimar o valor da altitude de qualquer ponto fora do conjunto amostral, possibilitando a geração de uma superfície contínua. Apesar da continuidade garantida pela interpolação, a transição entre superfícies não é suavizada, a exemplo da modelagem linear baseada em redes de triângulos irregulares. Para essa condição ser atingida, é necessária certa redundância, podendo ser usado o método dos mínimos quadrados com base em outros modelos

matemáticos, como as funções *splines* bicúbicas para modelar a superfície (BURROUGH e McDONNELL, 2004), por exemplo.

A representação da superfície de forma contínua terá, para cada célula da matriz, o valor correspondente à altitude do terreno no centróide da célula. A porção de área existente entre os centróides assumirá um valor entre os valores de altitude dos centróides das células adjacentes (MAUNE *et al.*, 2001a). Na Figura 6 é representada uma superfície modelada segundo a grade regular quadrada.

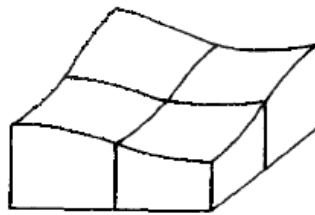


Figura 6 - Representação de superfície contínua, modelada segundo a grade regular quadrada.

Fonte: Petrie e Kennie (1987).

A resolução da grade depende tanto do nível de detalhe requerido pelas análises quanto da qualidade e representatividade dos dados amostrais disponíveis que serão utilizados como fonte. Assim, quanto maior o nível de detalhe pretendido, maior será a resolução espacial da grade. Conseqüentemente, para melhor representar a superfície do terreno, há que se considerar tanto a quantidade de amostras quanto sua acurácia posicional (MAUNE *et al.*, 2001a).

A modelagem baseada na estrutura *Grid* é a representação mais comum para superfícies tridimensionais, sendo bastante popular devido a sua ampla utilização em SIG. Muitas agências de mapeamento, a exemplo da USGS, utilizam a estrutura *Grid* para representação de seus dados tridimensionais devido à facilidade para sua geração e manipulação e ocupam relativamente pouco espaço físico (MAUNE *et al.*, 2001a; EL-SHEIMY *et al.*, 2005).

Devido à característica de distribuição regular dos dados amostrais, a estrutura *Grid* não representa adequadamente as discontinuidades da superfície caracterizadas por feições lineares (*breaklines*) como cursos d'água e linhas de cumeada. Da mesma forma, a localização de pontos isolados que representem picos ou depressões podem não constar do conjunto amostral devido à resolução da grade – espaçamento entre amostras (MAUNE *et al.*, 2001a). Estas características tornam a estrutura *Grid* adequada para a representação de superfícies suaves e de variação contínua.

2.1.2.4 Comparação entre estruturas

Os dados representativos do relevo normalmente advêm de curvas de nível, *breaklines*, e de pontos determinados no terreno através de diferentes técnicas (LIDAR; fotogrametria; sensoriamento remoto; técnicas de posicionamento baseadas em GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*, como GPS e outros). Porém, isoladamente, esses dados não constituem uma representação efetiva da continuidade da superfície quando tratadas em ambiente digital (PENG *et al.*, 1996), e por isso não são utilizadas diretamente para visualização e análises da superfície. Entretanto, a partir desse conjunto amostral de pontos, é possível construir modelos tridimensionais, armazená-los, realizar análises e manipulações diretamente sobre eles. Nesta fase os dados brutos usados como fonte para sua criação já não são utilizados, na medida em que todo o processamento é realizado sobre o modelo criado, e não mais sobre as amostras.

Considerando-se a continuidade da superfície proporcionada pelas abordagens da rede triangular irregular (TIN) e da grade regular quadrada (*Grid*), fica a dúvida sobre qual a estrutura ou modelo é mais adequado para representar a superfície física da Terra.

Na prática, nenhuma das estruturas representa de forma ótima todas as características inerentes à superfície terrestre, uma vez que ambas correspondem a modelos, ou seja, uma aproximação da realidade. As duas modelagens apresentam vantagens e desvantagens entre si e entre outros modelos mais complexos. Grande parte dos dados destinados a geração de MDTs/MDSs pode ser utilizada para modelar a superfície em ambas as estruturas, assim como é possível fazer a conversão entre elas (EL-SHEIMY *et al.*, 2005). Neste quesito em particular, cabe ressaltar que devido a sua natureza discreta e regular, a conversão da estrutura *Grid* (vetorial) para o formato *raster* gera uma segunda estrutura, baseada em área de influência, que permite sua integração com dados de sensoriamento remoto como imagens de satélites em geral.

Assim, a escolha de uma estrutura normalmente baseia-se em inúmeros fatores, como conjunto amostral e *softwares* disponíveis, tipo de análise desejada, capacidade de armazenamento e experiência do analista. Na Tabela 3 é apresentada uma comparação das principais características das duas estruturas (*Grid* e TIN).

Tabela 3 - Comparação entre estruturas *Grid* e TIN.

Características	<i>Grid</i>	TIN
Estrutura	Manipulação simples e armazenamento eficiente em computadores. Os nós da rede vetorial podem ser estimados a partir das amostras (construção indireta). Relações topológicas são explícitas, não sendo necessário armazená-la, já que a conectividade entre os pontos é estabelecida segundo uma distância e direção fixas.	Manipulação e armazenamento mais complexos, variando de um <i>software</i> para outro. Os nós da rede (vértices dos triângulos) pertencem ao conjunto amostral (construção direta). É necessário criar e armazenar as relações topológicas entre os nós, linhas e triângulos, uma vez que a conectividade entre os pontos da rede é estabelecida segundo distâncias e direções diferentes.
Referência Geométrica	Implícita na estrutura da rede.	Implícita nas coordenadas dos vértices dos triângulos.
Aplicações em Projetos	Projetos envolvendo grandes extensões territoriais. Projetos que requeiram integração com dados raster, como imagens orbitais.	Projetos que requeiram maior grau de precisão, pois o modelo é gerado diretamente do conjunto amostral.
Vantagens	As funções de análise espacial são de execução mais simples e rápida. Eficiente para cálculos de informações geométricas (declividade, volume e perfil) e ortorretificação. Facilidade para integração com dados de sensoriamento remoto, como imagens de satélite.	Feições características do terreno, como linhas de crista e talvegues, são mais bem representadas. Melhor representação de relevos complexos.
Desvantagens	Feições características do terreno não são bem representadas. Necessários muitos pontos amostrais para caracterizar satisfatoriamente a superfície. Haverá redundância de dados em terrenos de variação uniforme acarretando ineficiência computacional.	Análises espaciais são mais complexas. Não indicada para modelar grandes extensões territoriais.

Fonte: Adaptada de El-Sheimy *et al.* (2005).

2.1.3 Métodos de interpolação

A superfície física da terra pode ser considerada como uma superfície contínua, mas com inúmeras irregularidades que dificultam sua modelagem matemática. Assim, não importa quão pequena seja uma determinada área, para representá-la fidedignamente seria necessário considerar uma quantidade infinita de pontos.

Na prática, recorre-se a amostragem de pontos coletados sobre a superfície do terreno, com coordenadas planialtimétricas conhecidas, para representá-lo segundo um modelo matemático previamente definido.

Neste contexto, a interpolação em MDTs/MDSs é utilizada para determinar o valor da altitude de um ponto, a partir das altitudes conhecidas dos pontos amostrais vizinhos, para atender às seguintes situações (EL-SHEIMY *et al.*, 2005):

- (i) converter as amostras (pontos) irregularmente espaçadas para um padrão regular de distribuição;
- (ii) adensar um conjunto amostral;
- (iii) alterar a resolução espacial de uma estrutura *raster* para adequá-la a uma determinada aplicação; por exemplo, uma estrutura *raster* com 20 m de resolução espacial pode ser interpolada a fim de gerar uma nova estrutura com 40 m de resolução espacial (BURROUGH e McDONNELL, 2004);
- (iv) converter estruturas vetoriais para estrutura *raster* de representação da superfície, para possibilitar a integração com outros dados visando aplicações como, por exemplo, ortorretificação de imagens.

Com relação ao exposto no item (iv) sabe-se que o formato vetorial dos arquivos gráficos para representação da superfície requer pouco espaço físico para o seu armazenamento, representa feições com maior precisão e se estrutura sobre relações topológicas. Já o formato matricial (*raster*) representa a variação espacial de modo mais eficiente (indicada por uma escala de cores ou nível de cinza), gera melhores visualizações 3D da superfície do terreno, permite tratamentos e realces digitais, além de possibilitar maior integração de dados, motivos pelos quais esse formato é o mais utilizado para a representação do relevo (BURROUGH e McDONNELL, 2004).

Os métodos de interpolação podem ser classificados de acordo com os seguintes critérios (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989; LANDIM, 2000; CAMARGO *et al.*, 2001 BURROUGH e McDONNELL, 2004; EL-SHEIMY *et al.*, 2005):

1. Quanto ao ajuste da superfície interpolada em relação ao conjunto amostral: interpolação ajustada ou exata e aproximada ou inexata. Na interpolação ajustada a estimativa da altitude de um ponto do conjunto amostral tem o mesmo valor da altitude desse ponto. Ou seja, a interpolação ajustada gera uma superfície que passa por todos os pontos do conjunto amostral. A interpolação aproximada gera uma superfície que não necessariamente passa pelos pontos amostrados e normalmente indicam as tendências das superfícies.

As diferenças estatísticas entre os valores interpolados e amostrais normalmente são usadas como indicadores de qualidade da interpolação. Na Figura 7 é ilustrado o comportamento da superfície após o uso de interpolador ajustado e aproximado.

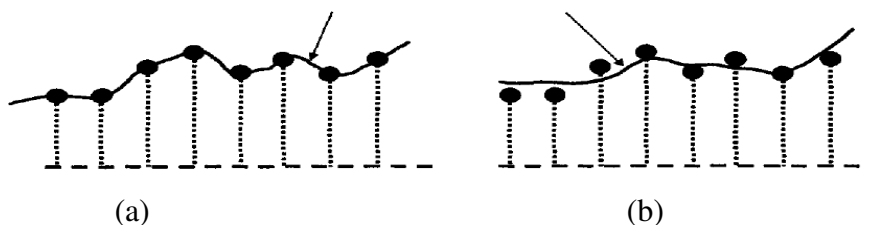


Figura 7 - Métodos de interpolação: (a) ajustada; (b) aproximada.

Fonte: Adaptada de El-Sheimy *et al.* (2005).

2. Quanto à abrangência do conjunto amostral: interpolação global e local. Como os próprios nomes sugerem, na interpolação global cada novo valor de altitude é estimado a partir de todo conjunto amostral. A suposição implícita nesta classe de interpoladores é que, para a caracterização da superfície, predomina a variação em larga escala, e que a variabilidade local não é relevante. Na abordagem local, cada ponto da superfície é estimado apenas a partir da interpolação das amostras mais próximas. A suposição implícita é que predominam os efeitos puramente locais.
3. Quanto à modelagem matemática relativamente às características do terreno: interpolação determinística e geoestatística. Métodos de interpolação determinísticos baseiam-se apenas em formulações matemáticas para estimar valores fora do conjunto amostral. Além da abordagem matemática, os métodos geoestatísticos consideram as propriedades estatísticas da superfície, como variabilidade espacial das amostras e relação de dependência entre elas.

A partir dessa classificação, os métodos de interpolação mais usuais para obtenção de MDTs e MDSs poderiam ser agrupados segundo três abordagens:

- (i) métodos determinísticos ajustados de abrangência local: interpolação linear simples, interpolação bilinear, média móvel ponderada, ponderado pelo inverso da distância, vizinho mais próximo ou vizinho natural, *spline* ou mínima curvatura;
- (ii) método determinístico aproximado de abrangência global: análise de superfícies de tendência;
- (iii) método geoestatístico ajustado ou aproximado de abrangência global e local: krigagem.

Porém, valem as seguintes considerações quanto a métodos interpoladores:

- (i) não existe um método de interpolação que seja o melhor ou claramente superior a outro e que seja apropriado para todas as aplicações (EL-SHEIMY *et al.*, 2005);
- (ii) segundo Watson³ (1992, *apud* Maine *et al.*, 2001), as maiores dificuldades encontradas na interpolação são causadas devido à amostragem, que não representa adequadamente a superfície terrestre ou por erros de observação;
- (iii) o critério mais importante para escolha do método de interpolação é sua capacidade de levar em consideração feições características da superfície e sua capacidade de adaptação às variações do terreno (EL-SHEIMY *et al.*, 2005).

A seguir é apresentada uma breve descrição dos métodos utilizados neste trabalho. A fundamentação e a formulação matemática de cada abordagem podem ser encontradas em bibliografia específica como Isaaks e Srivastava (1989); Burrough e McDonnell (2004); El-Sheimy *et al.* (2005).

2.1.3.1 Interpolação bilinear

Este método é bastante utilizado em processos de geração de MDTs e MDSs devido à simplicidade de sua formulação (LI *et al.*, 2005). Pode ser executado a partir de um mínimo de quatro pontos amostrais não colineares, sendo adequado, portanto, para superfícies estruturadas segunda a grade regular quadrada. Sua expressão matemática é dada pela seguinte equação:

$$Z_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i \quad (5)$$

onde Z_i representa o valor da altitude do ponto a interpolar.

A interpolação bilinear produz uma superfície contínua e não suavizada na transição entre as superfícies locais, mas que passa exatamente sobre os pontos amostrais (interpolador exato).

2.1.3.2 ANUDEM

³ WATSON, D. **Contouring**: a guide to the analysis and display of spatial data. England: Pergamon Press, 1992.

Uma variação da técnica de interpolação *spline* foi desenvolvida em 1989 por Michael Hutchinson para geração de modelos digitais hidrograficamente condicionados. Trata-se do aplicativo denominado ANUDEM – *Australian National University Digital Elevation Model* (MAUNE *et al.*, 2001a).

O método foi concebido para proporcionar uma modelagem que melhor caracterizasse as linhas de descontinuidade da superfície, como divisores de água e vertentes, de forma a melhor representar a rede de drenagem e, conseqüentemente, o escoamento superficial, não adequadamente contemplado pelos demais interpoladores (HUTCHINSON, 1996).

O princípio de interpolação do ANUDEM foi implementado no *software ArcInfo* através do aplicativo *Topogrid*, posteriormente adaptado para o ambiente *ArcGis*, quando passou a ser chamar “Topo to Raster”. O método utiliza uma técnica de interpolação baseada em diferenças finitas iterativas, para gerar uma grade regular a partir de pontos, curvas de nível ou polígonos, permitindo ainda a imposição de linhas de crista e da rede de drenagem. Essa imposição objetiva identificar depressões espúrias não percebidas na geração do MDE, de forma a torná-lo hidrograficamente condicionado (MDEHC), já que haverá uma coincidência entre a drenagem numérica e a real (ESRI, 2009b).

O método tem sido utilizado como suporte à gestão de recursos hídricos (WILSON *et al.*, 2000; ANA, 2006) assim como tem motivado estudos para determinação de áreas de preservação permanente (HOTT *et al.*, 2005; NASCIMENTO *et al.*, 2005; MACHADO, 2010).

2.2 Sensoriamento remoto orbital

O desenvolvimento do sensoriamento remoto em base orbital observado na última década do século XX ampliou as possibilidades de aplicações de imagens orbitais para estudos dos recursos naturais e do ambiente terrestre.

No contexto da representação cartográfica destaca-se a importância do programa LANDSAT, consagrado como uma importante fonte de aquisição de informação sobre recursos naturais terrestres. A partir do primeiro satélite da série, lançado em 1972, o programa gerou imagens de média resolução espacial até hoje utilizadas como fonte de extração de informação planimétrica. Segundo Correia (2008), a partir de 1999, com o lançamento de satélites comerciais operando com sensores de alta resolução espacial e com capacidade de mapeamento planialtimétrico decorrente de visada estereoscópica,

surge uma mudança de paradigma na produção cartográfica. A elaboração de bases cartográficas em escalas maiores que 1:250.000 era até então realizada por métodos tradicionais, como por exemplo, pelo processo fotogramétrico. Porém, a partir dos sistemas sensores orbitais de alta resolução espacial e radiométrica, construídos com maior rigor geométrico, tornou-se possível produzir bases cartográficas em escalas até 1:25.000 (MACHADO-SILVA *et al.*, 2003).

2.2.1 Sistemas sensores

Os sistemas sensores digitais são dispositivos capazes de detectar a radiação eletromagnética e convertê-la em sinal digital passível de ser registrado e quantificado como uma imagem digital, cujo menor elemento é chamado de *picture element* ou *pixel* (WOLF e DEWITT, 2004).

Duas diferentes tecnologias de imageamento são utilizadas em sensores ópticos digitais: o CCD (*Charge-Coupled Device*) e o CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*)

A tecnologia CCD (ou dispositivo de carga acoplada) de imageamento digital é mais comumente utilizada em satélites que operam com sensores ópticos de alta resolução espacial, assim como em câmeras utilizadas em levantamentos aerofotogramétricos. Trata-se de um conjunto de vários detectores acoplados a um circuito integrado, onde cada detector corresponde a um *pixel* da imagem. Assim, em cada *pixel* fica armazenada uma carga elétrica proporcional à intensidade da luz incidente registrada pelo detector. Essa carga é convertida para o formato digital de tal forma que cada *pixel* na imagem estará associado a um nível de cinza, de acordo com sua resolução radiométrica (WOLF e DEWITT, 2004; MOREIRA, 2007).

De acordo com Poli (2005), a tecnologia baseada em sensores digitais CMOS vem ganhando interesse por operarem a uma tensão mais baixa do que o CCD, reduzindo assim o consumo de energia. Segundo Kocaman (2008), essa tecnologia é mais utilizada em câmeras digitais de pequeno formato. Maiores detalhes sobre diferenças entre as tecnologias CCD e CMOS podem ser obtidas em Litwiller (2001).

As características dos sistemas sensores digitais orbitais são expressas, em geral, segundo quatro domínios de resolução: espectral, espacial, radiométrica e temporal.

A resolução espectral corresponde à dimensão e número de intervalos de comprimento de onda dentro do espectro eletromagnético em que o sensor opera. Esta característica está diretamente associada à capacidade de discriminação de feições em

função do comportamento espectral dos alvos sobre a superfície terrestre. Se o sistema sensor possui detectores operando em múltiplas faixas do espectro, ele é denominado multiespectral, a exemplo do sensor ETM+ do Landsat 7, que opera em oito bandas espectrais (MOREIRA, 2007). Já os sistemas hiperespectrais registram dados em centenas de bandas, enquanto que sistemas ultraespectrais coletam dados em milhares de bandas. Informações complementares sobre sensores hiperespectrais e ultraespectrais podem ser obtidas em Jensen (2009).

A resolução espacial é a menor unidade de imageamento do sensor. Ela corresponde à distância, no terreno, definida pelo ângulo de visada instantâneo de cada detector, chamado IFOV (*Instantaneous Field of View*). Em um sistema sensor digital, o campo de visão FOV (*Field of View*) está associado ao sistema óptico, correspondente ao campo de visada da imagem como um todo, enquanto que o IFOV está associado ao detector. Uma vez mantido o valor de IFOV a dimensão no terreno vai depender da altitude da plataforma. Quanto maior a abertura definida pelo IFOV, menor a resolução espacial (Figura 8). A referência mais usada para a resolução espacial é o tamanho do *pixel*, podendo ainda estar associada ao termo GSD (*Ground Sample Distance*) (KOCAMAN, 2008).

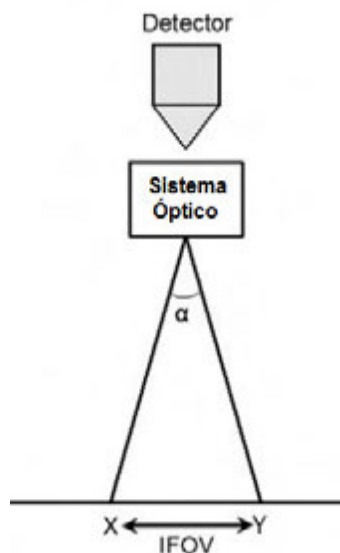


Figura 8 - Representação do IFOV.

Fonte: Mather (2004).

A resolução radiométrica refere-se à sensibilidade do sistema sensor em discriminar pequenas variações na intensidade da radiância espectral recebida dos alvos, convertida em sinal elétrico e representada por um valor numérico digital ou nível de cinza, sendo expressa em *bits* (MOREIRA, 2007). O valor mais tradicional de resolução radiométrica é de 8 *bits*, correspondentes a 256 níveis de cinza. Sensores de alta

resolução espacial mais recentes (Ikonos, GeoEye, Worldview, dentre outros) operam com uma resolução radiométrica de 11 *bits*, o que corresponde a ter 2048 níveis de cinza.

Já a resolução temporal é função das características da órbita do satélite e diz respeito ao intervalo de tempo entre a aquisição de duas imagens consecutivas de uma mesma área (passagem pelo nadir). Quanto maior o intervalo de tempo, menor é a resolução temporal.

De acordo com Mikhail *et al.* (2001), Wolf e Dewitt (2004) e Tommaselli *et al.* (2000) os sensores digitais também podem ser classificados em função da disposição dos detectores (matricial, discreto, linear) e do tipo de imageamento (sistemas de quadro, varredura mecânica, varredura eletrônica). Os principais sistemas sensores digitais estão apresentados a seguir.

No sistema imageador de arranjo matricial são utilizados sensores de câmera de quadro (*Frame System*). Esses sensores registram a radiação refletida de uma área da superfície em sua totalidade, em um mesmo instante, a exemplo de câmaras digitais utilizadas para levantamentos aerofotogramétricos (Figura 9). O sistema consiste de um arranjo bidimensional de CCDs, montado no plano focal da câmara com um único conjunto de lentes (WOLF e DEWITT, 2004), sendo as imagens adquiridas segundo a projeção cônica.

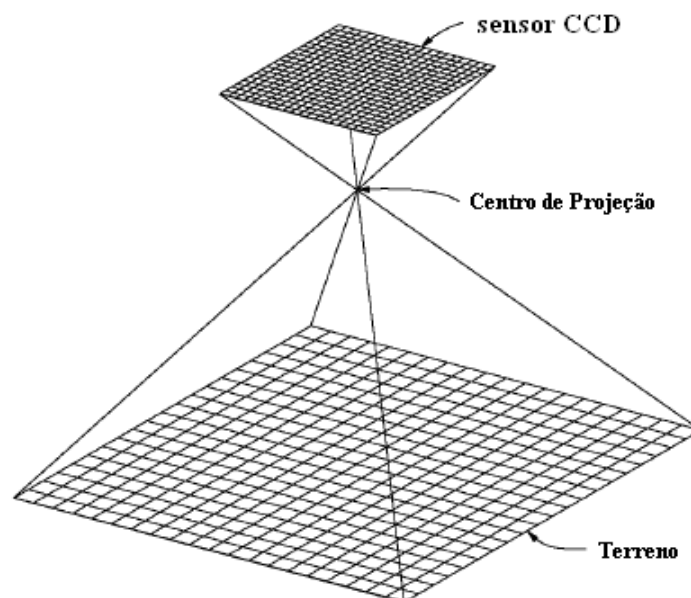


Figura 9 - Geometria do sensor de arranjo matricial.
Fonte: WOLF e DEWITT (2004).

No sistema imageador de varredura mecânica (*Electromechanical Scanner*), que utiliza detectores discretos, muda-se o campo de visada através da rotação mecânica de

um espelho em torno do eixo paralelo à trajetória do satélite (Figura 10). Este modo de varredura é chamado de *whiskbroom*.

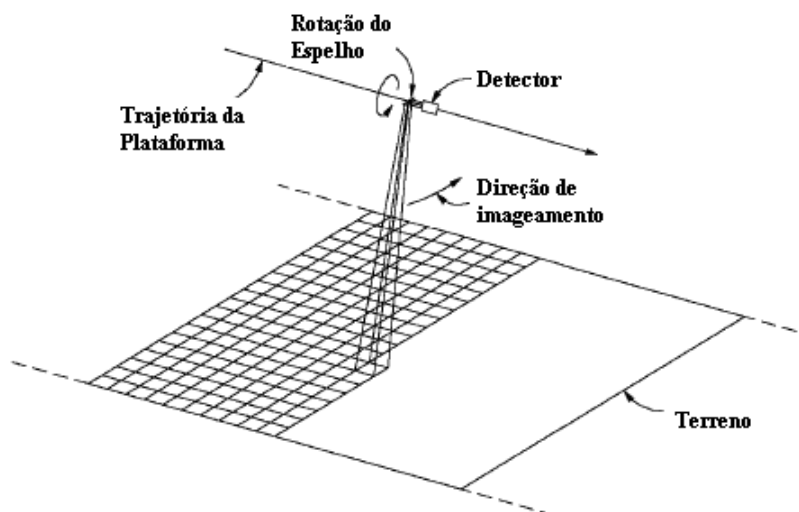


Figura 10 - Geometria do sensor de varredura mecânica.
Fonte: WOLF e DEWITT (2004).

Nesse sistema, que utiliza detectores discretos, o imageamento é realizado na direção perpendicular à trajetória do satélite (*across track*), e o espelho gira de um lado para outro, adquirindo um pixel a cada instante até a formação completa de uma linha. Com o avanço do satélite uma nova linha começa a ser registrada, pixel a pixel, e assim sucessivamente (SABINS, 1987). O conjunto de linhas contíguas compõe o arranjo bidimensional da imagem final. Esta geometria foi utilizada em sensores do satélite Landsat, por exemplo.

A estabilidade geométrica de imagens obtidas por sensores de varredura mecânica é na maioria das vezes mais suscetível a efeitos de distorção devido ao movimento irregular do satélite (WOLF e DEWITT, 2004).

O sistema imageador de arranjo linear utiliza uma barra de detectores, tipicamente uma barra CCD, dispostos segundo um arranjo linear no plano focal formado pelas lentes do sistema óptico. Nesse sistema, também conhecido com *pushbroom scanner*, a barra de detectores é posicionada perpendicularmente à trajetória da plataforma, onde cada detector do CCD corresponde a uma área (célula) imageada no terreno, conforme ilustrado na Figura 11. Nesse sistema a aquisição é realizada linha a linha, em diferentes instantes, sendo a imagem formada pelo movimento de varredura eletrônica, à medida que a plataforma se desloca ao longo de sua trajetória (*along track*). A imagem é formada, portanto, segundo a projeção cônico-cilíndrica: cônica, correspondente à projeção da barra de detectores a partir do centro perspectivo, e

cilíndrica, em função do deslocamento paralelo dessa barra ao longo da trajetória (CORREIA, 2008).

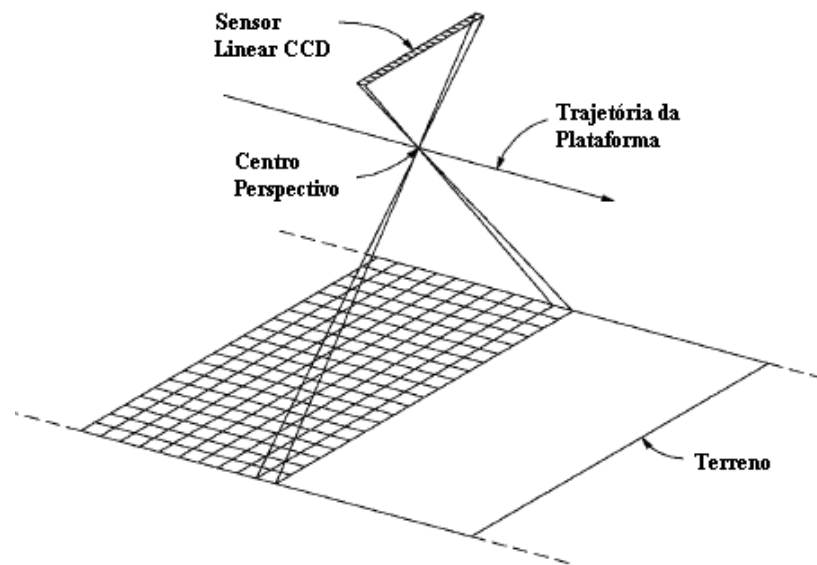


Figura 11 - Geometria do sensor de arranjo linear tipo *pushbroom*.
Fonte: WOLF e DEWITT (2004).

A cena resultante desse tipo de imageamento é uma combinação de imagens (linhas) registradas em diferentes posições, cada uma delas com seu próprio centro perspectivo e, conseqüentemente, com diferentes parâmetros de orientação, o que pode tornar fraca a rigidez geométrica dessas imagens (MEDEIROS e TOMMASELLI, 2009). Entretanto, essa geometria pode ser melhorada através do uso de determinados instrumentos a bordo das plataformas, como GPS, giroscópios, sistema de navegação inercial, *star tracker*, entre outros, além da combinação de sensores lineares (MIKHAIL *et al.*, 2001).

Fabricantes de satélites que operam com sensores de alta resolução espacial (por exemplo, Spot 5, Ikonos 2, Eros B, Geoeye 1, Worldview, Quickbird, ALOS) empregam o sistema de sensores digitais de arranjo linear.

Os sensores digitais de arranjo linear ainda apresentam como característica a possibilidade de formação de pares estereoscópicos, que permitem a determinação da posição 3D dos pontos do terreno.

No sensoriamento remoto orbital os pares estereoscópicos podem ser formados segundo duas configurações (TOUTIN, 2001): por imagens tomadas de órbitas distintas (*across track*) ou adquiridas continuamente ao longo de uma mesma órbita (*along track*).

A aquisição a partir de diferentes órbitas é realizada devido à capacidade de inclinação lateral do sensor em relação à vertical da plataforma do satélite, de forma que as imagens são adquiridas segundo dois ângulos de observação diferentes.

A aquisição de pares de imagens estereoscópicas segundo essa configuração ocorre em dias diferentes, ou seja, as imagens do par estéreo podem ser adquiridas sob diferentes condições meteorológicas e de ocupação do solo. Essas diferentes condições provocam variações radiométricas entre as imagens que comprometem o sucesso da correlação no processo de geração automática de MDEs. De acordo com Correia (2008), a equipe técnica da empresa Spot Image relatou um índice de sucesso de apenas 50% nesse tipo de geração de MDEs.

No caso dos pares estereoscópicos adquiridos na mesma órbita (*along track*) a superfície é imageada ao longo da trajetória do satélite, sendo as imagens formadas com defasagem de alguns minutos. Na prática, as imagens são adquiridas sob as mesmas condições atmosféricas e de iluminação, facilitando a correspondência entre as cenas e influenciando positivamente a qualidade da altimetria do MDS resultante. Nessa geometria de aquisição ao longo da órbita, os sistemas de imageamento registram continuamente uma mesma faixa no terreno com ângulos de visada diferentes.

O sensor HRS (*High Resolution Stereoscopic*) do satélite Spot5 apresenta dois sistemas independentes de imageamento: o primeiro está orientado na mesma direção da órbita (visada *forward*) enquanto o outro está orientado na direção contrária (visada *backward*). O ângulo de afastamento das visadas em relação ao nadir é de 20°.

No caso do sensor ASTER as imagens são adquiridas segundo as visadas nadir e à frente (*forward*) (ERSDAC, 2009). Já o sensor PRISM/ALOS imageia a mesma superfície três vezes ao longo da órbita, devido ao sistema trilinear (*triplet*) de imageamento independente: para trás (*backward*), nadir e para frente (*forward*) (EORC e JAXA, 2007a), conforme apresentado na Figura 12.

No processo de aquisição de pares estereoscópicos de imagens, a relação entre a altitude H do satélite e a distância entre os centros perspectivos de duas imagens consecutivas, chamada de base (B), é fundamental para o cálculo de desníveis a partir de medidas de paralaxe (WOLF e DEWITT, 2004).

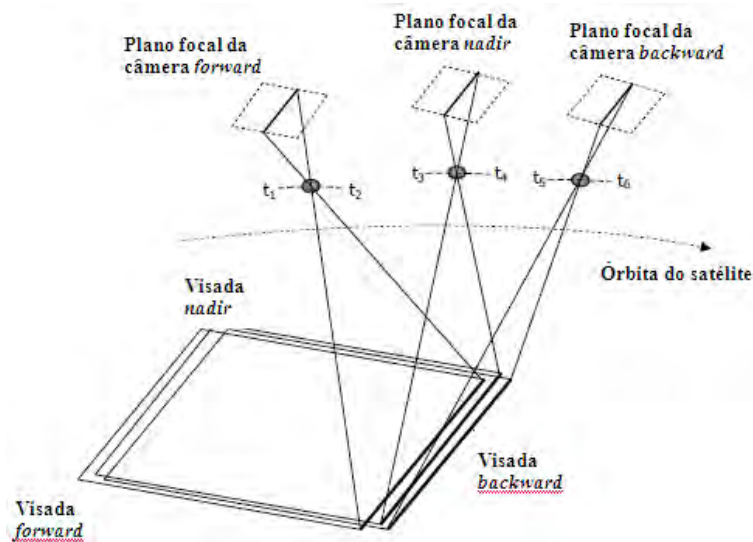


Figura 12 - Esquema de operação simultânea das câmeras do satélite ALOS com cada câmera (*forward*, *backward*, *nadir*) adquirindo uma linha da imagem no instante t ($t_3-t_1 = t_5-t_3 \approx 45''$).

Fonte: Adaptada de Kocaman (2008).

Como pode ser visto em Kraus (1993), quanto maior a razão B/H menor é o desvio-padrão estimado para as componentes X, Y e Z dos pontos do espaço objeto, indicando que quanto maior a razão B/H melhor será a qualidade do modelo 3D gerado. Entretanto, o processo de extração automática das elevações é mais eficiente quando há menores variações radiométricas entre o par estéreo, o que ocorre com menores valores de B/H (CORREIA, 2008).

De acordo com Toutin (2001), valores de razão B/H entre 0,6 e 1,2 são adequados para geração de mapeamento topográfico. Nesse intervalo estão incluídas as imagens estereoscópicas adquiridas pelos satélites Spot5, Ikonos, Geoeye, PRISM/ALOS (entre as visadas *backward-forward*), entre outros.

Na próxima Seção estão apresentadas as características do satélite ALOS, cujas imagens do sensor PRISM são utilizadas nessa pesquisa.

2.3 Satélite ALOS

O satélite japonês ALOS, desenvolvido pela JAXA, foi lançado em 24 de janeiro de 2006, com vida útil planejada de 3 anos. Em 12 de maio de 2011, após ser operado com êxito por mais de 5 anos, o satélite saiu definitivamente de operação devido a anomalias que comprometeram a geração de energia a bordo do satélite (JAXA, 2011).

Durante a fase operacional do ALOS, a *Alaska Satellite Facility* (ASF) e a *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA), através do AADN

(*Americas ALOS Data Node*), foram responsáveis pela distribuição, nas Américas, das imagens desse satélite (ASF, 2011a).

A partir do acordo com a ASF, o IBGE tornou-se distribuidor dessas imagens para os órgãos do Governo Federal, Estadual e Municipal, instituições de pesquisa e demais usuários não comerciais do Brasil (IBGE, 2007; ASF, 2011b). Esta parceria foi encerrada em 25 de março de 2011 (IBGE, 2011), assim como o AADN encerrou suas operações no dia 31 do mesmo mês (ASF, 2011c). Atualmente as imagens ALOS são comercializadas apenas por empresas distribuidoras, a preço de mercado.

A missão ALOS foi concebida para adquirir imagens do planeta, visando contribuir para o mapeamento cartográfico em escala 1:25.000, gestão ambiental, monitoramento de desastres e levantamento de recursos naturais (IBGE, 2007).

Para cumprir essa missão, a plataforma ALOS levou a bordo três sensores: PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*), AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near-infrared Radiometer type 2*), e PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*).

Sendo as imagens do sensor PRISM utilizadas neste trabalho, e em decorrência da necessidade de um melhor detalhamento, o mesmo será apresentado na Seção 2.3.1.

O sensor AVNIR é um sensor óptico multiespectral, do tipo *pushbroom*, que operou nas três faixas da luz visível e no infravermelho próximo. Apresenta resolução radiométrica de 8 bits e resolução espacial de 10 m (no nadir). A largura da faixa de imageamento é de 70 km (no nadir). O sensor também admite uma inclinação lateral (transversal à trajetória) de $\pm 44^\circ$, útil para observação e monitoramento de desastres (EORC e JAXA, 2007b).

O sensor PALSAR é um sensor ativo que operou na banda L da região das microondas do espectro eletromagnético, possibilitando a aquisição de imagens sem interferência de nuvens e durante o dia e à noite. As imagens do sensor podem ser adquiridas em diferentes polarizações e segundo diferentes modos de operação (*fine*, polarimétrico e *ScanSAR*). Dependendo do modo de operação a resolução espacial pode variar de 10 a 100 m, e cobrir faixas de 20 a 250 km de largura, enquanto que as polarizações podem variar desde HH (envio e recepção no modo horizontal) ou VV (envio e recepção do sinal no modo vertical), ambos no modo *fine*, até HH+HV+VH+VV (modo polarimétrico) (EORC e JAXA, 2007c).

O satélite ALOS operou segundo a órbita heliossíncrona, com altitude de 691,65 km e inclinação de 98,16° em relação ao plano do Equador, com período de revisita no nadir de 46 dias (EORC e JAXA, 2007d).

A plataforma ALOS também leva a bordo um subsistema de controle de órbita e atitude (AOCS – *Attitude and Orbit Control Subsystem*) que permite a determinação precisa da posição e atitude do satélite. O AOCS estima a posição do satélite através de receptores GPS de dupla frequência (GPSR), enquanto que a atitude é estimada pelo *Star Tracker* (STT) e por uma unidade de referência inercial (*Inertial Reference Unit – IRU*); o giroscópio possibilita a correção da atitude e posição do satélite, enquanto que um refletor a *LASER* é usado para calibração da posição determinada por GPS. Adicionalmente, um sensor de deslocamento angular (*Angular Displacement Sensor – ADS*) registra as oscilações do sensor PRISM durante o imageamento (IWATA, 2003; JAXA, 2004). A tecnologia presente no AOCS teve como objetivo a geração de imagens com alta qualidade geométrica, motivo pelo qual apresenta grande potencial para aplicações cartográficas (IWATA, 2003; JAXA, 2007).

2.3.1 Sensor PRISM

O PRISM é um sensor óptico, do tipo *pushbroom*, que opera com 1 banda pancromática nos comprimentos de ondas entre 0,52 e 0,77 μm ; sua resolução radiométrica é de 8 bits e a resolução espacial de 2,5 m no nadir. Este sensor é do tipo *pushbroom* e compreende 3 sistemas de imageamento, com dispositivos ópticos independentes, que permitem obter simultaneamente cenas com visadas no nadir, inclinada para frente (*forward*) e inclinada para trás (*backward*), tornando possível a aquisição de imagens estereoscópicas ao longo da trajetória (IBGE, 2009).

O sensor PRISM é formado por 6 unidades de CCD na visada nadir e 8 unidades nas visadas *backward* e *forward* (Figura 13). Cada CCD da visada nadir é formado por 4992 pixels x 16000 linhas, enquanto que os CCDs das visadas *backward* e *forward* são formados por 4928 pixels x 16000 linhas (EORC e JAXA, 2007e).

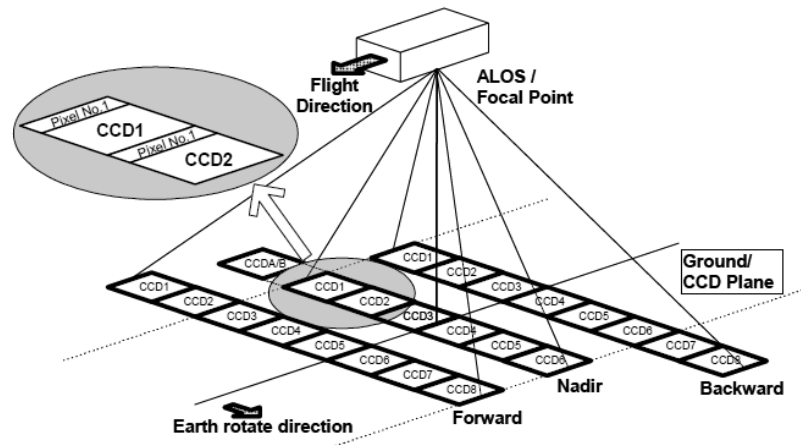


Figura 13 - Configuração das unidades de CCDs do sensor PRISM.
Fonte: Adaptada de Takaku e Tadono (2007).

O sensor operou em diferentes modos de observação por combinação de visadas. No modo de observação nadir o usuário recebe apenas a imagem correspondente a essa visada, composta por 6 CCDs recobrendo uma faixa de 70 km de largura. No modo de *triplet* de observação (*nadir +backward +forward*) são considerados, no máximo, 4 CCDs por visada, imageando simultaneamente uma faixa de 35 km de largura (EORC e JAXA, 2007e). Na Figura 14 são ilustrados os telescópios do sensor PRISM e a geometria de aquisição *triplet* e nadir.

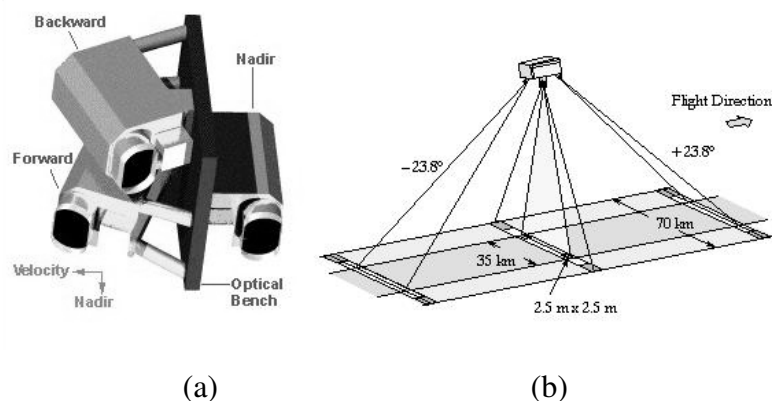


Figura 14 - Instrumento PRISM (a) e geometrias de aquisição *triplet* e nadir (b).
Fonte: JAXA (2006).

No modo *triplet* de observação as visadas *backward* e *forward* têm inclinações de $23,8^\circ$ em relação à visada nadir (Figura 14b), possibilitando a formação de pares estereoscópicos com uma relação base/altura (B/H) igual a 1,0 entre essas visadas. O campo de visada (FOV – *Field of View*) do sensor PRISM ($5,8^\circ$ no nadir) permite a superposição quase total das 3 imagens ao longo da faixa de 35 km, sem que nenhum recurso mecânico seja usado para isto. Sem este campo de visada não haveria

superposição entre as imagens devido à rotação da Terra (TADONO *et al.*, 2004; CHEN *et al.*, 2004).

Além da inclinação da visada ao longo da trajetória do satélite, o sensor pode ser inclinado lateralmente em $\pm 1,5^\circ$ no modo de observação *triplet* para garantir a continuidade entre faixas. Entretanto, o ângulo de inclinação lateral de $1,2^\circ$, alternado entre positivo e negativo a cada ciclo, foi estabelecido pela JAXA como suficiente para imagear a superfície terrestre estereoscopicamente de forma contínua (EORC e JAXA, 2007f; TADONO *et al.*, 2009).

As características do sensor PRISM, que apresenta resolução espacial de 2,5 m e capacidade de geração de MDSs por estereoscopia, combinadas com a tecnologia presente no AOCS visam alcançar a acurácia necessária para mapeamento na escala 1:25.000 (JAXA, 2004; 2007).

2.3.1.1 Níveis de processamento

As imagens dos sensores PRISM podem ser adquiridas em 3 níveis de processamento diferentes: 1A, 1B1, 1B2(R e G), conforme apresentado na Tabela 4. Estes produtos são identificados pela JAXA como produtos padrão (*standard products*), fornecidos no formato CEOS⁴.

Tabela 4 - Níveis de processamento das imagens PRISM.

Nível	Definição
1A	Corresponde à imagem bruta (sinal digital convertido em imagem). Os coeficientes para calibração radiométrica e os dados precisos de órbita e atitude necessários à correção geométrica estão anexados. Neste nível de processamento é disponibilizado um arquivo de imagem para cada um dos CCDs que compõem cada visada.
1B1	As imagens apresentam correção radiométrica e têm anexados os dados precisos de órbita e atitude necessários à correção geométrica. Como no nível 1A, é criada uma imagem para cada unidade de CCD.
1B2	Neste nível as imagens apresentam correção radiométrica e correção geométrica. Cada visada é formada por apenas 1 imagem, resultante da mosaicagem das imagens individuais dos CCDs. As seguintes opções de correção estão disponíveis: 1B2R: Georreferenciada. A imagem apresenta seus pixels orientados no sentido da trajetória do satélite, bem como os parâmetros da projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) anexados. Apresenta ainda arquivos auxiliares contendo vetores de posição e velocidade da plataforma. 1B2G: Geocodificada. Esta imagem corresponde à imagem 1B2R rotacionada, de forma que seus <i>pixels</i> estão projetados e orientados segundo o norte da quadrícula UTM.

Fonte: Adaptada de EORC e JAXA (2007e); IBGE (2009).

⁴Formato que corresponde a um misto dos formatos ASCII e binário (NASA, 2010; GEOSCIENCE AUSTRALIA, 2010).

Os coeficientes de correção geométrica empregados no nível de processamento 1B2 são obtidos a partir das informações do AOCS, o que pode dispensar o uso de pontos de controle medidos no terreno para se obter uma imagem corrigida e referenciada ao sistema terrestre. Entretanto, a qualidade geométrica dessas imagens está diretamente vinculada à qualidade dos dados produzidos pelo AOCS, além do que a correção aplicada não considera o efeito do deslocamento devido ao relevo (IBGE, 2009).

2.3.1.2 Calibração dos produtos PRISM 1B2 e especificações de acurácia

Desde o lançamento do satélite ALOS a JAXA realizou 4 operações para calibração e validação dos produtos padrão 1B2. Estas operações visaram determinar a qualidade das imagens e promover melhorias em sua acurácia, através da modificação e atualização de parâmetros que relacionam os dois sistemas (TAKAKU e TADONO, 2007; JAXA, 2009). Dessa forma, a calibração proporciona tanto a melhoria da acurácia das imagens como dos MDSs gerados a partir delas.

A última calibração das imagens PRISM 1B2 foi realizada em 1 de julho de 2009 (JAXA, 2009), e os novos parâmetros foram implementados na versão 5.09 do *software* de processamento das imagens.

A calibração geométrica relativa das imagens foi realizada através da validação e correção dos parâmetros referentes ao alinhamento das unidades de CCD do sensor PRISM em relação a um plano de alinhamento teórico. Já a calibração geométrica absoluta foi realizada a partir da modelagem dos resíduos do alinhamento dos CCDs em relação a pontos de controle GPS existentes no terreno (TAKAKU e TADONO, 2007).

Como pode ser visto, a calibração geométrica absoluta está intimamente ligada a estimativas precisas da atitude e posição do satélite, proporcionadas pelos instrumentos do AOCS (STT, GPSR, IRU e ADS) embarcados na plataforma. De acordo com Tadono *et al.* (2009), a precisão alcançada na posição do satélite foi da ordem de ± 1 m, enquanto que na atitude foi de $\pm 0,00071^\circ$.

A calibração radiométrica absoluta das imagens PRISM, realizada pela JAXA foi feita tendo como referência as imagens AVNIR-2, adquiridas simultaneamente sobre a área de teste. A calibração radiométrica relativa foi executada através de algoritmos para corrigir ruídos, linhas defeituosas e diferenças radiométricas entre os CCDs (TADONO *et al.*, 2009).

Os resultados da última calibração (01/ jul/ 2009) do produto PRISM 1B2 estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Acurácia geométrica absoluta esperada após calibração de julho de 2009.

Visada	Direção do pixel (<i>along track</i>)	Direção da linha (<i>across track</i>)	Distância	Nº de pts. de controle	Nº de cenas
Nadir	5,6 m	5,3 m	7,8 m	5.499	586
<i>Forward</i>	4,9 m	6,1 m	7,8 m	1.771	225
<i>Backward</i>	5,0 m	7,1 m	8,7 m	4.839	525

Fonte: Adaptada de JAXA (2009).

Na Tabela 5 (e também na Tabela 6) a acurácia é expressa através do RMSE (*Root Mean Square Error*) das distâncias calculadas entre a posição dos pontos na geometria da imagem com a posição de seus homólogos obtido em campo (pontos de controle) determinados por posicionamento GPS.

Tabela 6 - Acurácia geométrica relativa esperada após calibração de julho de 2009.

	Direção do pixel (<i>along track</i>)	Direção da linha (<i>across track</i>)	Distância
Desvio padrão dentro de uma cena (1σ)	1,4 m	1,8 m	2,4 m

Fonte: Adaptada de JAXA (2009).

Relativamente à acurácia geométrica, deve ser ressaltado que os valores apresentados para o nível de processamento 1B2R não consideram os efeitos do deslocamento devido ao relevo. Para a correção dessa deformação deve ser realizado o processo de ortorretificação.

2.3.1.3 Produto PRISM 1B2- RPC

O produto PRISM 1B2-RPC é considerado como um produto derivado do PRISM padrão, compreendendo imagens no formato GeoTIFF e respectivos RPCs, (RESTEC, 2008a; 2011).

Os RPCs usados no modelo matemático baseado em funções racionais (RFM – *Rational Function Model*) são calculados a partir dos dados da posição e atitude do satélite e de calibração, em órbita, da geometria sensor (TAKAKU e TADONO, 2011). O *software* desenvolvido pela JAXA-EORC/RESTEC para essa finalidade é atualizado em função dos resultados obtidos nas respectivas calibrações do produto padrão. A expectativa inicial da JAXA em relação à acurácia do produto obtido via RPC apontava para diferenças pouco significativas em relação à acurácia do produto padrão (RESTEC,

2007; 2008b, 2009), fato confirmado pelas avaliações de acurácia seguintes, como destacam Takaku e Tadono (2009).

2.4 Distorções geométricas de imagens orbitais

As imagens orbitais brutas apresentam distorções geométricas significativas que limitam seu uso direto como um documento com propriedades cartográficas. As fontes dessas distorções estão associadas a diferentes sistemas (TOUTIN, 2004b):

- plataforma do satélite: variações na posição, velocidade e orientação;
- sensor: geometria da visada, efeito panorâmico, deslocamento do ponto principal;
- instrumentos de medição (GPS, *Star Tracker*): sincronismo dos relógios;
- Terra: rotação, esfericidade, relevo e adoção de um elipsóide para representar a superfície física da Terra;
- atmosfera: refração e turbulência;
- projeção cartográfica: projeção da superfície do elipsóide para uma superfície plana.

Algumas dessas distorções, especialmente aquelas referentes ao instrumento sensor, são geralmente corrigidas nas estações de recepção. O mesmo não ocorre com as distorções resultantes da interação com a atmosfera, dada a sua complexidade e não disponibilidade de dados atmosféricos relativos ao momento da aquisição (TOUTIN, 2004b).

As distorções associadas à plataforma se relacionam às variações de efemérides (posição e velocidade) e atitude. As variações da atitude (orientação) da plataforma, representadas pelos ângulos de rotação *yaw* (guinada), *roll* (rolagem) e *pitch* (arfagem) provocam rotações e deslocamentos transversais e longitudinais à varredura da cena. A Figura 15 ilustra o efeito dessas variações para sensores do tipo *pushbroom*.

Quanto às efemérides, uma mudança de velocidade da plataforma altera o intervalo de tempo necessário para o sistema óptico varrer cada linha no terreno. Em consequência, provoca deformação do *pixel* e alteração da escala na direção longitudinal à trajetória. Podem ocorrer ainda linhas superpostas ou lacunas na varredura eletrônica, função de menor ou maior velocidade da plataforma em relação ao valor nominal. Essa distorção apresenta um efeito semelhante ao da arfagem.

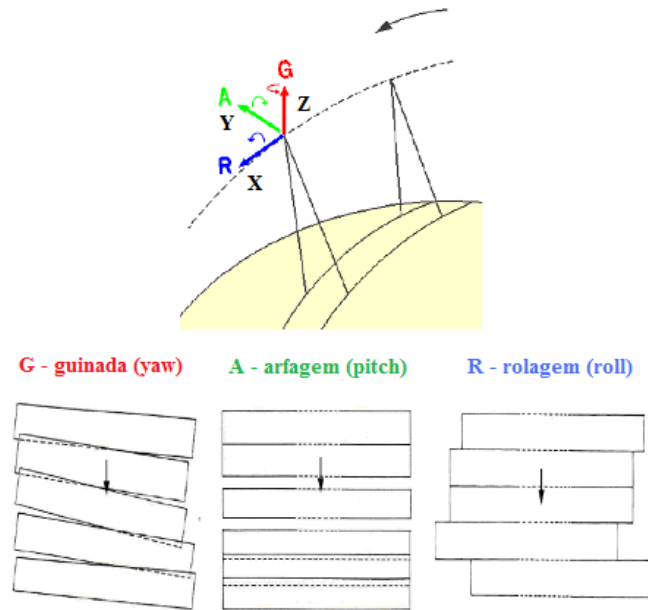


Figura 15 - Distorções de imagens orbitais devido a variações de atitude do satélite.
Fonte: Adaptada de Correia (2008).

As variações em altitude (eixo Z) aumentam a largura da faixa, e, portanto a escala, com deformação no pixel no sentido ortogonal a trajetória. Já as variações ao longo do eixo X produzem um efeito semelhante ao da arfagem, enquanto que mudanças em Y resultam similares ao erro provocado pela rolagem. Na Figura 16 são exemplificados esses efeitos.

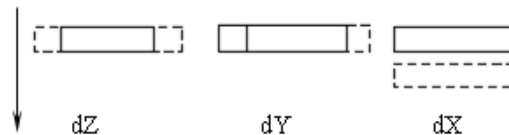


Figura 16 - Efeitos de variações ao longo dos eixos.
Fonte: Adaptada de Medeiros (2007).

A distorção panorâmica, relacionada com o sistema sensor, é originada pela variação do IFOV dentro do campo de visada. Como o IFOV corresponde a um ângulo fixo, ele cobre dimensões diferentes no terreno em função da inclinação da visada.

O efeito provocado pela rotação da Terra (*skew*) deve-se ao movimento relativo entre o satélite e a Terra. Enquanto o satélite se desloca, a Terra gira de oeste para leste, causando deslocamento entre varreduras (linhas) sucessivas (Figura 17). A compensação do posicionamento é feita com o deslocamento das linhas para leste. Esse efeito é o responsável pelo aspecto do paralelogramo das imagens corrigidas (D'ALGE, 2001).

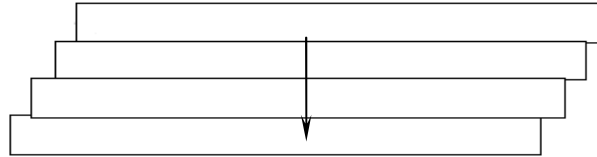


Figura 17 - Efeito provocado pela rotação da Terra.

A distorção geométrica provocada pela esfericidade da Terra acentua o efeito da distorção panorâmica e faz com que as dimensões dos *pixels* aumentem na medida em que o mesmo se afasta do nadir (Figura 18).

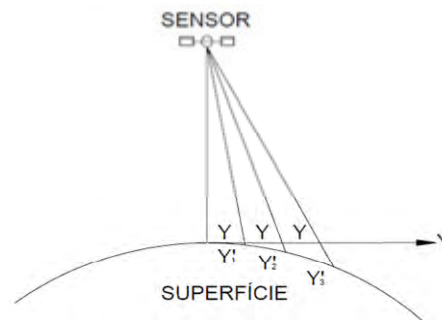


Figura 18 - Distorção devido à curvatura da Terra
Fonte: Marotta (2008).

A adoção de um elipsóide como modelo representativo da Terra é um meio bastante eficiente de se minimizar as distorções provocadas pela rotação e esfericidade da Terra (MACHADO-SILVA, 2007).

O relevo é uma das principais fontes de distorção geométrica nas imagens, e uma das mais difíceis de correção. Em imagens, considerando-se a visada nadir, de sensores de média ou baixa resolução espacial, o efeito causado pelo relevo pode, muitas vezes, ser desprezado em função da qualidade geométrica dessas imagens. Porém, para as imagens em visada oblíqua ou de sensores de alta resolução espacial, a topografia do terreno não pode ser desconsiderada. Como não é possível modelar a distorção devida ao relevo através de modelos matemáticos, normalmente recorre-se a MDTs/MDSs para corrigir essa distorção (MACHADO-SILVA, 2007).

2.5 Modelos de correção geométrica

As imagens orbitais são geradas a partir dos dados transmitidos pelo satélite e recebidos nas estações terrestres, onde podem ser submetidas a processos de correção radiométrica e correção geométrica, dependendo do nível do processamento realizado.

A correção radiométrica, que foge ao escopo desse trabalho, emprega parâmetros previamente conhecidos que integram o arquivo de calibração radiométrica.

Já o processo de correção geométrica depende de variáveis que possibilitam estabelecer uma relação entre um ponto na imagem (*pixel*) e sua posição na superfície terrestre (MACHADO-SILVA, 2007).

Em termos práticos, a correção geométrica de imagens orbitais compreende a adoção de modelos e funções matemáticas para representar a relação geométrica entre as coordenadas da imagem (espaço imagem) e respectivas coordenadas no terreno (espaço objeto), segundo determinado Sistema de Referência Terrestre e projeção cartográfica.

Os modelos de correção geométrica consideram desde simples transformações planas entre o espaço imagem e o espaço objeto, até complexos modelos matemáticos e, em geral, podem ser classificados segundo duas categorias: modelos físicos ou rigorosos e modelos empíricos ou generalizados (POLI *et al.*, 2004; TOUTIN, 2004b; KIM e DOWAN, 2006).

Os modelos físicos descrevem as características físicas do sensor e a geometria de aquisição da cena. Os modelos empíricos não requerem conhecimento *a priori* de nenhum componente do sistema de aquisição e relacionam a imagem ao terreno através de funções polinomiais, como o modelo de funções racionais (TOUTIN, 2004b). Esses modelos são apresentados a seguir.

2.5.1 Modelos rigorosos

O modelo rigoroso também é referenciado na literatura como modelo paramétrico, modelo físico 3D, modelo físico 3D do sensor, ou simplesmente como modelo físico do sensor (TOUTIN, 2003; TOUTIN, 2004b; POLI *et al.*, 2004; KOCAMAN e GRUEN, 2008).

De acordo com Toutin (2004b), o modelo físico 3D deve modelar matematicamente as distorções geométricas relativas à plataforma (posição, velocidade e atitude), ao sensor (geometria da visada e efeito panorâmico), à Terra (adoção do elipsóide e correção do relevo), e ao sistema de projeção cartográfica adotado (elipsóide-plano), o que proporciona mais rigor geométrico na solução.

A correção geométrica através dessa modelagem pressupõe o conhecimento dos parâmetros de orientação interior e exterior do sensor. A orientação interior é realizada a partir dos arquivos de calibração geométrica do sensor, que apresentam como principais parâmetros a distância focal, parâmetros do vetor de visada, coordenadas do ponto principal, posição dos sistemas sensores dentro do satélite (ângulos de *boresight*,

deslocamento entre barras de detectores e posição dos detectores em relação ao plano focal (MACHADO-SILVA, 2007).

A orientação exterior é obtida a partir dos dados de efemérides, que permitem recuperar a posição (coordenadas X, Y, Z) e velocidade da plataforma a cada instante de tempo; dos dados de atitude, correspondentes às três possíveis rotações da plataforma em relação a sua órbita (guinada, arfagem e rolamento), e da referência temporal, que permite saber o instante de aquisição de cada ponto da imagem. Adicionalmente, a modelagem rigorosa prevê, necessariamente, a utilização de pontos de controle para solução do modelo.

Em geral, os modelos rigorosos baseiam-se no método fotogramétrico, cuja solução é obtida por ajustamento rigoroso de feixes perspectivos (*bundle adjustment*) com o método dos mínimos quadrados, tendo por base o princípio da condição de colinearidade. Dessa forma, tais modelos são desenvolvidos partindo-se do princípio de que um ponto no espaço imagem (p), seu homólogo no espaço objeto (P) e o centro perspectivo da imagem orbital (CP_i) são colineares (Figura 19).

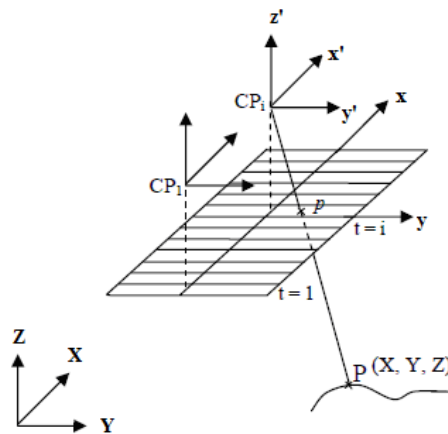


Figura 19 - Princípio da colinearidade.
Fonte: Adaptada de Wolf e Dewitt (2004).

As equações de colinearidade são expressas por:

$$x_i = (-f) \frac{m_{11}(X_i - X_0) + m_{12}(Y_i - Y_0) + m_{13}(Z_i - Z_0)}{m_{31}(X_i - X_0) + m_{32}(Y_i - Y_0) + m_{33}(Z_i - Z_0)} \quad (6)$$

$$y_i = (-f) \frac{m_{21}(X_i - X_0) + m_{22}(Y_i - Y_0) + m_{23}(Z_i - Z_0)}{m_{31}(X_i - X_0) + m_{32}(Y_i - Y_0) + m_{33}(Z_i - Z_0)} \quad (7)$$

nas quais (x_i, y_i) são coordenadas linha e coluna de um ponto no espaço imagem; (X_i, Y_i, Z_i) são coordenadas cartesianas de um ponto no espaço objeto; (X_0, Y_0, Z_0) são coordenadas cartesianas do centro perspectivo no espaço objeto; (f) é a distância focal;

(m_{ij}) são os elementos da matriz de rotação (calculados em função das rotações do sistema de coordenadas fotogramétrico em relação ao sistema de coordenadas do terreno).

Para atender à dinâmica orbital das imagens *pushbroom*, os modelos físicos 3D empregam as equações de colinearidade estendidas, que incorporam polinômios para descrever a trajetória do satélite ao longo de sua órbita (FRITSCH e STALLMANN, 2000).

Conforme descrito por Tommaselli e Medeiros (2010), modelos geométricos diferentes em complexidade, rigor e precisão têm sido desenvolvidos para modelar a geometria de aquisição de imagens orbitais. Essas pesquisas, ou modelos já propostos, variam em abordagens quanto: ao sensor considerado, aos dados utilizados na modelagem, ao número de parâmetros a estimar, entre outros, conforme pode ser verificado em Toutin (1995), Fritsch e Stallmann (2000); Cheng e Toutin (2001), Toutin (2004b), Kim e Dowman (2006) e Kocaman e Gruen (2008).

Vale salientar que nos sensores de varredura eletrônica do tipo *pushbroom* é registrada uma linha da imagem a cada instante de tempo, implicando em diferentes parâmetros de orientação exterior para cada linha da imagem formada. Devido ao excessivo número de parâmetros de orientação exterior seria praticamente impossível reconstruir a geometria de aquisição somente com pontos de controle medidos no terreno. Os dados obtidos por sistemas AOCS precisos, a bordo dos satélites, conferem a redundância de observações necessária ao ajustamento do modelo, que pode ser então refinado com uso de pontos de controle medidos no terreno (KOCAMAN, 2008).

Os pontos de controle utilizados na modelagem da geometria de aquisição das imagens devem apresentar coordenadas com precisão pelo menos duas vezes melhor que a esperada para a imagem. A densidade e a distribuição espacial desses pontos também exercem influência sobre a qualidade geométrica do produto final (MACHADO-SILVA, 2007).

De acordo com Kim e Dowman (2006), os modelos físicos 3D se apresentam segundo duas categorias:

- modelos baseados em posição-rotação: utilizam os parâmetros de posição e orientação da plataforma (coordenadas X, Y, Z e ângulos de atitude: rolagem (*roll*), arfagem (*pitch*) e guinada (*yaw*));

- modelos baseados em parâmetros de órbita e atitude: utilizam a posição, vetores de velocidade e ângulos de atitude ou dos parâmetros orbitais e ângulos de atitude como parâmetros do modelo.

Uma análise comparativa entre os modelos físicos de posição-orientação e de órbita-atitude, realizado por Kim e Dowman (2006) com cenas do satélite KOMPSAT-1 mostrou que, em termos de precisão do ajustamento, os dois tipos de modelagem produziram resultados similares, portanto adequados a aplicações cartográficas. Porém, os modelos de órbita-atitude produziram melhores resultados em termos de precisão na estimativa dos parâmetros de orientação exterior.

Kim e Kim (2008) realizaram experimento com aplicação do modelo órbita-atitude em imagens SPOT3 com posterior geração de MDS, alcançando resultados compatíveis ao esperado para essas imagens (erro absolutos de orientação inferiores a 20 metros ou 2 *pixel*).

2.5.1.1 Modelos baseados em posição-rotação

Os modelos baseados em dados de posição e rotação consideram a relação existente entre o sistema de referência do sensor e o sistema de referência terrestre, estabelecida pela posição da plataforma (X, Y, Z) e por ângulos de rotação devido ao não alinhamento dos sistemas: *roll* (guinada), *pitch* (arfagem) e *yaw* (guinada).

As equações de colinearidade (Equações 6 e 7), em que se baseia a modelagem rigorosa, podem ser expressas na forma matricial da Equação 8, já estendida para representar a geometria do sensores *pushbroom*, que requer parâmetros de orientação exterior para cada linha da imagem (KIM e DOWMAN, 2006).

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda R^T \begin{pmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{pmatrix} \quad (8)$$

onde:

x, y são coordenadas linha e coluna de um ponto no sistema sensor; X, Y, Z são as coordenadas cartesianas de um ponto no sistema terrestre; X_s, Y_s, Z_s são as coordenadas cartesianas da posição da plataforma ou do centro perspectivo (CP) do sensor no sistema terrestre, em um dado instante de tempo t ; R^T é a matriz de rotação transposta

determinada pelos ângulos de atitude do sistema sensor para o sistema terrestre; λ é o fator de escala; f é a distância focal.

Na Equação 8 o valor da coordenada x é igualado a zero para representar a geometria de aquisição dos sensores *pushbroom* ao longo da trajetória do satélite (Figura 20). Nesse sistema de imageamento, cada vetor linear tem seu próprio centro perspectivo, não havendo, portanto, dimensão na direção x .

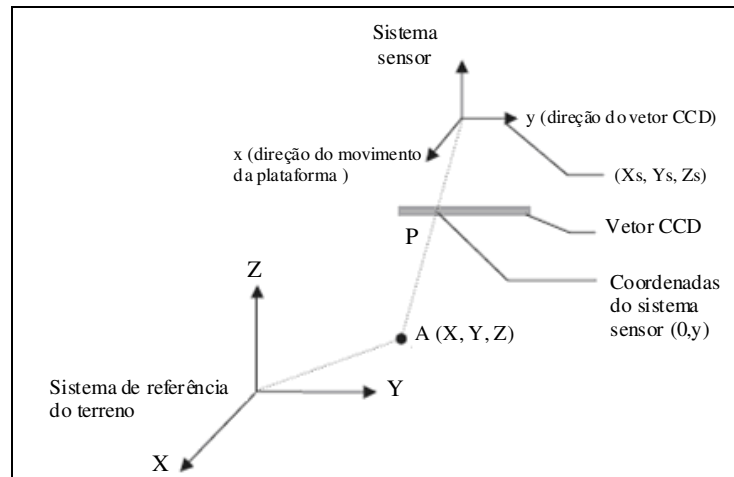


Figura 20 - Configuração dos sistemas do sensor e terrestre.
Fonte: Adaptada de Kim e Dowman (2006).

Para resolver a transformação proposta através da Equação 8, os parâmetros de orientação exterior (POEs) devem ser conhecidos para cada linha de varredura t . Há essencialmente apenas uma abordagem plausível para responder a esta exigência, que é estabelecer o modelo de orientação exterior como uma função de tempo ao longo de um número finito de linhas de varredura. Assumindo-se que um polinômio de segunda ordem é suficiente, então as equações expandidas para X_s , Y_s , Z_s e ângulos de rotação Ψ_s , P_s , R_s podem ser expressos de acordo com o conjunto de Equações a seguir (FRASER *et al*, 2006):

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\
 Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\
 Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\
 \Psi_s &= \Psi_0 + a_4 t + b_4 t^2 \\
 P_s &= P_0 + a_5 t + b_5 t^2 \\
 R_s &= R_0 + a_6 t + b_6 t^2
 \end{aligned} \tag{9}$$

onde: X_0 , Y_0 , Z_0 , Ψ_0 , P_0 , R_0 , a_1, \dots, a_6 e b_1, \dots, b_6 são parâmetros a serem determinados, dos quais: X_0 , Y_0 , Z_0 são as coordenadas do centro perspectivo (CP) do sensor no referencial

do terreno e Ψ_0, P_0, R_0 são os ângulos de atitude (*yaw, pitch, roll*, respectivamente), todos no instante $t=0$, e $a_1 \dots a_6$ e $b_1 \dots b_6$ são os coeficientes polinomiais;

$X_S, Y_S, Z_S, \Psi_S, P_S, R_S$ são as coordenadas do CP do sensor no referencial do terreno e os ângulos de atitude, num dado instante de tempo t , calculados em função dos parâmetros e do instante t ;

t é a diferença de tempo entre as posições do satélite no instante $t=0$ (X_0, Y_0, Z_0) e $t=S$ (X_S, Y_S, Z_S), para cada linha imageada. (t normalmente está associado à linha da imagem, ou coordenada x).

Já a matriz de rotação entre os sistemas pode ser representada conforme a seguir:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\Psi_S \cdot \cos P_S & \cos\Psi_S \cdot \text{sen} P_S \cdot \text{sen} R_S + \text{sen}\Psi_S \cdot \cos R_S & -\cos\Psi_S \cdot \text{sen} P_S \cdot \cos R_S + \text{sen}\Psi_S \cdot \text{sen} R_S \\ -\text{sen}\Psi_S \cdot \cos P_S & -\text{sen}\Psi_S \cdot \text{sen} P_S \cdot \text{sen} R_S + \cos\Psi_S \cdot \cos R_S & \text{sen}\Psi_S \cdot \text{sen} P_S \cdot \cos R_S + \cos\Psi_S \cdot \text{sen} R_S \\ \text{sen} P_S & -\cos P_S \cdot \text{sen} R_S & \cos P_S \cdot \cos R_S \end{bmatrix} \quad (10)$$

$R = R(\Psi) \cdot R(P) \cdot R(R)$, representando a sequência de rotações entre os sistemas (terrestre e sensor).

De acordo com Toutin (2004b), alguns dos movimentos da plataforma, representados por parâmetros do conjunto de Equações (9), são altamente correlacionados, o que pode tornar o modelo muito instável. Por exemplo, pequenas variações em X provocam a mesma distorção no terreno quando comparadas a mudanças no ângulo *pitch*, enquanto que variações em Y não diferem muito do efeito provocado por variações no ângulo *roll*. Como forma de tornar a solução estável, pode-se considerar como constantes alguns desses parâmetros, conforme proposto por Orun e Natarajan⁵ (1994) *apud* Kim e Downman (2006). No conjunto de Equações 11 são consideradas quatro equações e doze incógnitas, onde os ângulos *pitch* e *roll* são considerados constantes. Os parâmetros restantes são calculados por ajustamento de feixes perspectivos, pelo método dos mínimos quadrados.

$$\begin{aligned} X_S &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_S &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_S &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ \Psi_S &= \Psi_0 + a_4 t + b_4 t^2 \end{aligned} \quad (11)$$

2.5.1.2 Modelos baseados em parâmetros de órbita e atitude

⁵ORUN, A. B.; NATARAJAN, K. A. Modified bundle adjustment software for SPOT imagery and photography: tradeoff. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, p. 1431-1437, 1994.

Segundo Kim e Dowman (2006), modelos baseados em dados de órbita e atitude consideram a relação existente entre o sistema de referência do sensor e o sistema de referência da órbita, bem como entre esse último e o sistema de referência terrestre (Figura 21).

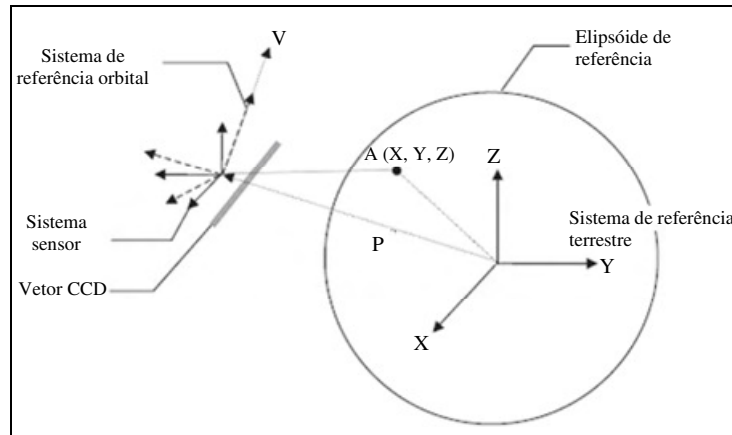


Figura 21 - Configuração dos sistemas do sensor, da órbita e terrestre.
Fonte: Adaptada de Kim e Dowman (2006).

O sistema de referência orbital pode ser representado segundo parâmetros como inclinação da órbita, ascensão reta do nodo ascendente e anomalia média (Radhadevi *et al.*, 1998), ou representado pelo vetor de posição e vetores de velocidade da plataforma (SPOT IMAGE, 2002).

Adicionalmente, como o sistema do sensor e o sistema de referência orbital não são alinhados, os ângulos formados entre esses sistemas é que passam a ser considerados como os ângulos de atitude *roll*, *pitch* e *yaw*. O ângulo *roll* é definido pela direção do movimento da plataforma, o ângulo *yaw* pela direção do vetor CCD e o ângulo *pitch* pelo eixo ortogonal ao plano formado pelos dois outros eixos.

A orientação do satélite em relação ao sistema de referência terrestre é uma função não linear da posição, velocidade e ângulos de atitude da órbita em relação ao sistema sensor ou dos parâmetros orbitais e ângulos de atitude. Nesse contexto, Kim e Dowman (2006) observam que os modelos de posição-orientação não seriam verdadeiramente modelos físicos, uma vez que simplificam a relação entre os sistemas a três ângulos de rotação.

A representação do modelo baseado em parâmetros de órbita com uso dos dados de posição e velocidade pode ser feita conforme a equação matricial abaixo, fundamentada no princípio da colinearidade (KIM e DOWMAN, 2006):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda \left[R_{sensor}^{órbita} \right]^T \left[R_{órbita}^{terreno} \right]^T \begin{pmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{pmatrix} \quad (12)$$

onde:

x, y : coordenadas linha e coluna de um ponto no sistema sensor;

X, Y, Z : coordenadas cartesianas de um ponto no sistema terrestre;

X_S, Y_S, Z_S : coordenadas cartesianas da posição da plataforma ou do centro perspectivo (CP) do sensor no sistema terrestre, em um dado instante de tempo t ;

$R_{sensor}^{órbita}$: matriz de rotação determinada pelos ângulos de atitude do sistema sensor para o sistema orbital;

$R_{órbita}^{terreno}$: matriz de rotação do sistema orbital para o sistema terrestre, determinada pela posição e velocidade da plataforma;

λ : fator de escala;

f : distância focal.

Na Equação 12, o valor da coordenada x é igualado a zero devido ao movimento da plataforma e sentido de varredura do sensor *pushbroom* ocorrerem ao longo do eixo x .

Cabe destacar que a representação matemática exata das matrizes $R_{sensor}^{órbita}$ e $R_{órbita}^{terreno}$ pode variar para diferentes satélites. A matriz $R_{sensor}^{órbita}$ representa a sequência de rotações para a transformação entre sistemas sensor-órbita, mas depende da ordem de rotação e da definição dos eixos de rotação.

Da mesma forma, a matriz $R_{órbita}^{terreno}$ depende da definição exata do sistema de referência orbital. Para o caso da representação da órbita em função do vetor posição e dos vetores de velocidade da plataforma essa matriz assume a expressão KIM e JEUN⁶, 2002 *apud* KIM e DOWMAN, 2006):

⁶ KIM, J. A. e JEUN, G. H. **Analysis of the geo-location accuracy of KOMPSAT-1 EOC image data.** Journal of Korea Aerospace Research Institute, 1(2): 141–148 (in Korean), 2002.

$$R_{\text{órbita}}^{\text{satélite}} = \begin{pmatrix} \frac{V_X}{L_V} & \frac{-Y_S V_Z + V_Y Z_S}{L_P L_V} & -\frac{X_S}{L_P} \\ \frac{V_Y}{L_V} & \frac{-Z_S V_X + V_Z X_S}{L_P L_V} & -\frac{Y_S}{L_P} \\ \frac{V_Z}{L_V} & \frac{-X_S V_Y + V_X Y_S}{L_P L_V} & -\frac{Z_S}{L_P} \end{pmatrix} \quad (13)$$

onde:

V_X, V_Y, V_Z = componentes do vetor velocidade;

L_P = magnitude do vetor posição;

L_V = magnitude do vetor velocidade.

Os parâmetros de posição, velocidade do satélite, tempo t (ou a coordenada imagem x) e a atitude são modelados como polinômios de segundo grau. Para o caso do satélite KOMPSAT-1 a modelagem é feita de acordo com o conjunto de Equações a seguir (KIM e DOWMAN, 2006):

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ V_X &= V_{X0} + a_4 t + b_4 t^2 \\ V_Y &= V_{Y0} + a_5 t + b_5 t^2 \\ V_Z &= V_{Z0} + a_6 t + b_6 t^2 \\ R &= R_0 + a_7 t + b_7 t^2 \\ P &= P_0 + a_8 t + b_8 t^2 \\ \Psi &= \Psi_0 + a_9 t + b_9 t^2 \end{aligned} \quad (14)$$

onde:

X_0, Y_0, Z_0 são as coordenadas cartesianas da posição da plataforma no referencial do terreno no instante $t=0$;

V_{X0}, V_{Y0}, V_{Z0} são as componentes do vetor velocidade no instante $t=0$;

R_0, P_0 e Ψ_0 representam os ângulos *roll*, *pitch* e *yaw* no instante $t=0$;

a_1, a_2, \dots, a_9 , e b_1, b_2, \dots, b_9 são os coeficientes polinomiais;

t é um dado instante de tempo.

Diferentes modelos baseados em parâmetros de órbita e atitude foram desenvolvidos por pesquisadores, onde se têm acesso a essas informações. Essas diferenças dizem respeito, por exemplo, ao sensor, aos parâmetros básicos da órbita utilizados na modelagem (posição-velocidade ou inclinação/ascensão reta/anomalia), ao

número de parâmetros (incógnitas) a estimar, à ordem dos polinômios (KIM e DOWMAN, 2006).

2.5.2 Modelos generalizados

Os modelos generalizados também, conhecidos como não paramétricos ou empíricos, são utilizados quando não se dispõe dos dados relativos à órbita e ao sensor, e por isso não descrevem o processo físico de aquisição das imagens. Nessa modelagem, a relação entre o espaço imagem e o espaço objeto é estabelecida através de funções polinomiais, não requerendo, *a priori*, qualquer informação relativa à plataforma, sensor e Terra (TONOLO e POLI, 2003; TOUTIN, 2004b).

Os métodos polinomiais de correção geométrica normalmente utilizam polinômios de ordem zero a três. Os parâmetros de transformação (coeficientes dos polinômios) são estimados pelo método dos mínimos quadrados a partir das coordenadas dos pontos de controle e seus homólogos na imagem, de forma que a correção geométrica é realizada sem identificar as fontes de distorção da imagem. Esses modelos polinomiais podem ainda ser classificados como 2D e 3D, em função do uso de coordenadas planimétricas (XY) ou tridimensionais (XYZ) dos pontos de controle (TOUTIN, 2004b).

2.5.2.1 Modelo polinomial simples (2D)

Funções polinomiais 2D não consideram a altitude dos pontos de controle. Polinômios de 1ª, 2ª e 3ª ordem apresentam 6, 12 e 20 incógnitas ou parâmetros de transformação, respectivamente. Polinômios de 1ª ordem, também chamados de transformação afim, modelam distorções de translação nos eixos x e y , escala em x e y , rotação da imagem e não ortogonalidade entre os eixos, e podem ser descritos conforme as Equações a seguir:

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1x' + a_2y' \\ Y &= b_0 + b_1x' + b_2y' \end{aligned} \quad (15)$$

onde:

x e y correspondem às coordenadas do ponto no espaço objeto e x' e y' as coordenadas do ponto homólogo no espaço imagem; a_0 e b_0 são coeficientes que representam a translação em x e y , respectivamente, sendo a_1 , a_2 , b_1 e b_2 outros coeficientes. Para a solução desse sistema, com seis incógnitas, é necessário um mínimo de 3 pontos de controle (COELHO e BRITO, 2007).

Cabe observar que um polinômio de ordem superior vai resultar em um ajuste mais preciso nas imediações dos pontos de controle, porém requer um número maior de pontos e esforço de processamento, além do que pode introduzir novos e significativos erros de posicionamento na imagem corrigida fora das imediações do ponto de controle (TOUTIN, 2004b).

O método polinomial simples não reflete as distorções inerentes à aquisição da imagem e não corrige as distorções devidas ao relevo, motivo pelo qual não se recomenda sua utilização em aplicações que requeiram posicionamento acurado ou em áreas de relevo acentuado (TOUTIN, 2004b).

2.5.2.2 Modelo de funções racionais (3D)

Nos modelos de funções racionais (*Rational Function Models* – RFM) as coordenadas dos *pixels* da imagem (linha e coluna) são expressas como função de coordenadas 3D no espaço objeto (FRASER *et al*, 2006). Essa modelagem utiliza duas razões de duas funções polinomiais, uma referente à linha e outra referente à coluna da imagem. A potência máxima para os polinômios normalmente está limitada a três. Neste caso, cada polinômio apresentará 20 coeficientes ou parâmetros de transformação. Os coeficientes das funções racionais são conhecidos pelo acrônimo RPC, oriundo do termo *Rational Polynomial Coefficients*

O modelo de funções racionais de terceiro grau é dado por (GRODECKI, 2001):

$$y_n = \frac{f_1(\varphi_n, \lambda_n, h_n)}{f_2(\varphi_n, \lambda_n, h_n)}, \quad x_n = \frac{f_3(\varphi_n, \lambda_n, h_n)}{f_4(\varphi_n, \lambda_n, h_n)} \quad (16)$$

$$y_n = \frac{y - y_0}{y_s}, \quad x_n = \frac{x - x_0}{x_s}, \quad \varphi_n = \frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_s}, \quad \lambda_n = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_s}, \quad h_n = \frac{h - h_0}{h_s} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} f(\varphi_n, \lambda_n, h_n) = & c_1 + c_2 \lambda_n + c_3 \varphi_n + c_4 h_n + c_5 \varphi_n \lambda_n + c_6 \lambda_n h_n + c_7 h_n \varphi_n + c_8 \lambda_n^2 + \\ & + c_9 \varphi_n^2 + c_{10} h_n^2 + c_{11} \varphi_n \lambda_n h_n + c_{12} \lambda_n^3 + c_{13} \varphi_n^2 \lambda_n + c_{14} h_n^2 \lambda_n + c_{15} \lambda_n^2 \varphi_n + c_{16} \varphi_n^3 + \\ & + c_{17} h_n^2 \varphi_n + c_{18} \lambda_n^2 h_n + c_{19} \varphi_n^2 h_n + c_{20} h_n^3 \end{aligned} \quad (18)$$

onde:

(x, y) : coordenadas linha e coluna no espaço imagem;

(φ, λ, h) : coordenadas latitude, longitude e altitude ou elevação no espaço objeto;

$(x_n, y_n, \varphi_n, \lambda_n, h_n)$: coordenadas normalizadas;

$(x_0, y_0, \varphi_0, \lambda_0, h_0)$: parâmetros de normalização (translação);

$(x_s, y_s, \varphi_s, \lambda_s, h_s)$: parâmetros de normalização (escala);

(f_{1-4}): polinômios de terceiro grau;

(c_{1-20}): coeficientes polinomiais.

A normalização dos valores das coordenadas é realizada para minimizar a introdução de erros durante o processo do cálculo, sendo definida por parâmetros de translação e escala, a fim de assegurar que todos os valores das coordenadas estejam entre -1 e +1 (NIMA, 2000).

Dessa forma, $x_0, y_0, \varphi_0, \lambda_0, h_0$ correspondem a valores médios assim calculados :

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{1}{n} \sum x \\ y_0 &= \frac{1}{n} \sum y \\ \varphi_0 &= \frac{1}{n} \sum \varphi \\ \lambda_0 &= \frac{1}{n} \sum \lambda \\ h_0 &= \frac{1}{n} \sum h \end{aligned} \tag{19}$$

Já os termos $x_S, y_S, \varphi_S, \lambda_S, h_S$ correspondem a fatores de escala:

$$\begin{aligned} x_S &= \max(|x_{\max} - x_0|, |x_{\min} - x_0|) \\ y_S &= \max(|y_{\max} - y_0|, |y_{\min} - y_0|) \\ \varphi_S &= \max(|\varphi_{\max} - \varphi_0|, |\varphi_{\min} - \varphi_0|) \\ \lambda_S &= \max(|\lambda_{\max} - \lambda_0|, |\lambda_{\min} - \lambda_0|) \\ h_S &= \max(|h_{\max} - h_0|, |h_{\min} - h_0|) \end{aligned} \tag{20}$$

Os coeficientes podem ser obtidos segundo duas abordagens (TOUTIN, 2004b; HU *et al.*, 2004):

1. Fornecidos pelos provedores de imagens

Essa abordagem corresponde a um caso particular do modelo RFM, sendo conhecido pelos termos *Rational Polynomial Camera Model*, *Rational Polynomial Coefficients Camera Model* ou modelo de câmera RPC (GRODECKI, 2001; HU *et al.*, 2004; DIAL e GRODECKI, 2005).

Essa solução utiliza polinômios de terceira ordem correspondendo a 20 coeficientes por polinômio, calculados pelos provedores das imagens a partir do modelo físico 3D do sensor, onde os parâmetros de orientação da imagem derivam de dados de

efemérides e atitude do satélite, sem uso de pontos de controle medidos no terreno (HU *et al.*, 2004, TOUTIN, 2004b; TAKAKU e TADONO, 2009).

O modelo de câmera RPC estabelece uma relação entre uma grade bidimensional representando o espaço imagem, e uma grade tridimensional para representar o espaço objeto em planos horizontais com diferentes elevações (normalmente de 3 a 5), conforme apresentado na Figura 22. As coordenadas horizontais (latitude e longitude) de um ponto na grade 3D são calculadas a partir do ponto (linha, coluna) correspondente na grade que representa a imagem, usando o modelo físico 3D do sensor para cada elevação. Dessa forma, os parâmetros de orientação da imagem derivam dos dados de efemérides e atitude do satélite. Os 80 coeficientes das funções racionais são então estimados através de ajustamento dos dados pelo método dos mínimos quadrados (GRODECKI, 2001; HU *et al.*, 2004; FRASER *et al.*, 2006).

O modelo de câmera RPC foi primeiramente empregado pela empresa *Space Imaging* para as imagens Ikonos, tendo sido adotado como padrão na indústria (XU, 2004). Os RPCs são fornecidos juntamente com as imagens, e estão disponíveis para imagens de alta resolução espacial como Ikonos e GeoEye, pelas empresas *Space Imaging*, Quickbird e WorlView, pela empresa *Digital Globe*, e PRISM, pela RESTEC. Atualmente, os principais *softwares* de processamento fotogramétrico de imagens suportam o modelo de câmera RPC para correção geométrica.

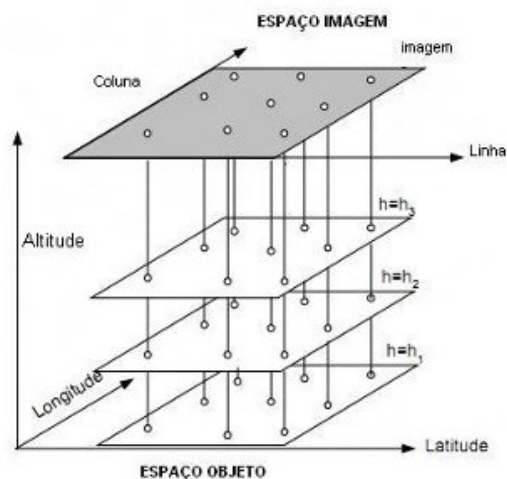


Figura 22 - Representação esquemática da geração dos RPCs.
Fonte: Adaptada de Grodecki (2001).

Dessa forma, através do uso dos RPCs fornecidos pelos provedores juntamente com a imagem, o usuário dispondo de *software* que suporte o modelo de câmera RPC, pode realizar a orientação interior e exterior da imagem sem o uso de pontos de

controle, bem como ortorretificá-la com uso de um MDE/MDT. Adicionalmente, para compensar a existência de erro de tendência (*bias*) na orientação da imagem, a solução pode ser refinada em pós-processamento com uso de 1 a 3 pontos de controle e funções polinomiais 2D de ordem zero ou de 1ª ordem (transformação afim). Um ponto de controle modela as translações em x e y , enquanto que o mínimo de três pontos de controle modela translação, rotação e outras distorções (por exemplo, oriundas da orientação interior) (HU *et al*, 2004).

Entretanto, de acordo com Bang *et al.* (2003), Tao e Hu (2004), e Takaku e Tadono (2009), em decorrência de experimentos realizados com imagens Ikonos, Quickbird e PRISM, as imagens são mais afetadas pelos erros de translação, sendo os demais erros insignificantes, de forma que a solução para refinamento pode ser obtida com apenas um ou dois pontos de controle (transformação polinomial de ordem zero).

Estudos desenvolvidos por Hu *et al* (2004), Dial e Grodecki (2005), Fraser *et al.* (2006) demonstram ainda que o modelo de câmera RPC proporciona resultados equivalentes aos obtidos pelo modelo físico 3D do sensor. Esses autores relatam, em função de resultados obtidos, que o modelo de câmera RPC pode ser utilizado como uma opção segura e confiável para realizar a correção de imagens quando se deseja alcançar a acurácia normalmente obtida através do modelo rigoroso. Experimento realizado por Grodecki (2001) com o modelo de câmera RPC para imagens Ikonos, por exemplo, apontou para diferenças menores que 0,1 pixel quando comparado à solução via modelo rigoroso, com RMS abaixo de 0,01 pixel.

2. *Calculados a partir de pontos de controle*

Nessa abordagem os coeficientes polinomiais são calculados a partir de pontos de controle determinados no terreno. Essa solução utiliza polinômios de segunda ou terceira ordem, implicando em um total de 40 ou 80 coeficientes, respectivamente, o que requer a determinação de pelo menos 20 ou 40 pontos de controle no terreno, regularmente distribuídos por toda a área da imagem (TOUTIN, 2004b).

Nesse cenário, o modelo RFM tenta aproximar a complexa geometria do imageamento através dos polinômios sem que se estabeleça uma relação direta entre as grades que representam o espaço imagem e o espaço objeto, sendo a solução altamente dependente do relevo da área, da quantidade e da distribuição dos pontos de controle (HU *et al*, 2004).

Estudos realizados por Tao e Hu⁷ (2001) *apud* Hu *et al* (2004), Toutin (2004b), Jacobsen *et al.* (2005), Fraser *et al.* (2006), indicam que essa abordagem, além de não se mostrar prática devido à grande quantidade de pontos de controle necessários à solução, apresenta resultados não satisfatórios e solução instável devido, entre outros fatores, à alta correlação entre os coeficientes. Por esse motivo não se recomenda sua utilização para aplicações que requeiram alta acurácia.

2.5.3 Ortorretificação

A orrorretificação corresponde ao processo de correção da imagem, *pixel a pixel*, relativamente à distorção provocada pelo relevo. Este procedimento pressupõe a correção prévia da imagem pelo modelo físico 3D do sensor ou pelo modelo de câmera RPC.

A correção da distorção geométrica devida ao relevo requer, necessariamente, o uso de um MDS/MDT, que possibilita transformar uma imagem em perspectiva cônica-cilíndrica em uma imagem em perspectiva ortogonal (Figura 23).

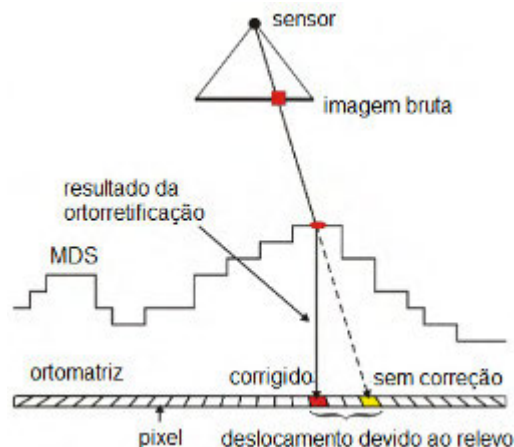


Figura 23 - Resultado proporcionado pela orrorretificação da imagem.

Fonte: Adaptada de PCI Geomatics (2008).

Nesse processo inicialmente é criada uma matriz “vazia” correspondente à área da ortoimagem no espaço objeto, com *pixels* de dimensões equivalentes ao elemento de resolução no terreno. Na sequência, a altitude de cada pixel da ortomatriz é extraída do MDE/MDT. Através dos parâmetros de transformação entre o espaço imagem e espaço objeto é possível realizar o mapeamento inverso e chegar ao correspondente *pixel* na imagem e, conseqüentemente, ao seu valor de cinza. A partir de um método de

⁷ TAO, V., HU, Y. A **comprehensive study on the rational function model for photogrammetric processing**. PE&RS, 67(12), 2001, p. 1347-1357.

reamostragem, como vizinho mais próximo, por exemplo, esse valor é então reamostrado para a imagem vazia (COELHO e BRITO, 2007). A qualidade da imagem ortorretificada está diretamente relacionada à qualidade tanto do modelo matemático quanto do MDT/MDS (Figura 24), conforme observa PCI GEOMATICS (2008).

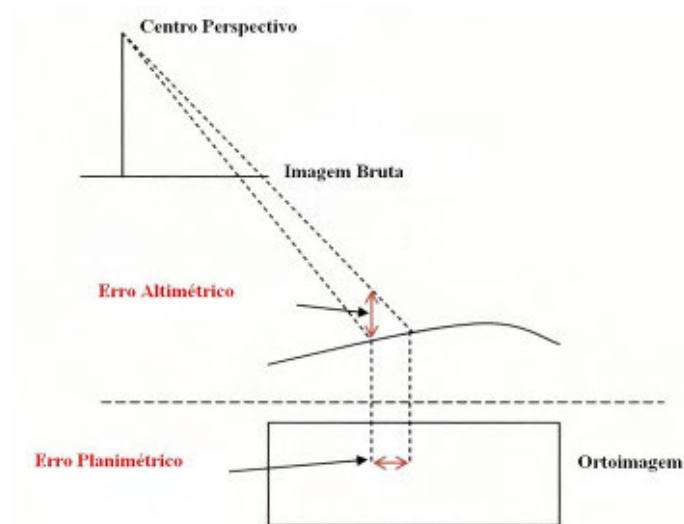


Figura 24 - Erro planimétrico na ortomagem decorrente de erro altimétrico do MDT/MDS.

Fonte: BAE Systems (2007).

Segundo ISM (1997), o tamanho do *pixel* do MDS/MDT utilizado nessa fase pode se basear na escala de representação pretendida para a ortomagem. De acordo com o mesmo autor, esse valor pode variar no intervalo de 3 a 4mm na escala do produto. Como exemplo, para a geração de uma ortomagem equivalente à escala de 1:25.000, poderia se admitir o uso de MDSs/MDTs com até 100 m de espaçamento de grade para ortorretificação da imagem.

2.6 Extração automática de MDT/MDS

Estereoscopia é o fenômeno advindo da visão binocular, que proporciona a percepção de profundidade a partir da observação de uma cena segundo dois ângulos distintos. Já a paralaxe estereoscópica pode ser definida como o deslocamento aparente da posição de um objeto na cena observada, causado pela mudança do ponto de observação.

O princípio da estereoscopia é utilizado para calcular as elevações/altitudes do terreno a partir das medidas de paralaxe entre um par de imagens estereoscópicas. Nesse caso, ocorre a simulação da percepção natural da profundidade, na medida em que o terreno é imageado segundo dois ângulos de incidência diferentes.

Na extração automática de MDT/MDS, a determinação da correspondência (*matching*) entre pares de pontos das cenas é uma etapa fundamental ao cálculo da altitude. Nesse sentido, vale a pena destacar a importância da utilização de pontos de ligação entre as imagens (*Tie Points*) como forma de refinar a solução do modelo matemático.

Um ponto de ligação corresponde a uma feição que pode ser claramente identificada em uma ou mais imagens, ou seja, são correspondentes ou homólogos. Esse tipo de ponto não possui coordenadas determinadas em campo, mas calculadas pelo próprio modelo matemático a partir dos pontos de controle. Além de relacionarem as duas imagens, os pontos de ligação cumprem uma função de controle, podendo ser coletados principalmente em áreas não cobertas por pontos de controle determinados em campo.

Quanto à correspondência entre as imagens, Heipke (1996) considera duas abordagens:

- baseada em área: está associada à correspondência dos tons de cinza das imagens, onde a similaridade é medida por correlação estatística. É o método mais usado em fotogrametria.
- baseada em feições: nessa abordagem, a correspondência é realizada a partir de feições vetoriais extraídas das imagens. Cada feição é caracterizada por atributos, tais como coordenadas, ou ainda por relações entre as feições, que podem ser geométricas, radiométricas ou topológicas.

De uma forma geral, a extração automática de MDT/MDS a partir de pares estereoscópicos orientados envolve as seguintes etapas (COSTA, 2006):

- a) selecionar a primitiva (níveis de cinza ou feições) para correspondência em uma imagem do par estéreo;
- b) encontrar a primitiva correspondente na outra imagem;
- c) calcular o MDE/MDT pela conversão de paralaxes em altitudes, no sistema de referência e projeção adotados.
- d) editar o MDE/MDT (filtragem, suavização).

2.6.1 Correlação de imagens

De acordo com Coelho e Brito (2007), a maioria dos aplicativos de correlação automática de imagens trabalha com dois recortes: o primeiro corresponde à imagem de referência (Imagem Esquerda da Figura 25) e o segundo correspondente à área da

segunda imagem (Imagem Direita da Figura 25), onde se espera encontrar um padrão similar ao recorte da imagem de referência. Assim, para cada posição da janela de busca procura-se a correlação máxima na janela de correlação na outra imagem (Figura 25).

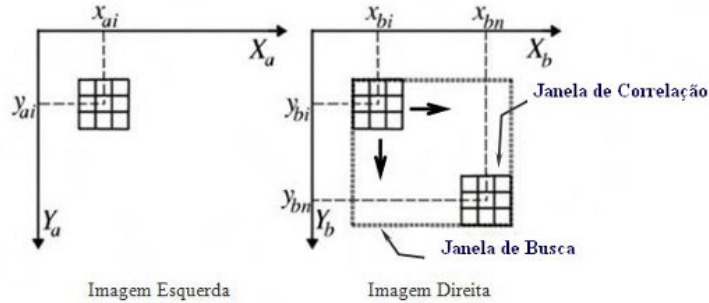


Figura 25 - Correlação automática de imagens.
Fonte: Adaptada de Coelho e Brito (2007).

O valor de correlação é expresso pelo coeficiente de correlação, que pode ser entendido como uma medida do grau de relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias (COELHO e BRITO, 2007).

O coeficiente de correlação pode ser expresso pela Equação 21 (HEIPKE, 1996):

$$\rho = \frac{\sigma_{RP}}{\sigma_R \sigma_P} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((g_R(x_i, y_j) - \bar{g}_R)(g_P(x_i, y_j) - \bar{g}_P))}{\sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (g_R(x_i, y_j) - \bar{g}_R)^2 * \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (g_P(x_i, y_j) - \bar{g}_P)^2}} \quad (21)$$

onde:

σ_{RP} é a covariância entre janelas de referência e pesquisa;

σ_R é o desvio padrão da janela de referência;

σ_P é o desvio padrão da janela de pesquisa;

n, m são as linhas e colunas da janela de referência;

$g_R(x_i, y_j)$ é o nível de cinza da posição (x_i, y_j) na janela de referência;

$g_P(x_i, y_j)$ é o nível de cinza da posição (x_i, y_j) na janela de pesquisa;

\bar{g}_R é a média dos níveis de cinza da janela de referência;

\bar{g}_P é a média dos níveis de cinza da janela de pesquisa.

ρ é o valor da correlação.

O coeficiente de correlação pode variar entre -1 e 1. O valor zero indica que não há correlação entre as variáveis, enquanto que o valor 1 indica correlação máxima, que pode ser positiva ou negativa (+, -).

No processo de correlação automática de imagens, a transformação das imagens orientadas para a geometria epipolar constitui uma etapa de grande importância no processo, na medida em que proporciona maior rapidez na solução, bem como possibilita a redução de erros na correspondência entre pontos homólogos (PCI GEOMATICS, 2008). Tal condição é obtida a partir da normalização do par estereoscópico (COELHO e BRITO, 2007), ilustrada na Figura 26.

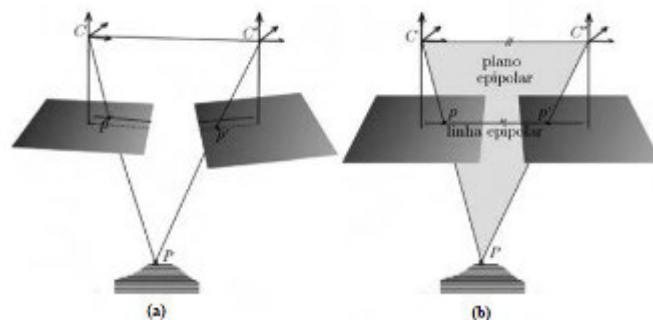


Figura 26 - Par estereoscópico antes (a) e depois (b) da normalização.

Fonte: Coelho e Brito (2007).

Para adequar um par à geometria epipolar, faz-se necessário eliminar todos os ângulos de atitude da plataforma. Os componentes de base B_Y e B_Z do par também devem ser eliminados para que ambas as imagens estejam em uma mesma altura e com seus pontos homólogos em uma mesma linha (linha epipolar). Apenas a componente B_X , equivalente a base (distância entre os CPs das imagens do par) e que permite o cálculo da elevação, é mantida. Conforme Coelho e Brito (2007) alertam, eliminar B_X seria equivalente a colocar uma imagem sobre a outra, impossibilitando a chance de usufruir das condições geométricas advindas do princípio da colinearidade e da geometria epipolar.

Uma vez que as imagens estão em suas posições normalizadas, os processos de correspondência de pontos podem ser realizados ao longo das linhas epipolares conjugadas, nas duas imagens, reduzindo o espaço de busca para uma dimensão (GALO, 2003). O efeito proporcionado pela normalização está demonstrado na Figura 27, enquanto que a Figura 28 ilustra a busca da correspondência ao longo da linha epipolar.

O detalhamento do modelo matemático utilizado para normalização das imagens pode ser conferido em Schenk (1999) e Coelho e Brito (2007).

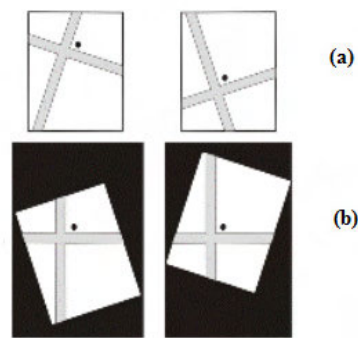


Figura 27 - Efeito proporcionado pela normalização do estereopar (b).
Fonte: Adaptada de PCI Geomatics (2008).

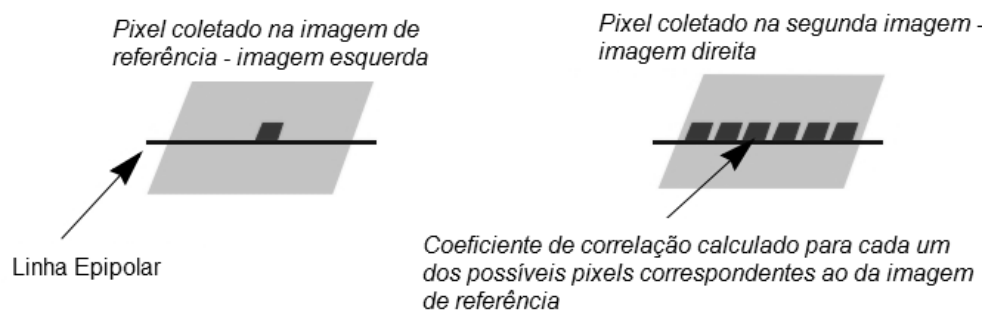


Figura 28 - Correspondência realizada ao longo da linha epipolar.
Fonte: Adaptada de LPS (2008).

Apesar da normalização das imagens reduzir o espaço de busca à área de sobreposição ao longo da linha epipolar, outras aproximações podem ser realizadas antes da correlação propriamente dita (COSTA, 2006).

Essas aproximações são realizadas segundo uma abordagem hierárquica, utilizando para tal uma pirâmide de imagens (PCI GEOMATICS, 2008). A pirâmide de imagens compreende um conjunto de imagens com diferentes níveis de resolução, a partir da imagem original, onde o nível mais alto corresponde à imagem de menor resolução e o nível mais baixo ao de maior resolução (HEIPKE, 1996), conforme ilustrado na Figura 29.

Nessa abordagem, a primeira tentativa de correlação é realizada no nível de resolução mais grosseira, formando a base para as próximas tentativas de correlação em nível de maior resolução, e assim sucessivamente. A cada nível de maior resolução a correlação é refinada, até que a correlação propriamente dita ocorra no nível da resolução original da imagem. Essa técnica de aproximação confere menor custo ao processo, além de reduzir o número de correlações equivocadas (PCI GEOMATICS, 2008).

Uma vez estabelecidos os pontos homólogos do par estereoscópico no espaço imagem, as correspondentes coordenadas tridimensionais no espaço objeto podem ser calculadas por intersecção espacial, a partir do modelo matemático que os relaciona (modelo físico 3D do sensor ou modelo de câmera RPC), conforme ilustrado pela Figura 30 (TOUTIN, 2001; DIAL e GRODECKI, 2005).

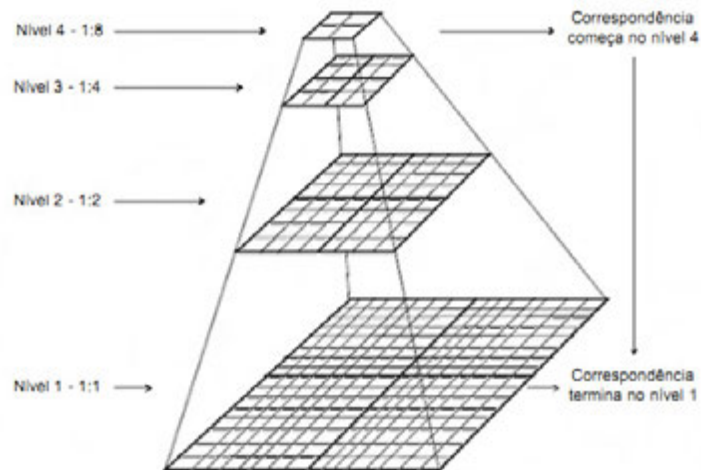


Figura 29 - Pirâmide de Imagens.
Fonte: Costa (2006).

A abordagem baseada em área, adotada neste trabalho, envolve essencialmente aspectos radiométricos das imagens (TOUTIN, 2001). Nesse sentido, sistemas de imageamento que proporcionam pares estereoscópicos adquiridos ao longo da trajetória ou órbita do satélite, a exemplo dos sensores de alta resolução espacial a bordo do Spot 5 e PRISM/ALOS, reduzem significativamente os problemas de determinação automática da correlação estatística, quando comparados ao sistema que forma os pares a partir de duas imagens adquiridas de órbitas diferentes, portanto, em datas diferentes.

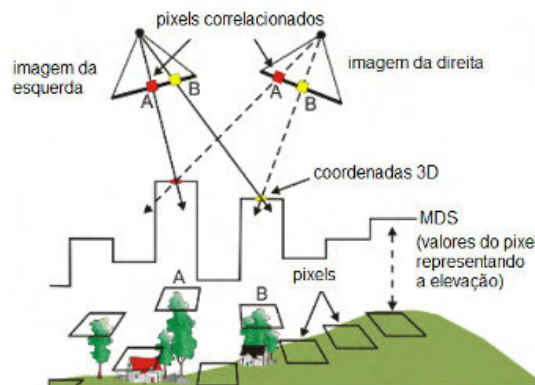


Figura 30 - Criação de MDS a partir de pares estereoscópicos.
Fonte: Adaptada de PCI Geomatics (2008).

A abordagem baseada em área, adotada neste trabalho, envolve essencialmente aspectos radiométricos das imagens (TOUTIN, 2001). Nesse sentido, sistemas de imageamento que proporcionam pares estereoscópicos adquiridos ao longo da trajetória ou órbita do satélite, a exemplo dos sensores de alta resolução espacial a bordo do Spot 5 e PRISM/ALOS, reduzem significativamente os problemas de determinação automática da correlação estatística, quando comparados ao sistema que forma os pares a partir de duas imagens adquiridas de órbitas diferentes, portanto, em datas diferentes.

Entretanto, na prática, ruídos, mudanças de iluminação e propriedades de reflexão entre duas imagens consecutivas causam diferenças nos níveis de cinza que podem comprometer a correlação. Estas diferenças são chamadas de distorções radiométricas (COSTA, 2006).

Ainda de acordo com Heipke (1996), a correspondência de imagens é um processo mal-condicionado uma vez que, dado um ponto em uma imagem, seu ponto correspondente em outras imagens pode não existir devido à existência de oclusões, como sombras e nuvens; ter mais de uma possibilidade de correspondência devido a padrões repetitivos nas imagens, como em áreas de vegetação densa, não ser estável devido a ruídos presentes nas imagens.

Procedimentos anteriormente apresentados, como o princípio da geometria epipolar, onde a área de busca é reduzida a uma componente unidimensional, assim como a busca hierárquica através de pirâmides de imagens visam minimizar tais problemas inerentes à correspondência baseada em área.

Neste contexto, o tamanho da janela de busca ao longo da linha epipolar constitui um dos fatores de maior importância no processo de correlação. Janelas muito largas podem gerar correlações equivocadas, enquanto que janelas menores podem inviabilizar a correlação em áreas com grandes paralaxes, associadas a áreas de maior elevação (LPS, 2008). Logo, o tamanho de janela de busca estará diretamente associado ao tipo da topografia existente na área.

2.7 Sistema Geodésico de Referência

Um Sistema Geodésico de Referência (SGR), ou Sistema de Referência Terrestre, pode ser entendido como um *“conjunto de parâmetros e constantes que caracteriza, conceitualmente, de uma forma abstrata e ideal, um objeto matemático no qual as posições de pontos serão expressas”* (IBGE, 2003a).

Nos sistemas globais de posicionamento por satélites de alta precisão (GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*), como o GPS (*Global Positioning System*), são adotados elipsóides cuja posição, orientação e dimensão melhor se ajustam ao geóide de uma forma global. Conceitualmente, o geóide corresponde a um modelo físico da Terra, limitado por uma superfície equipotencial do campo de gravidade que coincide com o nível médio não perturbado dos mares (TORGE, 2001, IBGE, 2010a). A origem do elipsóide de revolução coincide com o centro de massa da Terra (geocentro) e o seu eixo de revolução coincide com o eixo de rotação da Terra. Assim, as medidas realizadas segundo essas técnicas estão relacionadas a um sistema cartesiano tridimensional (X, Y, Z) com origem no geocentro (IBGE, 2003b), o que caracteriza o sistema como geocêntrico (MONICO, 2008).

O *World Geodetic System 1984* (WGS84), sistema geodésico de referência utilizado pelo sistema de navegação por satélites GPS, assim como o *International Terrestrial Reference System* (ITRS) são exemplos de referenciais geocêntricos baseados nas técnicas de posicionamento pelo GNSS. O primeiro adota o WGS84 como elipsóide de referência enquanto o segundo adota o GRS80 (*Geodetic Reference System 1980*). Como consequência da precisão centimétrica obtida através das técnicas de posicionamento global, faz-se necessário o acompanhamento temporal das coordenadas, caracterizado como realização do sistema. No caso do ITRS as realizações recebem a denominação de ITRF_{yy} (*International Terrestrial Reference Frame*), onde o termo “yy” corresponde ao ano em que a realização foi estabelecida (IBGE, 2003b).

O Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) tem como Sistema Geodésico de Referência o ITRS, sendo suas realizações correspondentes às densificações regionais do ITRF para todo o continente americano (SIRGAS, 2010). A segunda realização do SIRGAS, denominada SIRGAS 2000, tem por época de referência o ITRF2000 (época 2000,4), sendo o GRS80 o elipsóide associado ao sistema. A precisão das coordenadas dessa realização está entre ± 3 a ± 6 mm (SIRGAS, 2010, 2011a).

Em 25 de fevereiro de 2005, através de Resolução do Presidente do IBGE Nº 1/2005(ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pmrg/legislacao/RPR_01_25fev2005.pdf) ficou estabelecido como novo sistema de referência geodésico o SIRGAS 2000, para o SGB e para o Sistema Cartográfico Nacional (SCN).

As discrepâncias entre as coordenadas referidas ao SIRGAS 2000 e aquelas referidas às novas realizações do WGS84 apresentam acurácia compatível com as

realizações atuais do ITRS sendo, portanto, compatíveis com o SIRGAS 2000. A título de exemplo, a discrepância entre a última realização do WGS84, em 2002, e o SIRGAS 2000 é da ordem de 1 cm. Dessa forma, para fins práticos, como é o caso do mapeamento cartográfico e demais aplicações que não requeiram qualidade superior ao centímetro, é totalmente indiferente usar WGS84 ou SIRGAS 2000 (IBGE, 2006; MONICO, 2008), o que significa dizer que esses sistemas coincidem, sendo desnecessário realizar qualquer transformação de coordenadas entre eles.

A fundamentação teórica detalhada sobre sistemas geodésicos de referência pode ser encontrada em Monico (2008), SIRGAS (2011b) e IERS (2010). Para informações específicas sobre o processo de mudança do referencial geodésico no Brasil deve-se recorrer a IBGE (2004).

2.7.1 Posicionamento pelo GNSS

Dentre as tecnologias de posicionamento pelo GNSS destaca-se o GPS, devido à alta acurácia proporcionada pelo sistema e ao desenvolvimento da tecnologia envolvida nos receptores, motivo pelo qual tem sido amplamente utilizada em levantamentos geodésicos, cartográficos, entre outros.

Os levantamentos cartográficos referem-se, de uma maneira geral, à determinação de coordenadas tridimensionais de feições sobre a superfície terrestre, sejam elas lineares e/ou pontuais destinadas tanto à retificação de imagens (aerofotogramétricas e orbitais), quanto para correção e avaliação de qualidade posicional.

2.7.1.1 Técnicas de posicionamento

As técnicas de posicionamento pelo GNSS/GPS podem ser realizadas de forma estática e cinemática, em função do movimento da antena, assim como em tempo real e pós-processado. Além destas duas categorias, o posicionamento pode ser classificado como relativo, diferencial e absoluto, condicionado ao uso (relativo e diferencial) ou não (absoluto) de uma estação de referência materializada (IBGE, 2008).

Em função da natureza do trabalho desenvolvido, nesta Seção é dado enfoque às técnicas de posicionamento relativo estático e cinemático pós-processados. A concepção teórica sobre as demais técnicas pode ser encontrada em Monico (2008).

No posicionamento relativo, as coordenadas tridimensionais de um ponto são determinadas em relação a uma ou mais estações com coordenadas conhecidas. Neste

caso, é necessário que pelo menos dois receptores colem dados de, no mínimo, dois satélites, simultaneamente, onde um dos receptores deve ocupar a estação de referência. O usuário que possuir apenas um receptor poderá dispor de dados de uma ou mais estações pertencentes aos **Sistemas de Controle Ativos (SCA)**, no caso do Brasil, dados da **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC)** (MONICO, 2008).

O princípio básico do posicionamento relativo é minimizar as fontes de erro das observações originais através das diferenças entre as observáveis dos receptores que ocupam as estações, permitindo a determinação precisa das distâncias entre os satélites e o receptor (PEREIRA, 2002). Neste método a observável fundamental é a fase da onda da portadora (L1 e L2), muito embora também possa ser utilizada a pseudodistância, ou ambas, o que proporciona melhor acurácia. Já a solução das ambiguidades requer que a geometria envolvida entre as duas estações e os satélites se altere durante a coleta dos dados (MONICO, 2008).

O posicionamento relativo pode ser subdividido em quatro grupos: estático, estático-rápido, semicinemático e cinemático (IBGE, 2008).

No posicionamento relativo estático os receptores da estação de referência e do ponto a determinar ficam estacionados por períodos de tempo que variam normalmente de 20 minutos, no mínimo, a algumas horas, dependendo do comprimento da base a ser medida e da precisão que se quer alcançar. Para linhas de base inferiores a 10 km, por exemplo, 20 minutos são suficientes para solucionar ambiguidades com uso de receptores de uma frequência (L1).

No posicionamento relativo estático os dados coletados são pós-processados por *softwares* específicos que buscam os dados sincronizados quanto ao tempo e satélites observados. Com essa técnica, obtém-se precisão centimétrica e até subcentimétrica das coordenadas de novas estações a partir de uma estação de referência com melhor qualidade posicional (CORREIA, 2008).

O posicionamento relativo estático rápido difere do posicionamento estático no que diz respeito ao tempo de ocupação das estações, que não ultrapassa de 20 minutos, sendo adequado para linhas de base inferiores a 10 km. A técnica é utilizada para levantamentos em que se deseja alta produtividade, sendo possível alcançar precisões melhores que 10 cm (IBGE, 2008).

No posicionamento relativo cinemático, um receptor ocupa uma estação de referência enquanto o outro realiza a coleta de dados em movimento. Para receptores de frequência simples (L1) as distâncias em relação à estação de referência não devem

ultrapassar 10 km (THALES NAVIGATION, 2004). Já a técnica de posicionamento relativo semicinemático é similar ao estático rápido, motivo pelo qual também é conhecido pelas denominações pseudo-estático e *stop-and-go*. Nessa técnica de posicionamento o receptor permanece em cada estação a determinar por um período de 15 a 60 segundos e permanece ligado durante os deslocamentos entre cada estação (MONICO, 2008).

Nos métodos de posicionamento cinemático e semicinemático a duração do levantamento sem perda de sintonia dos satélites deve atingir em torno de 20 a 30 minutos. Este intervalo de tempo é necessário para proporcionar a alteração da geometria dos satélites e permitir a solução das ambiguidades em pós-processamento dos dados. No método semicinemático as ambiguidades são calculadas a partir das coordenadas das estações ocupadas, enquanto que no cinemático são obtidas a partir das coordenadas da trajetória da antena (MONICO, 2008). O método de posicionamento semicinemático, observadas as condições descritas nos parágrafos anteriores, alcança precisões melhores que 10 cm e é mais preciso que o cinemático (CORREIA, 2008).

Vale salientar que a altitude determinada utilizando-se um receptor GNSS está referida à superfície do elipsóide adotado para representação matemática da Terra. Dessa forma, para se obter a altitude ortométrica (referenciada ao geóide), torna-se necessário conhecer a diferença entre essas duas superfícies, chamada de ondulação geoidal.

Para se converter a altitude elipsoidal (h) em altitude ortométrica (H) deve-se utilizar a equação $H = h - N$, onde N corresponde ao valor da ondulação geoidal (Figura 31). Por convenção, N assume valor negativo quando o geóide se encontra abaixo do elipsóide, e positivo no caso contrário.

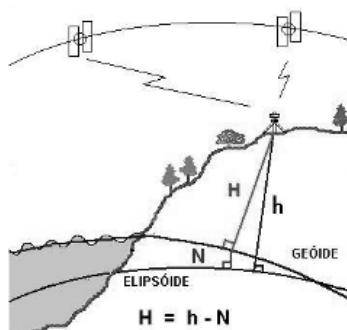


Figura 31 - Ondulação geoidal.
Fonte: MAPGEO (2010).

O novo modelo geoidal para o Brasil tem resolução espacial de 5' de arco e está implementado no sistema MAPGEO2010, disponibilizado gratuitamente pelo IBGE em

ftp://geoftp.ibge.gov.br/programa/Sistema_Interpolacao_Ondulacao_Geoidal/setup_ma_pgeo2010_v1.exe (acessado em 01 mai. 2011).

O erro médio padrão associado ao modelo MAPGEO2010 é da ordem de $\pm 0,32$ m, determinado a partir da comparação de altitudes do sistema altimétrico brasileiro derivado do nivelamento geométrico com aquelas interpoladas do modelo. Em regiões onde existe carência de dados para avaliar a consistência do modelo, como na região amazônica, poderão ocorrer erros superiores a 0,32 m (IBGE, 2010b).

A concepção teórica sobre a determinação de modelos geoidais para o Brasil pode ser encontrada em Blitzkow e Lobianco (2004), Lobianco (2005), IBGE (2010c). Na *homepage* do *International Geoid Service* (IGeS), em <http://www.iges.polimi.it/index.asp> (acessado em 03 mai. 2011) podem ser obtidas outras informações sobre modelos geoidais, incluindo o *Earth Gravity Model 96* (EGM96), modelo geoidal global utilizado como referência altimétrica do SRTM90.

2.8 Controle de qualidade de produtos cartográficos

Os produtos cartográficos, sejam eles matriciais ou vetoriais, correspondem a uma representação da realidade, de modo que estão inevitavelmente associados a uma incerteza quanto à realidade representada. Esta incerteza pode se referir à qualidade da posição dos elementos/feições representados, dos atributos que os descrevem, de suas relações com demais elementos e também à realidade existente à época de sua construção.

Com a disseminação do uso de dados geoespaciais, principalmente em aplicações de SIG, houve um aumento natural do interesse pela informação da qualidade desses dados. Em 1995, a Comissão de Qualidade de Dados Espaciais da ICA (*International Cartographic Association*) lançou a publicação “*Elements of Spatial Data Quality*”, reconhecendo como 7 os parâmetros definidores da qualidade de dados geoespaciais: linagem, acurácia posicional, fidelidade dos atributos, completude, consistência lógica, fidelidade semântica e temporalidade (RAMIREZ e ALI, 2003).

Resumidamente, a linagem diz respeito ao histórico do processo de produção (métodos empregados, materiais utilizados, entre outros). A fidelidade dos atributos corresponde à qualidade das informações que descrevem características do dado espacial (como o nome de um curso d'água, por exemplo). Já a completude trata do controle de elementos ausentes ou que não deveriam constar no produto. A consistência lógica envolve relações topológicas, enquanto que a fidelidade semântica refere-se ao

comportamento esperado dos elementos no modelo de representação (não é suposto que edificações estejam “dentro” de corpos d’água). Por fim, a temporalidade trata do controle das datas em que as informações foram coletadas para geração do produto cartográfico final.

Em virtude do contexto do trabalho, será dada ênfase na acurácia posicional. Mais detalhes a respeito dos parâmetros de qualidade de dados geoespaciais não tratados aqui, poderão ser encontrados em (RAMIREZ e ALI, 2003).

2.8.1 Acurácia posicional

Nas atividades cartográficas, a acurácia posicional indica a qualidade da posição planialtimétrica de uma grandeza medida ou parâmetro estimado, tomando-se como referência uma grandeza com qualidade posicional superior. De acordo com Merchant (1982), dados utilizados com referência posicional de documentos cartográficos devem ter uma acurácia pelo menos três vezes maior que a do produto analisado.

De forma geral a qualidade posicional dos documentos cartográficos é realizada através de feições pontuais, cujas coordenadas tridimensionais são obtidas por levantamentos topográficos ou geodésicos, mas também podem ser extraídas de documentos cartográficos existentes. Tais pontos podem ainda ser classificados de acordo com a componente a ser avaliada: ponto H (horizontal) para planimetria, ponto V (vertical) para altimetria e ponto HV para ambas. Na prática, as feições pontuais são genericamente denominadas como pontos de apoio, de controle, de referência ou de verificação.

Os principais tipos de erros nas medidas de grandezas físicas (pontuais ou lineares) são os grosseiros, sistemáticos e aleatórios. Os erros grosseiros, em geral, são de mais fácil detecção e podem ser eliminados quando detectados. Os erros sistemáticos se manifestam como uma tendência constante (ou variável com o tempo), afetando a estimativa do parâmetro (MIKHAIL e ACKERMAN⁸ 1976 *apud* MONICO *et al.* 2009). Já os erros aleatórios ou randômicos resultam da combinação de problemas de natureza acidental e desconhecida, e permanecem mesmo após a remoção dos erros grosseiros e sistemáticos.

⁸ MIKHAIL, E.; ACKERMAN, F. **Observations and least squares**. University Press of America, 1976. 497 p.

O erro sistemático se relaciona, portanto, a tendência, enquanto os erros aleatórios caracterizam a precisão de um conjunto de observações, ou a capacidade de dispersão dessas observações em torno da média (CORREIA, 2008).

De acordo com Monico *et al.* (2009) a acurácia engloba tanto a análise de erros sistemáticos quanto aleatórios, motivo pelo qual incorpora a tendência (erro externo), e a precisão (erro interno). Adicionalmente, ressaltam que diante da possibilidade de estimativa da tendência, associada a um ou mais efeitos sistemáticos, todos os resultados podem, em decorrência, ser corrigidos do efeito. Nesse caso, os valores de acurácia serão semelhantes aos de precisão. Por outro lado, o valor da precisão pode ser usado como um indicativo de qualidade nos casos da inexistência de uma referência externa para avaliação de tendência, o que não quer dizer que ela não exista, mas que é apenas desconhecida.

A Figura 32 exemplifica, graficamente, os conceitos de precisão, tendência e combinação entre elas, resultando na acurácia.

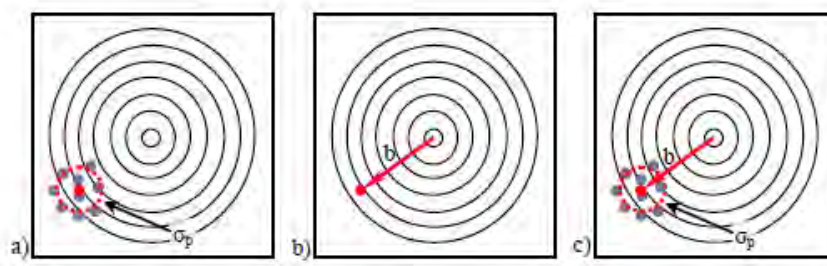


Figura 32 - (a) dispersão (σ_p) das observações; (b) valor médio da amostra e tendência ($b - bias$); (c) acurácia, incorporando efeitos de tendência e a precisão da amostra (σ_p).

Fonte: Monico *et al.* (2009).

Como consequência dos erros sistemáticos e aleatórios, pode-se dizer que o valor verdadeiro de uma grandeza observada, a rigor, não é conhecido (MONICO *et al.*, 2009). A solução é obtida atribuindo-se probabilidades de ocorrência do valor verdadeiro baseadas em padrões de distribuição (SMITH *et al.*, 2009).

Aqui cabe destacar que os métodos tradicionais utilizados em análise de medidas de erro baseiam-se na suposição intrínseca de que a maioria dos fenômenos físicos segue a distribuição normal, ou Gaussiana, de erros aleatórios (SMITH, 2010). Essa distribuição (Figura 33) é descrita por seus parâmetros de média e desvio padrão de forma que, uma vez conhecidos tais valores a partir do conjunto amostral, é possível determinar a probabilidade de ocorrência do valor verdadeiro de uma grandeza dentro de determinados intervalos de confiança (ANDRIOTTI, 2003).

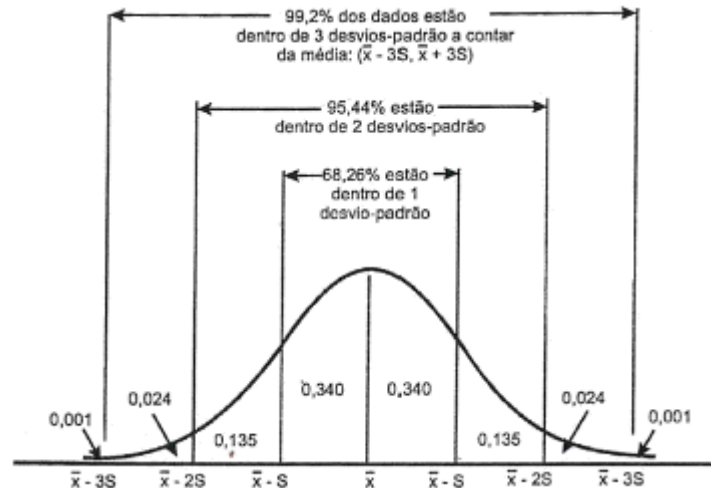


Figura 33 - Distribuição Normal.
Fonte: Andriotti (2003).

A medida de acurácia que reúne os efeitos de tendência e precisão de uma grandeza é primeiramente expressa através do *Root Mean Square Error* (RMSE), ou raiz quadrada do Erro Quadrático Médio (EQM) de uma amostra (MAUNE *et al.*, 2001b). Sua expressão é dada pela Equação (22):

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n-1}} \quad (22)$$

onde n representa o total de observações da amostra e ε a diferença entre o valor observado (ou medido) e o tomado como referência (conhecido) para cada ponto da amostra. Na sequência associa-se o EQM a uma probabilidade de ocorrência, ou nível de confiança estatística, normalmente de 90% ou 95%.

No Brasil, o controle de qualidade posicional é realizado em conformidade com as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da cartografia nacional, estabelecidas no Decreto-lei nº. 89.817 de 1984 (BRASIL, 1984).

Dentre os padrões internacionais de acurácia destacam-se o NMAS (*National Map Accuracy Standards*) publicado pela USGS, o *Accuracy Standards for Large Scale Maps* da ASPRS (*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*) e mais recentemente o NSSDA (*National Standard for Spatial Data Accuracy*) do FGDC (*Federal Geographic Data Committee*). Informações complementares sobre esses padrões podem ser obtidas em Maune *et al.* (2001b) e em ASPRS (2010).

2.8.2 Controle de qualidade de MDTs/MDSs

A exemplo de outros dados geoespaciais, MDSs gerados automaticamente por métodos fotogramétricos estão sujeitos a erros aleatórios, grosseiros e sistemáticos. Esses erros influenciam a qualidade dos modelos tanto em termos planimétricos quanto altimétricos.

De acordo com Daniel e Tennant (2001) e El-sheimy *et al.*(2005), são muitos os fatores que influenciam a acurácia de MDSs gerados automaticamente por métodos fotogramétricos. Dentre esses fatores, podem ser citados:

- *Características geométricas do sistema imageador*: diz respeito às coordenadas do ponto principal, distância focal e distorção das lentes (geometria interna), além de dados de posição e atitude (geometria externa) relativamente a um referencial terrestre.
- *Acurácia das coordenadas do par esteresocópico*: está associada ao modelo matemático empregado na correção geométrica das imagens e à acurácia e distribuição dos pontos de controle utilizados no processo, que devem contemplar, na medida do possível, a variação altimétrica da região de interesse.
- *Algoritmo de correlação automática*: refere-se a parâmetros utilizados pelos algoritmos para busca de pontos homólogos, como mínimo coeficiente de correlação, dimensões das janelas de referência e de busca, máxima paralaxe em x e y , e busca hierárquica. Cabe ressaltar que as propriedades radiométricas das imagens também constituem um fator importante no processo de correlação automática, já que maiores resoluções possibilitam melhor discriminação de feições.

Após a geração automática de MDSs, como na maioria dos processos automatizados, há que se proceder à etapa de edição. Esta etapa, na verdade, corresponde a um processo de controle de qualidade intermediário, que tem por objetivo eliminar, reduzir ou minimizar erros introduzidos no processo de geração do modelo de forma a torná-lo mais próximo da realidade. As ações compreendem a remoção de erros grosseiros (Figura 34), preenchimento por interpolação de pequenos vazios em áreas com coeficiente de correlação inferior ao limiar adotado e filtragem de suavização para minimização de ruídos. De acordo com Toutin (2001), diferentes métodos podem ser utilizados para esta tarefa, dependendo da capacidade da estação de trabalho: manual, automática ou interativa, seja em ambiente monoscópico ou esteresocópico. A remoção automática de erros grosseiros é utilizada quando valores de elevação são drasticamente diferentes dos valores da vizinhança. Essas funções geralmente utilizam filtros baseados em parâmetros de média e desvio padrão.

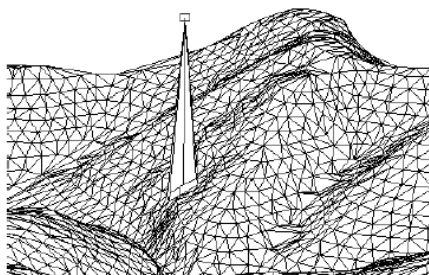


Figura 34 - Vista em perspectiva da área no entorno de um ponto com suspeita de erro grosseiro.

Fonte: Li *et al* (2005).

Para edição em ambiente estereoscópico o modelo deve ser exportado para uma estrutura vetorial (TIN ou curvas de nível) de forma que o operador possa editar interativamente os vértices da rede/curvas a partir de sua percepção tridimensional do relevo. A edição em ambiente estéreo proporciona maior coerência e consistência na reconstrução superfície topográfica (TOUTIN, 2001), porém requer um usuário treinado e um maior investimento em decorrência dos custos de aquisição de uma estação fotogramétrica com esta capacidade, além de consumir um tempo maior dentro do processo produtivo.

A avaliação da qualidade final do modelo, ou validação externa, pressupõe sua classificação com base na estimativa dos erros presentes nas coordenadas tridimensionais de cada ponto medido sobre o mesmo, tendo como referência dados com qualidade geométrica superior.

De acordo com LI *et al* (2005) a validação da acurácia de MDTs/MDSs pode ser realizada, pelo menos, segundo dois modelos diferentes:

- (i) acurácia planimétrica e acurácia altimétrica avaliadas separadamente;
- (ii) ambas as acurácias verificadas simultaneamente.

No primeiro modelo, os resultados da acurácia planimétrica podem ser obtidos separadamente dos resultados na componente vertical (acurácia altimétrica). Contudo, para o segundo modelo haveria a necessidade do estabelecimento de uma medida que refletisse a acurácia de ambas as componentes, medida essa ainda não encontrada na literatura.

A acurácia planimétrica de MDSs/MDTs é difícil de validar, a menos que haja uma imagem coincidente com o modelo ou que o modelo apresente feições lineares incorporadas e claramente identificadas (DANIEL e TENNANT, 2001). Nesse caso, tais feições serviriam como referência geométrica. Partindo-se da concepção

matemática de que em MDSs/MDTs a elevação de um objeto é função de sua posição planimétrica, ou seja, $Z = f(x, y)$, uma baixa acurácia vertical pode ser uma indicação de baixa acurácia planimétrica.

Já a acurácia altimétrica pode ser verificada de acordo com os seguintes procedimentos (Ley, 1986):

- (i) como consequência dos erros envolvidos ao longo do processo de obtenção do modelo;
- (ii) através da geração de curvas de nível;
- (iii) através dos resíduos entre os valores de altitude dos pontos de controle e respectivos valores interpolados do modelo ajustado;
- (iv) através da inclusão de pontos de verificação no processo de ajustamento (não considerados no ajustamento, mas utilizados para computar as diferenças em altitude relativamente ao modelo interpolado);
- (v) com base em pontos de referência medidos no terreno.

As medidas de acurácia ou instruções mais específicas associadas a controle de qualidade de MDSs/MDTs ainda não se encontram devidamente padronizadas, nem mesmo em nível internacional. O NMAS, assim como o padrão da ASPRS e o padrão brasileiro (Decreto-lei nº. 89.817 de 1984) não se referem especificamente a MDSs/MDTs, e ainda baseiam as medidas de acurácia vertical na equidistância das curvas de nível. A abordagem adotada pelo NSSDA apresenta uma ligeira evolução porque já considera os MDSs/MDTs. Entretanto, essa norma especifica um mínimo de 20 pontos de verificação medidos no terreno, a um nível de confiança de 95%, sem estabelecer outros critérios e níveis de tolerância, que ficam por conta do usuário (MAUNE *et al.*, 2001b; DANIEL e TENNANT, 2001).

Daniel e Tennant (2001), baseados na documentação da FEMA⁹ (*Federal Emergency Management Agency*) recomendam que os pontos de verificação sejam escolhidos em áreas planas ou com declividade até 20% ($\approx 11^\circ$), a fim de que o erro planimétrico não influencie a acurácia vertical do MDT/MDS. Li *et al.* (2005) sugerem o uso de parâmetros geomorfométricos, como também feições do terreno do tipo linha. Kocak *et al.* (2004) destacam a importância de se considerar o uso e a declividade do terreno no processo de validação de MDSs/MDTs. Muitos analistas avaliam a acurácia

⁹Federal Emergency Management Agency (<http://www.fema.gov/>) integra o U.S. Department of Homeland Security (<http://www.dhs.gov/index.shtm>). Acesso em 09 jul. 2011.

de curvas de nível extraídas do MDTs, que na prática corresponde à verificação da acurácia planimétrica isoladamente. Entretanto, não há consenso quanto a critérios para validação de MDTs/MDSs.

Neste trabalho, a classificação dos MDSs quanto à acurácia altimétrica e planimétrica segue o previsto nas Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, conforme apresentado na Seção 2.8.3.1, e ainda considera avaliações preliminares quanto à declividade do terreno.

De qualquer forma, como apresentado no início desse tópico, são muitos os fatores que influenciam os resultados e contribuem para o erro. Assim, a avaliação da acurácia de MDSs/MDTs geralmente é subjetiva e pode variar significativamente em função das diferentes condições para sua obtenção e de suas diferentes aplicações.

2.8.3 Análises Estatísticas

2.8.3.1 Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)

O Decreto-lei nº. 89.817 de 1984 (BRASIL, 1984) reúne um conjunto de normas que regulam e norteiam os processos de determinação e quantificação da acurácia posicional de produtos cartográficos.

No Capítulo II do referido Decreto-lei são estabelecidos os valores de tolerância para o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e Erro Padrão (EP) para a planimetria e altimetria dos documentos cartográficos, segundo três classificações quanto à acurácia (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores do PEC e EP.

Classe	Planimetria* (mm)		Atimetria* (equidistância)	
	PEC	EP	PEC	EP
A	0,5	0,3	1/2	1/3
B	0,8	0,5	3/5	2/5
C	1,0	0,6	3/4	1/2

(*): valores aplicados à escala do documento cartográfico.

(**): valores aplicados à equidistância das curvas de nível.

Com base nesses valores o decreto estabelece os pressupostos:

1. 90% dos pontos bem definidos no documento cartográfico, quando forem confrontados com os valores de referência, não deverão apresentar erro superior ao PEC planimétrico estabelecidos;

2. 90% dos pontos isolados cujas altitudes são obtidas por interpolação de curvas de nível, quando comparados com os valores de referência, não deverão apresentar erro superior ao PEC altimétrico estabelecido.

Quanto ao EP, o decreto-lei o considera equivalente às expressões EQM e desvio padrão, sem entrar no mérito da formulação matemática dos dois indicadores estatísticos, o que gera certa confusão na comunidade de usuários. Enquanto o desvio-padrão está associado à variabilidade dos dados, por se tratar de uma medida de dispersão em torno da média aritmética do conjunto amostral, o EQM está associado à diferença entre um valor observado (extraído do documento cartográfico) e o tomado como referência para cada ponto da amostra. Portanto, para efeito das análises estatísticas realizadas nesse trabalho, optou-se por adotar o EQM (Equação 22) como equivalente ao EP. Neste caso, a variável analisada para cálculo do EQM será a distância entre o ponto medido no documento cartográfico e o ponto de referência.

De acordo com a distribuição normal de erros (Figura 33), o PEC (Equação 23) corresponde a 1,6449 vezes o EQM, e equivale ao erro máximo admitido para uma determinada escala ao nível de confiança estatística de 90%.

$$PEC = 1,6449.EQM \quad (23)$$

Pode-se considerar que a classificação dos documentos cartográficos quanto à acurácia posicional deve atender aos dois critérios simultaneamente. O EQM sendo associado à precisão e o PEC à tendência. A Tabela 8 apresenta os valores do EQM e PEC planimétricos convertidos para escalas do mapeamento sistemático brasileiro.

Tabela 8 - Valores de EQM e PEC planimétricos por escala do mapeamento sistemático brasileiro.

Escala	Classe A		Classe B		Classe C	
	EQM (m)	PEC (m)	EQM (m)	PEC (m)	EQM (m)	PEC (m)
1:250.000	75	125	125	200	150	250
1:100.000	30	50	50	80	60	100
1:50.000	15	25	25	40	30	50
1:25.000	7.5	12.5	12.5	20	15	25

O erro planimétrico ep_i de cada ponto isolado medido em um documento cartográfico, em relação a um conjunto de pontos de referência é calculado conforme a seguir:

$$e_{p_i} = \sqrt{(E_{dc_i} - E_r)^2 + (N_{dc_i} - N_r)^2} \quad (24)$$

onde:

E_{dc_i} e N_{dc_i} : coordenadas E e N medidas no documento cartográfico;

E_{r_i} e N_{r_i} : coordenadas E e N do ponto de referência.

De forma análoga à planimetria, o erro altimétrico (e_{ai}) de cada ponto isolado de um documento cartográfico é assim calculado:

$$e_{a_i} = H_{dc_i} - H_{r_i} \quad (25)$$

onde:

H_{dc_i} : altitude interpolada do documento cartográfico;

H_{r_i} : altitude do ponto de referência.

A Tabela 9 apresenta os valores do EQM e PEC altimétricos convertidos para as escalas do mapeamento sistemático brasileiro.

Tabela 9 - Valores do EQM e PEC altimétricos por escala do mapeamento sistemático brasileiro.

Escala	Eq. curvas de nível (m)	Classe A		Classe B		Classe C	
		EQM (m)	PEC (m)	EQM (m)	PEC (m)	EQM (m)	PEC (m)
1:250.000	100	33.3	50	40	60	50	75
1:100.000	50	16.7	25	20	30	25	37.5
1:50.000	20	6.7	10	8	12	10	15
1:25.000	10	3.3	5	4	6	5	7.5

Cabe observar que as normas aqui apresentadas seguem o padrão NMAS (1947), anterior ao surgimento de MDTs. Adicionalmente, além de não prever um número mínimo de pontos de verificação necessários à comprovação da acurácia dos documentos, as especificações contidas no Decreto-lei nº. 89.817 refletem os métodos e tecnologias existentes na época de sua publicação, em 1984. Assim, a evolução observada no campo das geotecnologias nas últimas duas décadas mostra a necessidade de revisão técnica dessas normas, já considerada nas metas do Plano de Ação para Implantação da INDE – Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (CONCAR, 2010).

No contexto dos padrões internacionais, tanto o padrão NMAS, quanto o da ASPRS e NSSDA definem que o mínimo de 20 pontos de verificação deve ser utilizado no processo de validação do produto cartográfico. Já em 1998 o NSSDA passou a considerar MDTs assim como alterou o erro do nível de confiança estatística da acurácia planialtimétrica para 95% ao se considerar a nova realidade da produção de dados digitais (USGS, 1999; MAUNE *et al.*, 2001b, DANIEL e TENNANT, 2001). Atualmente a ASPRS segue o padrão NSSDA (ASPRS, 2010).

No contexto da implantação da INDE no Brasil, encontra-se em elaboração, pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG), o documento que trata das Especificações Técnicas relativas aos Produtos dos Conjuntos de Dados Geoespaciais

(ET-PCDG). Neste documento serão sugeridos novos padrões de acurácia e precisão para os dados geoespaciais, como forma de complementar os padrões estabelecidos no Decreto-lei nº 89.817, de 20 de junho de 1984 (DSG, 2010).

2.8.3.2 Erro linear e erro circular

A terminologia LE90 – *linear error* (erro linear) 90 é usada internacionalmente para quantificar o erro altimétrico ao nível de confiança de 90% (PARADELLA *et al.*, 2005). O erro é dito como linear porque é medido apenas em uma dimensão (eixo z). Na prática, o LE90 é determinado da mesma forma que o PEC altimétrico previsto no Decreto-lei nº. 89.817:

$$LE90 = 1,6449 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{dc_i} - H_r)^2}{n-1}} \quad (26)$$

Já a designação CE, de *circular error* ou erro circular, passou as ser usada para mensurar o erro planimétrico, resultante da combinação dos erros em duas dimensões (x e y) e que pode ser interpretada como o raio de um círculo de incerteza. Ao nível de confiança de 90% o erro circular é denominado CE90.

O erro circular pressupõe que os erros nas componentes x e y (E e N) são iguais e, por consequencia, o EQM_x também será igual ao EQM_y . Logo, o EQM resultante é calculado da seguinte forma:

$$EQM_{result} = \sqrt{EQM_x^2 + EQM_y^2} = \sqrt{2EQM_y^2} = 1,4142 \cdot EQM_y = 1,4142 \cdot EQM_x \quad (27)$$

Se os erros nas componentes x e y são independentes, como normalmente acontece, o fator de 2,1460 é usado para computar a acurácia horizontal ao nível de confiança de 90% (GREENWALT e SCHULTZ¹⁰, 1968 *apud* FGDC, 1998). Observada essa condição e de acordo com o padrão NMAS, o cálculo do *circular map accuracy standard* (CMAS), equivalente ao CE90, é assim calculado:.

$$CE90 = 2,1460 \cdot EQM_y = 2,1460 \cdot EQM_x = 2,1460 \cdot \frac{EQM_{result}}{1,4142} \quad (28)$$

¹⁰GREENWALT, C. R., SCHULTZ, M. E. **Principles and error theory and cartographic applications**. ACIC Technical Report No. 96: St. Louis, Mo., Aeronautical Chart and Information Center, U.S. Air Force, 89 p. 1968.

$$CE90 = 1,5175 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{dc_i} - E_{r_i})^2 + \sum_{i=1}^n (N_{dc_i} - N_{r_i})^2}{n-1}} \quad (29)$$

2.8.3.3 Tendência e precisão

O método descrito por Galo e Camargo (1994), baseado em Merchant (1982), considera não só a avaliação do documento cartográfico em termos de suas componentes tendência e precisão, como também propõe a utilização de testes estatísticos para validar os resultados.

Nesse método a análise da qualidade posicional baseia-se em testes de hipóteses sobre a média e o desvio padrão amostrais de discrepâncias, obtidas pela diferença entre as coordenadas de referência e as medidas sobre o produto em análise. Ao se admitir uma hipótese qualquer como verdadeira, testa-se sua validade para determinados níveis de confiança, comparando-se valores calculados com valores tabelados. No contexto da acurácia posicional, a hipótese da não existência de tendência é validada pelo teste *t de Student*, enquanto que a precisão é testada pelo teste do qui-quadrado.

No método proposto por Merchant, o teste da distribuição *t de Student* é aplicado ao nível de confiança de 90% ($\alpha = 0,10$). O $t_{calculado}$ é expresso pela Equação 30:

$$t_{calc_i} = \frac{\bar{d}_i \cdot \sqrt{n}}{S_{di}} \quad (30)$$

onde:

i : coordenada analisada;

\bar{d}_i : média das discrepâncias para a coordenada i ;

S_{di} : desvio padrão das discrepâncias para a coordenada i ;

n : número de amostras.

A precisão do produto cartográfico está associada a erros aleatórios. Essa precisão é testada por meio da estatística do qui-quadrado (χ^2), adequada para os casos onde não se conhece a distribuição de probabilidades de uma variável (SANTOS, 2009).

A hipótese assumida para o teste do qui-quadrado testa se a variância (S^2) das discrepâncias observadas entre coordenadas de referência e amostrais são estatisticamente iguais a um valor esperado, especificado pelo analista. Neste caso,

adota-se como valor esperado (σ_0^2) o quadrado do EQM correspondente à classe do mapeamento (A, B ou C) para a qual uma determinada escala está sendo testada.

A estatística qui-quadrado (χ^2) é obtida através da Equação 31:

$$\chi_i^2 = \frac{(n-1) \cdot S_i^2}{\sigma_i^2} \quad (31)$$

onde:

i : coordenada analisada;

S_i^2 : variância da discrepância para a coordenada i ;

σ_i^2 : variância esperada para a coordenada i , baseada no EP da classe/escala;

n : número de elementos da amostra.

A fundamentação teórica sobre testes de hipóteses pode ser obtida em Wong e Lee (2005).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta Seção é apresentada, primeiramente, a área de estudo utilizada para desenvolvimento do trabalho. Na sequência são apresentados os materiais utilizados e a metodologia empregada.

3.1 Descrição da área de estudo

Na região do médio vale do Rio Paraíba do Sul, abrangendo parte do corredor de ligação entre as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, tendo a serra da Mantiqueira ao norte e a serra do Mar ao sul, está localizada uma das principais áreas de estudo dos Departamentos de Geografia e de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e do Departamento de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Parte desta área também foi utilizada pelo IBGE como área piloto para avaliação dos sensores do satélite SPOT 5, objetivo da pesquisa realizada por Barros (2006). Atualmente, esta área também está sendo mapeada pelo IBGE, em escala 1:25.000, no contexto dos projetos de mapeamento do Estado do Rio de Janeiro e de parte do estado de São Paulo.

A área de estudo supracitada foi denominada por Correia (2008) de Área de Estudo Resende (AER), em referência à denominação da feição geológica lá existente, a Bacia Sedimentar de Resende. Trata-se de um área compreendendo seis folhas do mapeamento sistemático brasileiro na escala 1:50.000, em um total de 4.235 km², conforme mostrado na Figura 35.

Correia (2008) explica que as formas predominantes da morfologia de “mar de morros” são porções convexas ou arredondadas (colinas onduladas) e porções côncavas ou reentrâncias – com destaque para as cabeceiras de drenagem em forma de anfiteatro¹¹, determinantes no processo evolutivo de encostas. Esta explicação contextualiza igualmente a importância da AER para esta pesquisa, na medida em que a morfologia denominada “mar de morros” confere à região característica adequada ao estudo de MDTs e MDSs. Na Figura 36 é apresentada uma amostra da paisagem de “mar de morros” na AER.

¹¹Porção de terreno de forma semicircular ou ovalada, aberta pela erosão na encosta duma montanha (Novo Dicionário Eletrônico Aurélio versão 5.0, 2004).

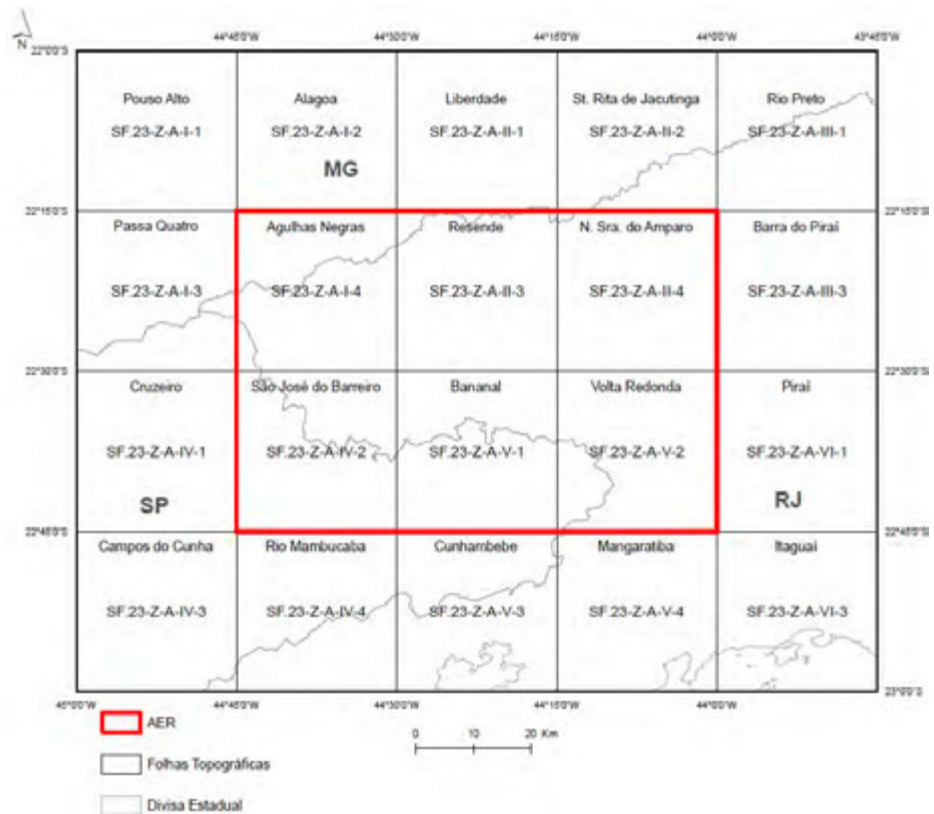


Figura 35 - Localização da AER na articulação da Folhas 1:50.000 do IBGE.
Fonte: Baseada em Correia (2008).



Figura 36 - Morfologia de “mar de morros” na AER.
Fonte: CORREIA (2008).

Na região da AER está localizada uma subárea de estudo, denominada AEB (Área de Estudo Bananal), utilizada por Correia (2008) como área de estudo para o desenvolvimento de sua pesquisa, visando contribuir para torná-la um campo de provas e testes de seleção de sensores de imageamento para fins de mapeamento topográfico.

Neste contexto, optou-se por escolher como área de estudo uma região que estivesse contida na AER e que também contivesse AEB. Assim, a cena PRISM/ALOS

que ofereceu a melhor configuração para atendimento a esse requisito foi a escolhida para aquisição.

Estando 90% inserida na AER, a área de estudo efetiva corresponde a uma região com cerca de 1.100 km², equivalente ao enquadramento da visada nadir do sensor PRISM no modo de observação *triplet* (largura nominal da faixa igual a 35 km). Além da presença da morfologia de “mar de morros”, esta área apresenta altitudes variando entre 340 e 1.900 m.

Cabe aqui destacar que a idéia inicial era concentrar as análises na AEB, devido à maior quantidade de levantamentos geodésicos já existentes. Porém, o aproveitamento de pontos de controle determinados na AEB ficou abaixo da expectativa, pois muitos não puderam ser perfeitamente identificados nas imagens PRISM. Assim, considerando-se: 1) a importância da AER para estudos científicos; 2) a necessidade de medição de novos pontos de controle; 3) a possibilidade de determinação de pontos de controle em áreas onde estão as partes mais altas da porção imageada pela cena PRISM, não contempladas em AEB; e 4) que o estudo pode contribuir para a ampliação do campo de provas constituído por Correia (2008), optou-se por adotar todo o enquadramento da cena nadir inserida na AER como área de estudo efetiva. Na Figura 37 é apresentado o esquema de localização do enquadramento da cena PRISM/ALOS, com destaque para a visada Nadir, área efetiva de estudo desta pesquisa.

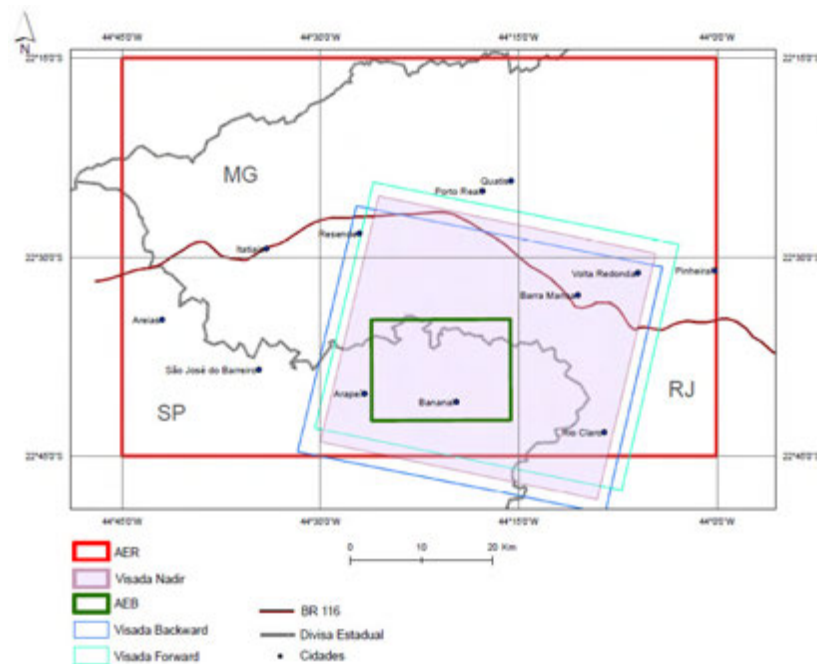


Figura 37 - Esquema de localização da cena PRISM/ALOS na AER.

3.2 Materiais utilizados

3.2.1 Dados

3.2.1.1 Cenas PRISM/ALOS

Conforme apresentado na Seção 3.1, a área de estudo corresponde ao enquadramento de uma cena nadir no modo *triplet* de aquisição das imagens PRISM. Para realização da pesquisa foi necessário adquirir dois produtos distintos para o mesmo conjunto de cenas *triplet*, quais sejam: produto padrão e produto com RPCs.

O produto padrão da JAXA corresponde às imagens apresentadas no formato CEOS. Quanto ao nível de processamento, é possível utilizar as imagens processadas nos níveis 1A, 1B1 e 1B2R, por permitirem a correção geométrica pelo modelo rigoroso para fins de ortorretificação e geração de MDT/MDS (PCI GEOMATICS, 2008).

A PCI Geomatics (2009) recomenda a utilização do nível 1B1, pois nesse nível de processamento, além da correção radiométrica já aplicada, a cena correspondente a cada visada (nadir, *backward* e *forward*) é composta de 4 imagens distintas, cada uma delas adquirida por um CCD do sensor PRISM, com seus respectivos dados orbitais. Assim, o sistema modela a imagem de cada CCD de forma independente, tornando a correção geométrica das imagens mais consistente e proporcionando melhor acurácia (PCI GEOMATICS, 2008; IBGE, 2009).

Todavia, considerando a recomendação da PCI Geomatics (2008), nessa opção de processamento é necessário utilizar um mínimo de 6 pontos de controle para modelar a geometria da imagem de cada CCD, gerar no mínimo 4 MDSs distintos e realizar 4 ortorretificações, como forma de obter os produtos para toda a área de interesse. Por esse motivo, optou-se pelo uso das cenas com nível de processamento 1B2R, uma vez que nesta opção as imagens dos 4 CCDs já estão mosaicadas, o que proporciona uma redução do número de pontos de controle e tempo de processamento.

O produto padrão foi processado pela ASF/AADN com o *software* (versão 5.09) utilizado pela JAXA no processamento das imagens ALOS (ASF, 2011d, 2011e). A acurácia geométrica esperada para as imagens processadas por essa versão do *software* foram apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

O produto com RPCs foi processado pela RESTEC, utilizando o *software* (na versão 1.4) desenvolvido pela JAXA-EORC/RESTEC. Este produto foi cedido gratuitamente pela JAXA para desenvolvimento da pesquisa. Conforme apresentado por Takaku e Tadono (2009), para efeitos práticos a acurácia esperada para o produto com RPCs pode ser considerada a mesma do produto padrão.

Na Tabela 10 são apresentados os principais metadados comuns às cenas PRISM *triplet* dos dois produtos utilizados na pesquisa. As listas de metadados fornecidos pelos distribuidores das imagens encontram-se no Anexo A.1 (Metadados das Imagens PRISM/ALOS, incluídos no CD anexo ao volume da dissertação).

Tabela 10 - Principais metadados das cenas PRISM/ALOS.

Metadado	Valor
Identificador Nadir	ALPSMN216394055
Data de aquisição	15/ 02/ 2010
Modo de observação	<i>Triplet</i>
Identificador <i>Backward</i>	ALPSMB216394110
Identificador <i>Forward</i>	ALPSMF216394000
Órbita	Descendente
Largura nominal da faixa	35 km
Nível de processamento	1B2R
Latitude do centro (imagem Nadir)	-22,614°
Longitude do centro (imagem Nadir)	-44,288°
Inclinação transversal à trajetória	- 1,2°
Elipsóide de referência	GRS80
<i>Datum</i> planimétrico	ITRF97

Fonte: IBGE – ASF/AADN e JAXA.

3.2.1.2 Dados gerados em outras pesquisas

Conforme apresentado na Seção 3.1 (descrição da área de estudo), um dos motivadores para sua escolha foi a existência de dados gerados em outras pesquisas científicas ou de projetos de mapeamento anteriores. Os dados efetivamente utilizados, bem como suas origens, estão descritos a seguir.

- a) 27 pontos de controle planialtimétrico e 17 pontos de verificação altimétrica determinados por posicionamento GPS relativo estático, bem como 9.776 pontos de controle altimétrico determinados por posicionamento GPS relativo cinemático, todos com precisões melhores que 0,25 m em planimetria e 0,50 m em altimetria (dados produzidos por Correia (2008) na pesquisa realizada na AEB);
- b) 13 pontos de verificação altimétrica determinados por posicionamento GPS relativo estático com precisões compatíveis com mapeamento na escala 1:10.000 (dados dos Projetos RJ25 e SP2-25 de mapeamento na escala 1:25.000 do estado do Rio de Janeiro e parte do estado de São Paulo, respectivamente, obtidos junto ao IBGE).

Os descritivos dos pontos de controle planialtimétricos, quando disponíveis, estão apresentados no Anexo A.2 – Dados gerados em outras pesquisas, incluídos no CD anexo ao volume da dissertação.

3.2.1.3 Dados gerados nessa pesquisa

Consiste de 19 pontos de controle planialtimétrico e 1 ponto de verificação altimétrica determinados por posicionamento GPS relativo estático, bem como 12.489 pontos de verificação altimétrica determinados por posicionamento GPS relativo cinemático, todos com precisões submétricas.

Os relatórios do processamento GPS dos pontos de controle estáticos estão apresentados no Apêndice A.1. Os respectivos descritivos estão apresentados no Apêndice A.2 – ambos organizados no CD anexo ao volume da dissertação.

3.2.1.4 Outros dados/produtos

Consiste em:

- a) MDS da missão SRTM v. 4.1, com resolução espacial de 3 arcos de segundo (90 m), LE90 esperado de 16 m e CE90 esperado de 20 m, *datum* planimétrico WGS84 e altimétrico EGM96 – *Earth Gravitational Model 1996* (NASA, 2007). O MDS do SRTM pode ser obtido gratuitamente no endereço <<http://srtm.csi.cgiar.org/>>;
- b) arquivos vetoriais de folhas do mapeamento sistemático brasileiro do IBGE, na escala 1:50.000, correspondentes às categorias Sistema Viário e Localidades;
- c) 2 estações GNSS integrantes do Sistema Geodésico Brasileiro: SAT-93652 e SAT-91893 (Anexo A.3 do CD anexo ao volume da dissertação).

3.2.2 Equipamentos e softwares

O desenvolvimento da pesquisa, em suas diversas etapas, envolveu o uso dos equipamentos e *softwares* relacionados a seguir:

- *notebook* Intel Core 2 Duo, 2,66GHz e 2Gb de RAM;
- receptor GPS L1 Ashtech Promark2;
- *software* de pós-processamento GPS Ashtech Solutions v.2.70;
- *Personal Digital Assistant* (PDA) Mio P550b, com GPS acoplado;

- *software* ArcPad v.7.0;
- *software* MapReady v.2.3;
- *software* MAPGEO, versões 2004 e 2010;
- *software* ArcGis v.9.3.1;
- *software* PCI Geomatica v.10.1.4, módulos OrthoEngine e Focus;
- *software* ERDAS *Leica Photogrammetry Suite* (LPS), v.9.2;
- *software* GEOPEC v.2.1 (maiores detalhes podem ser encontrados em Santos (2011)).

3.3 Metodologia

A metodologia adotada nessa pesquisa está subdividida em duas etapas, conforme fluxogramas apresentados nas Figuras 38 e 39.

Na primeira parte da metodologia é feita a seleção de dados de campo advindos de levantamentos já realizados. A determinação de novos pontos de controle é feita em campanha de campo compreendendo a área de estudo, onde são obtidos pontos de controle por levantamentos GPS relativo estático e cinemático, sendo esse último realizado em regiões com diferentes morfologias. As coordenadas dos pontos de controle estático são empregadas na correção geométrica das imagens, realizada de acordo com os modelos matemáticos a seguir: **M**odelo rigoroso baseado em parâmetros de **Ó**rbita e **A**titude (MOA); **M**odelo rigoroso baseado em **P**osição-**R**otação (MPR); e **M**odelo generalizado baseado no uso de **C**oeficientes **P**olinomiais **R**acionais fornecidos pela JAXA (MRPC).

Na segunda etapa, de posse dos dados disponíveis, os experimentos são realizados de acordo com algumas possibilidades, como a quantidade de pontos de controle usada na correção geométrica das imagens para fins de ortorretificação e geração de MDSs, diferentes estratégias de correlação das imagens, diferentes espaçamentos da grade dos MDSs, bem como a localização de pontos de referência (verificação) em terrenos com diferentes morfologias.

As análises estatísticas são realizadas para determinar a acurácia planialtimétrica das ortoimagens e MDSs, bem como suas classificações quanto ao PEC, consoante o Decreto-lei nº. 89.817. Adicionalmente, são realizados os testes de hipótese para análise de tendência (teste *t* de *Student*) e precisão (teste qui-quadrado- χ^2) desses produtos.

A solução que proporciona a melhor acurácia planimétrica em cada uma das abordagens de correção geométrica visando à ortorretificação da imagem é considerada

para a extração de MDSs. Na sequência, o MDS de melhor acurácia altimétrica é considerado para análises estatísticas locais, segundo diferentes morfologias: áreas de baixa declividade e regiões de encostas de anfiteatros.

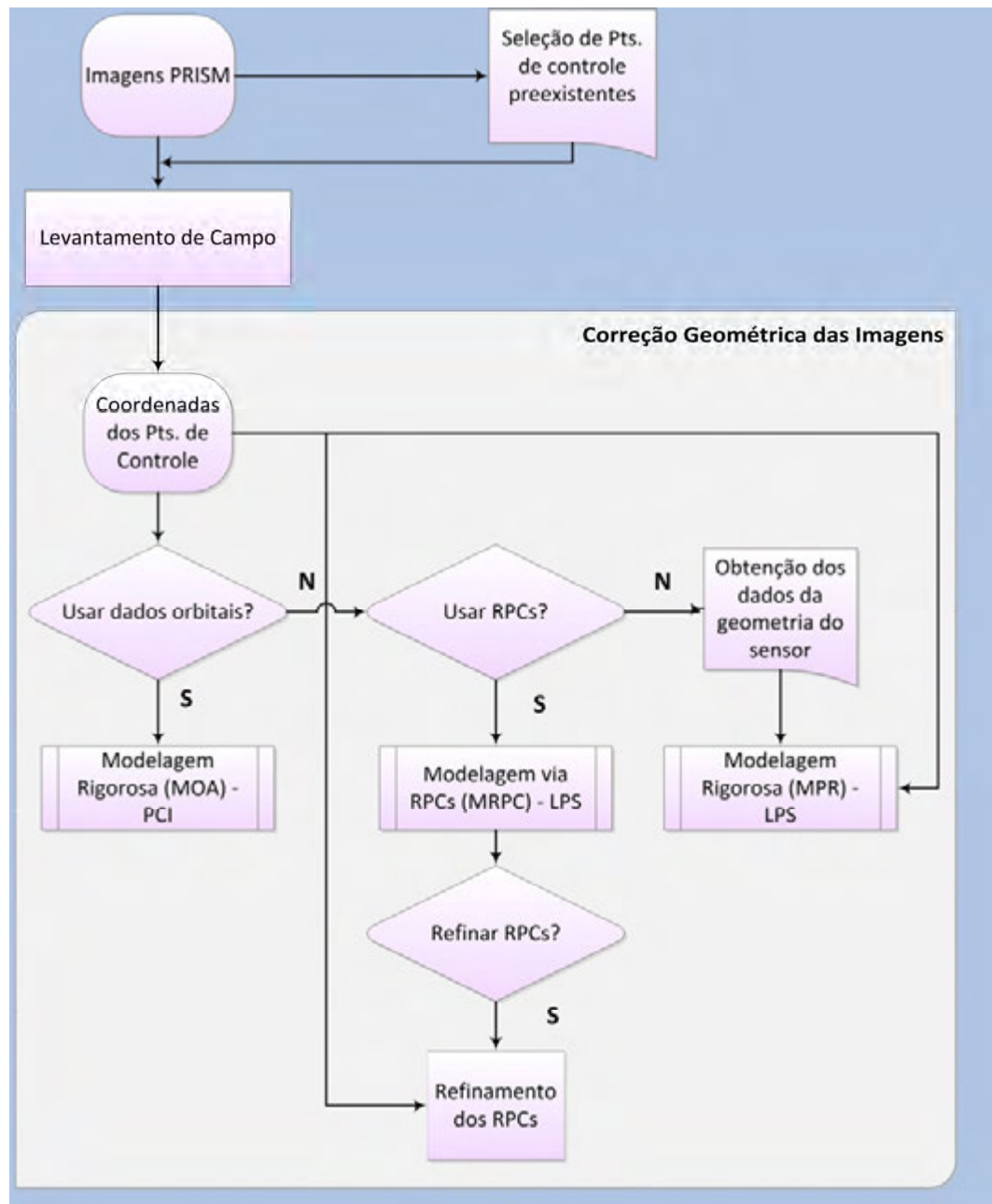


Figura 38 - Fluxograma correspondente à primeira etapa da metodologia: seleção de pontos de controle preexistentes, levantamento de campo e correção geométrica das imagens.

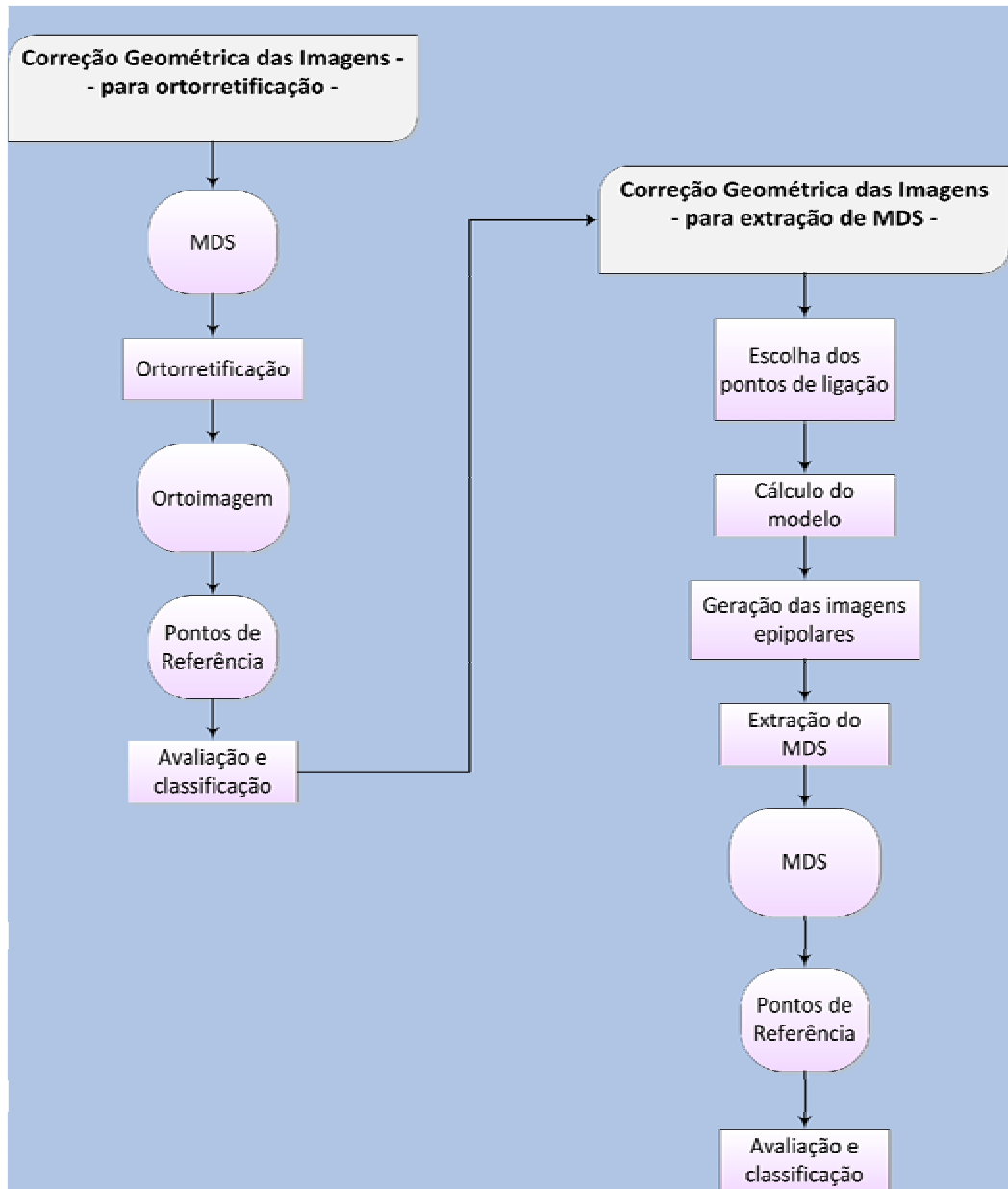


Figura 39 - Fluxograma para geração e classificação de ortorectificados e MDSs.

3.4 Aplicação da metodologia

3.4.1 Levantamento de campo

A atividade de levantamento de campo visa à determinação complementar de pontos de controle necessários à correção geométrica das imagens e geração de MDSs, e também à verificação dos produtos derivados (ortoimagens e MDSs).

3.4.1.1 Planejamento e execução

O planejamento consiste da seleção de pontos identificáveis sobre a imagem para posterior determinação de seus homólogos no terreno, a fim de se estabelecer a relação espaço imagem-objeto visando à correção geométrica da imagem.

Tendo em vista a disponibilidade de pontos de apoio levantados em campanhas anteriores (AEB e IBGE) houve por bem viabilizar o aproveitamento desses pontos, de acordo com suas precisões e distribuições (com auxílio da descrição e croquis de cada ponto) na cena utilizada.

Como esses pontos foram identificados em imagem Ikonos, com 1 m de resolução espacial, ou em fotografias aéreas analógicas coloridas – escala 1:30.000, muitos deles não foram aproveitados, pois não puderam ser identificados de modo inequívoco nas imagens PRISM. De um total de 66 pontos de controle planialtimétricos identificados numa cena Ikonos por Correia (2008) em sua pesquisa, apenas 27 pontos (41%) foram aproveitados, sendo que o maior aproveitamento ocorreu nos locais em que os pontos foram medidos nos eixos de cruzamentos e bifurcações de estradas. Já para os pontos determinados pelo IBGE, o aproveitamento foi de 0%, dada a incerteza na identificação dos referidos pontos na imagem PRISM.

Como não é possível realizar a identificação precisa de feições em MDSs, não existe a obrigatoriedade da adoção de pontos de verificação que sejam homólogos (terreno e imagem). Porém, devem ser observadas certas condições para sua escolha, por conta do erro planimétrico associado ao modelo. Em áreas planas, por exemplo, o erro planimétrico do MDS não afetará a qualidade da altimetria do modelo. Por outro lado, pontos escolhidos em áreas com declividade superior a 20% (vide Seção 2.8.2) estão sujeitos à influência do erro planimétrico, que pode mascarar a qualidade altimétrica do modelo.

Assim, um ponto de controle planialtimétrico pode ser utilizado como ponto vertical (ponto V), mas este não pode ser utilizado como ponto HV, na medida em que não é possível a identificação precisa de seu homólogo na imagem. Partindo dessa concepção, foram aproveitados 13 pontos determinados pelo IBGE, não identificáveis ou não identificáveis com precisão na imagem, mas adequados exclusivamente à avaliação altimétrica dos MDSs. Também foram aproveitados 17 pontos verticais determinados por Correia (2008) em AEB, somente para avaliação de MDSs.

Da pesquisa realizada por Correia (2008) foram aproveitados ainda pontos determinados por levantamentos cinemáticos para caracterização de superfícies. Esse aproveitamento objetivou avaliar, de forma local, o comportamento dos MDSs em áreas com baixa declividade e em áreas de encostas de anfiteatros, chamadas pelo autor de superfícies V e anfiteatros, respectivamente.

Os dados aproveitados de levantamentos GPS realizados pelo IBGE e por Correia (2008) estão apresentados na Figura 40. Na Figura 41 é mostrada, em detalhe, a área AEB.

Uma vez selecionados os pontos existentes e aproveitáveis, outros novos pontos foram escolhidos de forma a se ter uma boa distribuição dos pontos na área recoberta pela imagem. Essa distribuição levou em consideração a abrangência geográfica, variação altimétrica e declividade. Além desses critérios, deve ser destacada a importância de se escolher pontos identificáveis nas três visadas da cena (*backward*, *forward* e nadir), que servirão com pontos de controle estéreo na fase da geração automática dos MDSs.

Para conhecimento aproximado da altimetria e da declividade na área da cena foi utilizado o MDS do SRTM. Os arquivos vetoriais das categorias do sistema viário e localidades, correspondentes às folhas topográficas na escala 1:50.000 do IBGE, foram utilizados para auxiliar no planejamento. Devido à existência de 2 Estações Geodésicas do IBGE (SAT-91893 e SAT-93652) dentro da área de estudo, a distância dessas estações aos pontos de controle não foi superior a 27 km, alcance adequado para obtenção de precisão centimétrica com uso de receptor de uma frequência (MONICO, 2008).

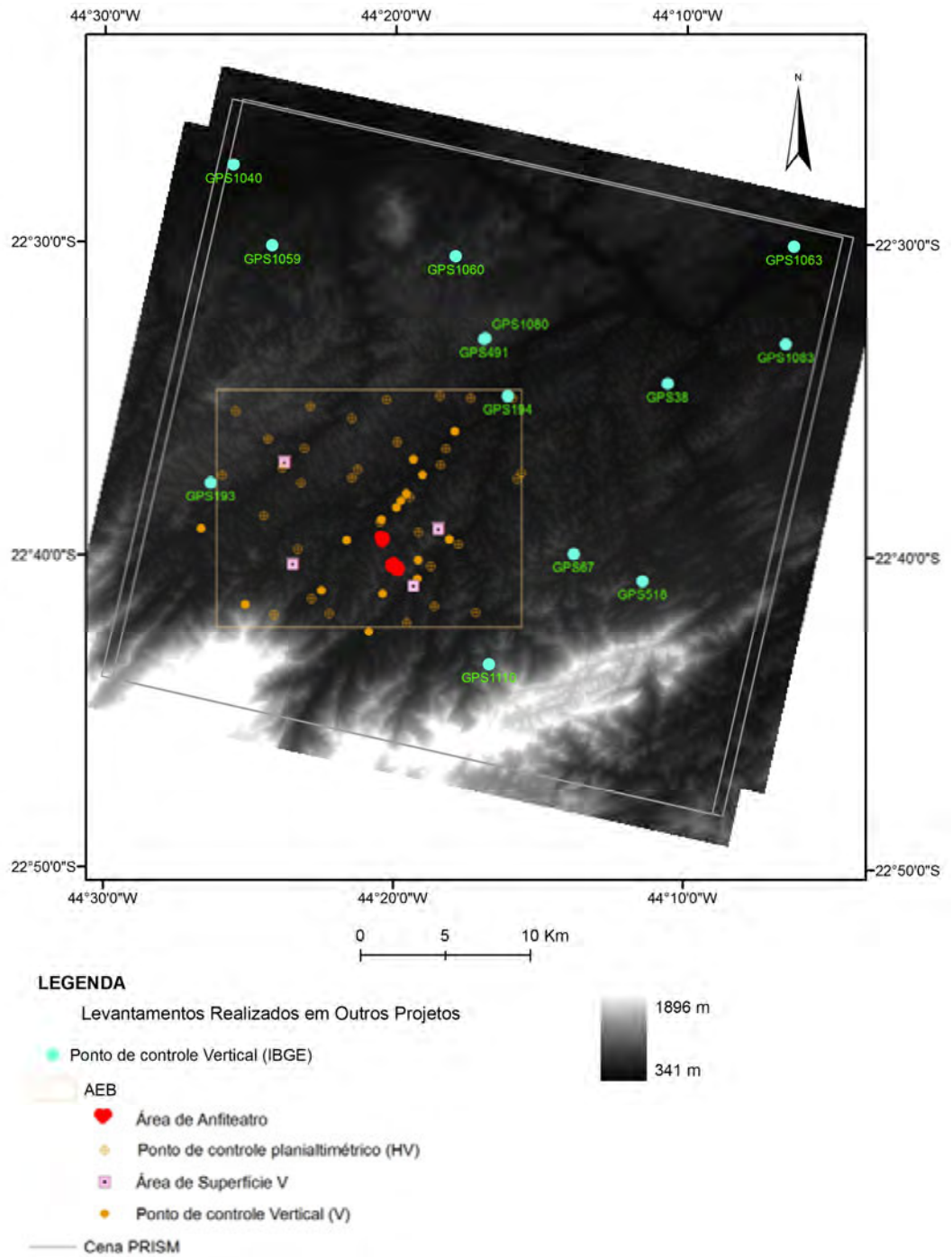


Figura 40 - Pontos e áreas utilizados de AEB e IBGE.

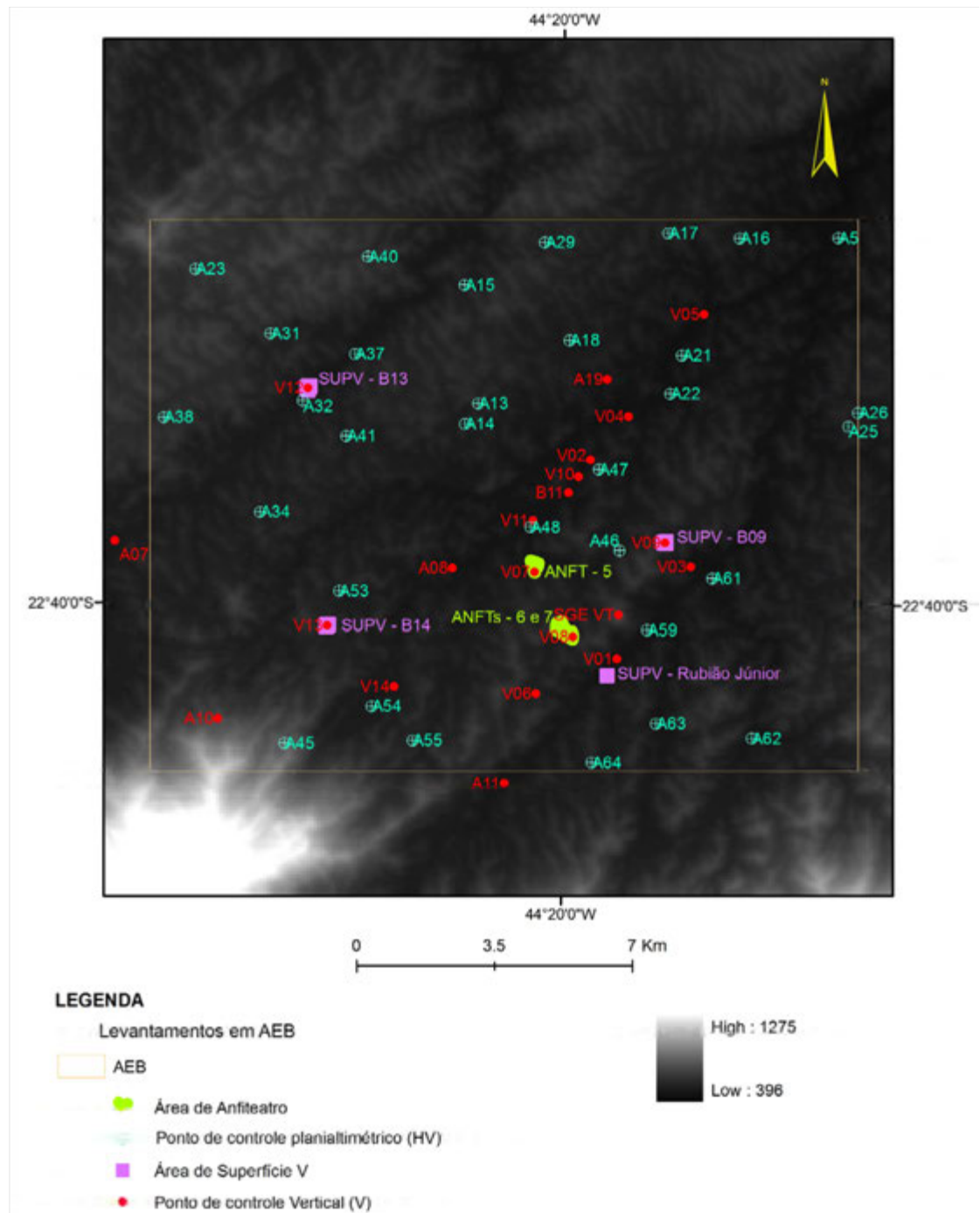


Figura 41 - Detalhe da AEB: pontos e áreas levantadas.

Preferencialmente, observadas as condições de acessibilidade, foram escolhidos pontos situados em cruzamentos, bifurcações e entroncamentos de vias, priorizando os pontos situados em cruzamentos perpendiculares, visando facilitar o posicionamento do equipamento GPS na interseção dos eixos dessas vias. Na medida do possível, buscou-se a distribuição homogênea desses pontos na área da imagem, com a preocupação de se identificar pontos em locais que contemplassem a variação altimétrica da região, entre 340 e 1.900 m. Porém, como as regiões mais elevadas normalmente correspondem a

áreas de serras e mata fechada, nem sempre foi possível a escolha de pontos nas áreas mais altas, seja pela inexistência de pontos perfeitamente identificáveis ou pela impossibilidade de acesso a um eventual ponto identificado.

O mapa de declividade, gerado a partir do MDS do SRTM segundo as classes definidas pela EMBRAPA (1995), foi utilizado como referência aproximada para a escolha de pontos em locais com declividade em torno de 20% ($\approx 11^\circ$), visando minimizar o erro em altimetria decorrente dos inevitáveis erros de identificação planimétrica dos pontos nas imagens.

Foram selecionados pontos em quantidade suficiente para eventuais descartes, como forma de otimizar o levantamento de campo. Deve ser ressaltado, entretanto, que nem sempre todas as condições desejadas e descritas anteriormente puderam ser atendidas simultaneamente. Fatores que vão desde a inexistência de pontos identificáveis nos locais de interesse, condições de acesso, além da alteração da paisagem, podem prejudicar a distribuição ideal dos pontos.

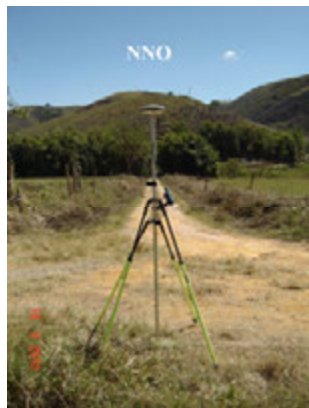
Para facilitar a navegação em campo, foram utilizados PDAs com GPS acoplado (com o *software* ArcPad, da ESRI). Este *software* emprega tecnologia SIG móvel, dispondo de recursos para acesso a banco de dados e integração com GPS, além de suportar dados em formato *raster* e vetorial. Assim, todos os dados utilizados durante a fase de planejamento (arquivos vetoriais de localidades, sistema viário, coordenadas dos pontos de controle selecionados e imagem georreferenciada) foram importados para os PDAs. A possibilidade de posicionamento em tempo real, tendo como base a imagem georreferenciada e todos os *layers* necessários ao acesso e identificação dos pontos confere maior agilidade e poder de decisão às operações de campo.

Para a determinação das coordenadas dos pontos de controle foi usada a técnica GNSS de posicionamento relativo estático por irradiação. As medições foram realizadas com o receptor GPS Ashtech Promark2, de uma frequência (L1). O rastreamento foi realizado de acordo com as seguintes especificações:

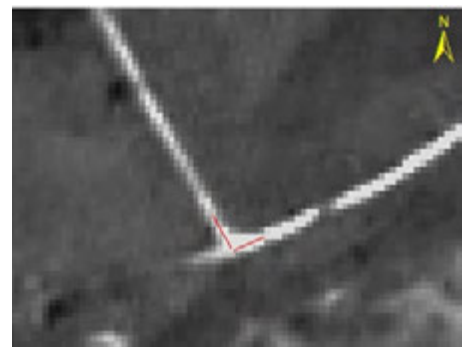
- Intervalo de rastreamento: 2 segundos;
- Tempo médio de rastreamento em cada estação remota: 40 a 60 minutos, em função da distância à base;
- Máscara de elevação: 10° ;
- *Datum* planialtimétrico: WGS-84;
- Distância máxima das estações remotas à estação base: 27 km.

O levantamento de campo foi realizado no período de 16 a 20 de agosto de 2010, em parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), através dos Departamentos de Geologia e Geografia do Instituto de Geociências, e com o IBGE, através da Coordenação de Recursos Naturais do Departamento de Geociências.

Para a medição dos pontos de controle identificados no terreno, escolheu-se, primeiramente, as duas vias cujos eixos pudessem ser bem definidos, preferencialmente as vias sem curvas, a fim de instalar o equipamento aproximadamente na interseção desses eixos, caracterizando assim o ponto de controle no terreno. Visando à elaboração de memoriais descritivos de localização de cada ponto determinado, foram feitos registros fotográficos do equipamento instalado, segundo diferentes ângulos, bem como elaborado o correspondente o *croqui* do ponto. O local escolhido para o ponto foi identificado na imagem por meio do traçado dos eixos sobre a mesma (Figura 42).



(a)



(b)

Figura 42 - Identificação de um ponto: (a) em campo; (b) na imagem.

A escolha das áreas para caracterizar uma superfície V e/ou anfiteatro, para o levantamento cinemático, foi realizada durante a campanha. No caso da existência de uma área com as características desejadas nas imediações do ponto de controle em medição, realizava-se o levantamento cinemático da área durante o rastreamento estático do ponto de controle. Dessa forma, o ponto de controle poderia ser utilizado como estação de referência para determinação das coordenadas dos pontos levantados de forma cinemática. Houve casos em que o próprio ponto de controle situava-se dentro da área. A maior distância observada entre uma superfície e o ponto de controle de referência foi cerca de 4 km, ocorrida em um único caso. As demais distavam menos de 500 m de sua base local. A menor área levantada pelo método cinemático foi equivalente a um polígono de 50 m x 50 m (cerca de 2500 m²).

As configurações adotadas para o levantamento cinemático foram as mesmas do levantamento estático. Todas as superfícies foram percorridas a pé, de forma a melhor caracterizar seu comportamento. A existência de obstruções ao longo da trajetória, como árvores, por exemplo, entre outros motivos, ocasionou perda de sinal antes do tempo mínimo de rastreamento, exigindo que o levantamento tivesse que ser reiniciado, em alguns casos, por mais de duas vezes. Os pontos determinados nas superfícies seguiram um padrão irregular de distribuição.

A diferença entre a data do imageamento (fev/2010) e a data do levantamento (ago/2010) não causou maiores impactos ao levantamento, pois houve pouca alteração da paisagem. Entretanto, as condições das estradas devido às chuvas ocorridas na região, impediram o acesso a áreas estratégicas da imagem, seja do ponto de vista da geometria de distribuição dos pontos, seja por conta da variação altimétrica da região. Por causa desse imprevisto, a região SSE da imagem não pode ser apoiada devidamente, conforme planejado.

Por outro lado, devido a melhores condições de acesso, apesar da dificuldade de identificação de pontos em áreas de serra e mata fechada, foi possível determinar 1 ponto de controle planialtimétrico e uma superfície V na região da serra da Bocaina, a sudoeste da cena, em uma das regiões de maior altitude na área de estudo.

Nas Figuras 43 e 44 são ilustradas a distribuição de pontos de controle e superfícies determinados na campanha, respectivamente, sobrepostos ao MDS do SRTM.

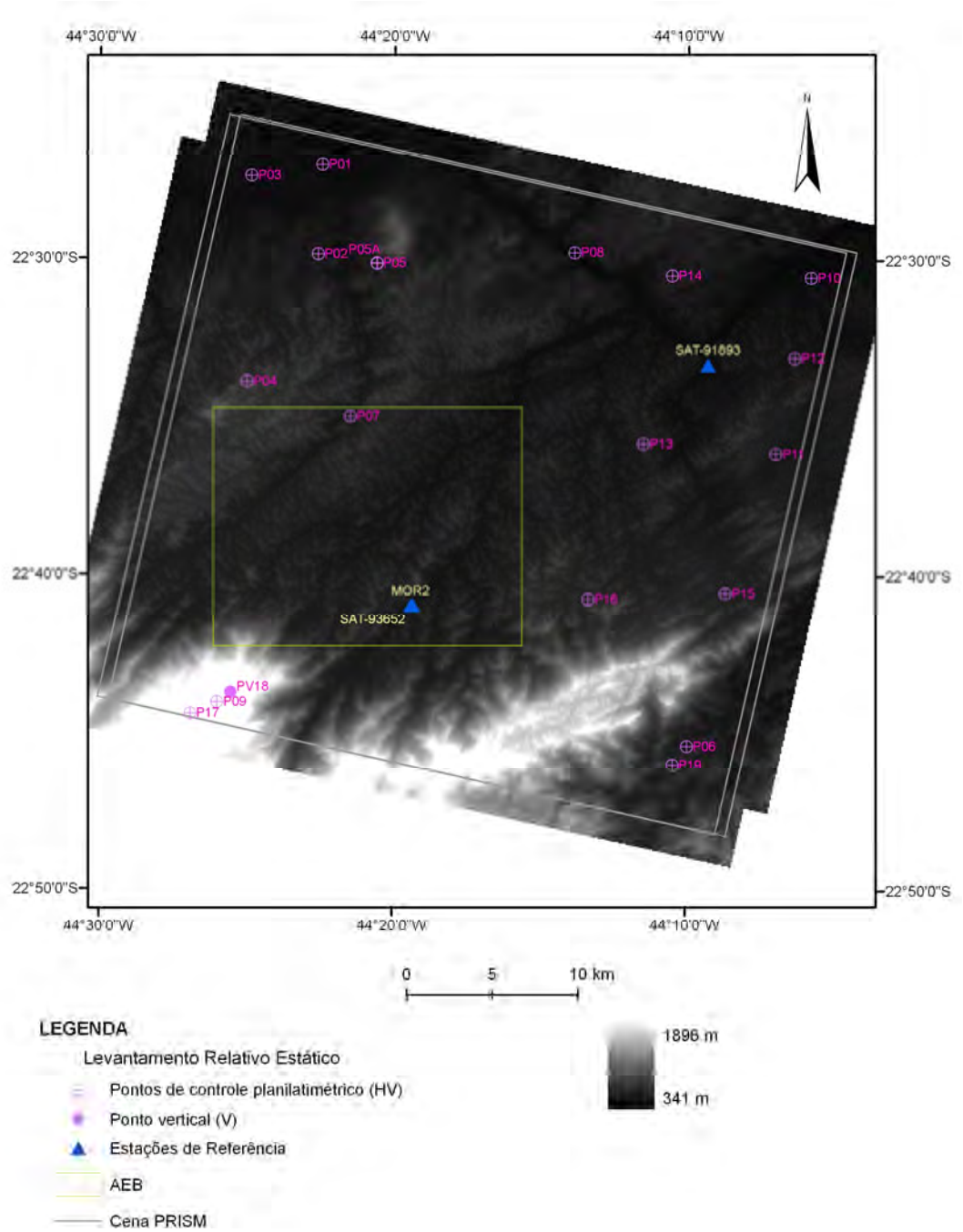


Figura 43 - Pontos de controle determinados por levantamento relativo estático.

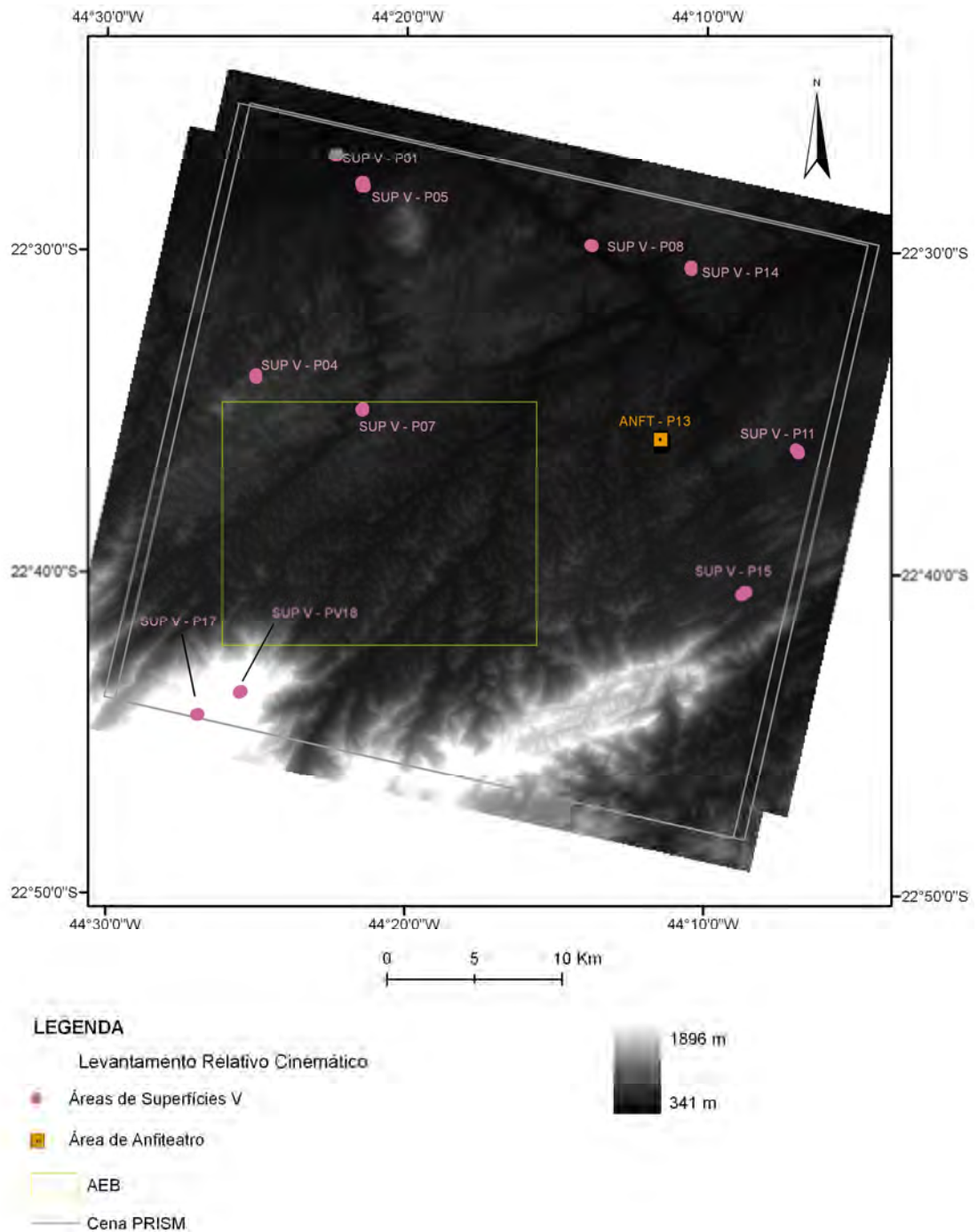


Figura 44 - Áreas determinadas pelo método relativo cinemático.

As superfícies V e o anfiteatro são identificados em função do ponto de controle utilizado como estação de referência para sua determinação. Por exemplo, a SUPV-P07 teve como estação de referência o ponto de controle P07.

Na Figura 45 estão reunidos todos os dados (pontos e áreas) oriundos dos levantamentos GPS considerados nesse trabalho.

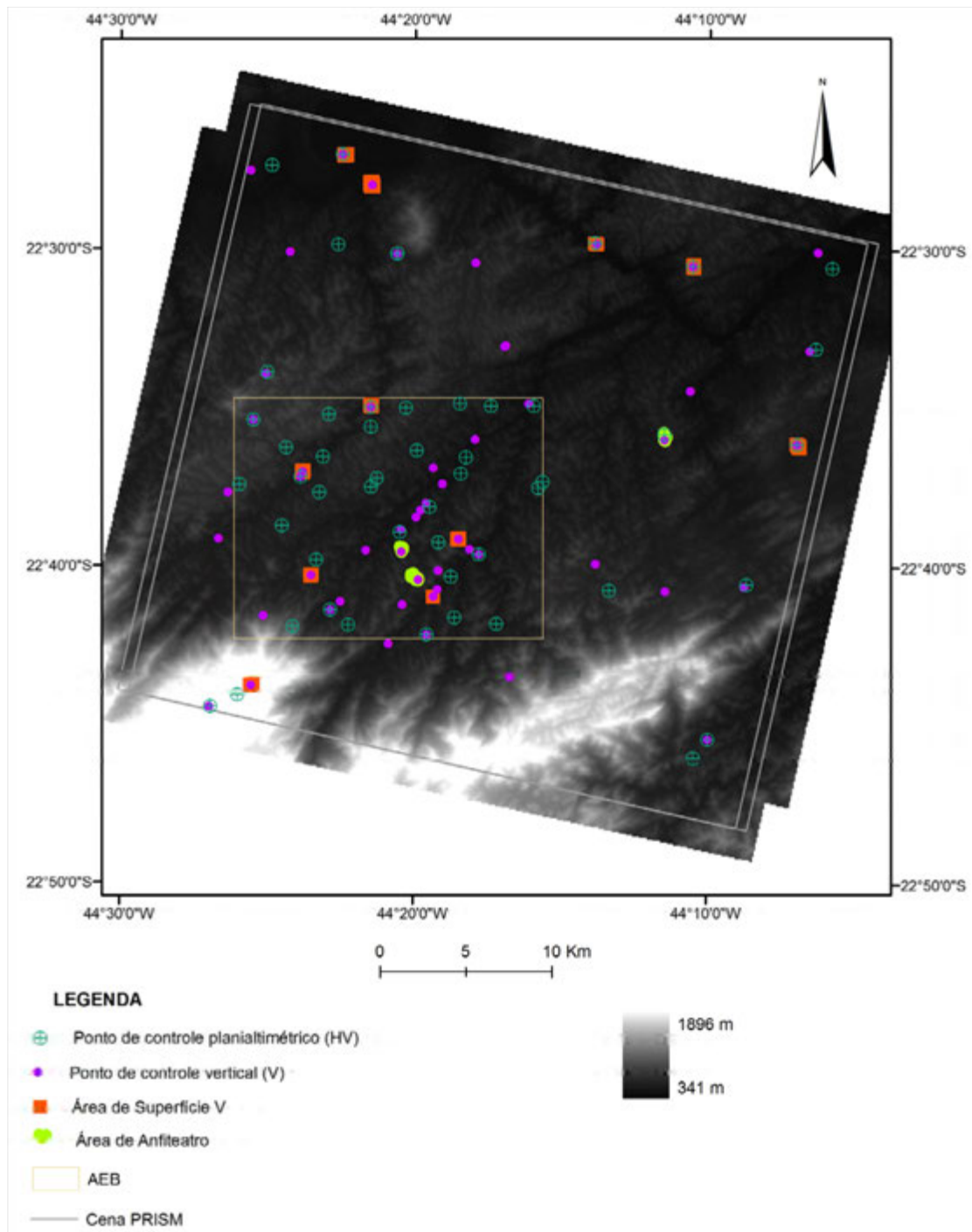


Figura 45 - Levantamentos GPS considerados na pesquisa.

3.4.1.2 Pós-processamento

Os dados resultantes do levantamento GPS foram pós-processados com uso do *software* GPS Astech Solutions v.2.70.

O processamento dos dados do levantamento relativo estático ocorreu dentro da expectativa, com solução fixa (95% das ambigüidades solucionadas) em todos os pontos, PDOP máximo de 2.8 e um mínimo de 7 satélites observados por ponto

determinado. As precisões alcançadas foram compatíveis com as especificações de precisão informadas pelo fabricante do Promark2:

- Horizontal: 0,005 m + 1 ppm;
- Vertical: 0,01 m + 2 ppm.

Desta forma, para a maior distância “estação base – estação remota” observada no levantamento (27 km), a precisão horizontal especificada é de 0,032 m e a vertical de 0,064 m

O processamento dos dados dos levantamentos cinemáticos, no cômputo geral, não alcançou as precisões informadas pelo fabricante para um mínimo de 5 satélites, observadas as condições de reinicialização em caso de perda de sintonia para um período inferior a 20 minutos de rastreamento contínuo:

- Horizontal: 0,012 m + 2,5 ppm;
- Vertical: 0,015 m + 2,5 ppm.

Para a maior distância “estação base – estação remota” observada no levantamento cinemático (4 km) a precisão horizontal especificada pelo fabricante é da ordem de 0,022 m e a vertical de 0,025 m, que satisfazem ao critério de qualidade considerando-se, para escala de 1:25.000, 1/3 dos erros padrão planimétrico (2,5 m) e altimétrico (1,1 m) (MERCHANT, 1982).

De um total de 12.776 pontos, 86% ficaram com precisões piores que as especificadas pelo fabricante. Neste conjunto de pontos, em 83% as ambigüidades foram solucionadas, em 9% a solução foi parcial (mínimo de 4 ambigüidades e mais de 50% do total de ambigüidades fixadas), e em 8% flutuante.

Na tentativa de se eliminar observações espúrias que pudessem estar interferindo na qualidade do rastreamento, foram analisados os resíduos do ajustamento dos vetores, excluindo-se integralmente ou parcialmente observações relativas a alguns satélites, e refeito o processamento, mas sem sucesso.

Diante da natureza do levantamento realizado, o único indicador de qualidade possível é a precisão interna do conjunto de observações. Assim, partiu-se para uma análise mais detalhada do conjunto de dados, quando foi observado que os vetores que apresentaram desvio padrão da distância espacial superior a 30 cm estavam normalmente associados a PDOPs muito altos, em alguns casos iguais a 20, e a menos que 5 satélites simultâneos à base. Logo, considerando-se a resolução espacial de 2,5 m

da imagem PRISM, bem como o padrão de acurácia esperado para as ortoimagens e MDSs (1:25.000), optou-se por excluir do conjunto de dados os vetores com desvio padrão da distância espacial superior a 30 cm. Foram excluídos 287 vetores, distribuídos por todas as superfícies levantadas.

Assim, após as exclusões, o maior desvio padrão, associado à distância espacial correspondente a 12.489 pontos, foi da ordem de 28 cm, valor considerado compatível com as análises de padrões de acurácia dos produtos gerados na pesquisa.

As coordenadas finais dos pontos de controle foram calculadas no sistema geodésico planialtimétrico WGS84, projeção UTM, fuso 23 Sul.

3.4.2 Cálculo da ondulação geoidal

No que diz respeito à componente altimétrica dos pontos de controle, cabe destacar a dúvida inicial quanto ao tipo de altitude a ser considerada no processamento das imagens (correção geométrica e ortorretificação das imagens, geração de MDS e verificação dos produtos gerados), se a elipsoidal ou ortométrica. A correção geométrica segundo o MRPC pressupõe o uso de coeficientes que relacionam coordenadas bidimensionais no espaço imagem com coordenadas tridimensionais medidas no espaço objeto, referenciadas à superfície de um elipsóide. Por esse motivo, caso seja do interesse do usuário refinar a modelagem com novos pontos de controle, deve-se considerar a altitude elipsoidal. Já no que diz respeito às duas outras abordagens (MPR e MOA), não se observou essa necessidade, podendo o usuário optar tanto pela altitude elipsoidal quanto ortométrica. Assim, como forma de se obter produtos (ortoimagens e MDSs) associados ao mesmo referencial altimétrico, optou-se pelo uso da altitude elipsoidal durante toda a pesquisa.

Como os experimentos iniciais de ortorretificação da imagem foram realizados com uso do MDS SRTM, houve necessidade de se compatibilizar seu referencial altimétrico – modelo geoidal EGM96, com o referencial altimétrico dos pontos de controle – elipsóide WGS84. Esta compatibilização é realizada aplicando-se uma translação no eixo Z do MDS SRTM equivalente ao valor da ondulação geoidal média para a região.

A ondulação geoidal média relativamente ao EGM96, de valor igual a – 3,56 m, foi obtida a partir da média aritmética das ondulações geoidais calculadas via NGA

(*National Geospatial-Intelligence Agency*) EGM96 *Geoid Calculator*¹², correspondentes a uma amostra de 69 pontos GPS distribuídos na área da cena.

No caso dos MDSs gerados na pesquisa, com altitudes referidas ao elipsóide WGS-84, a redução ao geóide pode ser realizada aplicando-se uma translação no eixo Z, equivalente ao valor simétrico da ondulação geoidal média para a região. Nesse caso, poderá ser adotado como referência o modelo geoidal brasileiro implementado no MAPGEO2010.

A ondulação geoidal média relativamente ao modelo geoidal brasileiro foi obtida com uso do mesmo conjunto amostral usado para o EGM96. O cálculo do desnível em cada ponto da amostra foi obtido através do aplicativo MAPGEO2010. A ondulação geoidal média calculada para a área da cena foi – 4,02 m.

Na Tabela 11 são apresentadas as estatísticas das ondulações geoidais da amostra, relativas ao EGM96 e MAPGEO2010.

Tabela 11 - Estatísticas das ondulações geoidais – EGM96 e MAPGEO2010.

Descritor	Valor (m)	
	EGM96	MAPGEO2010
Mínimo	– 4,23	– 4,43
Máximo	– 3,21	– 3,51
Variação	1,02	0,92
Média	– 3,56	– 4,02
Mediana	– 3,52	– 4,00
Moda	– 3,53	– 4,02
Desvio Padrão	0,25	0,19

3.4.3 Correção geométrica visando à ortorretificação

De acordo com o Fluxograma apresentado na Figura 39, a primeira etapa de processamento envolve a correção geométrica das imagens para fins de ortorretificação.

Uma das principais questões relativas à correção geométrica das imagens diz respeito à quantidade de pontos de controle a utilizar. Assim, optou-se por investigar primeiramente, a influência do número de pontos de controle utilizados na correção geométrica para fins de ortorretificação e seu impacto quanto à classificação em termos do PEC planimétrico. Em função dos resultados alcançados nessa primeira fase, foram estabelecidas as estratégias para geração dos MDSs.

¹²Disponível em: <<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html>>. Acesso em 27 mai. 2010.

Em todas as abordagens de correção geométrica, seja para ortorretificação, seja para extração de MDS, o sistema de referência planialtimétrico considerado foi o WGS84, projeção UTM, fuso 23 Sul.

A qualidade da correção geométrica após ajustamento dos modelos matemáticos (MOA, MPR, MRPC) foi avaliada com base nos resíduos dos pontos de controle e no EQM residual global do ajustamento. Vale lembrar que resíduos correspondem à diferença entre as coordenadas GPS dos pontos de controle e as coordenadas desses mesmos pontos, computadas após ajustamento do modelo. Preferencialmente, os resíduos em x e y devem ser iguais ou menores que 1 *pixel* (PCI GEOMATICS, 2008).

O critério adotado para rejeição de pontos de controle segue o recomendado por Cheng e Toutin (1997), para pontos de controle que apresentam resíduo planimétrico duas vezes maior que o EQM residual global.

Nos experimentos realizados visando à ortorretificação, optou-se por ortorretificar apenas a visada nadir, devido ao ângulo de inclinação das visadas *forward* e *backward* (23,8°). Por ainda não se dispor dos MDSs gerados a partir dos pares estereoscópicos das imagens PRISM, a ortorretificação da imagem nadir foi realizada com o emprego do MDS-SRTM90 reduzido ao elipsóide WGS84. O método de reamostragem utilizado para geração das ortoimagens foi o bilinear, para todas as abordagens. Todas as ortoimagens foram geradas com resolução espacial de 2,5 m.

3.4.3.1 Modelo rigoroso baseado em parâmetros de órbita e atitude

A correção geométrica segundo o modelo rigoroso baseado em parâmetros de órbita e atitude (MOA) foi realizada no *software* PCI Geomatica, módulo OrthoEngine, através do “Modelo Orbital para Satélites de Alta Resolução Espacial” (*Satellite Orbital Modelling – Toutin’s High Resolution Model*), desenvolvido no *Canada Centre for Remote Sensing (CCRS) – Natural Resources Canada*, por Thierry Toutin (TOUTIN, 1995). Este modelo oferece suporte para correção, dentre outras imagens, do produto padrão CEOS PRISM/ALOS nos níveis de processamento 1A, 1B1 e 1B2R.

As principais características do nível de processamento 1B2R, utilizado neste trabalho, são:

- corresponde a um mosaico das imagens oriundas de cada CCD;
- não apresenta dados precisos de órbita e atitude (presentes apenas nos níveis 1A e 1B1);
- apresenta vetores de posição e velocidade da plataforma.

Visto que na modelagem rigorosa implementada no OrthoEngine alguns dos parâmetros não são claramente especificados, houve por bem realizar consultas a referida empresa, no sentido de obter um melhor detalhamento quanto a essa modelagem. No entanto, as respostas obtidas não permitiram a compreensão desejada. Desta forma, considerando que apenas os metadados de posição e velocidade estão disponíveis para este nível de processamento, acredita-se que os parâmetros de atitude foram considerados como constantes.

Segundo essa abordagem foram geradas 4 ortoimagens, com 6, 7, 9 e 10 pontos de controle, respectivamente. O uso de 6 pontos de controle objetivou testar a qualidade da correção com o mínimo de pontos requeridos pela PCI, enquanto que a solução com uso de 10 pontos foi realizada para avaliar o limite inferior do intervalo de segurança também recomendado pela PCI (10 a 15 pontos de controle por imagem). As soluções intermediárias visaram avaliar o comportamento da solução utilizando um total de pontos entre o mínimo (6) e o limite inferior de segurança (10). Os pontos de controle utilizados nos 4 experimentos contemplaram a variação altimétrica do conjunto de pontos determinados em campo, bem como sua distribuição homogênea (Figura 46).

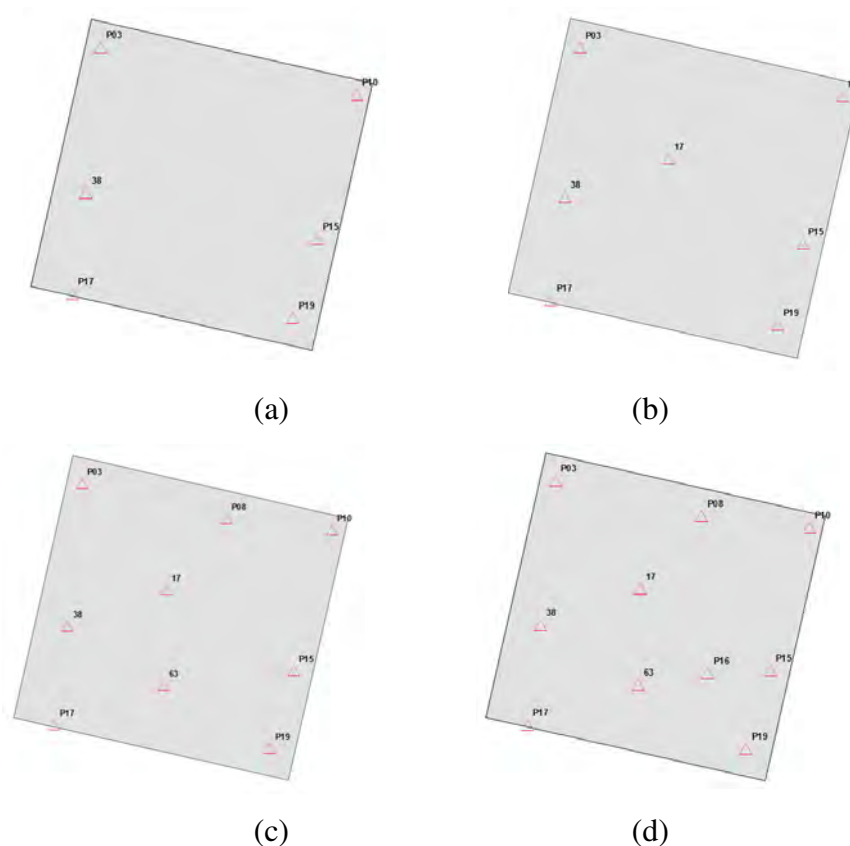


Figura 46 - Modelagem MOA com uso de 6 (a), 7 (b), 9 (c) e 10 (b) pontos de controle.

Devido à dificuldade encontrada na identificação precisa dos pontos na imagem, além do uso do arquivo contendo a descrição detalhada dos pontos medidos em campo, houve a necessidade de melhorar o contraste da imagem, para uma consequente melhora em sua qualidade visual, como forma de auxiliar e facilitar a identificação dos pontos, conforme ilustrado na Figura 47, onde um dos pontos é mostrado.

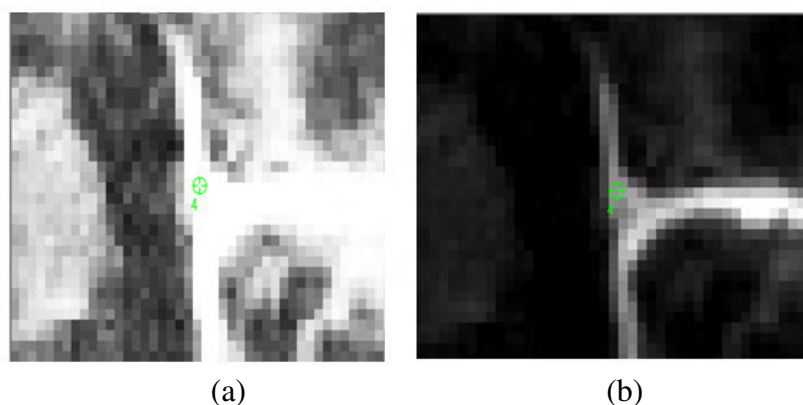


Figura 47 - Imagem antes (a) e após (b) aplicação de contraste.

3.4.3.2 Modelo rigoroso baseado em parâmetros de posição-rotação

O experimento quanto à correção de imagens usando um modelo rigoroso a partir de parâmetros de posição e rotação (MPR) do sensor foi realizado no *software Leica Photogrammetry Suite (LPS)*, segundo a configuração de modelagem denominada *Polynomial-based Pushbroom*.

De acordo com a descrição apresentada nos arquivos de ajuda do LPS, essa modelagem segue o princípio da modelagem baseada em posição-rotação, onde a posição e atitude do CP de cada linha da imagem são estimadas por funções polinomiais. Esse modelo já oferece suporte para as imagens SPOT *Pushbroom* e IRS-1C *Pushbroom*. Para uso dos demais sensores deve-se recorrer à opção *Generic Pushbroom* também disponível neste *software*, incorporando alguns parâmetros em sua configuração podendo-se, inclusive, selecionar o grau dos polinômios que modelam a mudança na posição e atitude da plataforma

Primeiramente, as visadas nadir, *backward* e *forward* do produto padrão CEOS processado pela ASF foram convertidas para o formato gráfico TIFF (linha e coluna). Na sequência, foi iniciada a fase de configuração do modelo matemático com dados dos sensores PRISM, conforme apresentado na Tabela 12. Como parte dos parâmetros a serem configurados, o número de linhas e colunas foi obtido consultando-se as propriedades de cada imagem TIFF. As resoluções espaciais das visadas *backward*,

forward e nadir foram consideradas iguais a 2,5 m, conforme metadados das imagens CEOS.

Quanto ao grau do polinômio utilizado, optou-se por usar parâmetros que configuram um polinômio de primeira ordem, visto que o período de aquisição de uma cena é relativamente pequeno e o trajeto da órbita para esse intervalo de tempo pode ser considerado como linear. Experimentos realizados por Tommaselli e Medeiros (2010) reforçam essa consideração.

Visto que o efeito de pequenas variações na coordenada X_0 do CP do sensor não difere do efeito de pequenas variações no ângulo de inclinação *pitch* (arfagem), e da mesma forma, o efeito de pequenas variações na coordenada Y_0 do CP não difere do efeito de pequenas variações no ângulo de inclinação *row* (rolamento), existe uma alta correlação entre os parâmetros. Assim, a fim de evitar instabilidade na solução do sistema, os parâmetros de orientação *row* e *pitch* foram considerados constantes.

Tabela 12 - Parâmetros de configuração dos modelos matemáticos para os sensores PRISM.

Item	Especificação			Observação
	Nadir	Backward	Forward	
<i>Focal length</i>	1939 mm			distância focal
<i>Principal Point x_0 and y_0</i>	0 mm			deslocamento do CP nos eixos X e Y em relação ao valor calibrado
<i>Pixel size</i>	0,007 mm			Resolução do elemento sensor (CCD)
<i>Sensor columns</i>	14722	16350	16286	número de colunas do sensor
<i>Side incidence</i>	-0,86°	0,86°	-0,68°	ângulo com a vertical (<i>across track</i>)
<i>Track incidence</i>	0°	-23,8°	23,8°	ângulo com a vertical (<i>along track</i>)
<i>Ground resolution</i>	2,5 m			resolução no terreno
<i>Sensor line along axis</i>	X			eixo da direção de varredura
X, Y e Z	1			grau dos polinômios para coordenadas X, Y e Z do CP
<i>Omega</i>	0			grau do polinômio para rotação em X (<i>row</i>)
<i>Phi</i>	0			grau do polinômio para rotação em Y (<i>pitch</i>)
<i>Kappa</i>	1			grau do polinômio para rotação em Z (<i>yaw</i>)

Fonte: Adaptada de Chen *et al* (2004) e Osawa e Hamazaki (2000).

Cabe aqui ressaltar que embora tenham sido configurados os modelos matemáticos correspondentes às três visadas, o processo de correção geométrica para

ortorretificação foi realizado apenas para a visada nadir, já que as visadas *backward* e *forward* apresentam maior deformação por conta da inclinação do ângulo de visada.

Nessa abordagem foram geradas 3 ortoimagens, a partir da correção geométrica com uso de 6, 9 e 15 pontos de controle. O uso de 6 pontos de controle teve como principal motivador a comparação dos resultados com a ortoimagem obtida com uso de 6 pontos de controle na abordagem MOA.

Teoricamente, em razão da natureza da modelagem na abordagem MPR, essa ortoimagem tende a apresentar acurácia inferior à ortoimagem equivalente gerada através do modelo MOA. O experimento com uso de 15 pontos de controle objetivou a análise dos resultados com uso de um número de pontos de controle superior ao usado na abordagem MOA (máximo de 10 pontos), enquanto que a ortoimagem obtida com 9 pontos buscou a avaliação de solução intermediária. Os pontos utilizados nas três soluções (Figura 48) contemplaram a variação altimétrica do conjunto de pontos determinados em campo.

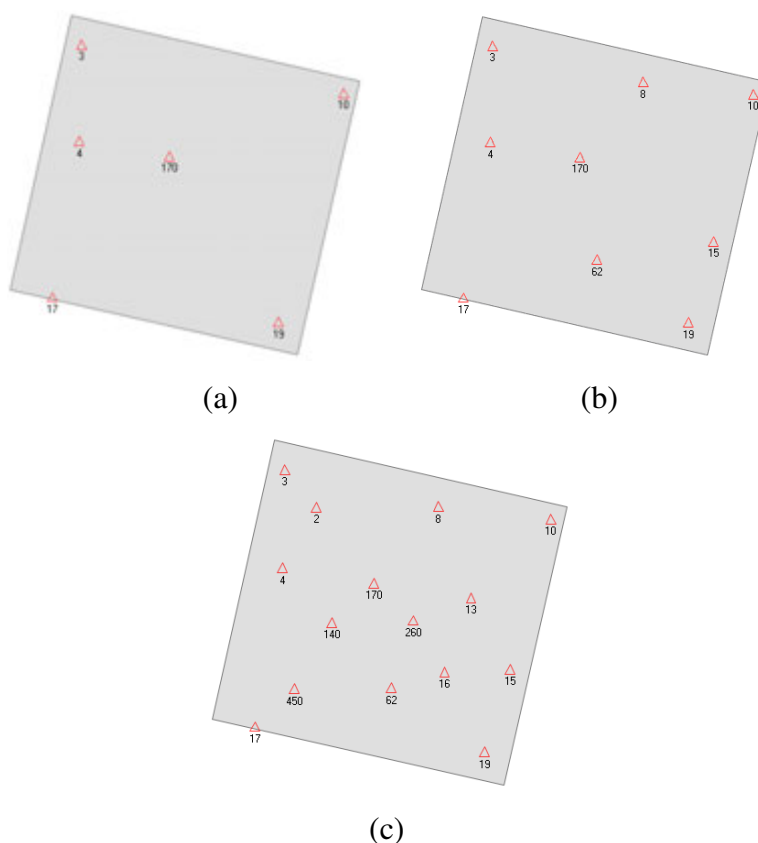


Figura 48: Modelagem MPR com uso de 6 (a), 9 (b) e 15 (c) pontos de controle.

Os procedimentos e cuidados para identificação dos pontos de controle na imagem seguiram a mesma rotina descrita na abordagem MOA. Uma vez identificados os pontos de interesse, partiu-se para o cálculo do modelo. O LPS permite configurar os

parâmetros para cálculo do modelo (*Triangulation Properties*) e ajustamento das observações, de forma que foram atribuídos os seguintes valores para os parâmetros solicitados:

- número de iterações: 10;
- valor da convergência (*em pixels*): 0,0001;
- desvio padrão dos pontos de controle: 0,25 cm para X e Y; 0,50 cm para Z;
- curvatura da Terra: sim.

3.4.3.3 Modelo generalizado baseado no uso de RPCs

A correção geométrica utilizando RPCs fornecidos pela JAXA (MRPC) foi realizada no ambiente LPS, com a opção de modelagem denominada *Rational Functions – ALOS RPC*, ou modelo de câmera RPC para imagens ALOS. No momento em que o arquivo .txt contendo os RPCs disponibilizados pela JAXA é carregado, o LPS requer apenas a informação dos valores mínimo e máximo aproximados da altitude na região. Os valores considerados foram 300 e 2000 m, respectivamente.

A correção da imagem é realizada a partir da leitura e processamento dos coeficientes, sem a necessidade de qualquer ponto de controle. Dessa forma, após o processamento dos RPCs é possível partir diretamente para a etapa de ortorretificação da imagem. Entretanto, conforme visto na Seção 2.5.2.2, é possível refinar a correção geométrica em pós-processamento com uso de 1 a 3 pontos de controle e funções polinomiais 2D.

Assim, nessa abordagem foram geradas 3 ortoimagens: a primeira a partir da correção geométrica sem pontos de controle, e as demais a partir do refinamento da correção com uso de polinômios de ordem “zero”, visando modelagem das translações em x e y . O refinamento foi realizado com uso de 1 e 2 pontos de controle (Figura 49).

As propriedades para cálculo do refinamento (*Rational Function Refinement*) foram assim configuradas:

- número de iterações: 10;
- valor da convergência (em metros): 0,0001
- desvio padrão dos pontos de controle: 0,25 cm para X e Y; 0,50 cm para Z.

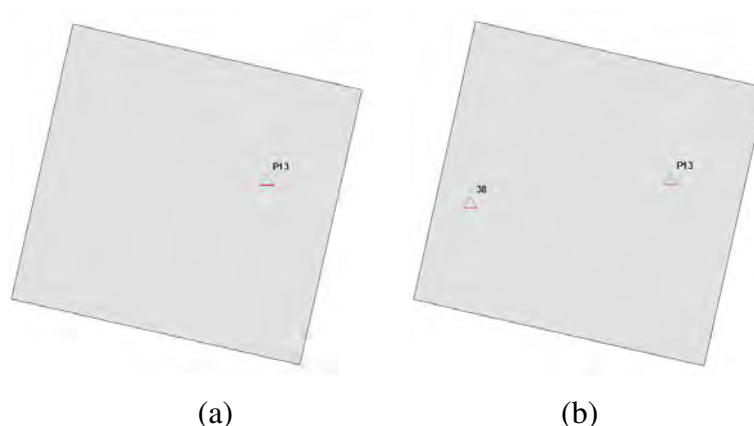


Figura 49 - Refinamento do MRPC com 1 (a) e 2 (b) pontos de controle.

3.4.4 Correção geométrica visando à extração automática de MDSs

Os resultados alcançados na fase de correção geométrica para fins de ortorretificação subsidiaram a escolha das soluções de modelagem para extração dos MDSs. Dessa foram estabelecidas 5 possibilidades de solução, relativamente ao número de pontos de controle para correção geométrica visando à extração de MDS:

- MOA: com uso de 7 pontos de controle, 1 a mais que o mínimo recomendado pela PCI; e com 9 pontos de controle, 1 a menos que o limite inferior de segurança recomendado pelo mesmo *software*;
- MPR: apenas a solução com 15 pontos de controle, em decorrência da classificação das ortoimagens obtidas com menor número de pontos;
- MRPC: solução sem ponto de controle e com uso de 2 pontos de controle, para possibilitar o cálculo do EQM da solução.

No decorrer das análises iniciais, optou-se por realizar mais uma investigação na abordagem MOA. Como a solução usando-se três pares estereoscópicos, extraídos a partir da correção geométrica com uso de 7 e 9 pontos de controle, não retornaram a qualidade geométrica esperada para o MDS (1:25.000), foram realizados experimentos com uso de 17 pontos de controle, dois a mais que o limite superior de segurança recomendado pela PCI. O padrão de distribuição dos pontos seguiu os mesmos critérios adotados na fase de correção geométrica visando ortorretificação (Seção 3.4.3).

Para cada abordagem das modelagens MOA, MPR e MRPC foram gerados MDSs a partir de diferentes configurações.

Na fase de correção geométrica para fins de extração do MDS foram consideradas ao menos duas visadas, para formação dos pares estereoscópicos

backward-nadir (BN), *nadir-forward* (NF) ou *backward-forward* (BF). O mesmo procedimento descrito para correção geométrica visando à ortorretificação nas abordagens MOA, MPR e MRPC, foi adotado para a extração dos MDSs. A diferença, nesse caso, é que os pontos de controle foram coletados em cada uma das imagens, bem como coletados pontos de ligação (*tie points*) entre elas.

Uma vez concluída a coleta dos pontos de controle e de ligação para todas as imagens, foi realizado o cálculo do modelo e posterior análise dos resíduos. Esse processo ocorreu de forma iterativa. Primeiramente, a identificação de pontos de controle e de ligação com resíduos maiores que duas vezes o EQM residual global após ajustamento foi conferida, refinada, e processamento repetido. Diante da permanência dos resíduos acima da tolerância, o ponto era rejeitado e substituído por outro, sem alterar significativamente a distribuição espacial e amplitude altimétrica da amostra. Após as devidas substituições e recálculos do modelo, os EQMs residuais globais em todas as três soluções ficaram abaixo de 1 *pixel*, conforme tolerâncias descritas na Seção 3.4.3.

Quanto ao processo de correspondência para extração das elevações, a solução adotada nas três abordagens foi a baseada em área, com similaridade medida por correlação entre as imagens. As estratégias de correlação foram estabelecidas de acordo com as opções de configuração oferecidas pelos *softwares* utilizados em cada abordagem. Os MDSs foram extraídos com resoluções de 5, 10 e 20 m. A edição 2D dos MDSs limitou-se a utilização de recursos automáticos de interpolação e filtragem disponibilizados pelos *softwares* no momento de sua extração.

A solução para extração de MDS, em termos de ponto de controle, resolução espacial e estratégia de correlação, que gerou o MDS com melhor acurácia altimétrica segundo a combinação simultânea de três pares estereoscópicos, foi a escolhida para extração do MDS segundo a combinação dos pares BN-NF.

3.4.4.1 Abordagem MOA

O projeto para extração de MDS no OrthoEngine foi realizado com as visadas *backward*, *nadir* e *forward*. Primeiramente foram coletados os pontos de controle em cada uma das imagens. Alguns pontos de controle utilizados na correção geométrica da imagem *nadir* visando ortorretificação precisaram ser substituídos, pois não foi possível identificá-los com precisão nas visadas *backward* e *forward*, em decorrência do ângulo

de visada e baixa qualidade radiométrica das imagens. De qualquer forma, os novos pontos escolhidos não comprometeram os critérios de distribuição da amostra.

Na sequência, foram configuradas as propriedades para coleta automática dos pontos de ligação. A principal propriedade configurada foi o limiar para o sucesso da correlação, que varia entre 0 e 1, sendo 1 o indicador da correlação máxima. Optou-se pelo valor 0,8 como forma de não inviabilizar totalmente o processo de correlação.

Após a geração automática dos pontos de ligação foi realizada uma inspeção visual dos pontos gerados, quando foram excluídos do conjunto aqueles posicionados em copas de árvores, sombras e nuvens, ou incluídos outros manualmente, para melhor caracterizar a distribuição para o processo de orientação e amplitude altimétrica da amostra.

Após o ajustamento do modelo de correção geométrica e análise dos resíduos, foram geradas as imagens epipolares. A formação dos pares reproduziu a ordem da aquisição da cena. Por exemplo, no caso do par *backward-nadir* (BN), a imagem *backward* foi escolhida como imagem da esquerda, enquanto que a *nadir*, a imagem da direita. Seguindo esse raciocínio, formaram-se os 3 pares estereoscópicos BN, NF e BF.

O OrthoEngine permite gerar as imagens epipolares com resolução reamostrada em relação à imagem original. Para conferir mais agilidade no processamento optou-se por gerar imagens epipolares com *pixel* de 5 metros e valor calculado pela média dos valores dos *pixels* originais. Em experimento isolado, para avaliar a opção da não reamostragem do *pixel*, o custo computacional foi maior, sem ganho significativo na solução final.

Para a extração do MDS, o OrthoEngine permite uma série de combinações de parâmetros que definem as características do MDSs. Entretanto, optou-se por variar apenas a resolução espacial dos MDSs. Os demais parâmetros foram fixados em todas as soluções: altitudes mínima e máxima aproximadas de 300 e 2000 m, respectivamente; valor do pixel com falha na correlação igual a -100 e valor de *background* igual a -150; alto detalhamento do MDS; preenchimento de áreas não correlacionadas (e com correlação inferior a 50%,) e filtragem de ruídos; criação de arquivos de *score*, representando o sucesso da correlação para cada pixel do MDS; criação do MDSs no sistema de referência e de projeção adotados no projeto.

A indicação do intervalo da variação altimétrica é usada para estimar a área de busca da correlação, agilizando o processamento e minimizando a possibilidade de erro. Já o detalhamento do MDS diz respeito à abordagem hierárquica com uso de uma

pirâmide de imagens. Existem três opções para detalhamento do MDS: alto, médio e baixo. O detalhamento alto, usado nos experimentos, significa aproximações sucessivas da correlação, desde o nível de resolução mais grosseira até a correlação final na resolução plena da imagem. Para imagens com grandes áreas homogêneas, como de florestas, a opção de detalhamento baixo pode gerar melhores resultados na correlação, uma vez que a precisão das altitudes seria menor porque o tamanho do pixel é maior nos níveis mais elevados da pirâmide. Porém, considerando a natureza da área de estudo, optou-se pelo uso do detalhamento alto. No caso, a correlação se deu ao nível de resolução de 5 metros das imagens epipolares. Não foram encontradas referências sobre o tamanho das janelas de busca e correlação usadas no OrthoEngine.

O preenchimento, por interpolação, de áreas não correlacionadas (normalmente em áreas de vegetação densa, áreas de sombras ou nuvens) é feito automaticamente pelo OrthoEngine. De acordo com VROOM¹³ (2001, citado por COELHO, 2002) nos processos automáticos de interpolação e filtragem de ruídos o OrthoEngine utiliza o algoritmo de interpolação bilinear e filtro da média. Vale aqui ressaltar que a interpolação e filtragem automática já correspondem, na prática, a um procedimento automático de edição e foram consideradas em todos os experimentos por trazerem melhorias significativas à qualidade do modelo, conforme já atestado por Correia (2008) e IBGE (2009).

Os experimentos foram realizados com uso de função para processamento de dois ou mais MDSs que apresentem sobreposição entre eles. Quando um novo MDS é adicionado ao MDS existente, o OrthoEngine oferece três opções para o valor do final do *pixel* na área de sobreposição: manter o valor do *pixel* do MDS existente; substituir o valor do *pixel* do MDS existente pelo MDS adicionado; ou utilizar como valor do *pixel* aquele resultante da melhor correlação alcançada (*highest score*), opção esta utilizada nos experimentos.

Uma vez estabelecidos os critérios quanto às configurações básicas, houve apenas variações quanto à combinação do número de pontos utilizados na correção geométrica (7, 9 e 17), quanto às combinações das visadas BN-NF-BF e quanto às resoluções dos MDSs (5, 10 e 20 m).

O tempo de processamento envolvendo a geração das imagens epipolares até a extração propriamente dita do MDE chegou a atingir o patamar de 6 horas,

¹³ VROOM, W. **Citação de textos eletrônicos**. Mensagem pessoal enviada pelo autor em 3 outubro de 2001b.

correspondente à geração do MDS com resolução espacial de 5 m envolvendo os três pares estereoscópicos. Em razão do tempo de processamento e custo computacional, optou-se por não extrair MDSs com a mesma resolução da imagem.

3.4.4.2 Abordagem MPR

O projeto para extração de MDS no LPS também foi realizado considerando-se as visadas *backward*, *nadir* e *forward*. Os parâmetros de configuração do modelo matemático apresentados na Tabela 12 (Seção 3.4.3.2) foram recuperados no momento da criação dos projetos.

Da mesma forma que descrito na abordagem MOA (Seção 3.4.4.1), foram coletados os pontos de controle para cada imagem do par, mantendo o critério da escolha de pontos de controle identificados nas três visadas. Os pontos de ligação foram gerados automaticamente, considerando-se o valor de 0,8 como limiar para o coeficiente de correlação. Após a geração automática dos pontos de ligação, procedeu-se à inspeção visual para eliminar aqueles selecionados em locais inadequados ou para inclusão manual de novos pontos.

Ao final do processo de coleta de pontos de controle e de ligação, foi realizado o cálculo do modelo considerando-se o par de imagens em questão. Os parâmetros para cálculo (*Triangulation Properties*) e ajustamento das observações foram os mesmos utilizados na fase de correção geométrica visando ortorretificação da imagem nadir.

O processo de ajustamento do modelo e análise dos resíduos foi iterativo. A substituição de alguns pontos também foi necessária, pelos mesmos motivos apresentados no caso da correção geométrica no OrthoEngine. A distribuição dos pontos não foi comprometida. Entretanto, como a correção geométrica de pares estereoscópicos isolados (BN, BF e NF) e simultâneos (considerando todas as visadas simultaneamente), não atendeu aos requisitos de aprovação da solução, não foram gerados MDSs segundo essa abordagem de correção geométrica.

3.4.4.3 Abordagem MRPC

Para a abordagem MRPC foram consideradas duas possibilidades de correção geométrica: sem uso de pontos de controle, realizada diretamente a partir dos RPCs fornecidos pela JAXA; e com refinamento dessa solução, usando 2 pontos de controle. Um desses pontos foi escolhido por estar localizado na região da Serra da Bocaina, e por apresentar a maior altitude dentre os pontos determinados na campanha de campo.

A geração automática dos pontos de ligação foi realizada conforme descrito na abordagem MPR (Seção 3.4.4.2).

Após o ajustamento do modelo e análise dos resíduos procedeu-se à extração dos MDSs, realizada através do módulo *Automatic Terrain Extraction* (ATE) do LPS, com uso de configurações avançadas. Na sequência estão apresentadas as opções de configuração de maior representatividade adotadas no processo de extração dos MDSs.

Nas configurações básicas do ATE existe a opção de se processar todos os pares estereoscópicos simultaneamente (*Single Mosaic*) e de forma individual (*Individual Files*). No primeiro caso, o ATE utiliza recurso semelhante ao OrthoEngine quanto ao valor do *pixel* resultante da melhor correlação. Foram realizados experimentos utilizando ambas as opções.

Os MDSs foram gerados na estrutura DEM do ATE, correspondente à grade regular. Nos MDSs gerados nessa estrutura, todas as áreas não correlacionadas são interpoladas (LPS, 2008). Não foi encontrada referência sobre o tipo de interpolação usada pelo sistema.

O uso do algoritmo *Adaptive ATE* possibilita a utilização de MDE externo, para aproximação dos valores de elevação da região correspondente ao MDS que será extraído. Essa opção não foi habilitada.

Relativamente às configurações avançadas foi utilizada a função que gera arquivo *raster* contendo *status* da qualidade da correlação (*Create DTM Point Status Output Image*), semelhante ao arquivo de *score* gerado no OrthoEngine. Os pixels classificados como “*Excellent*” (correlação entre 1 e 0,85), “*Good*” (0,85 a 0,7) e “*Fair*” (0,5 e 0,7), são agrupados de acordo com seus coeficientes individuais. Já os pontos “*Isolated*” são assim classificados por não apresentarem, em sua vizinhança, pontos cujos coeficientes de correlação permitam agrupamento. Por último, estão os pixels classificados como “*Suspicious*” (suspeitos), porque foram obtidos por interpolação, ao invés de correlação.

A rotina usada para classificar um *pixel* como de qualidade suspeita é a seguinte: o ATE utiliza uma matriz 3x3 para calcular o valor de elevação de um *pixel* com base em sua vizinhança. O valor calculado por correlação é subtraído do valor interpolado. Se a diferença for maior que três vezes o desvio padrão da amostra, o valor interpolado é usado e o *pixel* classificado com suspeito.

Diferentemente do OrthoEngine, não foi possível configurar a resolução das imagens epipolares, pois sua geração está embutida no processo de extração do MDS.

O recurso *Trim the DTM Border* foi utilizado para eliminar um pequeno percentual no entorno do MDSs, normalmente sujeito a distorções nas bordas. Foi escolhido um valor de 4%. A área de extração do MDS corresponderá à área de sobreposição completa, reduzida 2% em todos os lados.

A exemplo da configuração adotada no processo de geração de MDSs no OrthoEngine, foi estabelecida a abordagem hierárquica da pirâmide ao nível da resolução da imagem (100%).

O ATE oferece ainda a possibilidade da combinação de diferentes estratégias para a extração das elevações propriamente ditas. Essas estratégias incluem, por exemplo, a configuração de parâmetros relativos às características terreno (plano, ondulado ou montanhoso), à sua cobertura (área rural, pouco ou altamente urbanizada, ou densamente florestada), ao algoritmo de filtragem para remoção de ruídos, ao tamanho das janelas de busca e correlação, ao limiar de correlação, entre outros.

Uma vez configuradas, essas estratégias podem ser aplicadas de forma global (para toda a área) ou local. A abordagem local torna-se útil no caso da existência de áreas com características muito distintas no par estereoscópico. Por exemplo: um par estereoscópico apresentando grandes extensões de áreas florestadas ou grandes corpos d'água, que podem ser excluídos a fim de evitar correlações equivocadas, ou ainda apresentando região montanhosa isolada, contra a predominância de áreas totalmente planas.

Em decorrência das características da região imageada, optou-se pelo uso da estratégia global, ou seja, de uma mesma estratégia para toda a área, a cada experimento para geração de um MDS. O ATE oferece ainda uma série de estratégias com configurações predefinidas (LPS, 2008). Dentre elas, foram escolhidas aquelas mais representativas da região de estudo:

- *High Mountain*: utiliza uma janela de busca 27×3 pixels e uma janela de correlação 7×7 pixels. O limiar para o coeficiente de correlação é 0,8. O algoritmo de filtragem (*DTM Filtering*) associado é de suavização moderada (*Smoothing/Moderate*). Os parâmetros internos da filtragem são estabelecidos com base na configuração das opções *Topographic Type* (descrição geral da topografia do terreno) e *Object Type* (ocupação do terreno), configuradas nessa estratégia para montanhoso (*mountainous*) e área rural (*open area*), respectivamente.

- *Middle Mountains*: apresenta as mesmas características da estratégia anterior, exceto pela janela de busca, reduzida para 21 x 3 *pixels*.

O uso do recurso *DTM Filtering* corresponde, na prática, a uma edição automática do MDS durante o processo de sua extração. De acordo com o tutorial do ATE (LPS, 2008), o processo de filtragem é o seguinte: para cada *pixel* correlacionado, é obtido um valor de elevação por interpolação dos valores da vizinhança. Para diferentes configurações dos algoritmos *DTM Filtering*, *Topographic Type* e *Object Type*, um valor limiar é estabelecido. Se a diferença entre o valor do *pixel* obtido por correlação e o valor interpolado for maior que o limiar estabelecido, o valor interpolado será definido como o valor final do *pixel*. Nesse caso, o *pixel* será classificado como de qualidade suspeita (*Suspicious*). Se a diferença for menor que o limiar, as altitudes interpoladas e obtidas por correlação serão ponderadas, e o valor resultante corresponderá ao valor final do *pixel*. Nesse caso, o *status* original do indicador da qualidade da correlação do ponto (*Excellent*, *Good* ou *Fair*) não é alterado.

3.4.5 Avaliação da qualidade posicional das ortoimagens

Para o controle de qualidade posicional das ortoimagens, geradas de acordo com os procedimentos descritos na Seção 3.4.3, foram utilizados pontos de referência (pontos de verificação) diferentes daqueles empregados na correção geométrica. Esses pontos foram selecionados considerando-se, na medida do possível, tanto a homogeneidade da distribuição como a variação altimétrica do conjunto amostral.

Nas abordagens MOA e MPR foram utilizados 22 pontos de referência no controle da qualidade posicional das ortoimagens. Na abordagem MRPC, que empregou apenas dois pontos de controle para refinamento da solução, foi possível incluir como pontos de referência alguns dos pontos de controle utilizados nas correções geométricas das abordagens MOA e MPR. Assim, um total de 27 pontos de referência foi utilizado na verificação da qualidade posicional das ortoimagens geradas no MRPC.

Nas Figuras 50, 51 e 52 são ilustradas as distribuições das amostras selecionadas para verificação da qualidade posicional das ortoimagens, considerando o número máximo de pontos de controle usados para as abordagens MOA, MPR e MRPC.

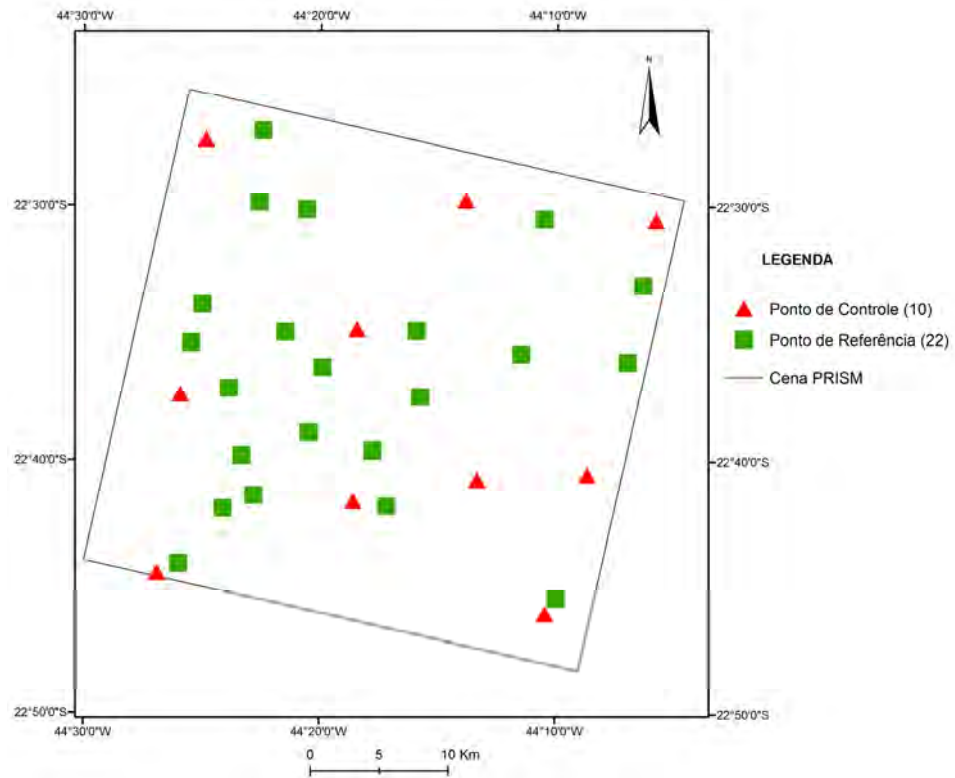


Figura 50 - Distribuição dos pontos de controle e de referência utilizados na abordagem MOA.

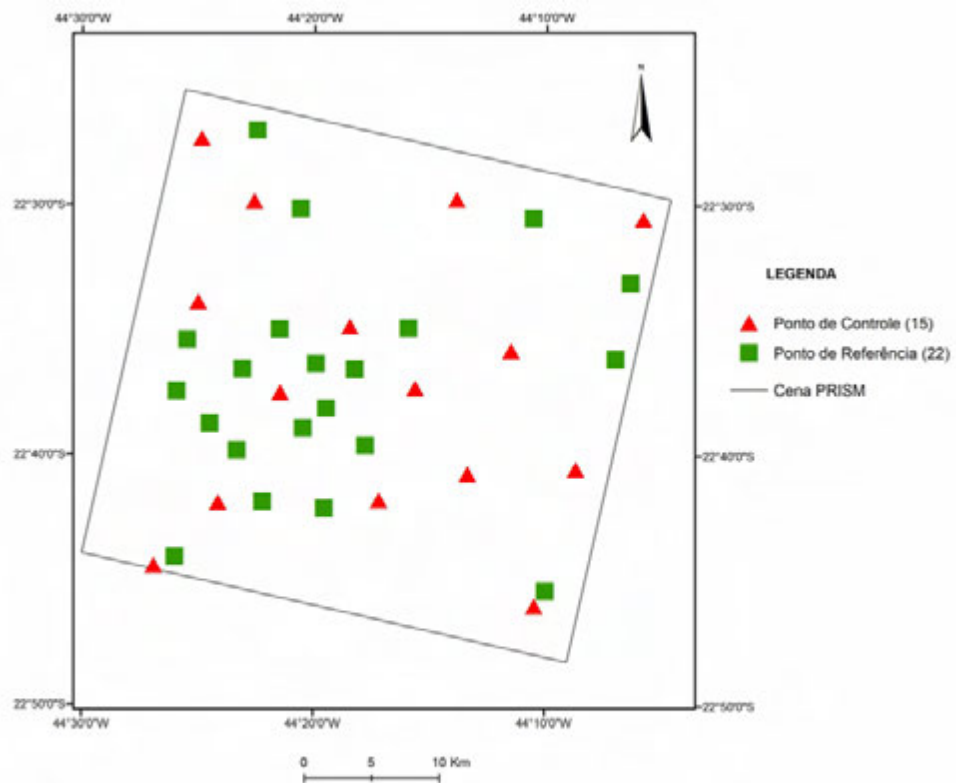


Figura 51 - Distribuição dos pontos de controle e de referência utilizados na abordagem MPR.

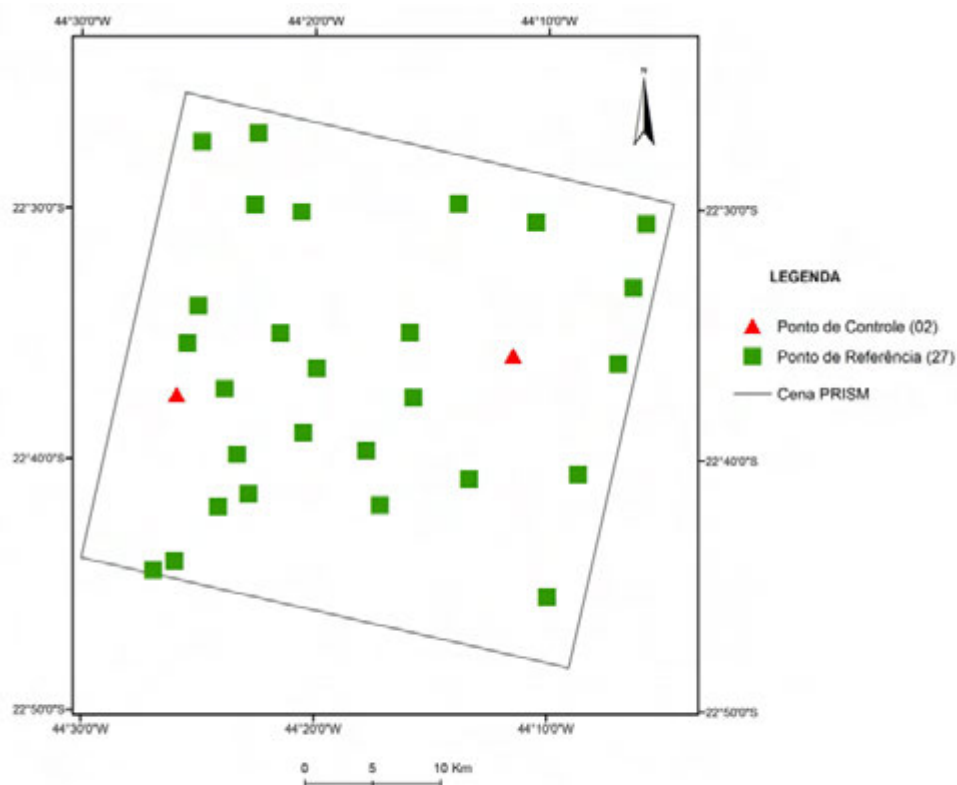


Figura 52 - Distribuição dos pontos de controle e de referência utilizados na abordagem MRPC.

A identificação dos pontos de referência sobre cada imagem ortorretificada foi realizada no ambiente ArcGis, com auxílio dos memoriais descritivos de localização dos pontos. O cálculo do erro planimétrico em cada ponto, assim como as estatísticas para classificação das ortoimagens quanto ao PEC, tendência e precisão, foram realizados no *software* Excel. As ortoimagens foram codificadas como “**orto_xPC**”, onde **x** corresponde ao número de pontos de controle (**PC**) usados na correção geométrica.

3.4.6 Avaliação da qualidade posicional dos MDSs

As acurácias planimétrica e altimétrica dos MDSs gerados nas abordagens MOA e MRPC foram avaliadas em separado.

Primeiramente, a acurácia altimétrica dos MDSs gerados foi avaliada de forma global, a partir da comparação com pontos de referência altimétrica determinados por posicionamento GPS relativo estático. Com base nos resultados alcançados, os MDSs de melhor acurácia altimétrica obtidos em cada abordagem foram considerados para a avaliação global da acurácia planimétrica. Essa avaliação foi realizada segundo a perspectiva de uso dos MDSs para fins de ortorretificação da imagem nadir, segundo as abordagens MOA e MRPC. Dessa forma, a acurácia planimétrica da ortoimagem

produzida com uso de um determinado MDS, foi assumida como sendo equivalente à acurácia planimétrica desse mesmo MDS.

Após as análises globais, o MDS de melhor acurácia altimétrica obtido dentre o conjunto de MDSs gerados, foi escolhido para análises locais da acurácia altimétrica. Essa avaliação foi realizada a partir de conjunto de pontos determinados por posicionamento relativo cinemático nas superfícies V e encostas de anfiteatros.

3.4.6.1 Avaliação global altimétrica

O conjunto amostral usado para avaliação altimétrica global reuniu os pontos denominados pontos V e alguns dos pontos determinados para fins de correção geométrica, que não foram utilizados na modelagem para extração dos MDSs. Foram usados ainda pontos isolados, extraídos de superfícies V e anfiteatro, para substituir alguns pontos de controle usados na correção geométrica das imagens. O conjunto amostral reuniu, portanto, um total de 54 pontos de referência altimétrica, com distribuição que procurou contemplar a variação altimétrica desse conjunto (Figura 53).

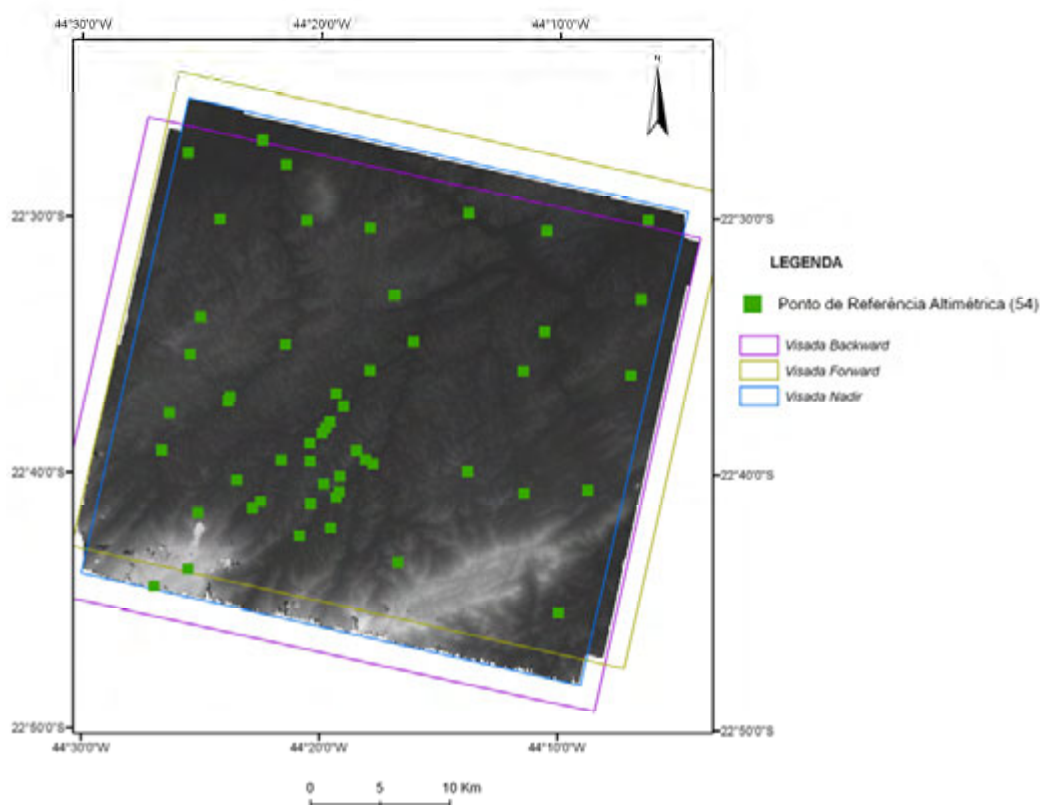


Figura 53 - Distribuição dos pontos de referência altimétrica (determinados por posicionamento relativo estático).

O erro altimétrico foi obtido a partir da comparação entre o MDS e o conjunto de pontos de referência. Dessa forma, o valor da elevação no MDS, correspondente à posição de cada ponto de referência altimétrica, foi obtido por interpolação bilinear, através da função *Surface Spot* do módulo *3D Analyst Tools*, do *software* ArcGis. Esta função extrai os valores interpolados do MDS e os agrega à tabela de atributos do arquivo *shape* dos pontos de referência. Os cálculos para classificação dos MDSs quanto ao PEC, e análises quanto à tendência e precisão foram realizados no *software Excel*.

Os MDSs gerados a partir das imagens PRISM receberam uma codificação para melhor identificá-los, já que resultaram da combinação de diferentes configurações. Através dessa codificação, o MDS é identificado de acordo com a abordagem de correção geométrica usada (MOA ou MRPC), combinação dos pares estereoscópicos utilizada (BN-NF-BF ou BN-NF), número “x” de pontos de controle (PC) utilizados na abordagem (xPC), resolução espacial “y” do modelo em metros (ym) e tipo de estratégia utilizada (HM- *High Mountains* ou MM- *Middle Mountains*), sendo estas estratégias exclusivas da abordagem MRPC. Exemplificando, para o MDS denominado “MOA_BN-NF-BF_9PC_5m”, subentende-se que o mesmo MDS foi gerado segundo a abordagem MOA de correção geométrica, considerando-se os três pares estereoscópicos simultaneamente, com uso de 9 pontos de controle para correção geométrica das imagens e com espaçamento da grade de 5m. Cada MDS gerado também está associado a um identificador sequencial (ID).

3.4.6.2 Avaliação global planimétrica

Para esta análise, o MDS que alcançou a melhor acurácia global altimétrica em cada abordagem foi utilizado para ortorretificar a imagem nadir correspondente.

Na correção geométrica da imagem visando à ortorretificação foi considerada a solução, em termos do número de pontos de controle, que proporcionou o melhor resultado na ortorretificação com uso do SRTM90 (Seção 3.4.3), quais sejam: abordagem MOA, com 9 pontos de controle e MRPC com 2 pontos de controle para refinamento dos RPCs.

A avaliação da acurácia planimétrica das ortoimagens geradas nesta etapa foi realizada conforme descrito na Seção 3.4.5, inclusive quanto aos pontos de referência utilizados (MOA - Figura 50 e MRPC - Figura 52). As ortoimagens foram codificadas como “orto_xPC_MDSy”, onde x corresponde ao número de pontos de controle (PC)

usados na correção geométrica e y ao identificador sequencial (**ID**) do MDS empregado na ortorretificação da imagem.

3.4.6.3 Avaliação local altimétrica

As análises locais da acurácia altimétrica foram realizadas apenas para o MDS que apresentou a melhor acurácia altimétrica global. Para essa análise, foram selecionadas 16 superfícies distintas, sendo 12 superfícies V e 4 anfiteatros, distribuídas na área de estudo conforme a Figura 54. O conjunto amostral de referência foi composto por 17.351 pontos, sendo 8.658 em áreas de Superfícies V e 8.693 em áreas de anfiteatros. Todas as áreas estão localizadas em regiões com altitudes variando de 300 a 600 m, aproximadamente, com exceção de uma única superfície V, localizada na Serra da Bocaina, com altitude em torno de 1460 m.

Inicialmente, foi considerada a possibilidade de se gerar MDSs a partir de cada conjunto de pontos definidores das superfícies para, a partir daí, realizar a comparação por subtração dos MDSs. Entretanto, essa comparação somente seria válida no caso da inexistência de deslocamento planimétrico entre eles. Um eventual deslocamento planimétrico entre os MDSs poderia retornar valores equivocados de elevação para uma dada posição. Adicionalmente, um MDS gerado por interpolação de um conjunto de pontos constituiria um novo produto, sujeito a erros decorrentes do processo. Por isso, antes de ser usado como referência, haveria necessidade de se avaliar sua acurácia posicional. Por esses motivos, optou-se pelo uso direto do dado bruto, ou seja, dos próprios pontos, por representarem a verdade de campo.

Cada uma das 16 superfícies foi analisada separadamente. Essas superfícies são identificadas pelos códigos SUPV (Superfície V) e ANFT (anfiteatro), seguido do ponto de controle estático utilizado como estação base para sua determinação. Por exemplo, a SUPV_P05 teve como estação base o ponto de controle estático P05. Os procedimentos para cálculo do erro altimétrico e demais análises estatísticas foram realizados conforme descrito na Seção 3.4.6.1.

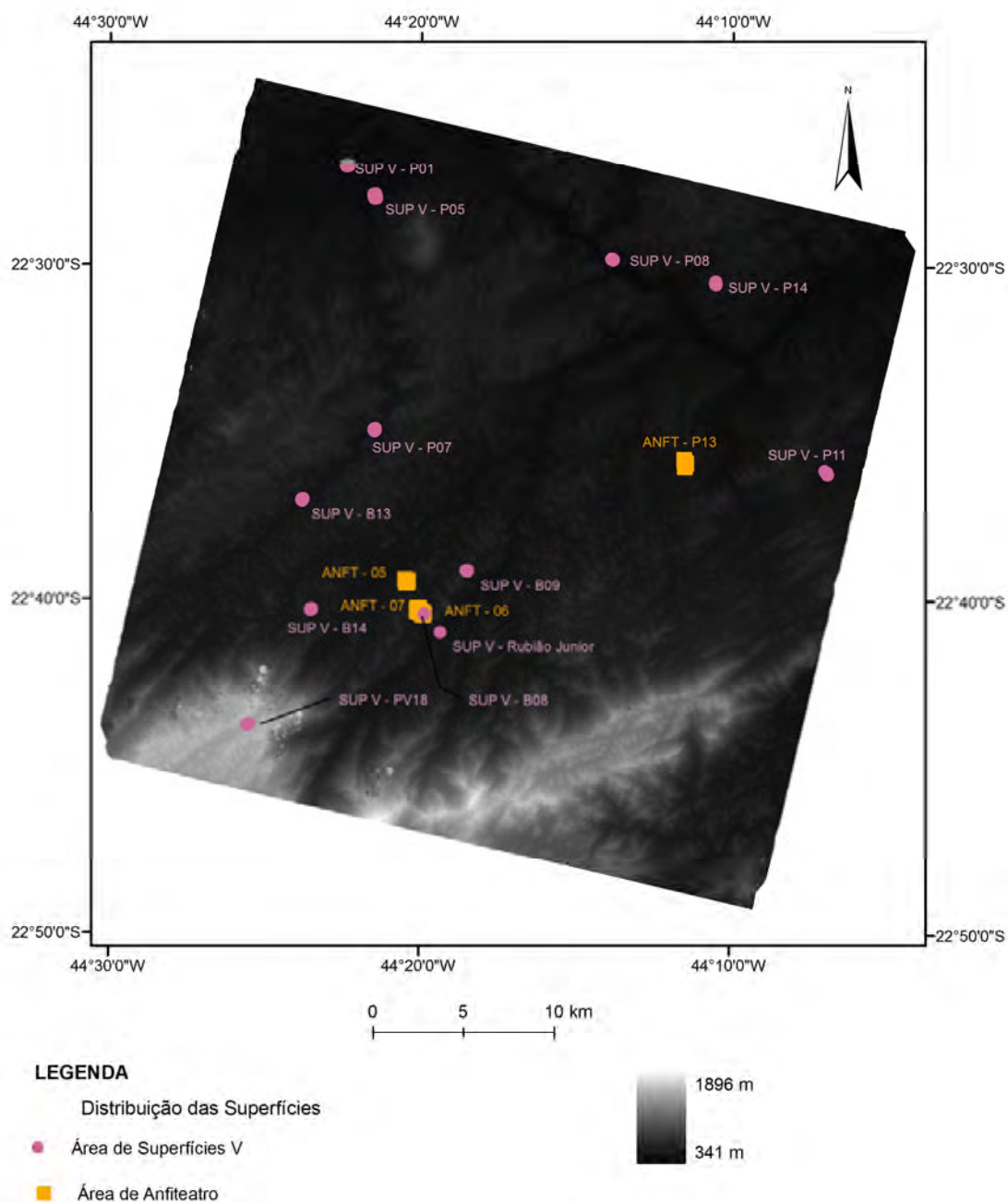


Figura 54 - Distribuição dos pontos de referência altimétrica (determinados por posicionamento relativo cinemático).

Para estimativa do parâmetro declividade associado a cada superfície, foi considerada a abordagem do uso de indicadores de intervalos de declividade, ao invés das declividades relativas, calculadas para cada conjunto amostral de referência altimétrica. Para obtenção desses intervalos, primeiramente foram gerados MDTs construídos a partir da interpolação dos pontos de referência de cada superfície para, em seguida, derivar os respectivos mapas de declividade. Pelo fato das declividades resultarem de MDTs não validados, não é possível afirmar que sejam verdadeiras, motivo pelo qual estão sendo usadas apenas como indicadores para as análises. Os

MDTs e mapas de declividade foram gerados no ambiente ArcGIS, módulo *3D Analyst*, através das funções *Topo to Raster* e *Slope*, respectivamente.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta Seção são apresentados os resultados e análises quanto à acurácia posicional de ortoimagens e MDSs, gerados a partir da aplicação da metodologia descrita na Seção 3.4.

No processo de geração das ortoimagens e MDSs foram considerados para as análises apenas os experimentos mais significativos, onde o ajustamento das observações visando às correções geométricas das imagens proporcionou resíduos e EQM residual global dentro da tolerância estabelecida (Seção 3.4.3), ou seja, inferiores a 1 *pixel*.

Os resultados da avaliação da qualidade posicional das ortoimagens e MDSs são apresentados considerando-se:

- estatísticas do erro planimétrico: valor mínimo (Min), valor máximo (Max), média aritmética (Med), desvio padrão (DP), EQM, PEC e CE90;
- estatísticas do erro altimétrico: Min, Max, Med, DP, EQM, PEC e LE90;
- classificação : escala e classe de mapeamento;
- testes de hipóteses (TH): *t* de *Student* e qui-quadrado (χ^2), para indicação de produto tendencioso (TD) ou não tendencioso (NTD), e preciso (PR) ou não preciso (NPR), respectivamente.

4.1 Avaliação da qualidade posicional das ortoimagens

Os resultados das avaliações das ortoimagens geradas segundo as abordagens MOA, MPR e MRPC, estão apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15, respectivamente. As ortoimagens estão nomeadas de acordo com a codificação apresentada na Seção 3.4.5. Aquelas que apresentaram melhor acurácia planimétrica estão grifadas em negrito.

Esses resultados comprovam a expectativa inicial em relação à qualidade posicional da abordagem MPR, cujo resultado foi equivalente às demais abordagens apenas na solução com 15 pontos de controle.

Deve-se destacar a qualidade posicional das 3 soluções da abordagem MRPC, especialmente aquela alcançada sem uso de pontos de controle. Tais resultados reforçam a qualidade do subsistema de controle de órbita e atitude (AOCS) a bordo do satélite ALOS, que permitiram a determinação precisa dos dados de efemérides e atitude utilizados no cálculo dos RPCs.

Tabela 13: Resultado da avaliação posicional das ortoimagens para a abordagem MOA.

Solução	Estatísticas do erro planimétrico resultante (m)							Classificação		TH	
	Min	Max	Med	DP	EQM	PEC	CE90	Escala	Classe	<i>t</i>	χ^2
Orto_6PC	0,00	7,58	3,38	2,32	4,17	6,86	6,33	1:25.000	A	TD	PR
Orto_7PC	0,31	6,73	3,74	2,01	4,32	7,10	6,55	1:25.000	A	TD	PR
Orto_9PC	0,00	6,46	3,52	1,93	4,08	6,72	6,20	1:25.000	A	TD	PR
Orto_10PC	1,69	7,06	3,84	1,42	4,18	6,88	6,34	1:25.000	A	TD	PR

Tabela 14: Resultado da avaliação posicional das ortoimagens para a abordagem MPR.

Solução	Estatísticas do erro planimétrico resultante (m)							Classificação		TH	
	Min	Max	Med	DP	EQM	PEC	CE90	Escala	Classe	<i>t</i>	χ^2
Orto_6PC	0,96	14,8	6,81	3,79	7,93	13,05	12,04	1:25.000	B	TD	PR
Orto_9PC	0,82	15,95	6,58	3,85	7,75	12,76	11,78	1:25.000	B	TD	PR
Orto_15PC	0,0	15,71	5,74	3,91	7,06	11,61	10,71	1:25.000	A	NTD	PR

Tabela 15: Resultado da avaliação posicional das ortoimagens para a abordagem MRPC.

Solução	Estatísticas do erro planimétrico resultante (m)							Classificação		TH	
	Min	Max	Med	DP	EQM	PEC	CE90	Escala	Classe	<i>t</i>	χ^2
Orto_0PC	0,88	7,58	4,03	1,96	4,55	7,49	6,91	1:25.000	A	TD	PR
Orto_1PC	0,95	7,72	3,40	1,88	3,94	6,49	5,98	1:25.000	A	TD	PR
Orto_2PC	0,78	8,05	3,19	2,02	3,83	6,29	5,81	1:25.000	A	NTD	PR

Cabe ainda observar que, mesmo classificadas para aplicações em escala 1:25.000, classes A e B, o teste *t* de *Student* evidenciou a presença de erros sistemáticos em 80% das ortoimagens. Esse resultado era esperado para a solução MRPC sem uso de pontos de controle, devido à expectativa de erros de translação associados a esse tipo de modelagem. A existência de tendência nas demais soluções pode decorrer da utilização dos pontos de controle. Nesse caso, vale citar Machado-Silva (2007) e Schenk (1999), que mencionam que os pontos de controle ou outros elementos auxiliares usados na correção geométrica, como MDTs/MDSs, passam a constituir nova fonte de degradação da imagem, o que pode soar contraditório, já que são empregados para melhorar a sua geometria. Porém, ao mesmo tempo em que esses dados reduzem distorções, introduzem outras, como aqueles decorrentes dos inevitáveis erros de identificação de pontos, dependendo da qualidade das imagens digitais.

4.2 Modelos digitais de superfície

Inicialmente são apresentadas considerações acerca da geração dos MDSs segundo as abordagens de correção geométrica MOA, MPR e MRPC. Na sequência, são apresentados os resultados da avaliação da qualidade posicional dos MDS gerados.

4.2.1 Abordagem MOA

Experimentos realizados para extração de MDSs considerando-se apenas um par estereoscópico (BN, NF e BF), para todas as opções de número de pontos de controle e resolução dos MDSs, evidenciaram que o par NF proporcionou a melhor correlação dentre os três pares. O par BF, apesar de apresentar a melhor relação base/altura e, portanto, melhor configuração geométrica para extração da elevação, apresentou a pior correlação dos três pares.

Na Figura 55 são ilustrados exemplos de sucesso da correlação entre os pares estereoscópicos, expressos a partir arquivos de *score* (vide Seção 3.4.4.1), correspondentes aos MDSs gerados com 10 m de espaçamento da grade, a partir do uso de 17 pontos de controle na etapa de correção geométrica das imagens. As áreas não correlacionadas ou com correlação inferior a 50% foram interpoladas automaticamente durante a extração dos MDSs.

Excluindo-se a região das bordas dos MDSs, normalmente associadas a distorções, nota-se a presença de áreas anômalas, em destaque, concentradas nas regiões mais elevadas da cena. As áreas anômalas estão associadas a falhas na correlação ou correlação inferior a 50%, interpoladas automaticamente durante o processo de extração do MDS. Essas áreas são relativamente fáceis de identificar a partir da representação das elevações em escala de tons de cinza, pois estão associadas a um aumento ou diminuição súbita dos valores da elevação em relação a sua vizinhança. As anomalias mais representativas ocorreram na região mais ao sul da área imageada, devido à extensão de área com cobertura vegetal densa e presença localizada de nuvens. Vale ressaltar que em outras regiões além das áreas anômalas citadas, também houve problemas de correlação em trechos do Rio Paraíba do Sul, e em outras áreas menores caracterizadas como áreas homogêneas.

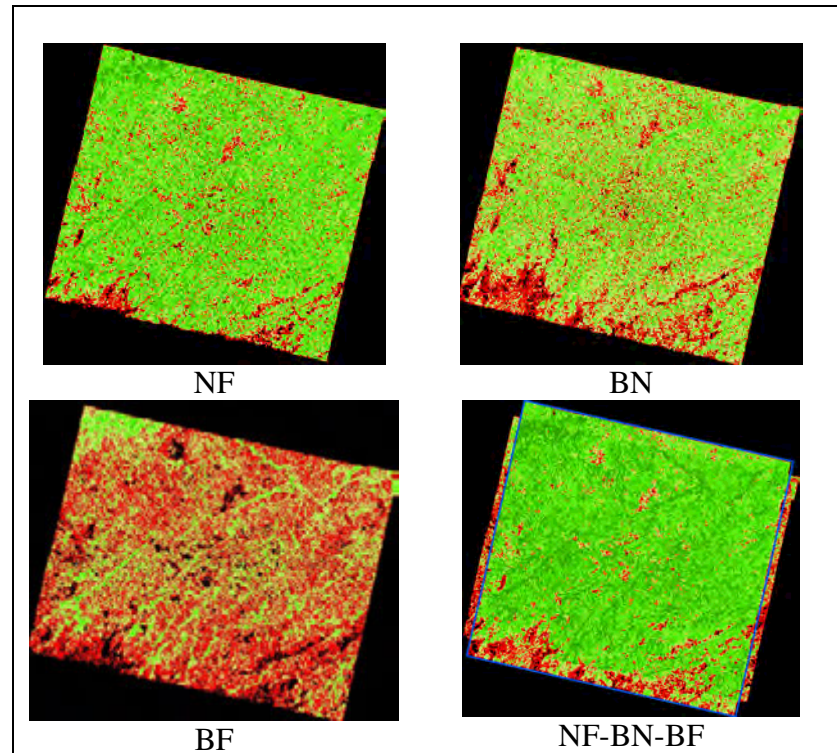
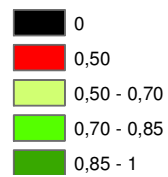
**Coeficiente de Correlação**

Figura 55: Indicadores do sucesso de correlação dos pares estereoscópicos NF, BN, BF e NF-BN-BF, abordagem MOA.

Em destaque na Figura 56, são mostradas algumas áreas anômalas identificadas por inspeção visual.

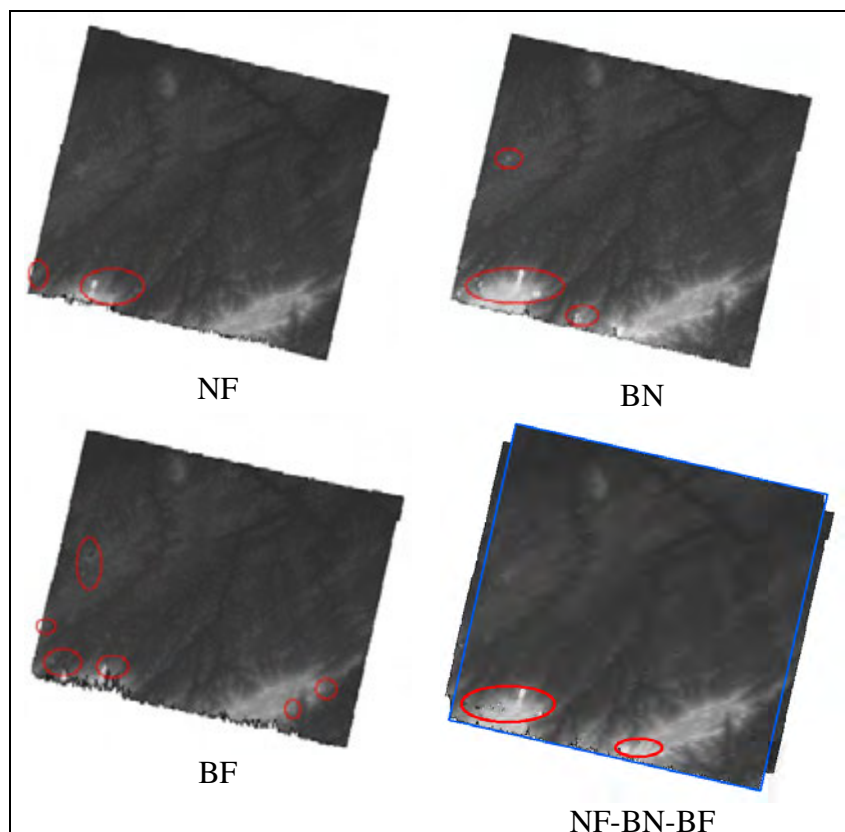


Figura 56: Representação em tons de cinza dos MDSs gerados a partir das visadas NF, BN, BF e NF-BN-BF, abordagem MOA.

4.2.2 Abordagem MPR

A correção geométrica de pares estereoscópicos isolados (BN, BF e NF) e simultâneos (considerando todas as visadas simultaneamente), não atendeu aos requisitos de aprovação da solução. O número de iterações necessárias à convergência do ajustamento já evidenciou problemas na modelagem. Apesar do EQM residual global do ajustamento abaixo de 1 *pixel*, os resíduos observados nas componentes de alguns pontos de controle nas visadas *backward* e *forward* superaram 3 *pixels*, enquanto que os resíduos observados nos pontos de controle da imagem nadir e pontos de ligação se apresentaram dentro da tolerância. No ensaio feito para correção geométrica das visadas *backward* e *forward* isoladamente, com 15 pontos de controle, o comportamento foi o mesmo.

A exemplo da abordagem MOA, o processo de correção geométrica ocorreu de forma iterativa. A eliminação dos pontos com maior resíduo e sua substituição por outros, sem comprometimento da distribuição, não melhorou a solução. A inclusão de novos pontos de controle, assim como sua redução sucessiva até o patamar de 6 pontos, não produziram melhora significativa da solução. Em todos os ensaios visando melhora

da solução do modelo, apenas os resíduos e EQM observados para a visada nadir atenderam aos critérios de qualidade do ajustamento.

Na Figura 57 é ilustrada a distribuição dos resíduos observados para os 15 pontos de controle após correção geométrica considerando-se as três visadas simultaneamente. Os resultados alcançados neste experimento foram similares aos resultados da correção geométrica isolada das imagens. Pode-se observar que os maiores resíduos estão associados à componente y das visadas *backward* e *forward*.

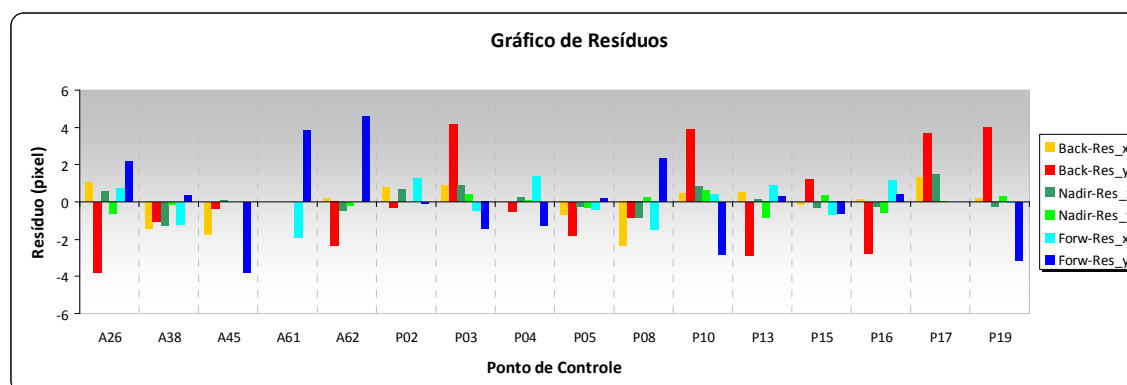


Figura 57: Resíduos (em *pixel*) observados nos pontos de controle usados na correção geométrica simultânea das visadas *backward*, nadir e *forward* (abordagem MPR).

Adicionalmente, ao se considerar as visadas inclinadas (*backward* e *forward*) a relação base/altura é um aspecto importante para a qualidade da solução. Por outro lado, a diferença no ponto de vista pode dificultar a identificação dos pontos homólogos e este aspecto também pode contribuir, pelo menos em parte com os resultados obtidos.

Devido ao mau desempenho observado já na fase da correção geométrica dos pares estereoscópicos segundo a abordagem MPR, os respectivos MDSs não apresentaram resultados satisfatórios e, em consequência disso não são apresentados neste trabalho.

4.2.3 Abordagem MRPC

Inicialmente foram realizados ensaios extraíndo-se MDSs a partir dos pares estereoscópicos isolados. Os arquivos gerados no ATE com indicadores da qualidade evidenciaram um maior sucesso das correlações, comparativamente à abordagem MOA.

Os indicadores de sucesso da correlação não demonstraram diferenças significativas entre os pares. O par BN apresentou correlação com qualidade ligeiramente superior ao par NF, enquanto que o par BF retornou piores índices de correlação.

Da mesma forma que abordagem MOA, optou-se pela geração de MDSs considerando-se as três visadas simultaneamente. Na Figura 58 são ilustrados os indicadores de sucesso na correlação para a geração de MDSs com resolução espacial de 10 m, considerando-se os pares isoladamente e combinados (BN-NF-BF).

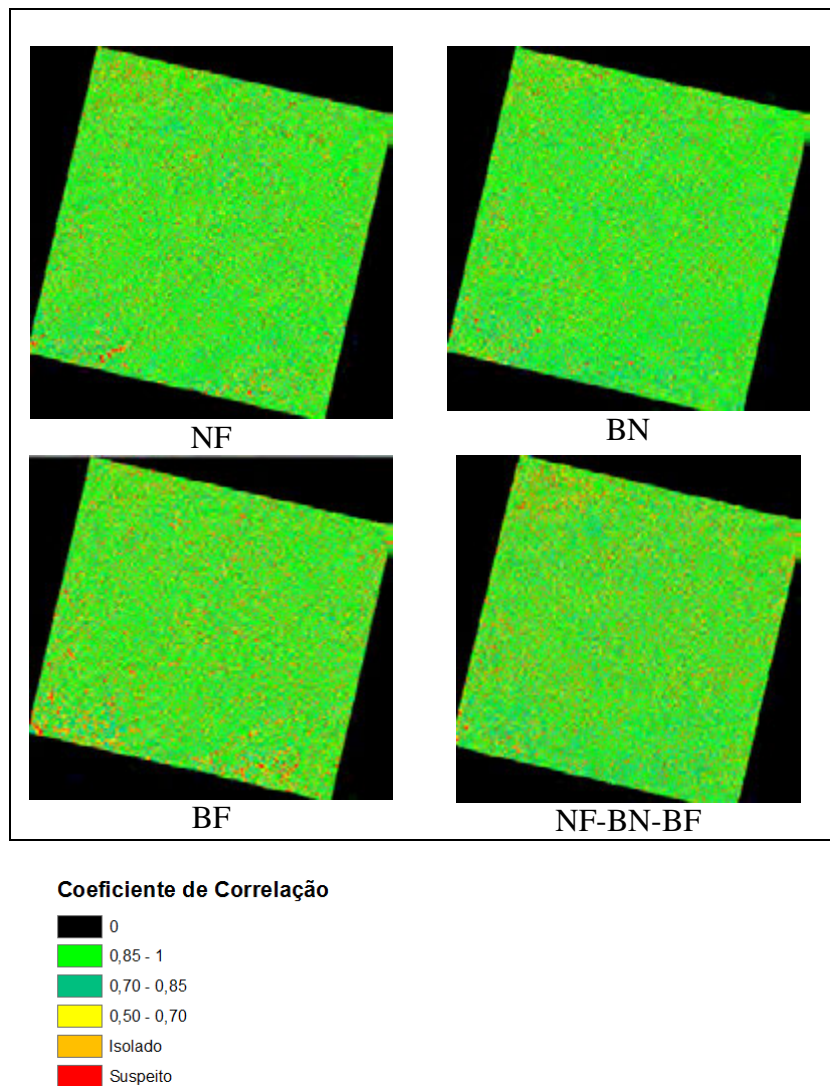


Figura 58: Indicadores do sucesso de correlação dos pares estereoscópicos NF, BN, BF e NF-BN-BF, abordagem MRPC.

Em destaque na Figura 59, são mostradas algumas áreas anômalas identificadas por inspeção visual dos MDSs gerados a partir dos pares estereoscópicos indicados na Figura 58.

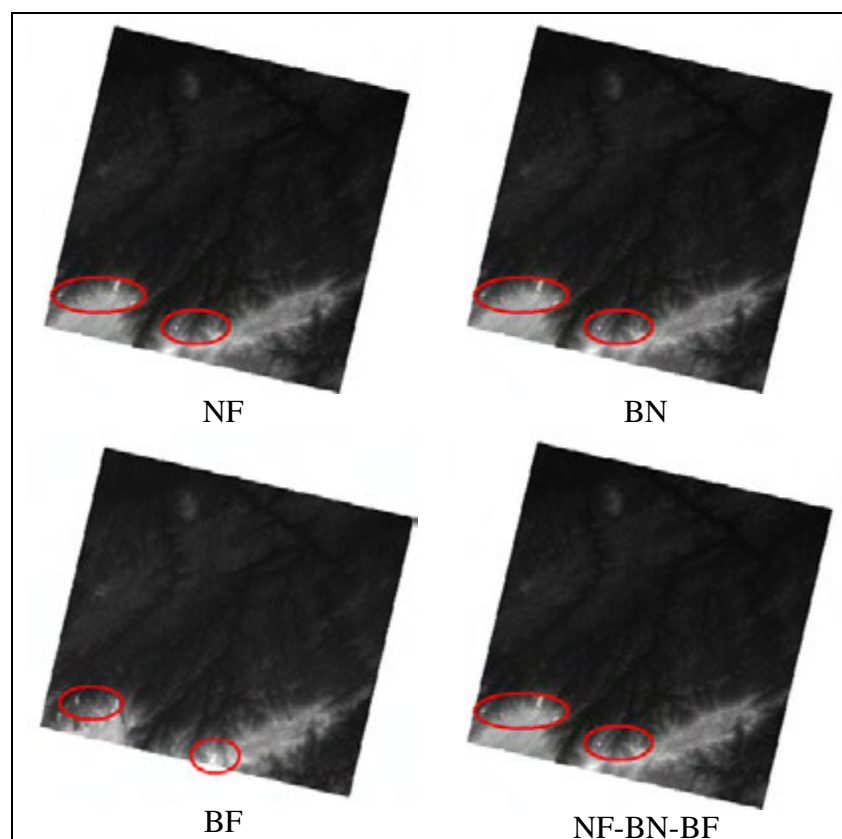


Figura 59: Representação em tons de cinza dos MDS gerados a partir das visadas NF, BN, BF e NF-BN-BF, abordagem MRPC.

No início do processo de extração do primeiro MDS com espaçamento de grade no valor de 5 m, o ATE retornou mensagem alertando que o tamanho mínimo utilizado pelo sistema para correlação corresponde a uma matriz de 3×3 *pixels* da imagem original, ou seja, 7,5m no caso da imagem PRISM. De acordo com LPS (2008), quando o valor especificado para o *pixel* do MDS é menor que o valor mínimo necessário para a correlação, a qualidade final do MDS pode ser afetada. Por esse motivo, não foram gerados MDSs com 5m de espaçamento de grade.

4.2.4 Avaliação da qualidade posicional dos MDSs

4.2.4.1 Avaliação global altimétrica

As Tabelas 16 e 17 apresentam os resultados da avaliação global dos MDSs gerados nas abordagens MOA e MRPC, respectivamente. Os MDSs estão nomeados de acordo com a codificação apresentada na Seção 3.4.6.1.

Nessas tabelas estão destacados, em negrito, os MDSs de melhor acurácia obtidos em cada abordagem. O teste do χ^2 confirmou a hipótese de precisão para todos

os MDSs que, no entanto, apresentam tendência confirmada pelo teste *t* de *Student* em 85% dos casos.

Na abordagem MOA, por exemplo, os MDSs 6 e 7 foram extraídos segundo as mesmas configurações, apenas com resoluções diferentes, e apresentam-se como tendencioso e livre de tendência, respectivamente. Em outro exemplo, os MDSs 9 e 10 extraídos a partir da correção geométrica sem refinamento dos RPCs, ou seja, sem pontos de controle, apresentam tendência, em ambas as resoluções espaciais. Além desses, os MDSs 11 e 12 foram extraídos a partir da mesma modelagem geométrica e estratégia HM, e com resoluções diferentes, onde o teste *t* de *Student* indicou somente o MDS 12 como livre de tendência.

Tabela 16: Resultados dos MDSs na abordagem MOA.

ID	MDS MOA	Estatísticas do erro altimétrico (m)						Classificação		TH	
		Min	Max	Med	DP	EQM	PEC=LE90	Escala	Classe	<i>t</i>	χ^2
1	BN-NF-BF_7PC_5m	-7,85	15,97	3,64	6,11	7,13	11,73	1:50.000	B	TD	PR
2	BN-NF-BF_7PC_10m	-9,34	15,47	3,93	6,06	7,24	11,91	1:50.000	B	TD	PR
3	BN-NF-BF_7PC_20m	-36,94	22,47	2,79	9,26	9,68	15,92	1:100.000	A	TD	PR
4	BN-NF-BF_9PC_5m	-10,34	13,47	2,67	4,95	5,64	9,27	1:50.000	A	TD	PR
5	BN-NF-BF_17PC_5m	-8,34	10,47	1,97	3,61	4,12	6,77	1:25.000	C	TD	PR
6	BN-NF-BF_17PC_10m	-7,34	11,47	1,95	3,79	4,27	7,02	1:25.000	C	TD	PR
7	BN-NF-BF_17PC_20m	-33,94	16,47	0,99	7,37	7,44	12,23	1:50.000	C	NTD	PR
8	BN-NF_17PC_5m	-8,34	10,47	1,80	3,67	4,09	6,74	1:25.000	C	TD	PR

Tabela 17: Resultados dos MDSs na abordagem MRPC.

ID	MDS MRPC	Estatísticas do erro altimétrico (m)						Classificação		TH	
		Min	Max	Med	DP	EQM	PEC=LE90	Escala	Classe	<i>t</i>	χ^2
9	BN-NF-BF_0PC_10m_HM	-15,58	18,41	1,66	6,24	6,46	10,63	1:50.000	B	TD	PR
10	BN-NF-BF_0PC_20m_HM	-37,55	14,47	-5,85	10,63	12,16	20,01	1:100.000	A	TD	PR
11	BN-NF-BF_2PC_10m_HM	-7,20	4,85	-0,48	2,09	2,15	3,53	1:25.000	A	TD	PR
12	BN-NF-BF_2PC_20m_HM	-20,46	10,17	-1,01	4,85	4,96	8,15	1:50.000	A	NTD	PR
13	BN-NF-BF_2PC_10m_MM	-29,47	4,24	-1,19	4,55	4,71	7,74	1:50.000	A	TD	PR
14	BN-NF_2PC_10m_HM	-7,31	4,14	-0,53	2,15	2,22	3,65	1:25.000	A	TD	PR

Os MDSs mais acurados na abordagem MOA, apresentaram compatibilidade com a escala 1:25.000 classe C. Esses MDSs (5, 6 e 8) resultaram da configuração que utilizou o maior número de pontos de controle na correção geométrica, a partir de três e dois pares estereoscópicos, visando à geração de MDSs com espaçamento da grade no valor de 5 m e 10 m, sendo que todos apresentaram tendência.

O MDS 11, obtido na abordagem MRPC, apresentou a melhor acurácia entre todos os MDSs extraídos nesse trabalho (Escala 1:25.000-Classe A). Com 10m de resolução espacial, esse MDS resultou da correção geométrica com refinamento dos RPCs, considerando-se os três pares estereoscópicos e estratégia HM. O refinamento dos RPCs proporcionou em resultado significativo, quando comparado ao resultado obtido sem pontos de controle, ou seja, sem refinamento, que resultou no MDS 9, compatível com a escala 1:50.000, classe B.

Ainda analisando-se os resultados da abordagem MRPC, o MDS 14, extraído segundo as mesmas configurações e resolução espacial do MDS 11, mas considerando-se apenas dois pares esteresocópicos, apresentou resultado equivalente ao MDS 11. O MDS 13 diferiu das configurações do MDS 11 apenas no tipo de estratégia de extração (MM). Essa estratégia, que utiliza uma janela de busca de correlação menor que a estratégia HM, produziu um MDS menos acurado (Escala 1:50.000-Classe A), equivalente ao MDS 12, gerado com resolução de 20m.

Quanto aos MDSs que apresentaram os piores resultados, analisando-se os valores absolutos dos erros e a média amostral dos MDSs 3 e 7 (MOA) e MDSs 10, 12 e 13 (MRPC), há evidências de valores anômalos. A Figura 60 ilustra o gráfico das discrepâncias observadas nestes 5 MDSs. Pode-se observar, de modo geral, que as maiores discrepâncias não estão associadas, necessariamente, aos mesmos pontos de referência nos diferentes modelos. A Figura 61 ilustra as discrepâncias observadas no MDS 11, o mais acurado do conjunto de MDSs.

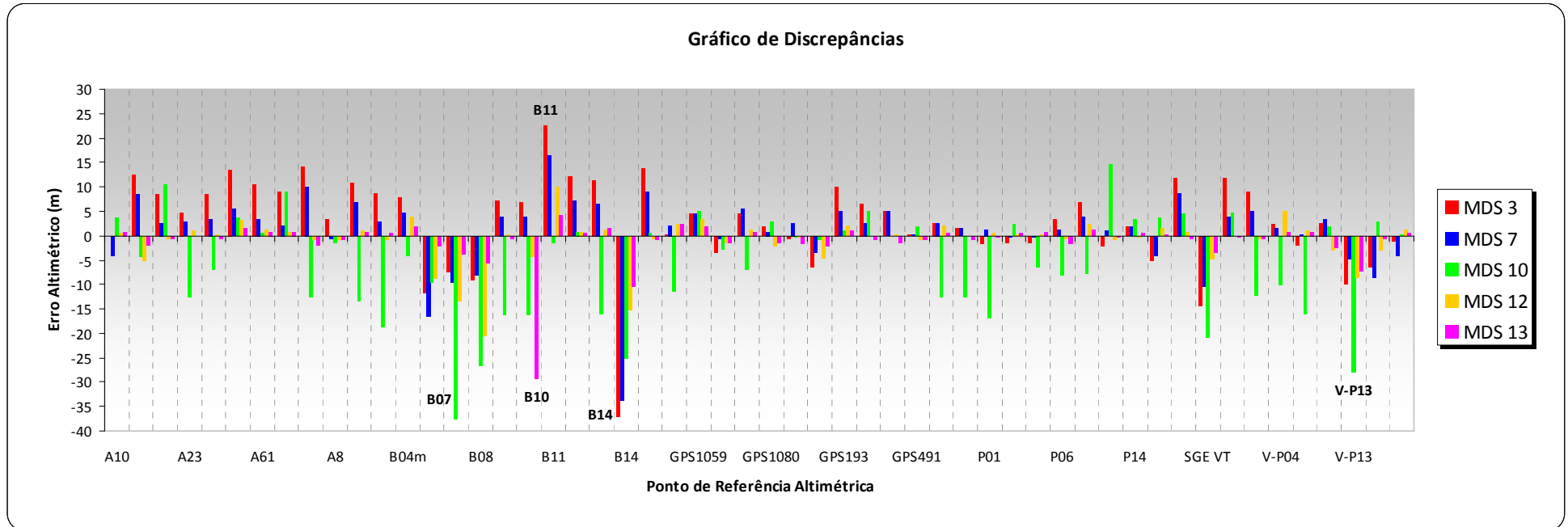


Figura 60: Erros altimétricos observados nos MDSs 3, 7, 10, 12 e 13.

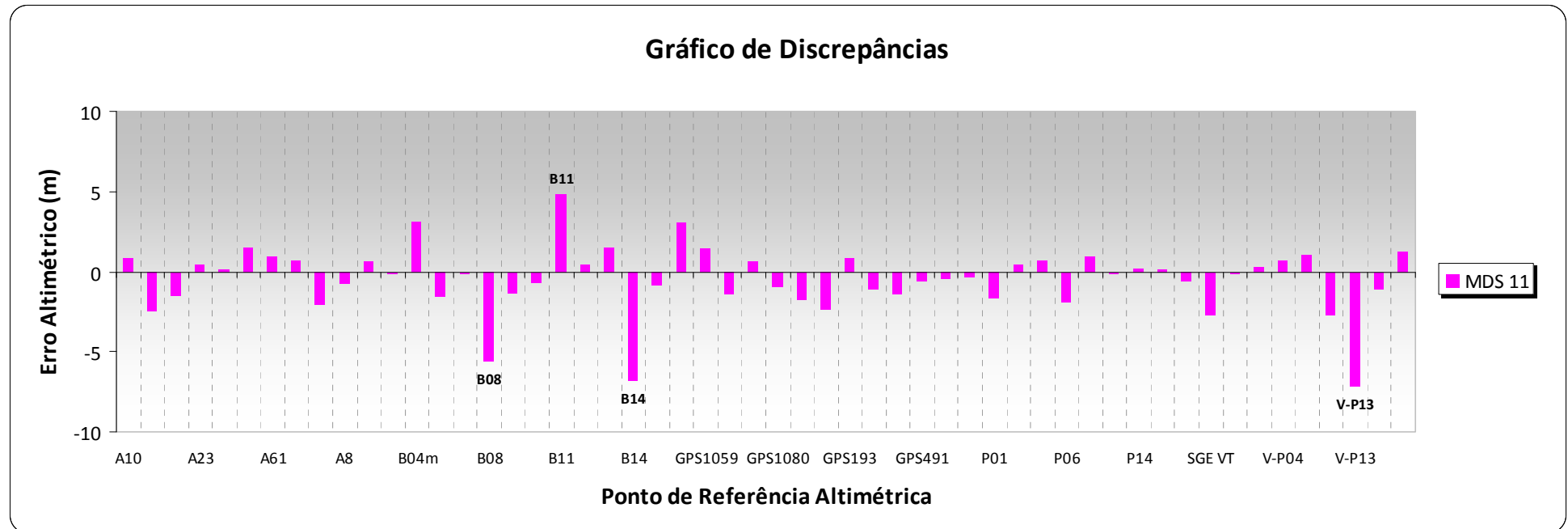


Figura 61: Erros altimétricos observados no MDS 11.

Embora em menor magnitude, os pontos de referência B11, B14 e V-P13 dos MDSs 3, 7 e 10 também estão associados aos maiores erros observados no MDS 11. No MDS 11, os arquivos indicadores do sucesso da correlação apontam para valor “suspeito” da elevação nos *pixels* correspondentes aos pontos B14 e V-P13, o que poderia justificar o erro. Já para o ponto B11, a correlação foi classificada como “boa”. Quanto ao MDS 3, a correlação nos *pixels* correspondentes a B11 e B14 foram classificados com “excelente”, e “boa” para o V-P13 (MDS 10). Nesse caso, a fonte do erro pode estar associada a outros fatores. Vale observar que esses 3 pontos são classificados como Pontos V.

Outra característica dos pontos B14 e B11 é sua localização em áreas com baixa declividade, de forma que o erro planimétrico do MDS não afeta significativamente a análise altimétrica. A diferença entre eles diz respeito à relação de vizinhança. Enquanto o ponto B14 foi determinado no platô de um morro com vegetação rasteira, para controle de áreas elevadas do terreno, o ponto B11 foi determinado em uma planície de inundação. Quanto ao ponto V_P13, o mesmo também foi escolhido no topo de um morro, porém com morfologia diferente do local do ponto B14. A representação esquemática dos perfis topográficos correspondentes é ilustrada na Figura 62.

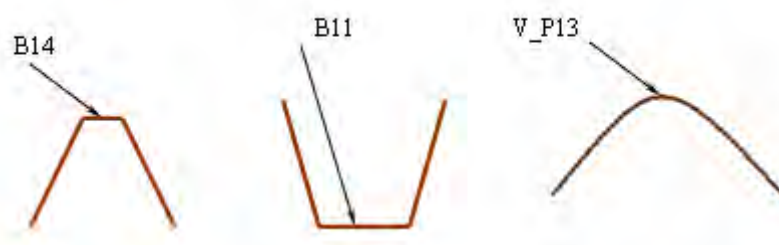


Figura 62: Tipos de perfis topográficos na região de pontos de controle.

Tomando-se como referência o MDS 11, por ser o mais acurado do conjunto, foi criado o gráfico ilustrado na Figura 63, que permite visualizar o comportamento do erro altimétrico relativamente à altitude do ponto de referência. Pode-se perceber que o erro altimétrico não está associado, necessariamente, a maiores altitudes.

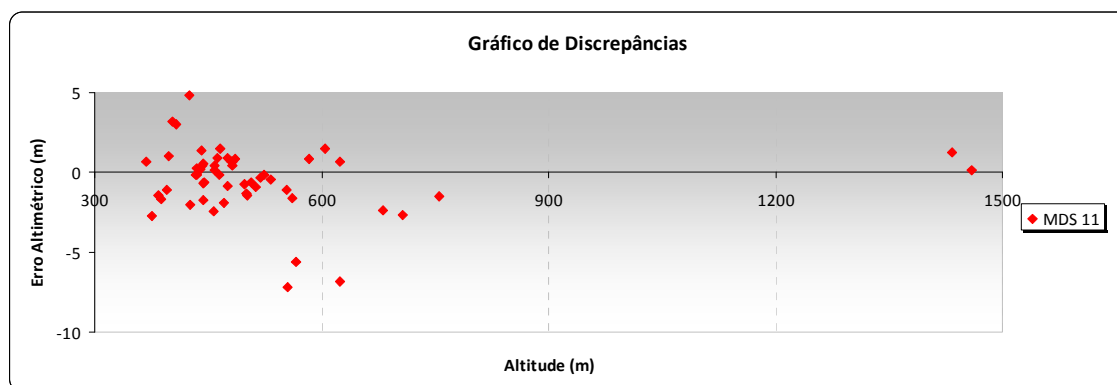


Figura 63: Erros altimétricos e altitudes (MDS 11).

4.2.4.2 Avaliação global planimétrica

Os MDSs 5 e 11, por apresentarem a melhor acurácia global altimétrica das abordagens MOA e MRPC, respectivamente, foram empregados para ortorretificar a imagem nadir.

Em termos de acurácia planimétrica, esses MDSs geraram ortoimagens compatíveis com a escala 1:25.000, Classe A (Tabela 18). As características dos MDSs, em termos de espaçamento da grade e acurácia planimétrica, não proporcionaram diferenças significativas nos resultados das ortoimagens, que foram equivalentes à ortorretificação feita com o SRTM90 (Tabelas 13 e 15 da Seção 4.1). Este resultado vai ao encontro do considerado por ISM (1997), conforme Seção 2.5.3 – Ortorretificação.

As duas ortoimagens passaram no teste de precisão, enquanto que a obtida com uso do MDS 11 não apresentou tendência. As ortoimagens estão codificadas conforme apresentado na Seção 3.4.6.2.

Tabela 18: Resultados da análise planimétrica das ortoimagens com uso dos MDSs 5 e 11.

Abordagem	Solução	Estatísticas do erro planimétrico (m)							Classificação	
		Min	Max	Med	DP	EQM	PEC	CE90	Escala	Classe
MOA	Orto_9PC_M DS 5	0,00	6,96	3,80	1,88	4,32	7,11	6,56	1:25.000	A
MRPC	Orto_2PC_M DS 11	0,37	8,05	3,14	2,05	3,80	6,25	5,77	1:25.000	A

4.2.4.3 Avaliação local altimétrica

O MDS 11, por apresentar a melhor acurácia global altimétrica de todo o conjunto de MDSs gerados, foi empregado nessa avaliação.

As análises estatísticas locais revelaram compatibilidade do MDS 11 para escalas que variaram de 1:10.000 a 1:50.000, dependendo da área analisada. Em todos os casos, a precisão foi confirmada pelo teste do qui-quadrado. Quanto ao teste *t* de *Student*, apenas a SUPV_PV18, localizada na Serra da Bocaina, não apresentou tendência. Os resultados estão apresentados na Tabela 19, onde os MDSs estão nomeados de acordo com a codificação apresentada na Seção 3.4.6.3.

Tabela 19: Resultado das avaliações locais do MDS 11.

Superfície	Total de Pontos	Estatísticas do erro altimétrico (m)						Classificação	
		Min	Max	Med	DP	EQM	PEC=L E90	Escala	Classe
SUPV_P01	567	-1,59	3,01	0,66	0,95	1,16	1,90	1:10.000	A
SUPV_P05	910	-19,42	3,12	-0,46	2,33	2,37	3,90	1:25.000	A
SUPV_P07	780	-4,17	1,78	-0,66	1,64	1,77	2,91	1:25.000	A
SUPV_P08	668	-4,75	0,51	-1,93	1,09	2,22	3,65	1:25.000	A
SUPV_P11	678	-2,81	0,72	-1,01	0,68	1,22	2,00	1:10.000	A
SUPV_P14	1025	-2,11	3,64	0,24	1,11	1,13	1,86	1:10.000	A
SUPV_PV18	955	-3,17	2,17	0,05	1,07	1,07	1,76	1:10.000	A
SUPV_B08	480	-11,54	-0,07	-5,04	1,83	5,37	8,83	1:50.000	A
SUPV_B09	855	-3,05	3,34	-0,17	1,36	1,37	2,25	1:10.000	A
SUPV_B13	884	-3,54	5,25	1,71	1,52	2,28	3,76	1:25.000	A
SUPV_B14	533	-10,25	-0,92	-6,49	2,09	6,83	11,23	1:50.000	B
SUPV_Rubião Jr.	323	-1,24	1,87	-0,48	0,53	0,71	1,17	1:10.000	A
ANFT_05	3019	-13,74	12,40	-2,38	4,98	5,52	9,09	1:50.000	A
ANFT_06	1325	-14,36	3,26	-4,74	3,10	5,67	9,33	1:50.000	A
ANFT_07	2357	-15,63	9,47	-2,02	4,59	5,01	8,24	1:50.000	A
ANFT_P13	1992	-13,07	17,10	-0,66	5,50	5,54	9,11	1:50.000	A

As declividades nas superfícies V, calculadas a partir dos MDTs gerados dos pontos do conjunto amostral, variaram de 0° a 12°, aproximadamente. De acordo com a Embrapa (1995), valores dentro desse intervalo correspondem a terrenos classificados como plano/praticamente plano (0° a 3°), suave ondulado (3° a 8°) e moderadamente ondulado (8° a 13°).

As declividades observadas nos anfiteatros variaram de 0° a 31°. Além de apresentarem porções do terreno com declividades equivalentes às superfícies V, os anfiteatros apresentaram ainda porções classificadas como ondulado (13° a 20°) e forte ondulado (20° a 45°).

Como pode ser observado na Tabela 19, o MDS 11 mostrou-se mais acurado nas áreas de superfície V, com exceção de SUPV_B08 e SUPV_B14. Vale salientar, que os pontos de controle altimétricos estáticos B08 e B14, medidos dentro das superfícies

correspondentes, também retornaram erros altimétricos elevados na avaliação global dos MDSs 3, 7 e 11 (Figuras 60 e 61).

Das áreas SUPV apresentadas na Tabela 19, a maioria é caracterizada por áreas extensas de baixa declividade, com exceção das SUPV_B08, SUPV_B14 e SUPV_PV18 que têm como característica áreas de maior declividade em sua vizinhança.

A SUPV_B14 apresenta altitude média de 622 m, correspondendo à superfície de maior altitude depois da SUPV_PV18. A altitude média em SUPV_B08 é de 560 m e, tal como a SUPV_B14, foi determinada no platô de um morro (Figura 62).

Já a SUPV_PV18, está localizada em uma área de desmatamento, entre duas encostas, porém com boa identificação na imagem. A Figura 64 ilustra o perfil dessa área.

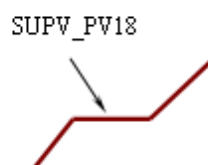


Figura 64: Esquema do perfil do terreno na SUPV_PV18.

Apesar das características semelhantes quanto à existência de maiores declividades nas imediações dessas três áreas, a avaliação indicou maior acurácia na SUPV_PV18. A cobertura vegetal nas SUPVs_B14 e B08 é rasteira, do tipo pasto, relativamente homogênea, e os indicadores de sucesso da correlação na fase de extração do MDS 11 apontaram a existência de valores de elevação “suspeitos” e “isolados” nas duas superfícies analisadas, o que pode ter causado problemas de correlação.

No entanto, esse tipo de cobertura também caracteriza outras áreas de SUPVs que apresentaram melhores resultados em termos de acurácia altimétrica. Tal fato pode ter ocorrido devido à existência de pequenas regiões dentro de uma mesma superfície, suscetíveis a falhas na correlação. Como por exemplo, a SUPV_P05, que apresenta o maior erro altimétrico absoluto dentre todas as superfícies (19,42m), mas a classificação dessa área como um todo ficou dentro da acurácia altimétrica esperada (1:25.000, Classe A).

A SUPV_P05 apresenta altitude média de 397 m, baixa declividade (0° a $1,6^\circ$, de acordo com o mapa de declividade correspondente) e cobertura homogênea do solo (Figura 65). Esta última característica pode ter contribuído para falhas na correlação das

imagens. Analisando-se o arquivo de sucesso da correlação correspondente ao MDS 11, os maiores erros altimétricos absolutos observados em SUPV-P05 estavam associados a uma pequena área classificada como de elevação “suspeita”. Entretanto, outras porções de SUPV_P05 igualmente associadas a elevações suspeitas, retornaram erros absolutos próximos a 1 m.

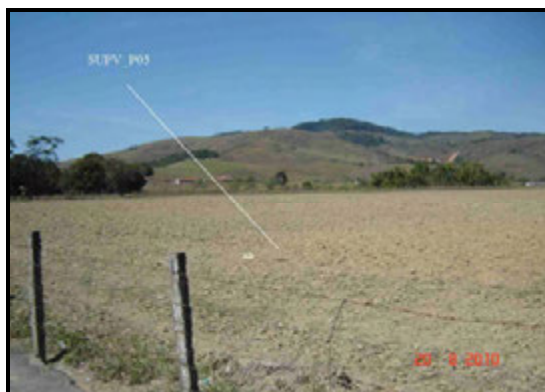


Figura 65: Vista panorâmica da SUPV_P05.

Diante deste contexto, não foram encontradas outras evidências que pudessem justificar o mau desempenho das duas superfícies em análise (SUPV_B08 e SUPV_B14), a não ser pelo fato de estarem localizadas no topo de morros, próximo ao divisor de águas e apresentarem áreas homogêneas. A Figura 66 ilustra a vista panorâmica da SUPV_B14.



Figura 66: Vista panorâmica da SUPV_B14.
Fonte: Correia (2008).

Quanto às superfícies de anfiteatros determinadas, todas apresentaram resultados com menor acurácia que as superfícies V, exceto para as SUPV_B08 e SUPV_B14.

A superfície ANFT_P13 apresentou maior erro altimétrico absoluto (17,10m) e maior variação do erro altimétrico. Essa superfície apresenta altitude média de 522m, tem uma forma irregular com área aproximada de 0,4 km², e declividades variando de

2° a 23°. A Figura 67 apresenta uma vista panorâmica, em perspectiva, do local onde a superfície foi determinada. A correspondente vista de topo e o perfil topográfico do terreno são apresentados na Figura 68.

Apesar de apresentar o maior erro altimétrico dentre as superfícies de anfiteatro, a região da superfície ANFT_P13 se enquadrou na mesma classificação das demais.



Figura 67: Vista em perspectiva de ANFT_P13.
Fonte: Google Earth (2011).

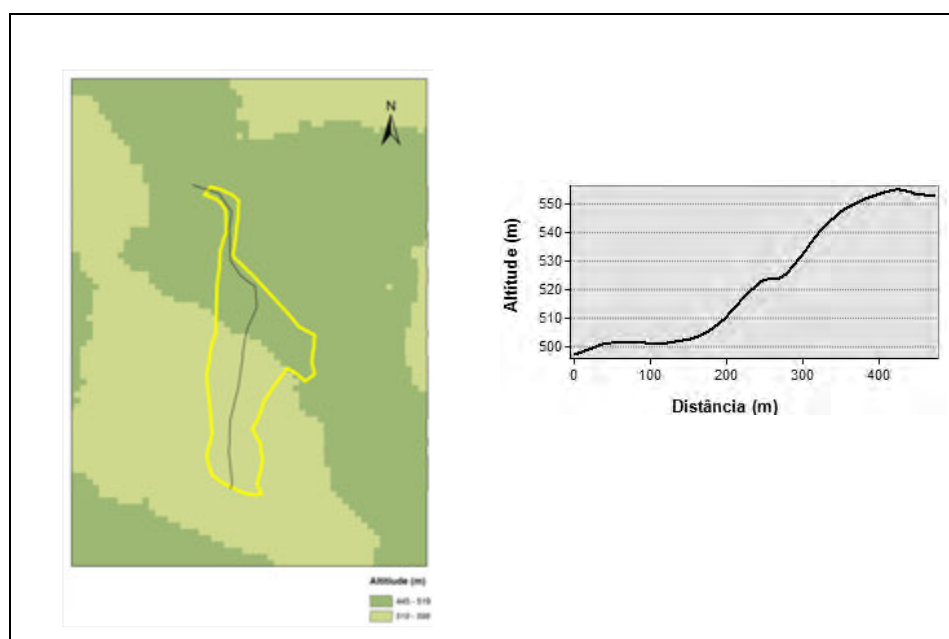


Figura 68: Vista de topo e perfil topográfico de ANFT_P13.

A fim de se avaliar o comportamento do erro altimétrico relativamente à declividade, foram gerados gráficos de dispersão correspondentes a um perfil quanto às superfícies SUPV_P05 (Figura 69) e ANFT_P13 (Figura 70). A primeira apresenta o maior erro altimétrico do conjunto amostral, e a segunda a maior variação do erro altimétrico.

Nos gráficos apresentados nas Figuras 69 e 70 o eixo das ordenadas é adimensional: a unidade da grandeza representada está associada à variável declividade (graus) ou erro altimétrico (m).

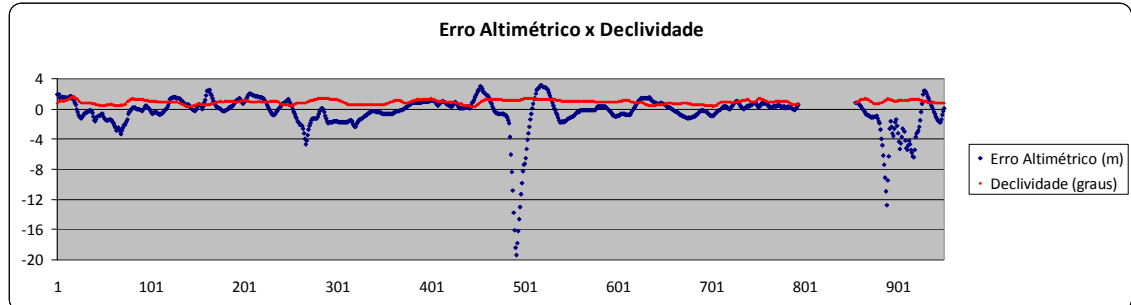


Figura 69: Gráfico de dispersão relacionando o erro altimétrico com a declividade em SUPV_P05.

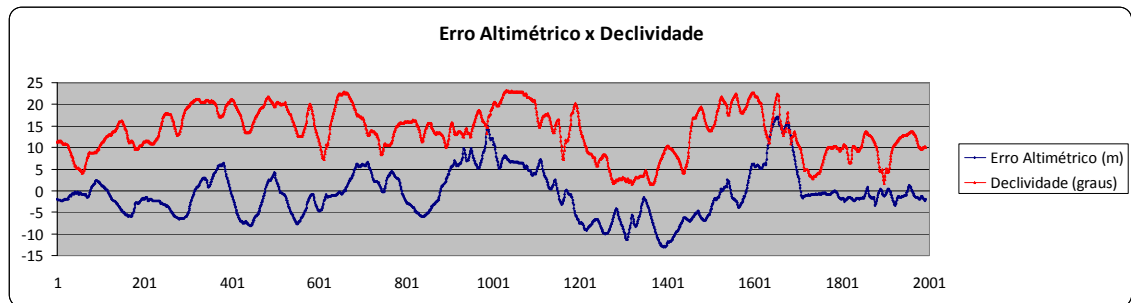


Figura 70: Gráfico de dispersão relacionando o erro altimétrico com a declividade em ANFT_P13.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos na fase de correção geométrica das imagens, visando à extração de MDSs, indicaram que a acurácia altimétrica dos MDSs está diretamente vinculada à abordagem de correção geométrica considerada, ao número de pontos de controle utilizados, às estratégias de correlação das imagens e ao espaçamento da grade do MDS.

Quanto à combinação das visadas para formação dos pares estereoscópicos, ainda que as visadas inclinadas (*backward* e *forward*) apresentem a melhor relação base/altura, as distorções geométricas e presença de ruídos associados a essas visadas prejudicam a correlação automática. Por esse motivo, caso não sejam utilizadas estratégias específicas de correlação, o uso isolado do par BF deve ser avaliado, sendo sugerido o uso dos pares BN e NF, ou ainda BN, NF, BF, simultaneamente.

Quanto à correção geométrica para fins de ortorretificação, na abordagem MOA foi possível obter ortoimagens compatíveis com o padrão de acurácia para a escala 1:25.000, classe A, do mapeamento sistemático brasileiro utilizando-se o mínimo de pontos de controle. Na abordagem MRPC, o mesmo resultado foi alcançado para a solução sem refinamento dos RPCs, ou seja, sem pontos de controle. Sobre a abordagem MPR, por não se dispor de dados de efemérides e atitude, os parâmetros de orientação das imagens foram estimados, e por isso foi necessário utilizar um maior número de pontos para alcançar resultado equivalente. Dessa forma, a utilização dessa modelagem para fins de ortorretificação, ainda que implique em maior número de pontos de controle e, por consequência, maior custo para o usuário, se mostrou adequada para a escala e classe de mapeamento considerada.

A correção geométrica para fins de extração de MDSs nas abordagens MOA e MRPC, exigiu o uso de maior número de pontos de controle e o refinamento dos RPCs, a fim de se atingir acurácia altimétrica equivalente ao padrão alcançado para fins de ortorretificação.

O processo de geração de MDSs considerando-se a correção geométrica pela abordagem MPR, não atendeu aos critérios de qualidade pré-estabelecidos na metodologia. Acredita-se que os resultados da correção geométrica relativos às visadas inclinadas, podem ter ocorrido em função das aproximações realizadas para os dados dos sensores *backward* e *forward* utilizados para configuração do modelo de correção geométrica.

Como esperado, a acurácia altimétrica dos MDSs se apresentou inversamente proporcional ao espaçamento da grade do MDS. Já os resultados alcançados na avaliação da acurácia planimétrica dos MDSs indicaram que as diferentes acurácias altimétricas e resoluções espaciais dos MDSs usados para ortorretificar a imagem nadir, não ocasionaram diferenças significativas em relação à acurácia esperada para as ortoimagens, o que retrata o mesmo padrão de qualidade planimétrica para os MDSs analisados.

Apesar dos resultados alcançados com a abordagem MRPC, em especial para a solução que gerou o MDS mais acurado (MDS 11), todos os MDSs gerados nesse trabalho apresentaram muitas áreas com falhas na correlação, solucionadas por algoritmos de interpolação, assim como presença de áreas anômalas e ruídos. As análises pautadas nas avaliações globais e locais, tendo como referências as amostras utilizadas para verificação da qualidade posicional dos MDSs, indicaram que a solução dada pelos algoritmos de interpolação para áreas não correlacionadas foi aprovada em alguns casos, e não aprovada em outros. Dessa forma, vale alertar quanto à importância do conjunto amostral utilizado para avaliação do MDS, pois a inexistência de pontos de verificação do MDS nos locais interpolados pelo sistema pode levar a classificações equivocadas do MDS analisado.

As análises locais demonstraram ainda, que a acurácia altimétrica dos MDSs varia de acordo com a morfologia do terreno, o que proporciona resultados mais ou menos acurados relativamente à abordagem global. Considerando as áreas analisadas, pôde-se perceber que áreas de baixa declividade tendem a apresentar acurácia superior às áreas de maior declividade. Entretanto, fatores como erros decorrentes de possíveis falhas no processo de correlação, assim como de uma possível solução mal condicionada dos algoritmos de interpolação, podem ser agravados por regiões com maior declividade, proporcionando degradação da acurácia altimétrica dos MDSs.

Quanto aos testes de hipóteses, embora a precisão dos produtos tenha sido confirmada pelo testes do qui-quadrado, os testes *t* de *Student* apontaram a existência de tendência em quase todos os produtos gerados.

Acredita-se que a tendência pode estar associada ao processo de identificação de pontos de controle nas imagens, à modelagem utilizada e a outros fatores, como a qualidade radiométrica das imagens, entre outros, não detectados nessa pesquisa. Todavia, considerando-se que o Decreto-lei nº. 89.817 de 1984 não prevê análises

quanto a esses quesitos, os produtos foram considerados acurados para as escalas correspondentes.

A representação tridimensional da superfície através do uso da tecnologia de estereoscopia óptica, além de produzir modelos que consideram tanto a superfície nua do terreno quanto os objetos acima dele, como cobertura vegetal, pode apresentar qualidade posicional comprometida, em decorrência de falhas na correlação seguida de interpolação pelos algoritmos interpoladores. Essas características limitam o uso do produto para aplicações que requeiram maior acurácia e o conhecimento da superfície nua do terreno. Nesse caso, pode-se realizar uma etapa de edição do produto ou recorrer a outras tecnologias, como o LIDAR ou interferometria por RADAR, com uso de comprimento de onda que penetre a vegetação.

Recomenda-se para trabalhos futuros o uso de diferentes estratégias para a correlação das imagens. Essas estratégias permitem a seleção de áreas de acordo com suas características, a fim de produzir MDSs com melhor acurácia. Nesse caso, áreas de nuvens e sombras, assim como corpos d'água podem ser excluídos do processo de correlação. Assim, um pré-processamento das imagens considerando índices para identificação de áreas suscetíveis a falhas no processo de correlação, pode facilitar o processo de correspondência e ocasionar melhora nos resultados.

Além disso, áreas predominantemente planas podem estar associadas a uma estratégia diferente das áreas de maior elevação, assim como as áreas urbanas em relação a áreas de características rurais.

A etapa de edição dos MDSs/MDTs também constitui uma linha de investigação promissora, que possibilita o tratamento de áreas anômalas de forma local, seja através do uso de interpoladores diferenciados, ou integração com MDSs/MDTs de maior acurácia, assim como pode possibilitar a obtenção de MDTs a partir de MDSs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Topologia hídrica: método de construção e modelagem da base hidrográfica para suporte à gestão de recursos hídricos**. Versão 1.11. Agência Nacional de Águas, Superintendência de Gestão da Informação. Brasília: ANA, SGI, 2006. 29 p. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/PortalSNIRH/LinkClick.aspx?fileticket=pUs5pBqqS2c%3D&tAbid=77>>. Acesso em 31 mar. 2011.

ANDRIOTTI, J. L. S., **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo, RS: Editora Unisinos, 2003, 165 p.

ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF). **About AADN**. In: Americas ALOS Data Node, 2011a. Disponível em: <<http://www.asf.alaska.edu/program/aadn>>. Acesso em 28 fev.2011

ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF). **AADN data**. In: Americas ALOS Data Node, 2011b. Disponível em: <<http://www.asf.alaska.edu/program/aadn/data>>. Acesso em 28 fev.2011

ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF). **Americas ALOS data node (AADN) 2006-2011**. In: ASF Enterprise Project. 2011c. Disponível em: <<http://www.asf.alaska.edu/program/asfe/project/aadn>>. Acesso em 04 abr. 2011

ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF). **ALOS sensors**. In: Americas ALOS Data Node, 2011d. Disponível em: <http://www.asf.alaska.edu/program/aadn/alos_sensors>. Acesso em 28 fev. 2011.

ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF). **ALOS processor versions**. In: Americas ALOS Data Node, 2011e. Disponível em: <http://www.asf.alaska.edu/program/aadn/processors_versions>. Acesso em 28 fev. 2011.

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). **ASPRS Accuracy standards for large scale maps**. 2010. Disponível em: <http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/ASPRS_Interim_Accuracy_Std_largescalemap.pdf>. Aceso em 09 mai. 2011.

BAE SYSTEMS **Geospatial exploitation products: Next-generation automatic terrain extraction (NGATE) case study**. 2007, 32p.

BANG, K.I.; JEONG, S.; KIM, K. **Modification of sensor model parameters with a few GCPs**. ASPRS Annual Conference, 3-9 May, Anchorage, Alaska, 2003, 6 p.

BARROS, R. S. **Avaliação da altimetria de modelos digitais de elevação obtidos a partir de sensores orbitais**. 2006. 195 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

BLITZKOW, D.; LOBIANCO, M. C. B. Modelo de ondulação geoidal:

MAPGEO2004. Seminário sobre Referencial Geocêntrico no Brasil, 2., 2004, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBGE, 2004.

BRASIL. **Decreto n. 89.817, de 20 de junho de 1984.** Estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 jun. 1984. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm>. Acesso em 25 jun. 2009.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems.** Oxford; New York: Oxford University Press, 2004, 333 p.

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Ed. e Org.). **Introdução à ciência da geoinformação.** São José dos Campos: INPE, 2001. Cap. 3. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap3-superficies.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2011.

CHEN T.; SHIBASAKI R.; TSUNO K.; MORITA K. Triplet-matching for DEM generation with PRISM, ALOS: A case study using air-borne three line scanner data. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Proceedings...**Istanbul: ISPRS, 2004, p.-. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/258.pdf>>. Acesso em 30 mar. 2011.

CHENG, P.; TOUTIN, T. On-site GPS and interactive geometry modeling: a winning combination. **Earth Observation Magazine**, v. 6, n. 4, p. 35-37, 1997.

CHENG, P.; TOUTIN, T. Orthorectification and DEM generation from high resolution satellite data. Asian Conference On Remote Sensing, 22., 2001, Singapura. **Proceedings...**ACRS 2001, p. 1203-1208. Disponível em: <<http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001/pdf/070cheng.pdf>>. Acesso em 14 mar. 2011.

COELHO, A. L. **Geração de modelos digitais de elevação a partir de pares estereoscópios Radarsat.** 2002. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cartográfica) – Instituto Militar de Engenharia, IME, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

COELHO, L. C. T.; BRITO, J. L. N. **Fotogrametria Digital.** Ed. UERJ, 2007, 196 p.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR). **Plano de ação da INDE.** Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2010. Disponível em: <<http://www.concar.ibge.gov.br/arquivo/PlanoDeAcaoINDE.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2011.

CORREIA, J. D. **Mapeamento de feições deposicionais quaternárias por imagens orbitais de alta resolução espacial: médio vale do rio Paraíba do Sul.** 2008. 662 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

COSTA, E. R. **Geração automática de modelos digitais de terreno a partir de imagens de câmaras digitais.** 2006. 139 f. Dissertação (Mestrado em Ciências

Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Presidente Prudente, SP, 2006. Disponível em:

<http://www4.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d_costa_er.pdf>. Acesso em 13 abr. 2010.

CROSETTO, M.; PASQUALI, P. DSM generation and deformation measurement from SAR data. In: LI, Z., CHEN, J., BALTSAVIAS, E. (Eds.). **Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information: 2008 ISPRS Congress Book**. ISPRS Book Series, CRC Press, 2008, v.7, Chapter 12, p. 157-167.

D'ALGE, J. C. L. Cartografia para geoprocessamento. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Ed. e Org.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. Cap. 6. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap6-cartografia.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2011.

DANIEL, C.; TENNANT, K. DEM quality assessment. In: MAUNE, D. F. (Ed.). Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. **The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, Bethesda, 2001. Chapter 12, p. 395-440.

DIAL, G.; GRODECKI, J. **RPC replacement camera models**. In: ASPRS 2005 Annual Conference, 2005. Baltimore, Maryland, 2005. Disponível em: <http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/technical-papers/2005/C_RPCReplacementCameraModelsFinal.pdf>. Acesso em 25 mai. 2011.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO (DSG). **Especificação técnica para a aquisição de dados geoespaciais vetoriais ET- ADGV**. 1ª ed. 2010.

EARTH OBSERVATION RESEARCH CENTER (EORC); JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **PRISM**. In: About ALOS. 2007a. Disponível em: <<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/prism.htm>>. Acesso em 20 mar. 2010.

EARTH OBSERVATION RESEARCH CENTER (EORC); JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **AVNIR-2**. In: About ALOS. 2007b. Disponível em: <<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/avnir2.htm>>. Acesso em 20 mar. 2010.

EARTH OBSERVATION RESEARCH CENTER (EORC); JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **PALSAR**. In: About ALOS. 2007c. Disponível em: <<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>>. Acesso em 20 mar. 2010.

EARTH OBSERVATION RESEARCH CENTER (EORC); JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **Overview and objectives**. In: About ALOS. 2007d. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about_index.htm>. Acesso em 20 mar. 2010.

EARTH OBSERVATION RESEARCH CENTER (EORC); JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **ALOS PRISM level 1 product format descriptions**. 2007e.

Disponível em: <<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/format.htm>>. Acesso em 20 mar. 2010.

EARTH OBSERVATION RESEARCH CENTER (EORC); JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **ALOS systematic observation strategy user request guidelines – PRISM & AVNIR-2**. In: ALOS Observation Strategy. 2007f. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/obs/prism_av2_guide.htm>. Acesso em 20 mar. 2010.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital terrain modelling** – acquisition, manipulation and applications. Boston/London, Artech House, 2005, 257 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema de Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras**. 3 ed. em. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **About TIN surfaces**. In: ArcGIS Desktop v9.3.1 Help, 3D Analyst, 2009a.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **Using the Topo to Raster tool**. In: ArcGIS Desktop v9.3.1 Help, 3D Analyst, 2009b.

FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE (FGDC). **Geospatial positioning accuracy standards** Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. 1998. Disponível em: <<http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>>. Acesso em 23 nov. 2010.

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. Modelagem numérica do terreno. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Ed. e Org.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. Cap. 7. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2011.

FELICÍSIMO, A. M. **Modelos digitais del terreno**: introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. In: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad de Oviedo, 1994, 118p. Disponível em: <<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>>. Acesso em 06 mar.2011.

FRASER, C. S.; DIAL, G.; GRODECKI, J. Sensor orientation via RPCs. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, p. 182-194, 2006. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VF4-4HVDYP7-1/2/04ff44c46827878d456d046b8b0e19ed>>. Acesso em 11 mar.2011.

FRITSCH, D.; STALLMANN, D. Rigorous photogrammetric modelling processing of high resolution satellite imagery. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Congress, 19., 2000, Amsterdam, The Netherlands. **Proceedings...** Amsterdam: ISPRS, 2000. p. 313-321. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part1/313_XXXIII-part1.pdf> Acesso em 09 fev 2011.

GALO, M. **Automação dos processos de correspondência e orientação relativa em visão estéreo**. 2003. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, SP, 2003.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. O uso do GPS no controle de qualidade de cartas. In: 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. **Anais**. Tomo II, p. 41-48, Florianópolis, 1994.

GEOSCIENCE AUSTRALIA. **Importing and georeferencing ALOS CEOS format**. In: Earth Observation and Satellite Imagery. 2010. Disponível em: <<http://www.ga.gov.au/remote-sensing/get-satellite-imagery-data/technical-information/file-formats/imp.html>>. Acesso em 24 jun. 2010.

GRODECKI, J. **Ikonos stereo feature extraction - RPC approach**. In: ASPRS 2001 Annual Conference, St. Louis, Missouri, 2001. Disponível em: <http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/technical-papers/2001/C_GrodeckiJacek_2001.pdf>. Acesso em 25 mai. 2011.

HABIB, A. F.; KIM, E. M.; KIM, C. J. New methodologies for true orthophoto generation. In: **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Vol. 73, n. 1, Jan. 2007, pp. 025–036. Disponível em: <http://www.asprs.org/publications/pers/2007journal/january/2007_jan_25-36.pdf>. Acesso em 10 mar.2011.

HEIPKE, C. Overview of Image Matching Techniques. In: **Proceedings...OEEPE - Workshop on the application of digital photogrammetric workstations**. Lausanne, Mar. 1996.

HOLLAUS M.; MANDLBURGER G.; PFEIFER N.; MÜCKE W. **Land cover dependent derivation of digital surface models from airborne laser scanning data**. In : Paparoditis N., Pierrot-Deseilligny M., Mallet C., Tournaire O. (Eds.), IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3A – Saint-Mandé, France, 2010. p. 221-226. Disponível em : <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part3/a/pdf/221_XXXVIII-part3A.pdf>. Acesso em 02 abr.2011.

HOTT, M. C.; GUIMARÃES, M.; MIRANDA, E. E. Um método para a determinação automática de áreas de preservação permanente em topos de morros para o Estado de São Paulo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais Eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3061-3068. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.13.47.22/doc/3061.pdf>>. Acesso em 31 mar. 2011.

HU, Y.; TAO, V.; CROITORU, A. Understanding the rational function model: methods and applications. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Proceedings...**Istanbul: ISPRS, 2004, p. 663-668. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm4/papers/423.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2011.

HUTCHINSON, M. F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. In: International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling, 3., 1996, Santa Fé, New Mexico. **Proceedings....**Disponível em: <http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/hutchinson_michael_dem/local.html>. Acesso em 04 abr. 2011.

HYYPPÄ, H.; YU, X.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; KAASALAINEN, S.; HONKAVAARA, E.; RÖNNHOLM, P. Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Workshop Laser Scanning 2005, 2005, Enschede, The Netherlands. **Proceedings...** Enschede: ISPRS, 2005. p. 85-90. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W19/papers/085.pdf>>. Acesso em 27 mar.2011

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Resolução de São Paulo**. In: Documentos técnicos/PMRG – Projeto Mudança do Referencial Geodésico, 2003a. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/DOCUMENTA_RESOLUC_AOSP_D.pdf>. Acesso em 25 abr. 2011.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Informativo geocêntrico, Ano 1, Nr.1**. In: Documentação, PMRG – Projeto Mudança do Referencial Geodésico. Diretoria de Geociências, Departamentos de Cartografia e Geodésia, 2003b. Disponível em: <<ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pmrg/Informativo1.pdf>>. Acesso em 27 abr. 2011.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Documentos técnicos**. In: PMRG – Projeto Mudança do Referencial Geodésico. 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/doc_tec.shtm>. Acesso em 26 abr. 2011.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Revista Ponto de Referencia**. Ano 1, Nr 1, In: PMRG – Projeto Mudança do Referencial Geodésico, 2006. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pmrg/revista_ponto_de_referencia.pdf>. Acesso em 31 mar. 2011.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Apresentação**. In: Imagens do satélite ALOS, 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/alos>>. Acesso em: 10 mar. 2011.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Recomendações para levantamentos relativos estáticos GPS**. 2008. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/Recom_GPS_internet.pdf>. Acesso em: 24 set. 2010.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Avaliação planialtimétrica de dados ALOS/PRISM**. Estudo de Caso: Itaguaí – RJ. Relatório, 2009.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **O que é o geóide**. In: Modelo de ondulação geoidal. 2010a. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/oquee_geoide.shtm>. Acesso em

28 abr. 2011.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Avaliação do modelo.** In: Modelo de ondulação geoidal. 2010b. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/avaliacao_do_modelo.shtm>.

Acesso em 01 mai. 2011.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cálculo do modelo.** In: Modelo de ondulação geoidal. 2010c. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/calculo_do_modelo.shtm>.

Acesso em 01 mai. 2011.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Término do Acordo de Cooperação.** In: ALOS, 2011. Disponível em:

<<http://www.ibge.gov.br/alos>>. Acesso em: 04 abr. 2011.

IMAI, Y.; AKAMATSU, Y.; MORI, M.; SHIRAI N.; MARUYA, M.; OHYAMA, H. An accuracy assessment of DSMs and orthoimages derived from ALOS/PRISM and their availability in forestry. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, 21., 2008, Beijing, China. **Proceedings...**Beijing: ISPRS, 2008. p. 1021-1026. Disponível em:

<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/11_WG-VIII-11/03.pdf>.

Acesso em 02 fev 11.

INTERNATIONAL EARTH ROTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE (IERS). **Data/Products** In: Home. 2010.

Disponível em: <<http://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/data.html>>. Acesso em 27 abr. 2011.

INTERNATIONAL SYSTEMAP CORPORATION (ISM). **The fundamentals of digital photogrammetry.** Vancouver, British Columbia, Canadá, 1997.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics.** New York: Oxford University Press, 1989, 561 p.

IWATA, T. Precision geolocation determination and pointing management for the advanced land observing satellite (ALOS). Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS 2003. **Proceedings...** 2003 IEEE International, vol.3, p. 1845- 1848. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1294269&isnumber=28603>

>. Acesso em 14 fev. 2011

JACOBSEN, K. DEM generation by SPOT HRS. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Proceedings...**Istanbul: ISPRS, 2004. p. 439-444. Disponível em:

<<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm1/papers/79.pdf>>.

Acesso em: 02 fev 2011

JACOBSEN, K; BÜYÜKSALIH, G.; TOPAN, H. **Geometric models for the orientation of high resolution optical satellite sensors.** In: ISPRS Workshop, 2005,

Hannover, Germany. Hannover: ISPRS, 2005. p.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **ALOS Hardware**. In: ALOS, 2004. Disponível em: <http://alos.jaxa.jp/2/alos_hard-e.html>. Acesso em: 31 mar. 2011.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **Advanced land observing satellite “DAICHI” (ALOS)**. In: Missions-Satellites and Spacecraft. 2007. Disponível em: <http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_e.html>. Acesso em: 30 abr. 2009.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **PRISM level 1B2 data products**. In: Calibration result of JAXA standard products (as of July 1, 2009). 2009. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/en/hatoyama/satellite/data_tekyo_setsumei/alos_hyouka_e.htm>. Acesso em: 04 abr. 2011.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **DAICHI (ALOS) operation completion**. In: Press Releases. 2011. Disponível em: <http://www.jaxa.jp/press/2011/05/20110512_daichi_e.html>. Acesso em 05 jul. 2011.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da segunda edição. Tradução: EPIPHANIO, J. C. N., FORMAGGIO, A. R., SANTOS, A. R., RUDORFF, B. F. T., ALMEIDA, C. M., GALVÃO, L. S., São José dos Campos, INPE, Parêntese, 2009, 598 p.

JOLY, F. A **Cartografia**. 14.ed. Campinas: Editora Papirus, 2011, 112 p.

KAYADIBI, O. **Recent advances in satellite technologies using to generate the Digital Elevation Model (DEM)**. In: Recent Advances in Space Technologies, RAST’09. International Conference on, 4., p. 29-34, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5158229&isnumber=5158174>>. Acesso em: 11 mar.2011.

KIM, T.; DOWMAN, I. Comparison of two physical sensor models for satellite images: Position-Rotation model and Orbit-Attitude model. **The Photogrammetric Record**, v. 21, n.114, p. 110–123, 2006.

KIM, D.; KIM, T. Modeling of absolute orientation of adjacent satellite image strips using a few ground control points. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, 21., 2008, Beijing, China. **Proceedings...Beijing**: ISPRS, 2008. p. 909-912. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/156.pdf>. Acesso em 18 mai. 11.

KOCAK, G.; BÜYÜKSALIH, G.; JACOBSEN, K. Analysis of digital elevation models determined by high resolution space images. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Proceedings...Istanbul**: ISPRS, 2004. P. 636-641 -. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm4/papers/418.pdf>>. Acesso

em 10 fev. 2011.

KOCAMAN, S. **Sensor modeling and validation for linear array aerial and satellite imagery**. 2008. 166 f. Tese (Doutorado) – ETH ZURICH, 2008. Disponível em: <www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue_Berichte_PDF/106.pdf>. Acesso em 02 mar. 2011.

KOCAMAN, S.; GRUEN, A. Geometric modeling and validation of ALOS/PRISM imagery and products. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, 21., 2008, Beijing, China. **Proceedings...Beijing: ISPRS, 2008. p. 731-738.** Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/126.pdf>. Acesso em 13 fev. 2011.

KRAUS, K. **Photogrammetry: fundamentals and standard processes – Volume 1**. Bonn: Ferd. Dümmlers, 1993. 397 p.

KRAUSS, T.; SCHNEIDER, M.; REINARTZ, P. **Orthorectification and DSM generation with ALOS-Prism data in urban areas**. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009. IEEE International, IGARSS 2009, v.5, p.V-33-V-36. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5417739&isnumber=5417612>>. Acesso em 07 mar. 2011.

LANDIM, P. M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. In: DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 02, 2000, 18 p. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/geologia/GAA01001/aulas_files/interpo.pdf>. Acesso em 18 mar. 2011.

LEICA PHOTOGRAMMETRY SUITE (LPS). **Automatic Terrain Extraction – user’s guide**, 2008.

LI, Z.; GRUEN A. Automatic DSM generation from linear array imagery data. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Proceedings...Istanbul: ISPRS, 2004. p. -.** Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/254.pdf>>. Acesso em 10 fev. 2011.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital terrain modeling: principles and methodology**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005. 318 p.

LINDER W. **Digital photogrammetry: a practical course**. Springer, 2006, 214 p.

LITWILLER, D. **CCD vs. CMOS: Facts and Fiction**. Photonics Spectra. Laurin Publishing Co. Inc., January, 2001.

LOBIANCO, M. C. B. **Determinação das alturas do geóide no Brasil**. 2005. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica. – Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-21022006-162205/pt-br.php>>.

Acesso em 02 mai. 2011.

MACHADO-SILVA, A. J. F.; SILVA, M. V. D.; SANTINI, D. Mapeamento topográfico usando imagens Ikonos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais Eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 297-302. Disponível em:

<http://mar.te.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/08.19.17.06/doc/02_001.pdf>.

Acesso em 02 fev.2011.

MACHADO-SILVA, A. J. F. **Geometria de imagens: do projeto do satélite à geração dos produtos.** 2007. 224 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, SP, 2007.

MACHADO, K. J. **Geração do modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado e determinação de áreas de preservação permanente.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, MG, 2010.

MAROTTA, G. S. **Análise de diferentes modelos para a correção geométrica de imagens orbitais de altíssima resolução.** 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, MG, 2010.

MAUNE, D. F.; KOPP, S. M.; CRAWFORD, C. A.; ZERVAS, C. E. Introduction. In: MAUNE, D. F. (Ed.). Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. **The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, Bethesda, 2001a. Chapter 1, p. 1-34.

MAUNE, D. F.; MAITRA, J. B.; MCKAY, E. J. Accuracy standards. In: MAUNE, D. F. (Ed.). Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. **The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, Bethesda, 2001b. Chapter 3, p. 61-82.

MEDEIROS, N. G. **Orientação exterior de imagens orbitais usando modelos rigorosos com feições retas.** 2007. 182 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Presidente Prudente, SP, 2007. Disponível em:

<http://www4.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/t_medeiros_ng.pdf>. Acesso em 16 set. 2010.

MEDEIROS, N. G.; TOMMASELLI, A. M. G. Orientação indireta de imagens CBERS: avaliação de técnicas que usam linhas retas e sua combinação com pontos. In: **Boletim de Geociências Geodésicas**, sec. Artigos, Curitiba, v. 15, n. 1, p.33-57, 2009.

Disponível em:

<<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/view/13900/9355>>. Acesso em: 28 fev. 2011.

MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. In **Proceedings of the Technical Congress on Surveying and Mapping** (1), 222-231, 1982.

MEYER, W. **Concepts of mathematical modeling.** McGraw-Hill Book Company,

New York, 1985.

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

MITASOVA, H.; HOFIERKA, J. Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. In: **Mathematical Geology**, v.25, n. 6, 1993. Disponível em: <<http://skagit.meas.ncsu.edu/~helenagmslab/papers/MG-II-93.pdf>>. Acesso em 31 mar.2001.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008, 476 p.

MONICO, J. F. G.; DAL PÓZ, A.P.; GALO, M.; SANTOS, M.C.; OLIVEIRA, L.C. Acúrcia e Precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, sec. Comunicações, Curitiba, vol. 15, nº 3, p.469-483, jul-set, 2009.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3.ed. Viçosa: Editora UFV, 2007, 320 p.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **The shuttle radar topography mission**. In: SRTM bibliography. 2007. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf>. Acesso em 24 jun. 2010.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **SIR-C sample data set**. In: Jet Propulsion Laboratory. 2010. Disponível em: <<http://southport.jpl.nasa.gov/sampledata/README.TXT.html>>. Acesso em 24 jun. 2010.

NASCIMENTO, M. C.; SOARES, V. P.; RIBEIRO, C. A. A. S; SILVA, E. Uso do geoprocessamento na identificação de conflito de uso da terra em áreas de preservação permanente na bacia hidrográfica do rio Alegre, Espírito Santo. In: **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, 2005, p. 207-220. Disponível em: <<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/cienciaflorestal/article/viewFile/1838/1227>>. Acesso em 31 mar. 2011.

NATIONAL IMAGERY AND MAPPING AGENCY (NIMA). **The compendium of controlled extensions (CE) for the national imagery transmission format (NITF)**, v. 2.1. 2000. Disponível em: <www.gwg.nga.mil/ntb/superseded/stdi00021/stdi_00021.pdf>Acesso em 23 jun 2011.

OKSANEN, J. **Digital elevation model error in terrain analysis**. 2006. 51 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciência, Universidade de Helsinki, Helsinki, 2006. Disponível em: <<http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/mat/maant/vk/oksanen/digitale.pdf>>. Acesso em: 04 mar. 2011.

OSAWA, Y.; HAMAZAKI, T. Japanese spaceborne three-line-sensor and its mapping capability. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. Vol. XXXIII, Part B4. Amsterdam 2000, p. 779-782. Disponível em:

<http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part4/779_XXXIII-part4.pdf>. Acesso em: 10 out. 2010.

PAPARODITIS, N.; POLIDORI, L. Overview of digital surface models. In: KASSER, M., EGELS, Y. (Eds). **Digital Photogrammetry**, Taylor & Francis, 2002, Chapter 3, p. 160-164.

PAPASAIKA, H.; BALTSAVIAS, E. **Quality evaluation of DEMs**. In: International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, 9., 2010, Leicester, UK, 2010, p. 249-252.

PARADELLA, W. R.; CECARELLI, I. C. F.; LUIZ, S.; OLIVEIRA, C.G.; OKIDA, R. Geração de carta topográfica com estéreo-pares fine do RADARSAT-1 e dados ETM+ LANDSAT 7 em ambiente de relevo montanhoso na região amazônica (Serra dos Carajás, Pará). In: **Revista Brasileira de Geociências**, Volume 35, 2005, p. 323-332.

PCI GEOMATICS. **Geomatica OrthoEngine 10.1.4 -User Guide**, 2008.

PCI GEOMATICS. **Orthorectifying ALOS PRISM data rigorous and RPC modeling**. In: Geomatica OrthoEngine v10.2 - 2009.

PENG, W.; PILOUK, M.; TEMPFLI, K. Generalizing relief representation using digital contours. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Congress, 18., 1996, Vienna, Austria. **Proceedings...** 1996, p. 649-654. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part4/649_XXXI-part4.pdf>. Acesso em 31 mar.2011.

PEREIRA, K. D. **Apostila do curso GPS**. Rio de Janeiro: IBGE/Coordenação de Geodésia da Diretoria de Geociências, 2002. 79 p.

PETRIE, G. Spaceborne digital imaging sensors and systems. In: LI, Z., CHEN, J., BALTSAVIAS, E. (Eds.). **Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information: 2008 ISPRS Congress Book**. ISPRS Book Series, CRC Press, 2008, v.7, Chapter 3, p. 29-43.

PETRIE G.; KENNIE, T. J. M. Terrain modelling in surveying and civil engineering. In: **Computer Aided Design**, Butterworth & Co Ltd., v.19, n.4, p. 171-187, 1987. Disponível em: <http://web2.ges.gla.ac.uk/~gpetrie/Petrie_Kennie_Terrain_Modelling_C-A-Design_1987.pdf>. Acesso em 23 out.2009.

POLI, D. **Modelling of spaceborne linear array sensors**. 2005. 205 f. Tese de Doutorado em Ciências Técnicas. Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, Zurique, 2005. Disponível em: <http://webfarm102b.ethz.ch/berichte/Blaue_Berichte_PDF/85.pdf>. Acesso em 04 mar. 2011.

POLI, D.; LI, Z.; GRUEN, A. SPOT-5/HRS stereo images orientation and automated DSM generation. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Proceedings...**Istanbul: ISPRS, 2004. p. 421-432. Disponível em:

<<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm1/papers/77.pdf>>. Acesso em: 02 fev 2011

QIMING, Z.; LEES, B.; GUO-AN, T. Advances in digital terrain analysis: the TADTM initiative. In: QIMING ZHOU; BRIAN LEES, GUO-AN TANG (Eds.). **Advances in Digital Terrain Analysis**, Springer, 2008, Introduction, p. 2-10.

RADHADEVI, P. V.; RAMACHANDRAN, R.; MURALIMOHAN, A. S. R. K. V. Restitution of IRS-1C PAN data using an orbit attitude model and minimum control. **ISPRS Journal of Photogrammetry and RemoteSensing**, 1998, 53(5): 262–271.

RAMIREZ, J. R; ALI, T. **Progress in metrics development to measure positional accuracy of spatial data**. International Cartographic Conference (ICC), 21., Durban, South Africa, 2003, p.1763-1772. Disponível em: <http://icaci.org/documents/ICC_proceedings/ICC2003/Papers/221.pdf>. Acesso em 03 mai. 2011.

REES, W. G. **Assessment of ASTER global digital elevation model data for arctic research**. In: International Circumpolar Remote Sensing Symposium, 11., 2010, Cambridge, United Kingdom, Oral Presentations. Disponível em: <<http://alaska.usgs.gov/science/geography/CRSS2010/presentations/DEMPaper.pdf>>. Acesso em 02 fev. 2011.

REMOTE SENSING TECHNOLOGY CENTER OF JAPAN (RESTEC). **The geometric accuracy evaluation results of RPC (Ver.1.0)**. In: Products & Services. Derivative –work products/service. 2007. Disponível em: <http://www.alos-restec.jp/pdf/RPC_ver10result_e.pdf>. Acesso em 11 mar. 2011.

REMOTE SENSING TECHNOLOGY CENTER OF JAPAN (RESTEC). **ALOS data: products and services. v.4, Nov.. 2008a**. Disponível em: <<http://www.alos-restec.jp/pdf/alosdata.pdf>>. Acesso em 01 mar. 2011.

REMOTE SENSING TECHNOLOGY CENTER OF JAPAN (RESTEC). **The geometric accuracy evaluation results of RPC (Ver.1.4)**. 2008b. Disponível em: <http://www.alos-restec.jp/pdf/RPC_ver14result_e.pdf>. Acesso em 01 mar. 2011.

REMOTE SENSING TECHNOLOGY CENTER OF JAPAN (RESTEC). **The geometric accuracy evaluation results of RPC (Ver.1.5)**. In: Products & Services. Derivative –work products/service. 2009. Disponível em: <http://www.alos-restec.jp/pdf/RPC_ver15result_e.pdf>. Acesso em 01 mar. 2011.

REMOTE SENSING TECHNOLOGY CENTER OF JAPAN (RESTEC). **Derivative-work products: ALOS/data**. 2011. Disponível em: <<http://www.alos-restec.jp/en/staticpages/index.php/products-additional-value>>. Acesso em 25 out. 2011.

SABINS, F.F. **Remote sensing: principles and interpretation**. 2nd ed. New York; W. H. Freeman and Company, 1987, 449 p.

SANTOS, A. P. **GEOPEC – Software para Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais**, v. 2.1, 2011. Disponível em: <<http://afonsopsantos.blogspot.com/>>. Acesso

em 10 jun. 2011.

SANTOS, D. R.; TOMMASELLI, A. M. G. Extração semi-automática de edificações com análise do MNE. In: **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 8, n. 1, p.25-45, 2002. Disponível em:

<<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/view/1412/1166>>. Acesso em 07 mar. 2011.

SANTOS, N. T. **Notas de aula**: Estatística Espacial Aplicada. Departamento de Estatística, Universidade Federal de Viçosa, 2009.

SCHENK, T. **Digital photogrammetry**. The Ohio State University: TerraScience, 1999. v.1.

SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). **Definição**. 2010. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/index.php?id=52>>. Acesso em 27 abr. 2011.

SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). **Realizaciones**. 2011a. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/index.php?id=53>>. Acesso em 27 abr. 2011.

SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). **Home**. 2011b. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/index.php?id=15>>. Acesso em 27 abr. 2011.

SMITH, M. J., **Statistical analysis**: a comprehensive handbook of statistical concepts, techniques and software tools. University College London. 2010. 46 p. Disponível em: <<http://www.statsref.com/StatsRefExtract.pdf>>. Acesso em 03 mai. 2011.

SMITH, M. J.; GOODCHILD, M. F.; LONGLEY, P. A. **Geospatial analysis**: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools. 3th ed. The Winchelsea Press, London, 2009, 560 p.

SOUZA, E. M. F. R.; CRUZ, C. B. M.; SILVA, R. B.; CARVALHO, I. H. C. Análise de MDE Radarsat 1 em área de relevo misto no entorno da Baía de Guanabara/RJ: planimetria, altimetria, declividade e uso do solo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14., 2009, Natal. **Anais Eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7497-7504. Disponível em : <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/10.21.12.10/doc/7497-7504.pdf>>. Acesso em 12 fev.2011.

SPOT IMAGE. **SPOT satellite geometry handbook**. S-NT-73-12-SI, 2002, 76 p.

SPOT IMAGE. **SPOT-5 and HRS**: reference3D and SPOT DEMs. Apresentação feita no IBGE. 2004.

TAO, V.; HU, Y. **RFM**: an open sensor model for cross sensor mapping. ASPRS Conference, 23-28 May, Denver, USA, 2004, 9 p.

TADONO, T.; SHIMADA, M.; WATANABE, M.; HASHIMOTO, T.; IWATA, T.

Calibration and validation of PRISM onboard ALOS. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Proceedings...** ISPRS, p. 13-18, 2004. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm1/papers/3.pdf>>. Acesso em 30 mar. 2011.

TADONO T.; SHIMADA M.; MURAKAMI H.; TAKAKU J. **Calibration of PRISM and AVNIR-2 onboard ALOS "Daichi"**. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 47, 12., p. 4042-4050, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05208235>>. Acesso em 02 mar. 2011.

TAKAKU J.; TADONO T. PRISM geometric validation and DSM generation status. In: The First Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program in Kyoto, 2007, Kyoto, Japan. **Proceedings...** Kyoto: JAXA, 2007. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/conf/Proc_PIsymp2007/contents/proceedings/Optical_Sensors_Cal_Val/OCV07.pdf>. Acesso em 02 mar. 2011.

TAKAKU J.; TADONO, T. **RPC generations on PRISM/AVNIR-2 level 1B2 images**. In: ALOS PI Symposium 2009. Kailua-Kona, Hawaii, USA, 2009. Disponível em: <http://www.asf.alaska.edu/sites/www.asf.alaska.edu/pi_symp/files/documents/presentations/Takaku_J._optcalval_RPC.pdf>. Acesso em :17>. 16 abr.2011

TAKAKU, J.; TADONO, T. **RPC generations on ALOS PRISM and AVNIR-2**. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International , vol., no., 2011, p. 539-542. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6049184&tag=1>>. Acesso em 15 ago. 2011.

THALES NAVIGATION. **ProMark2 System user's guide**. Califórnia, 2004.

TOMMASELLI, A. M G; HASEGAWA, J. K; GALO, M. Modernas tecnologias de aquisição de imagens em fotogrametria. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba - PR, v. 6, n. 1, p. 49-64, 2000.

TOMMASELLI, A. M. G.; MEDEIROS, N. G. Determination of the indirect orientation of orbital images using control straight lines. In: **The Photogrammetric Record**, v. 25(130), p.159–179, June 2010. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1477-9730.2010.00572.x/pdf>>. Acesso em 28 fev. 2011.

TONOLO, G. F.; POLI, D. **Georeferencing of EROS-A1 high resolution images with rigorous and rational function model**. In: ISPRS, 2003, Hannover. Workshop High resolution mapping from space, Hannover: ISPRS, 2003. Disponível em: <<http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/tonolo.pdf>>. Acesso em 04 abr.2011.

TORGE, W. **Geodesy**. 3th ed. Germany: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 2001. 416 p.

TOUTIN, T. Multisource data fusion with an integrated and unified geometric modeling. **EARSeL Journal Advances in Remote Sensing**, v. 4, n. 2, p. 118-129, 1995.

TOUTIN, T. Elevation modelling from satellite visible and infrared (VIR) data: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 6, p. 1097-1125, 2001.

TOUTIN, T. Error tracking in Ikonos geometric processing using a 3D parametric modeling. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 69, n. 1, p. 43-51, 2003.

TOUTIN, T. Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: Spot-5, Eros-A, Ikonos-II, and QuickBird. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 10, p. 2121-2129, 2004a.

TOUTIN, T. Review article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1893-1924, 2004b.

TOUTIN, T. Comparison of 3D physical and empirical models for generating DSMs from stereo HR images. In: **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Vol. 72, n. 5, May 2006, pp. 597-604. Disponível em: <http://www.asprs.org/publications/pers/2006journal/may/2006_may_597-604.pdf>. Acesso em 07 mar.2011.

TOZ, G.; ERDOGAN, M. DEM (digital elevation model) production and accuracy modeling of DEMs from 1:35.000 scale aerial photographs. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, 21., 2008, Beijing, China. **Proceedings...Beijing: ISPRS**, 2008. p. 775-780. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/133.pdf>. Acesso em 02 fev 11.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Map accuracy standards**. 1999. Disponível em: <<http://egsc.usgs.gov/isb/pubs/factsheets/fs17199.html#US>>. Acesso em 09 mai. 2011.

WILSON, J. P.; MITASOVA H.; WRIGHT D. J. Water Resource Applications of Geographic Information Systems. In: **URISA Journal**, v.12, n.2, 2000, p. 61-79. Disponível em: <<http://www.urisa.org/files/WilsonVol12No2-5.pdf>>. Acesso em 29 mar. 2011.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of photogrammetry with applications in GIS**. 3th ed. U.S.A: The McGraw-Hill Companies, 2004. 607 p.

WONG, D.W.S.; LEE, J. **Statistical analysis of geographic information with ArcView GIS and ArcGIS**. Editora John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2005. 464 p.

XU, J. Z. **The rational function model in photogrammetric mapping: methods and accuracies**. 2004. 64 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Ciências da Terra e

Espaço & Engenharia, Universidade York, Ontario, Canadá, 2004. Disponível em: <<http://www.geoiict.yorku.ca/test-page/papers/past-researchers-papers/Final-report-Jeff.pdf>>. Acesso em 11 mar. 2011.

ZALOTI-JUNIOR, O.D.; FREITAS, C.C.; SANT'ANNA, S.J.S.; ANDRADE, R.A.M. Avaliação do modelo digital do terreno extraído de dados do SRTM – uma abordagem baseada na declividade, aspecto e uso/cobertura do solo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis. **Anais Eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 5043-5050. Disponível em: <<http://martte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2006/11.15.18.43/doc/5043-5050.pdf>>. Acesso em 30 mar. 2011.

APÊNDICE A

Os documentos que integram o Apêndice A estão organizados no CD anexado ao volume da dissertação:

Apêndice A.1: Relatórios do processamento GPS dos pontos de controle estáticos;

Apêndice A.2: Memoriais descritivos dos pontos de controle estáticos.

ANEXO A

Os documentos que integram o Anexo A estão organizados no CD anexado ao volume da dissertação.

Anexo A.1: Metadados das imagens PRISM/ALOS;

Anexo A.2: Dados gerados em outras pesquisas;

Anexo A.3: Memoriais descritivos das estações geodésicas do IBGE.