



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-13168-TDI/1027

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO GERADOS A
PARTIR DE SENSORES REMOTOS ORBITAIS ÓPTICO (ASTER) E RADAR
(RADARSAT-1, SRTM): UM ESTUDO PARA A REGIÃO DA SERRA DOS
CARAJÁS (PA)**

Cleber Gonzáles de Oliveira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. Waldir Renato Paradella, aprovada em 28 de fevereiro de 2005.

528.711.7 (811.5)

OLIVEIRA, C. G.

Avaliação de modelos digitais de elevação gerados a partir de sensores remotos orbitais óptico (ASTER) e radar (RADARSAT-1, SRTM): um estudo para a região da Serra dos Carajás (PA) / C. G. Oliveira. – São José dos Campos: INPE, 2005.

184p. – (INPE-13168-TDI/1027).

1. Modelos digitais de elevação. 2. Radarsat-1.
3. Acurácia. 4. Imagens estereoscópicas. 5. Erro médio quadrático. I. Título.

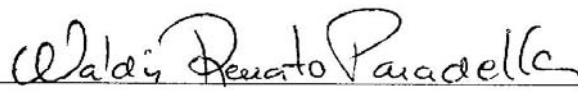
Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestrado em Sensoriamento Remoto

Dr. Athos Ribeiro dos Santos



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Waldir Renato Paradella



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. José Cláudio Mura



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Paulo de Oliveira Camargo



Convidado(a) / UNESP/PP / Presidente Prudente - SP

Aluno (a): Cleber Gonzáles de Oliveira

São José dos Campos, 28 de fevereiro de 2005

*Assim como nem todos podem habitar o mesmo sítio,
nem todos conseguem partilhar as mesmas idéias.*

André Luis.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao Dr. Waldir Renato Paradella pelo conhecimento compartilhado, orientação e apoio na realização deste trabalho.

À Sra. Izabel Cecarelli, Diretora Presidente da empresa Geoambiente Sensoriamento Remoto Ltda, pelo apoio e crédito.

Aos pesquisadores do INPE pelo conhecimento compartilhado.

À minha esposa Maria Aparecida Thomazini, pelo amor, compreensão e incentivo.

À minha irmã Magaly Gonzales de Oliveira pelo apoio e incentivo.

Aos amigos Fábria, Orlando, Silvia, Veraldo, Eliane e Paulo pela ajuda e suporte.

À Dra. Rosana Okida pelo apoio.

Ao Sr. Bob Walker da empresa Geoimage, Austrália, pelo fornecimento da imagem ASTER.

Aos colegas que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

RESUMO

Grandes áreas do território Brasileiro ainda apresentam falta de informação planialtimétrica nas escalas de semidetalhe (1:100.000) e de detalhe (1:50.000), principalmente nas regiões Norte e Nordeste. Além disso, quando disponíveis as cartas topográficas estão desatualizadas e com uma pobre qualidade altimétrica. Modelos Digitais de Elevação (DEMs) são dados primários para a produção de mapeamento topográfico, e o uso de dados de sensores remotos orbitais para a geração de DEM é uma alternativa promissora para suprir a ausência de informações do terreno. Neste estudo, vários DEMs gerados de sensores remotos óptico (ASTER) e radar (RADARSAT-1, SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*), baseados em metodologias distintas (estereoscopia e interferometria) foram avaliados para fins de mapeamento topográfico. Como local de teste, uma área de 9.000 quilômetros quadrados foi selecionada na Província Mineral de Carajás, um terreno montanhoso localizado na borda mais oriental da região Amazônica Brasileira. A modelagem geométrica para a geração dos DEMs foi baseada no software OESE (PCI Geomatics). Dados topográficos precisos de campo obtidos com o GPS (*Global Positioning System*) no método estático e cinemático foram usados como GCPs (Ground Control Points) para a modelagem dos DEMs e ortorretificação de dado óptico auxiliar (ETM+ Landsat), e como ICP (Independent Check Points), para o cálculo da precisão e acurácia altimétrica dos produtos. Além disso, uma análise comparativa foi realizada considerando os requisitos altimétricos para o mapeamento topográfico nacional baseado no Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). A investigação mostrou que as precisões dos DEMs derivados dos dados ASTER e SRTM, que foram gerados e avaliados com um conjunto bem distribuído de GCPs e ICPs, respectivamente, atenderam as exigências para cartas 1:100.000 (classe A), como requerido pelo PEC. As informações altimétricas fornecidas pelo RADARSAT-1 Fine e Standard atenderam apenas aos requerimentos do PEC para cartas 1:100.000 classe B e C, mas estes resultados foram afetados por uma pobre distribuição em área e pequena quantidade de GCPs e ICPs, respectivamente, disponíveis para a geração e avaliação da precisão dos DEMs.

EVALUATION OF DIGITAL ELEVATION MODELS GENERATED FROM OPTICAL (ASTER) AND RADAR (RADARSAT-1, SRTM) ORBITAL REMOTE SENSORS: A STUDY FOR THE AREA OF THE MOUNTAIN OF CARAJÁS (PA)

ABSTRACT

Large areas within the Brazilian territory still present a lack of planialtimetric information at both semi-detailed (1:100,000) and detailed (1:50,000) map scales, mainly at the Northern and Northeast regions. In addition, topographic maps when available are outdated and with poor altimetric quality. Digital Elevation Models (DEMs) are primitive inputs for topographic mapping production, and the usage of orbital remote sensing data for DEM generation is a promising alternative to overcome this overall absence of terrain information. In this study, several DEMs generated from optical (ASTER) and radar (RADARSAT-1, Shuttle Radar Topography Mission-SRTM) remote sensing and based on distinct methodology (stereoscopy and interferometry) were generated and evaluated for topographic mapping purposes. As a test-site, an area of 9,000 square kilometers was selected in the Carajás Mineral Province, a mountainous terrain located on the eastern most border of the Brazilian Amazon region. The geometric modeling for the DEMs extractions was based on the OESE software (PCI Geomatics). Precise topographic field data from static and kinematic GPS (Global Positioning System) was used as GCPs (Ground Control Points) for the modeling of the DEMs and ortho-rectification of ancillary optical data (ETM+ Landsat), and as ICP (Independent Check Points), for the calculation of altimetric accuracies of the products. In addition, a comparative analysis was also carried out considering the altimetric requirements for national topographic mapping based on the Brazilian Standard for Cartographic Accuracy (PEC – *Padrão de Exatidão Cartográfica*). The investigation has shown that the DEMs accuracies derived from ASTER and SRTM data, which were generated and evaluated with a well-distributed set of GCPs and ICPs, respectively, met the requirements for 1:100,000-map (class A) as requested by PEC. The altimetric information provided by Fine and Standard RADARSAT-1 has only fulfilled the PEC requirements for 1:100,000-map classes B and C, but these results were affected by a poor area distribution and small numbers of GCPs and ICPs, respectively, available for the DEMs generation and accuracy evaluation.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	27
1.1 Objetivo Geral	29
1.2 Objetivos Específicos	29
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1 Métodos de Geração de DEM	31
2.1.1 Estereoscopia	32
2.2 O Sensor ASTER	39
2.3 O Satélite RADARSAT-1	46
2.4 SRTM - Shuttle Radar Topography Mission	57
2.5 Controle de Qualidade de Produtos Cartográficos	60
2.6 Análise de Tendência e Precisão	64
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS	67
3.1 Área de Estudo	68
3.1.1 Localização	68
3.2 Material	70
3.3 Trabalho de Campo	72
3.4 Geração dos Modelos Digitais de Elevação Absolutos	77
3.4.1 Geração de Modelos Digitais de Elevação ASTER	78
3.4.2 Geração de Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1	82
3.4.2.1 Geração dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 Standard	82
3.4.2.2 Geração dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 Fine	87
3.4.2.3 Geração de 40 DEMs Fine pela modelagem Toutin	93
3.4.2.4 Geração de 40 DEMs Fine pela modelagem RADARSAT Specific	94
3.5 Seleção de Pontos de Verificação para Controle de Qualidade dos Modelos Digitais de Elevação	95
3.5.1 Seleção dos pontos de verificação	95
3.5.2 Cálculo do Erro Médio Quadrático dos Modelos Digitais de Elevação	97
3.5.3 Análise de tendência e precisão dos Modelos Digitais de Elevação	97
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
4.1 Geração Dos DEMs ASTER	99
4.1.1 Pontos de controle para as imagens ASTER	99
4.1.2 Resíduos estereoscópicos dos pontos de controle das imagens ASTER	101
4.1.3 Imagens epipolares ASTER	102
4.1.4 Resultados da geração e geocodificação dos DEMs ASTER	103

4.2 Geração dos DEMs RADARSAT Standard	107
4.2.1 Pontos de controle para as imagens RADARSAT Standard	107
4.2.2 Resíduos estereoscópicos dos pontos de controle das imagens RADARSAT Standard	109
4.2.3 Imagens epipolares RADARSAT Standard	110
4.2.4 Resultados da geração e geocodificação dos DEMs RADARSAT Standard.....	111
4.3 Geração dos DEMs RADARSAT Fine	114
4.3.1 Geração de DEMs RADARSAT Fine a partir de 13 GCPs	114
4.3.1.1 Localização dos 13 GCPs das imagens RADARSAT Fine.....	114
4.3.1.2 Resíduos estereoscópicos dos 13 GCPs das imagens RADARSAT Fine	116
4.3.1.3 Imagens epipolares RADARSAT Fine geradas a partir de 13 GCPs.....	117
4.3.1.4 Resultados da geração e geocodificação dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 13 GCPs	119
4.3.2 Geração de DEMs RADARSAT Fine a partir de 20 GCPs	121
4.3.2.1 Ortorectificação da imagem ETM+ Landsat 7.....	121
4.3.2.2 Localização dos 20 GCPs das imagens RADARSAT Fine.....	122
4.3.2.3 Resíduos estereoscópicos dos 20 GCPs das imagens RADARSAT Fine	123
4.3.2.4 Imagens epipolares RADARSAT Fine geradas a partir de 20 GCPs.....	124
4.3.2.5 Resultados da geração e geocodificação dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs	126
4.4 Comparação entre Curvas-de-Nível Geradas a Partir dos DEMs ASTER, RADARSAT Standard e Fine, das Cartas Topográficas e SRTM.....	128
4.5 Controle de Qualidade dos Modelos Digitais de Elevação	135
4.5.1 Distribuição dos pontos de verificação para o controle de qualidade dos DEMs ASTER	135
4.5.2 Distribuição dos pontos de verificação para o controle de qualidade dos DEMs RADARSAT Standard	137
4.5.3 Distribuição dos pontos de verificação para o controle de qualidade dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 13 GCPs	139
4.5.4 Distribuição dos pontos de verificação para o controle de qualidade dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs	141
4.5.5 Distribuição dos pontos de verificação para o controle de qualidade do DEM das cartas topográficas 1:100.000 da área de estudo.....	142
4.5.6 Distribuição dos pontos de verificação para o controle de qualidade dos DEMs SRTM.....	143
4.5.7 Cálculo do Erro Médio Quadrático dos Modelos Digitais de Elevação.....	144
4.5.7.1 Erro Médio Quadrático dos DEMs ASTER	144
4.5.7.2 Erro Médio Quadrático dos DEMs RADARSAT Standard	144
4.5.7.3 Erro Médio Quadrático dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 13 GCPs.....	145
4.5.7.4 Erro Médio Quadrático dos 40 DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs.....	147
4.5.7.5 Erro Médio Quadrático dos DEMs das Cartas Topográficas e SRTM.....	151
4.5.8 Análise de tendência e precisão dos Modelos Digitais de Elevação.....	152
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	157

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	167
APÊNDICE A	169
APÊNDICE B.....	177

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Possíveis combinações de imagens estereoscópicas de radar.	34
2.2 – Comparação de imagens brutas com imagens epipolares	35
2.3 – Comparação entre imagens de radar nas projeções <i>Slant Range</i> (A) e <i>Ground Range</i> (B).....	37
2.4 – Efeitos geométricos das imagens de radar.....	38
2.5 – Configuração em estéreo do ASTER.	41
2.6 – Os três subsistemas e respectivas aplicações dos dados ASTER.....	46
2.7 – Configuração estereoscópica para imagens RADARSAT-1 de mesmo lado.....	49
2.8 – Modos de aquisição, configuração de visada e ângulos de incidência das imagens RADARSAT-1.....	50
2.9 – Posição das antenas primárias e secundárias da SRTM.....	58
2.10 – Geometria de aquisição dos dados da SRTM.....	59
3.1 – Esquema das etapas de trabalho.....	67
3.2 – Localização da área de estudo	68
3.3 – Imagem ETM+ Landsat 7 correspondente à região da Serra dos Carajás, na composição colorida 5R4G3B.....	69
3.4 – Imagens ASTER, Landsat, RADARSAT-1, DEMs SRTM, cartas topográficas e pontos GPS sobre a área de estudo.....	71
3.5 – Levantamento de pontos GPS em clareira notável sobre imagens (foto superior) e intersecção de estrada (foto inferior).....	75
3.6 – Levantamento de pontos de controle no Rio Itacaiunas (foto superior) e RN sobre ponte do Rio Parauapebas (foto inferior).....	76
3.7 – Fluxo para a geração e avaliação dos DEMs ASTER.....	78
3.8 – Composição colorida 1R3G2B ASTER.....	79
3.9 – Imagens 3N (esquerda) e 3B (direita) sem efeito de <i>strips</i>	80
3.10 – Fluxograma para a geração e avaliação dos DEMs RADARSAT Standard.....	83
3.11 – Imagem RADARSAT-1 Standard 5 (S5).....	84
3.12 – Imagem RADARSAT-1 Standard 7 (S7).....	84
3.13 – Fluxograma para geração e avaliação dos DEMs RADARSAT Fine.....	87
3.14 – Imagem RADARSAT-1 Fine 2 (F2).....	88
3.15 – Imagem RADARSAT-1 Fine 5 (F5).....	88
3.16 – Imagem Fine 5 sem filtragem (A) e com filtragens <i>Enhanced Frost</i> 3×3 (B), 5×5 (C), 7×7 (D), 9×9 (E) e 11×11 (F).....	90
3.17 – Distribuição dos GCPs adquiridos no modo estático (pontos na cor vermelha) e cinemático (conjunto de pontos na cor preta) sobre estéreo-par F5 (verde)/F2 (azul).....	91
4.1 – Localização do GCP 20 sobre a imagem ASTER 3N.....	99
4.2 – Distribuição dos 20 GCPs (cor vermelha) e 15 TPs (cor azul) sobre imagens ASTER 3N e 3B.....	100
4.3 – Imagem epipolar ASTER 3N gerada sobre imagem sem filtragem.....	102
4.4 – Imagem epipolar ASTER 3B gerada sobre imagem sem filtragem.....	102
4.5 – DEM ASTER gerado a partir de imagens 3N e 3B brutas (sem filtragem),	

com 20 pontos de controle (GCPs) e 15 pontos de amarração (TPs).....	103
4.6 – DEM ASTER gerado a partir de imagens 3N e 3B com filtro mediana 3×3, com 20 pontos de controle (GCPs) e 15 pontos de amarração (TPs).....	104
4.7 – DEM ASTER gerado a partir de imagens 3N e 3B com filtro mediana 5×5, com 20 pontos de controle (GCPs) e 15 pontos de amarração (TPs).....	105
4.8 – Detalhes dos DEMs ASTER gerados a partir das imagens 3N e 3B sem filtragem (A), com filtragem mediana 3×3 (B) e 5×5 (C).....	106
4.9 – Localização do GCP 12 sobre imagem S5.	107
4.10 – Distribuição dos 17 GCPs (cor vermelha) e 13 TP's (cor azul) sobre imagens S5 e S7.....	108
4.11 – Imagem epipolar S5 gerada sobre imagem sem filtragem.	110
4.12 – Imagem epipolar S7 gerada sobre imagem sem filtragem.	110
4.13 – DEM Standard gerado a partir de imagens S5 e S7 sem filtragem.	111
4.14 – DEM Standard gerado a partir de imagens S5 e S7 com filtragem Enhanced Frost 5×5.....	112
4.15 – Detalhe dos DEMs Standard gerados a partir de imagens sem filtragem (A) e com filtragem <i>Enhanced Frost</i> 5×5.....	113
4.16 – Distribuição dos 4 pontos de controle adquiridos no modo estático (pontos na cor vermelha) e 9 pontos no modo cinemático (pontos na cor azul) sobre estéreo- par F5/F2.	114
4.17 – Localização de um GCP sobre a imagem F5.....	115
4.18 – Distribuição dos 13 GCPs (cor vermelha) e 22 TP's (cor azul) sobre imagens F2 e F5.....	115
4.19 – Imagem epipolar gerada a partir de 13 GCPs sobre a imagem F2 (direita) sem filtragem e modelagem <i>Toutin</i>	117
4.20 – Imagem epipolar gerada a partir de 13 GCPs sobre a imagem F5 (esquerda) sem filtragem e modelagem <i>Toutin</i>	117
4.21 – Imagem epipolar gerada a partir de 13 GCPs sobre a imagem F2 (direita) sem filtragem e modelagem <i>RADARSAT Specific</i>	118
4.22 – Imagem epipolar gerada a partir de 13 GCPs sobre a imagem F5 (esquerda) sem filtragem e modelagem <i>RADARSAT Specific</i>	118
4.23 – DEM Fine gerado a partir de 13 GCPs e modelagem <i>Toutin</i>	119
4.24 – DEM Fine gerado a partir de 13 GCPs e modelagem <i>RADARSAT Specific</i>	120
4.25 – Distribuição dos 16 GCPs obtidos pelo método estático (cor verde) e 12 GCPs obtidos pelo método cinemático (cor vermelha) utilizados na ortorretificação da imagem pancromática do satélite Landsat 7.	121
4.26 – Distribuição dos 13 GCPs (triângulos na cor vermelha) coletados em campo com equipamento GPS e 7 GCPs (quadrados na cor verde) coletados a partir de imagem ETM+ Landsat ortorretificada.	122
4.27 – Imagem epipolar gerada a partir de 20 GCPs sobre a imagem F2 (direita) sem filtragem e modelagem <i>Toutin</i>	124
4.28 – Imagem epipolar gerada a partir de 20 GCPs sobre a imagem F5 (esquerda) sem filtragem e modelagem <i>Toutin</i>	124
4.29 – Imagem epipolar gerada a partir de 20 GCPs sobre a imagem F2 (direita) sem filtragem e modelagem <i>RADARSAT Specific</i>	125
4.30 – Imagem epipolar gerada a partir de 20 GCPs sobre a imagem F5 (esquerda)	

sem filtragem e modelagem <i>RADARSAT Specific</i>	125
4.31 – DEM RADARSAT Fine gerado a partir de 20 GCPs sobre imagens F2 e F5 sem filtragem utilizando a modelagem <i>Toutin</i>	126
4.32 – DEM RADARSAT Fine gerado a partir de 20 GCPs sobre imagens F2 e F5 sem filtragem utilizando a modelagem <i>RADARSAT Specific</i>	127
4.33 – Detalhe das curvas-de-nível geradas a partir do DEM ASTER gerado a partir das imagens 3N e 3B sem filtragem.....	129
4.34 – Detalhe das curvas-de-nível geradas a partir do DEM ASTER gerado a partir de imagens 3N e 3B com filtragem mediana 3×3.....	130
4.35 – Detalhe das curvas-de-nível geradas a partir do DEM ASTER gerado a partir de imagens 3N e 3B com filtragem mediana 5×5.....	131
4.36 – Detalhes dos DEMs RADARSAT Standard gerados a partir das imagens S5 e S7 sem filtragem (A) e com filtragem <i>Enhanced Frost</i> 5×5 (B).....	132
4.37 – Detalhes dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir das imagens F2 e F5 sem filtragem nas modelagens <i>RADARSAT Specific</i> (A) e <i>Toutin</i> (B) com 13 GCPs.....	133
4.38 – Detalhes das curvas de nível geradas sobre os DEMs das Cartas Topográficas (A) e da SRTM (B).....	134
4.39 – Distribuição dos 20 ICPs selecionados sobre os DEMs gerados a partir das imagens ASTER.....	135
4.40 – Distribuição dos 28 ICPs selecionados sobre os DEMs gerados a partir das imagens ASTER.....	136
4.41 – Distribuição dos 20 ICPs selecionados sobre os DEMs gerados a partir das imagens RADARSAT Standard 5 e 7.....	137
4.42 – Distribuição dos 28 ICPs selecionados sobre os DEMs gerados a partir das imagens RADARSAT Standard 5 e 7.....	138
4.43 – Distribuição de 20 (magenta) e 28 (vermelho) ICPs selecionados sobre DEM gerado a partir das imagens RADARSAT Fine 2 e 5 na modelagem <i>RADARSAT Specific</i> , com 13 GCPs.....	139
4.44 – Distribuição de 20 (magenta) e 28 (vermelho) ICPs selecionados sobre DEM gerado a partir das imagens RADARSAT Fine 2 e 5 na modelagem <i>Toutin</i> , com 13 GCPs.....	140
4.45 – Distribuição de 20 (A) e 28 (B) ICPs selecionados sobre os DEMs gerados a partir das imagens RADARSAT Fine 2 e 5 nas modelagens <i>Toutin</i> (1) e <i>RADARSAT Specific</i> (2).....	141
4.46 – Distribuição dos 20 (A) e 28 (B) ICPs sobre DEM gerado a partir das cartas topográficas em escala 1:100.000 da área de estudo.....	142
4.47 – Distribuição dos 20 (A) e 28 (B) ICPs sobre mosaico dos DEMs SRTM.....	143
4.48 – Gráfico dos RMSE dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs e modelagem <i>Toutin</i>	150
4.49 – Gráfico dos RMSE dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs e modelagem <i>RADARSAT Specific</i>	151

LISTA DE TABELAS

2.1 – Parâmetros Orbitais do Satélite TERRA	39
2.2 – Características do Sensor ASTER	40
2.3 – Precisão de DEMs de Três Localidades no Japão	42
2.4 – Resultados de DEMs ASTER Gerados para Quatro Localidades	43
2.5 – Resultados Alcançados na Geração de DEM ASTER de Uma Área na Columbia Britânica, Canadá.....	44
2.6 – Características dos Modos do RADARSAT-1	48
2.7 – Precisão de DEMS Gerados com Imagens RADARSAT-1	52
2.8 – Disparidade Geométrica e Radiométrica de Pares de Imagens RADARSAT-1 em Estéreo	53
2.9 – Resultados da Geração de DEMs RADARSAT FINE Absoluto e Relativo para Relevo Plano.....	55
2.10 – Resultados da Geração dos DEMs RADARSAT FINE Absoluto e Relativo para Relevo Montanhoso	56
2.11 – Valores do Padrão de Exatidão Cartográfica.....	62
2.12 – Tolerâncias Altimétricas dos Pontos de Verificação Considerando 1/3 do Erro Padrão	63
3.1 – Pontos de Controle Coletados em Campo com Altitudes Ortométricas Calculadas pelo MAPGEO92.....	73
3.2 – Características das Imagens RADARSAT-1 Utilizadas na Geração dos Modelos Digitais de Elevação	82
3.3 – Conteúdos dos 40 Canais de Cada Arquivo Correspondente as Imagem FINE 2 E FINE 5	89
4.1 – Resíduos Planimétrico e Altimétrico dos 20 Pontos de Controle Utilizados para o par Estereoscópico 3N/3B ASTER.....	101
4.2 – Resíduos Planimétrico e Altimétrico dos 17 Pontos de Controle Utilizados para o par Estereoscópico S5/S7	109
4.3 – Resíduos dos 13 Pontos de Controle Utilizados para o par Estereoscópico F5/F2	116
4.4 – Resíduos dos 20 Pontos de Controle Utilizados para o par Estereoscópico F5/F2 na Modelagem TOUTIN.....	123
4.5 – Estatística dos Modelos Digitais de Elevação ASTER	144
4.6 – Estatística dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 Standard	145
4.7 – Estatística dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 FINE Gerados a Partir de 13 GCPS e Avaliados com 20 ICPS	146
4.8 – Estatística dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 FINE Gerados a Partir de 13 GCPS e Avaliados com 28 ICPS	146
4.9 – Estatística dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 FINE Gerados na Modelagem TOUTIN	147
4.10 – Estatística dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 FINE Gerados na Modelagem RADARSAT Specific.....	148
4.11 – Estatística do Modelo Digital de Elevação das Cartas Topográficas e da	

SRTM – UTM/SAD69 Zona 22.....	151
4.12 – Análise de Tendência e Precisão dos Modelos Digitais de Elevação ASTER para Escala 1:100.000.....	152
4.13 – Análise de Tendência e Precisão dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT standard.....	153
4.14 – Análise de Tendência e Precisão dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT FINE Gerados a Partir de 13 Pontos de Controle.....	154
4.15 – Análise de Tendência e Precisão dos Modelos Digitais de Elevação das Cartas Topográficas e SRTM.....	155

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de declividade do terreno
β	Ângulo de depressão
θ	Ângulo de Incidência
λ	Comprimento de onda

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASI	-	Agenzia Spaziale Italiana
ASTER	-	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CCRS	-	Canada Centre for Remote Sensing
CVRD	-	Companhia Vale do Rio Doce
DEM	-	Digital Elevation Model
DGI	-	Divisão de Geração de Imagens
DLR	-	Deutschen Zentrum für Luft - und Raumfahrt
FAPESP	-	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
GPS	-	Global Positioning System
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LE	-	Linear Error
MAPGEO92	-	Mapa Geoidal do Brasil 1992
NASA	-	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	-	National Oceanic and Atmospheric Administration
PIPE	-	Programa de Inovação Tecnológica em Pequenas Empresas
RBMC	-	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
SAD 69	-	South America Datum 1969
SAR	-	Synthetic Aperture Radar
VPR	-	Vertical Parallax Ratio
USGS	-	Levantamento Geológico Americano
UTM	-	Universal Transversa de Mercator

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A Cartografia Nacional, na sua porção amazônica, apresenta uma grande área sem mapeamento nas escalas 1:100.000 e 1:250.000. Isso pode ser explicado por diversos fatores, sendo os principais a falta de investimentos do Governo Federal nos órgãos responsáveis pelo mapeamento sistemático nacional (IBGE e DSG) ao longo dos anos e os custos considerados elevados dos métodos tradicionais utilizados para a produção cartográfica por aerofotogrametria, com logística complexa e onerosa para esta região do país.

Uma alternativa para suprir a necessidade de mapeamento nas escalas 1:100.000 e 1:250.000 é a utilização de dados de sensores remotos orbitais, nas faixas do espectro óptico e de microondas. As imagens adquiridas por esses sensores possibilitam a geração de Modelos Digitais de Elevação (Digital Elevation Models – DEMs), que podem ser utilizados como fonte de dados para a geração de mapas altimétricos.

Para a região amazônica, o mapeamento por sensores ópticos é prejudicado pelas condições atmosféricas, que afetam a obtenção sistemática e a radiometria das imagens. Os sensores na faixa de microondas apresentam vantagem nesse aspecto, pois são menos suscetíveis aos fatores atmosféricos e, dependendo do comprimento de onda utilizado, esses fatores não prejudicam o imageamento.

Os métodos utilizados na aerofotogrametria convencional (câmeras aerotransportadas) têm sido aplicados à geração de DEM a partir de dados de sensores ópticos orbitais. Os modelos matemáticos são baseados nas equações de colinearidade, que integram a plataforma, o sensor, a superfície terrestre e as projeções cartográficas (Toutin, 1995; Wolf e Dewitt, 2000).

No contexto dos sensores aerotransportados, Abrams e Hook (2001) reportam que, a partir de dados estereoscópicos adquiridos no infravermelho próximo, com 15 metros de

resolução espacial, podem ser gerados DEMs com padrões de exatidão apropriados para as escalas entre 1:50.000 e 1:250.000.

Entre os sensores remotos orbitais ópticos de média e alta resolução espacial, que estão em operação com capacidade de produzir imagens estereoscópicas para a geração de DEMs, destacam-se os sensores ASTER, SPOT-5/HRS, IKONOS-2 e QUICKBIRD (Toutin e Gray, 2000a).

Com o advento dos sistemas orbitais com sensores que operam no espectro das microondas, as aplicações cartográficas foram beneficiadas, sobretudo com o uso dos dados obtidos por radares de abertura sintética ou SAR, do inglês *Synthetic Aperture Radar*.

O SAR é um dispositivo imageador em radiofrequência que fornece uma imagem bidimensional (*range, azimuth*) da realidade tridimensional. Esse imageamento é feito pela detecção da radiação retroespalhada quando o sensor ilumina a superfície, sob um campo bem definido de microondas ativas (Lewis et al, 1998; Paradella et al., 2001).

Os imageadores SAR medem propriedades elétricogeométricas do terreno, operam independentemente do Sol, possuem geometria de iluminação controlada, penetram nuvens, brumas, fumaças e chuvas (dependendo da frequência usada), e produzem imagens com resolução espacial comparável à alta resolução dos sensores ópticos (Paradella et al., 2003).

Entre os sensores orbitais que operam no espectro de microondas e que fornecem, ou forneceram, um avanço para as aplicações cartográficas com dados SAR, podem ser citados os SIRs, ERS-1, JERS-1, ERS-2, RADARSAT-1 e SRTM (Toutin e Gray, 2000a).

Conforme apresentado a seguir, no presente trabalho foram avaliados DEMs gerados a partir de imagens ASTER, RADARSAT-1 e DEMs SRTM-3 (*Shuttle Radar Topography Mission*), para verificar a viabilidade de aplicação desses produtos no enriquecimento da cartografia sistemática nacional.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os Modelos Digitais de Elevação – DEMs gerados a partir de três sensores orbitais distintos: um que opera no espectro óptico (ASTER) e dois que operam no espectro das microondas (SRTM e RADARSAT-1), face à possibilidade de uso na cartografia sistemática nacional, em especial na região amazônica.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- a) Gerar e avaliar os DEMs estereoscópicos derivados a partir das imagens 3N e 3B do sensor ASTER, com e sem aplicação de filtragens, com resolução espacial de 15 metros;
- b) Avaliar o DEM interferométrico da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponível para a comunidade internacional com resolução espacial de 3 arco-segundos (aproximadamente 90 metros);
- c) Gerar e avaliar os DEMs derivados a partir de pares estereoscópicos de imagens RADARSAT-1 Standard (S5 e S7) descendentes, com resolução espacial nominal de 25 metros, e de imagens Fine (F2 e F5) ascendentes, com resolução espacial nominal de 8 metros;

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Métodos de Geração de DEM

O DEM é uma representação digital (numérica) do relevo no formato matricial. Trata-se de uma matriz de valores de elevação de pontos regularmente distribuídos no terreno.

Um DEM é uma representação discreta de uma superfície topográfica e em algumas literaturas referem-se ao DEM como um Modelo Digital do Terreno (DTM), do Inglês *Digital Terrain Model*, ou Modelo Digital de Elevação do Terreno (DTEM), do Inglês *Digital Terrain Elevation Model* (Wolf e Dewitt, 2000).

Outra definição para DEM é apresentada por Paradella et al. (2001) como uma representação digital de uma seção da superfície, através de uma matriz de *pixels* com coordenadas planimétricas (x,y) e valor de intensidade do *pixel* correspondendo à elevação.

Um DEM pode ser produzido a partir da interpolação de curvas de nível ou de pontos cotados digitalizados a partir de documentos cartográficos existentes, e também a partir de imagens obtidas por sensores remotos, orbitais ou aerotransportados, operantes nos espectros óptico e das microondas.

A partir de pares estereoscópicos de imagens obtidas pelos sensores remotos atuantes no espectro óptico, a geração de DEM baseia-se nas equações de colinearidade e outros elementos presentes nos modelos matemáticos da aerofotogrametria tradicional, que utilizam o princípio da Estereoscopia.

A geração de DEM a partir de imagens de sensores remotos que atuam no espectro das microondas (em especial os radares imageadores), pode também utilizar o método da Estereoscopia e, ainda, outros como a Clinometria, a Interferometria e a Polarimetria (Toutin e Gray, 2000a).

A Estereoscopia permite obter dados tridimensionais, através da observação de um par de imagens planas (pares estereoscópicos) obtidas de uma mesma cena, com ângulos de incidência distintos (Santos et al., 1999). Mais detalhes são apresentados adiante.

A Clinometria é o método que utiliza a sombra e seus fenômenos na extração da informação da elevação de objetos de interesse. Em imagens na faixa das microondas, as sombras são áreas não-imageadas. Através de cálculos trigonométricos e conhecendo-se a geometria do SAR, as alturas relativas de estruturas verticais podem ser determinadas (Toutin e Gray, 2000a).

A Interferometria combina imagens SAR registradas por duas antenas posicionadas em posições diferentes ou uma mesma antena registrando a cena em tempos distintos. Utiliza a informação de diferença de fase entre medidas de *range* (distância) para pontos comuns em um par de imagens SAR, obtendo assim a informação sobre a elevação do terreno (Toutin e Gray, 2000a).

A Polarimetria de radar está relacionada com o controle das propriedades polarimétricas (comportamento da orientação do vetor campo elétrico) das ondas do radar e com a extração das propriedades dos alvos (Boerner et al., 1998). Tem sido usada com sucesso em estudos de classificação temática nos mapeamentos envolvendo recursos naturais. Os desenvolvimentos recentes de aplicações com SAR polarimétrico envolvem medidas diretas de declividade e estimativas da elevação do terreno (Toutin e Gray, 2000a).

2.1.1 Estereoscopia

A estereoscopia é um fenômeno natural que ocorre quando se observa simultaneamente duas imagens que foram tiradas da mesma cena, mas de pontos diferentes, fazendo com que cada imagem seja vista independentemente. O resultado é a percepção da profundidade, ou terceira dimensão (Paredes, 1997).

A estereoscopia, em qualquer tipo de imageamento, depende fundamentalmente de dois indicadores fotogramétricos (Santos et al., 1999):

- a paralaxe estereoscópica horizontal ou X, que busca reproduzir a disparidade binocular da visão humana, e que pode ser entendida como a aparente mudança de posição de objetos, quando vistos de diferentes lugares;
- o ângulo de interseção estereoscópica, que busca reproduzir a convergência da visão humana, é medido entre as linhas de visada do sensor em um determinado ponto no terreno, nas duas cenas do par. Em um mesmo par estereoscópico, a paralaxe e o ângulo de interseção estereoscópica são diretamente proporcionais à elevação do ponto observado.

A paralaxe de qualquer ponto, numa mesma imagem, está diretamente relacionada com a elevação do ponto e é maior para pontos em altitudes mais elevadas do que para pontos em altitudes mais baixas. A partir de medidas fotogramétricas a elevação de um ponto pode ser determinada e suas coordenadas E, N e H no terreno podem ser calculadas a partir de sua paralaxe (Wolf e Dewitt, 2000).

A visão estereoscópica tem papéis fundamentalmente diferentes nos sensores ópticos e no radar. Nos sistemas ópticos, as alterações de geometria, que resultam na paralaxe necessária à visão tridimensional, não implicam em mudanças significativas na iluminação das cenas. Por outro lado, o radar imageador tem sua própria fonte de iluminação, o que significa que, quanto maiores forem as diferenças geométricas entre as cenas do par (obtidas através de alterações da geometria de visada), maiores serão as diferenças radiométricas entre elas. Ao contrário do que acontece com sensores ópticos, no radar imageador a visão estereoscópica depende do equilíbrio entre as diferenças geométricas e as similaridades radiométricas das cenas do par (Santos et al., 1999).

Para os sensores ópticos que utilizam dispositivos de varredura para registrar a cena (*scanners*), o par de imagens estereoscópicas pode ser obtido de duas formas: em uma mesma órbita (*along-track*), em que uma imagem é obtida no nadir e outra fora do nadir, e a outra opção é a obtenção de imagens em duas diferentes órbitas (*across-track*) (Toutin e Cheng, 2001).

No caso do radar, o par de imagens estereoscópicas depende da posição do sensor e do sentido da órbita (ascendente ou descendente). As combinações possíveis são: imagens de mesmo sentido da órbita e sentidos opostos, podendo variar o ângulo de incidência das imagens (Figura 2.1).

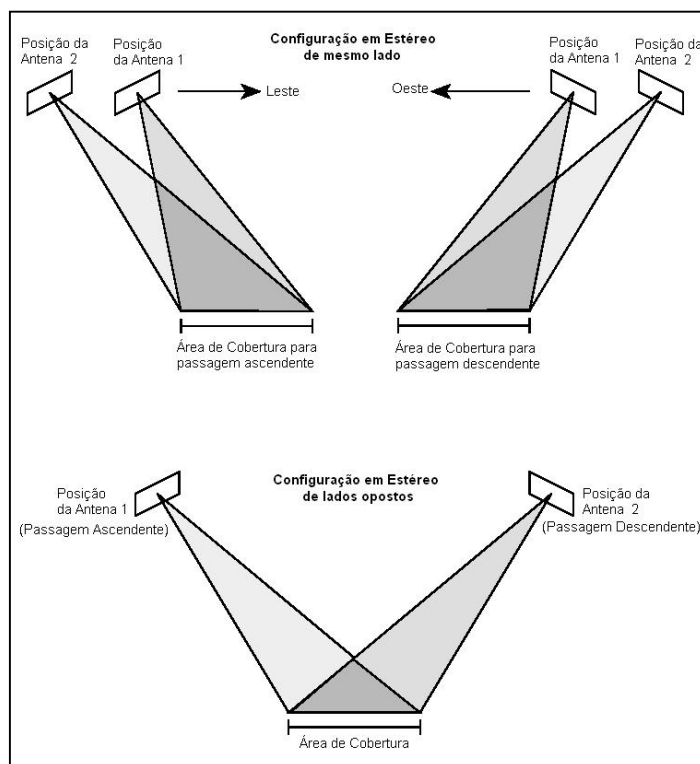


FIGURA. 2.1 – Possíveis combinações de imagens estereoscópicas de radar.

FONTE: Adaptada de Toutin e Vester (1997).

O início das aplicações de métodos estereoscópicos com sensores SAR foi realizado na década de 1960, levando ao desenvolvimento da radargrametria e a partir de 1980, melhorias nos sistemas SAR mostraram a possibilidade da obtenção de estereoscopia com imagens SAR obtidas de órbitas de mesmo sentido ou sentidos opostos (Leberl,1998).

Segundo Toutin e Gray (2000a), para a extração da paralaxe através da correlação de imagens podem ser utilizados os métodos visual e automático. A extração da paralaxe pelo método visual é uma extensão do método fotogramétrico tradicional, requerendo

uma capacidade estereoscópica total para a reconstrução do estéreo modelo e para a representação das feições planimétricas e altimétricas, em três dimensões.

Para visualizar imagens em estereoscopia, as imagens são reamostradas em imagens com geometria epipolar ou quase-epipolar, onde apenas a paralaxe na direção X relacionada à elevação é eliminada (Toutin e Gray, 2000a).

Imagens epipolares são pares estereoscópicos de imagens, reprojetaadas de tal forma que tenham as mesmas orientações e as feições comuns entre elas, são alinhadas em um mesmo eixo. A utilização de imagens epipolares aumenta a velocidade do processo de correlação entre as imagens e reduz a possibilidade de erros na geração de DEMs (PCI Geomatics, 2003).

A Figura 2.2 ilustra a comparação entre a geometria de um par de imagens antes e depois da geração de imagens epipolares.

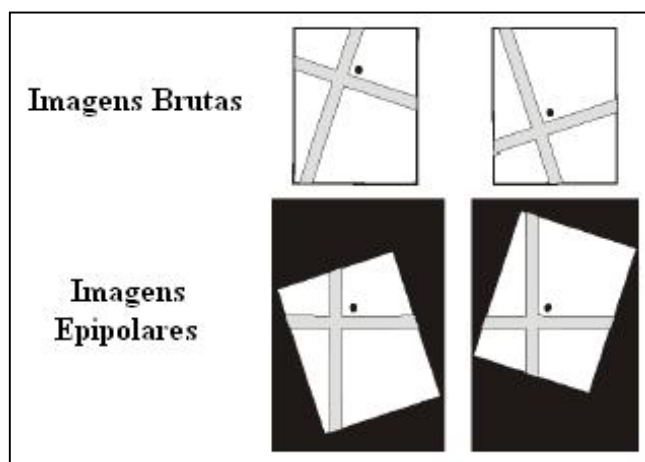


FIGURA. 2.2 – Comparação de imagens brutas com imagens epipolares.

FONTE: Adaptada de PCI Geomatics (2003).

Toutin e Gray (2000a) relatam ainda que o método de correlação visual é o mais oneroso em termos de horas de trabalho no processo de geração de DEM. Uma alternativa para isto é a correlação automática de imagens, que nos últimos 20 anos vem sendo muito estudada por vários pesquisadores e vários trabalhos já foram publicados sobre o assunto.

Com relação à geometria de aquisição das imagens, há aspectos na geometria de iluminação do radar que produzem efeitos de deslocamento do relevo, diferentes daqueles observados nos sistemas ópticos e de importância fundamental para o entendimento da estereoscopia de radar.

Paradella et al. (2003a) relatam que nas imagens SAR as estruturas verticais no terreno são deslocadas em direção ao sensor e as linhas de projeção que conectam pontos no terreno com pontos na imagem de radar, seguem círculos concêntricos em relação à localização da antena.

Nas imagens de radar os deslocamentos devido ao relevo são maiores na projeção *slant-range*, distância entre o sensor e o alvo no terreno, do que na projeção *ground-range*, distância entre a projeção da plataforma no terreno e o alvo. A figura 2.3 apresenta as projeções *slant-range*, *ground-range* e a comparação entre imagens nas duas projeções.

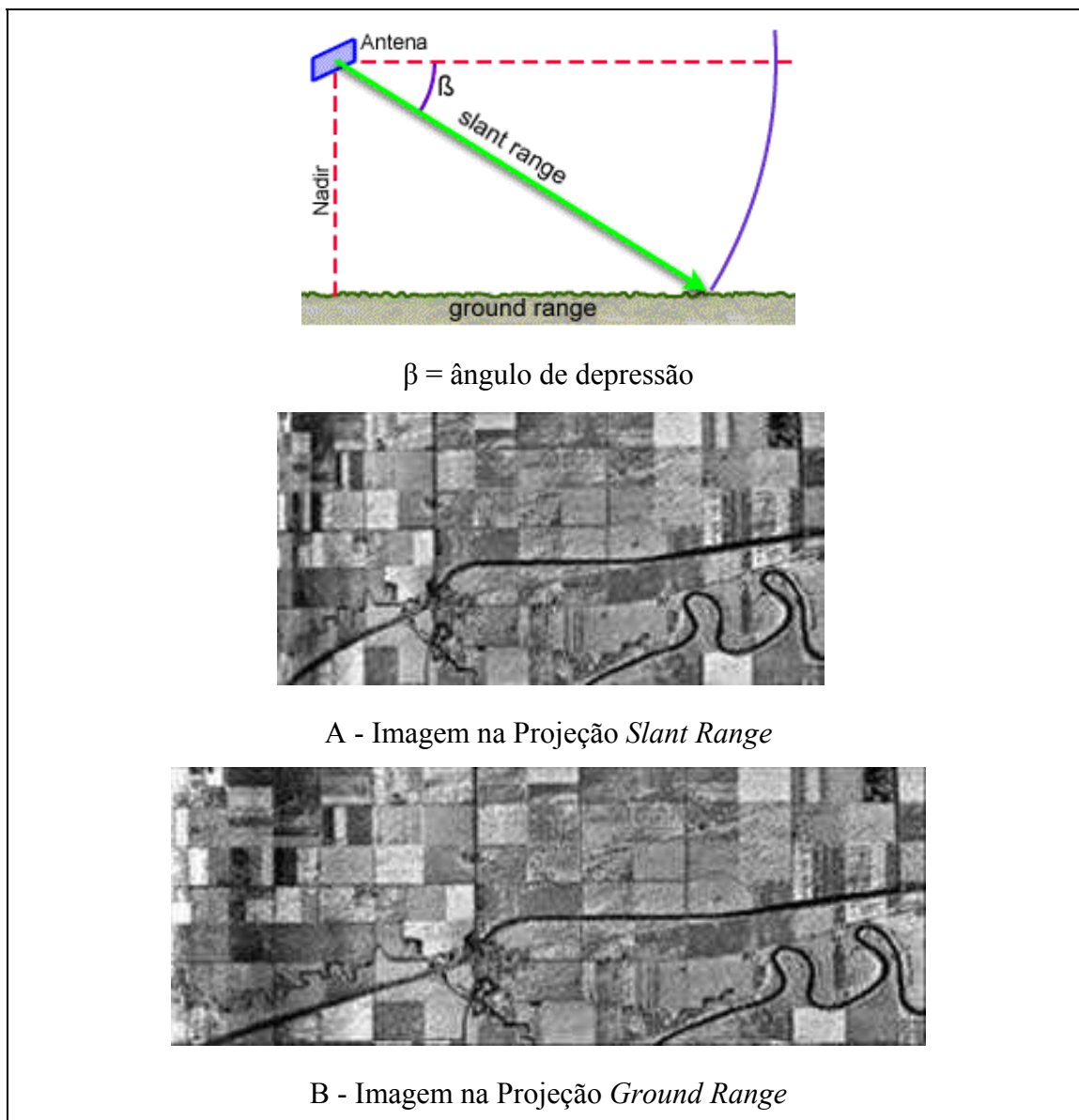


FIGURA. 2.3 – Comparação entre imagens de radar nas projeções *Slant Range* (A) e *Ground Range* (B).

FONTE: Adaptada de CCRS (2001).

Algumas distorções geométricas típicas no imageamento de radar são o *foreshortening* (encurtamento de rampa), *layover* (inversão de relevo) e sombreamento (Leberl, 1998). A figura 2.4 apresenta as situações onde podem ocorrer tais distorções.

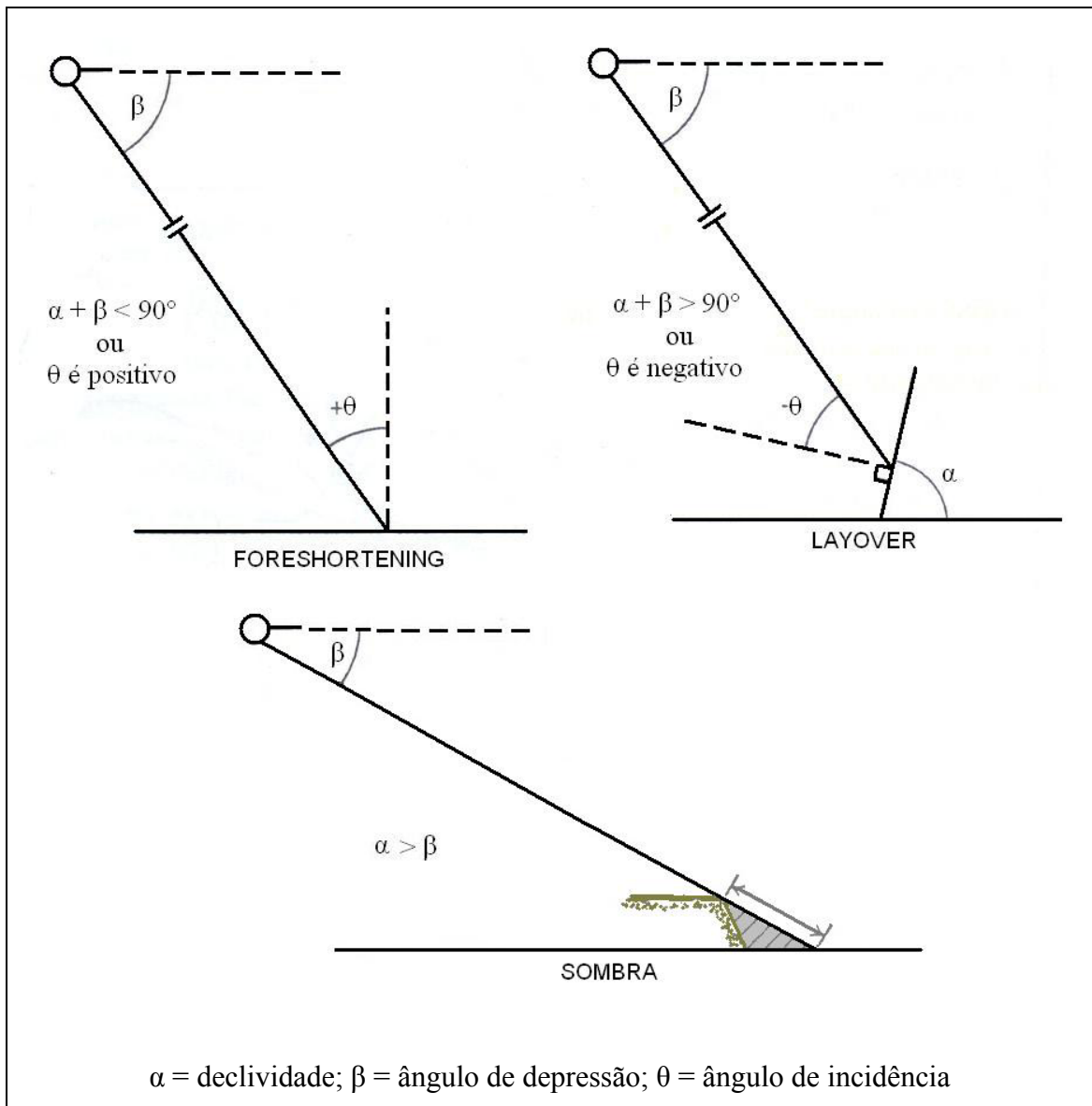


FIGURA 2.4 – Efeitos geométricos das imagens de radar.

FONTE: Adaptada de Leberl (1998).

Os efeitos de relevo apresentados acima são de grande importância em uma imagem de radar e, conseqüentemente, na composição de pares estereoscópicos. Deve-se observar que, especialmente em terreno montanhoso, quanto menor for o ângulo de incidência da iluminação de radar (observação mais verticalizada), maiores serão os efeitos de *foreshortening* e *layover* (Paradella et al., 2003a).

Ângulos de incidência maiores minimizam esses efeitos, porém, aumentam as áreas com sombras de radar, que representam perda de informação. Há ainda que se considerar o efeito da micro-topografia (rugosidade superficial na escala do comprimento de onda), como modulador do sinal retroespalhado. Neste sentido, maior será o efeito da rugosidade superficial no retroespalhamento do sinal de radar, quanto menor for o ângulo de incidência (Paradella et al., 2003a).

2.2 O Sensor ASTER

O ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) é um instrumento sensor que está a bordo do satélite Terra, lançado pela NASA em Dezembro de 1999 (Abrams e Hook, 2001).

O satélite Terra faz parte do Sistema de Observação da Terra (*Earth Observing System - EOS*) e transporta, também, outros quatro sensores, MODIS, MOPIT, MISR e CERES (Abrams e Hook, 2001). Os parâmetros orbitais da plataforma são apresentados na tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Parâmetros Orbitais do Satélite TERRA.

Órbita	Hélio-síncrona
Semi-eixo maior	7.078 km
Hora local de passagem	10h30 ± 15 min.
Altitude	705 km no equador
Inclinação	98,2° ± 0,15°
Ciclo de repetição	16 dias
Distância entre órbitas adjacentes	172 km

O trabalho entre cientistas japoneses e americanos levou ao desenvolvimento dos instrumentos, calibração e validação dos dados do sensor, que pode obter imagens em 14 bandas espectrais, desde o espectro visível ao infravermelho termal. O ASTER é considerado um sensor de alta resolução espacial, espectral e radiométrica, além de possuir o recurso de visada inclinada na mesma órbita, que permite obter imagens

estereoscópicas na banda 3, situada na região do infravermelho próximo (Abrams e Hook, 2001).

O sensor possui três subsistemas que possibilitam a variação da resolução espacial conforme a faixa de comprimento de onda: (1) VNIR, resolução espacial de 15 metros em 3 bandas do espectro visível e infravermelho próximo; (2) SWIR, 30 metros em 6 bandas do infravermelho de ondas curtas; (3) TIR, 90 metros em 5 bandas do infravermelho termal. Cada cena cobre uma área de 60 por 60 km no terreno (Abrams e Hook 2001; Toutin e Cheng, 2001).

A Tabela 2.2 apresenta as características do sensor ASTER.

TABELA 2.2 – Características do Sensor ASTER.

Subsistema	Banda	Intervalo Espectral (μm)	Resolução Espacial	Níveis de Quantização
VNIR	1	0,52 – 0,60	15 m	8 bits
	2	0,63 – 0,69		
	3N*	0,78 – 0,86		
	3B*	0,78 – 0,86		
SWIR	4	1.600 – 1.700	30 m	8 bits
	5	2.145 – 2.185		
	6	2.185 – 2.225		
	7	2.235 – 2.285		
	8	2.295 – 2.365		
	9	2.360 – 2.430		
TIR	10	8.125 – 8.475	90 m	12 bits
	11	8.475 – 8.825		
	12	8.925 – 9.275		
	13	10.25 – 10.95		
	14	10.95 – 11.65		
Razão Base/Altura em estéreo			0,6 (<i>along-track</i>)	
Largura de faixa			60 km	

* 3N = visada no nadir; 3B = visada inclinada.

A configuração em estéreo (figura 2.5) é obtida com o início da aquisição da imagem 3B, 55 segundos após o término da aquisição da imagem 3N. A relação entre Base/Altura (B/H) é dada pela tangente de α , que é o ângulo entre a visada no nadir (imagem 3N) e a visada inclinada (imagem 3B). Considerando a curvatura da Terra, o ângulo entre as imagens 3N e 3B é de $27,6^\circ$ (ERSDAC, 2001).

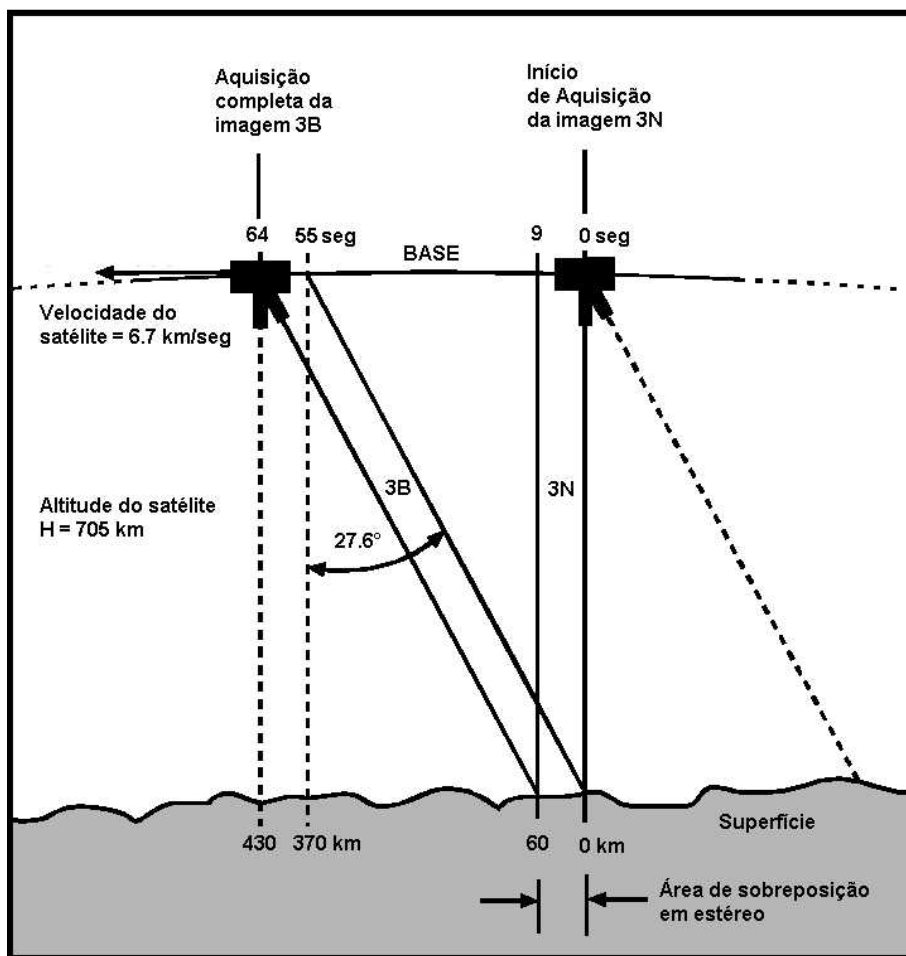


FIGURA 2.5 – Configuração em estéreo do ASTER.

FONTE: Adaptada de Toutin (2002).

Os produtos do ASTER são disponibilizados em vários níveis de processamento, destacando-se os produtos do nível 1 (1A e 1B), para a geração de DEMs (ERSDAC, 2001).

A partir das imagens do nível 1A e 1B, em configuração de imagens estéreo do VNIR (3N e 3B), podem ser gerados DEMs Relativos (sem pontos de controle) e DEMs Absolutos (com pontos de controle).

Segundo Abrams e Hook (2001), os DEMs absolutos podem ser gerados com erro médio quadrático (RMSE – *Root Mean Square Error*) de até 7 metros em altimetria, e os DEMs relativos com valores de RMSE de até 10 metros.

Cientistas da ERSDAC (*Earth Remote Sensing Data Analysis Center*) geraram e avaliaram DEMs do ASTER em três regiões do Japão, para a altimetria e planimetria. Foram utilizados pontos de controle cujas coordenadas foram coletadas com GPS para avaliar a precisão dos DEMs. Os valores de RMSE alcançados variaram de 4,6 a 12,1 metros em planimetria e 2,1 e 4,8 metros em altimetria. Os resultados alcançados são apresentados na tabela 2.3.

TABELA 2.3 – Precisão de DEMs de Três Localidades no Japão

Localidades no Japão	Número de ICPs	RMSE (m)		
		E	N	H
Tsukuba	20	5,1	6,6	3,5
Yatsugatake	12	12,1	9,0	3,3
Saga 1	7	5,1	5,4	4,8
Saga 2	5	8,1	4,6	3,2
Saga 3	11	6,5	5,1	2,1

FONTE: ERSDAC - Earth Remote Sensing Data Analysis Center (2002).

Hirano et al. (2003), examinaram a possibilidade de geração de DEMs do ASTER para sub-áreas de imagens nível 1A de quatro localidades: (1) Monte Fuji, Japão; (2) Cordilheira dos Andes, Chile e Bolívia; (3) San Bernardino, Califórnia USA; e (4) Huntsville, Alabama USA.

Para as quatro áreas de estudo, foram gerados DEMs absolutos utilizando pontos de controle (GCPs – *Ground Control Points*) identificados nas imagens 3N e 3B, que formam o par estereoscópico. Os GCPs foram obtidos a partir de coordenadas extraídas de cartas topográficas e também do levantamento de campo com equipamentos GPS.

Hirano et al. (2003) também utilizaram pontos de verificação (ICPs – *Independent Check Points*) para dar suporte à avaliação do produto obtido.

Os autores reportam que a estereocorrelação das imagens foi realizada com sucesso, variando de 97 a 99%, sobre as imagens 3B e 3N com aplicação de filtros do tipo mediana (3×3 e 5×5) para remoção de *outliers*.

Na tabela 2.4 pode-se observar que para os pontos de verificação (ICPs) foram obtidos valores de RMSE entre 7,3 e 14,7 metros nos casos onde foram utilizados GCPs obtidos a partir de DGPS, e valores de RMSE entre 15,8 e 26,3 metros para os casos em que os GCPs foram extraídos de cartas topográficas, sendo que a quantidade de pontos também interferiu nos resultados.

TABELA 2.4 – Resultados de DEMs ASTER Gerados para Quatro Localidades.

LOCALIDADE	NÚMERO DE GCPs	RMSE GCPs	NÚMERO DE ICPS	RMSE ICPS
Monte Fuji	5 pontos de cartas 1:25.000	6 m	51 pontos (cartas 1:25.000)	26,3 m
Cordilheira dos Andes	5 pontos de cartas 1: 50.000	19,5 m	53 pontos (cartas 1:50.000)	15,8 m
San Bernardino	12 pontos DGPS	18 m	16 pontos (cartas 1:24.000)	10,1 m
Huntsville	8 pontos DGPS	9 m	39 pontos (DGPS)	7,3 m
			512 pontos (DGPS)	11,1 m
			239.776 pontos (USGS DEM)	14,7 m

Hirano et al (2003) concluem que, com a utilização de imagens de boa qualidade, *softwares* especializados e pontos de controle adequados, é possível obter resultados de RMSE altimétrico entre 7 e 15 metros, e que os produtos ASTER podem ser utilizados para mapeamento de áreas de relevo montanhoso em escalas entre 1:50.000 e 1:100.000.

Com imagens estereoscópicas do ASTER, Toutin (2002) gerou e analisou estatisticamente um DEM gerado para uma área da Columbia Britânica no Canadá.

Antes da geração do DEM foi realizado um pré-processamento nas imagens 3N e 3B para reduzir os efeitos de *striping*, a partir dos coeficientes de calibração radiométrica contidos no arquivo de metadados das imagens.

O autor testou ainda alterar a quantidade de GCPs (de 20 até 10) utilizados na geração do DEM e de ICPs (de 15 até 25) na análise estatística. Os resultados apresentaram uma variação em torno de 2 metros nos três eixos (E, N e H) com qualquer quantidade de GCPs, demonstrando estabilidade na modelagem matemática utilizada.

Para o DEM gerado com 20 GCPs e avaliado com 15 ICPs, o erro médio quadrático em elevação foi de 20 metros. Para o DEM gerado com 10 GCPs e avaliado com 25 ICPs, o erro médio quadrático foi de 18 metros em elevação. Com isto, o autor concluiu que a quantidade de 15 GCPs (com 20 ICPs) apresentou o melhor resultado para manter a redundância no ajustamento do modelo matemático.

Além do teste realizado acima, Toutin (2002) comparou o DEM ASTER gerado sem correção radiométrica (não calibrado) e com correção radiométrica (calibrado) com 4.000.000 de pontos extraídos de um DEM gerado a partir de cartas topográficas. Os resultados do erro linear (LE - *Linear Error*) com 68% e 90% de nível de confiança e o valor do erro médio (*Bias*) são apresentados na tabela 2.5.

TABELA 2.5 – Resultados Alcançados na Geração de DEM ASTER de uma Área na Columbia Britânica, Canadá.

DEM	Estatística		
	LE68	LE90	<i>Bias</i>
Calibrado	30m	56 m	-11,7 m
Não Calibrado	33 m	61 m	-12,4 m

FONTE: Toutin (2002).

A comparação entre os DEMs com correção radiométrica (calibrado) e sem correção radiométrica (não calibrado) mostrou que o pré-processamento da imagem melhorou a

precisão do DEM em quase 10% e a precisão do DEM é inversamente proporcional à declividade, ou seja, em áreas menos íngremes, é possível obter melhores resultados, considerando-se as mesmas condições de processamento.

Além da geração de DEM, diversas outras aplicações das imagens ASTER podem ser citadas (ERSDAC, 2001), tais como:

- (a) Áreas continentais: monitoramento de atividades vulcânicas e observação de erupções; monitoramento de erosão costeira, vegetação, florestas tropicais, mangues e pântanos;
- (b) Áreas oceânicas: monitoramento de vegetação aquática, mapeamento de corais, estudos da temperatura da superfície do mar, e análise de áreas costeiras;
- (c) Neve e gelo: monitoramento da costa glacial Antártica, análises climáticas, análises de distribuição e temperatura de icebergs;
- (d) Atmosfera: classificação de nuvens, monitoramento de nuvens e gelo em regiões polares.

A Figura 2.6 apresenta um esquema com os três subsistemas do ASTER, citados anteriormente, e as respectivas áreas de aplicação.

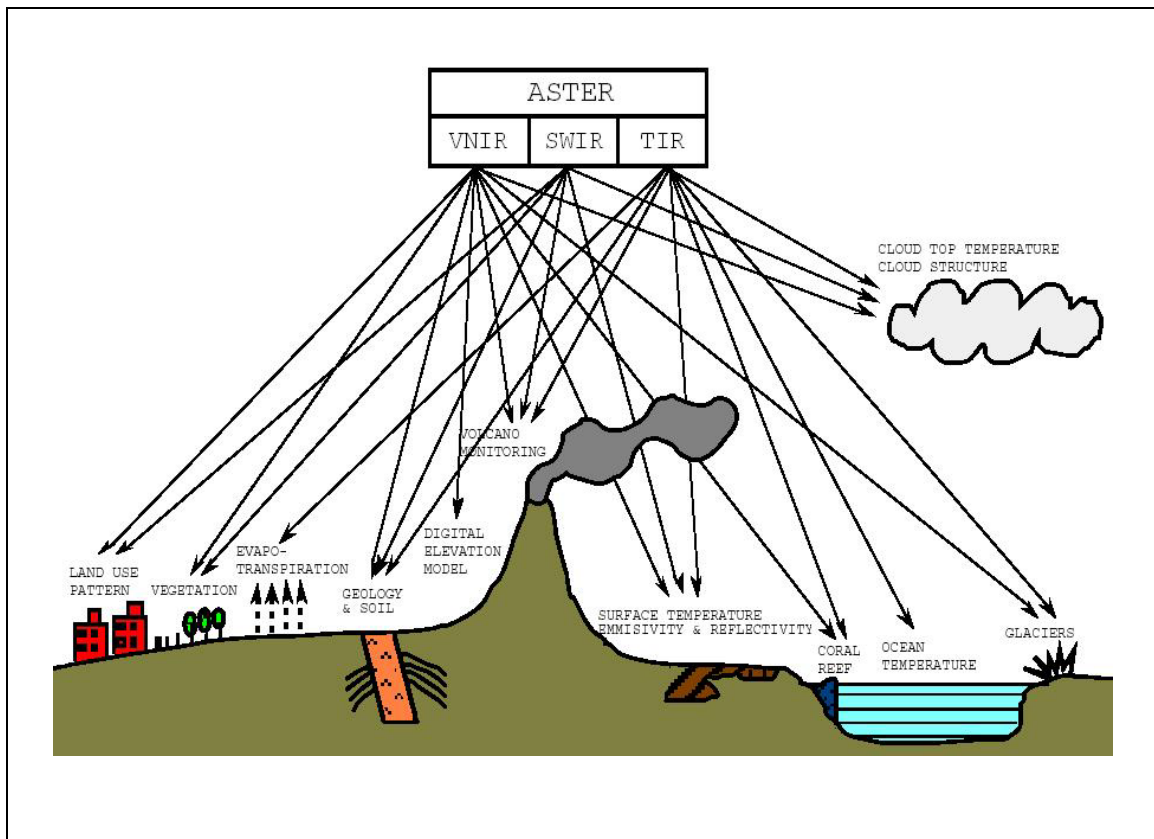


FIGURA. 2.6 – Os três subsistemas e respectivas aplicações dos dados ASTER
 FONTE: Adaptada de ERSDAC (2001).

2.3 O Satélite RADARSAT-1

O RADARSAT-1 é um sofisticado satélite de observação da Terra desenvolvido pelo Canadá, sendo o primeiro satélite SAR comercial com a capacidade de disponibilizar um grande volume de dados para todo o mundo. O satélite foi desenvolvido sob gerenciamento da Agência Espacial Canadense (*Canadian Space Agency – CSA*), em cooperação com a NASA/NOAA, províncias e empresas do setor privado do Canadá. (RADARSAT International, 1995).

Lançado em novembro de 1995, o RADARSAT-1 permite obter imagens de radar para fins comerciais ou científicos de diversas áreas, como a Agricultura, Cartografia, Geologia, Hidrologia, Floresta, Oceanografia, Monitoramento Costeiro e Gelo (RADARSAT International, 1995).

O RADARSAT-1 opera na frequência de microondas conhecida como banda C, com frequência de 5,3 GHz ou 5,6 cm de comprimento de onda, transmitindo e recebendo a energia em orientação horizontal, ou polarização horizontal (HH). As variações no sinal de retorno (*backscatter*) capturadas pelo sensor são resultantes das mudanças de rugosidade da superfície e topografia, assim como as propriedades físicas, conteúdo de umidade e propriedades elétricas dos alvos (RADARSAT International, 1995).

O satélite circula a Terra a uma altitude de 798 km, com uma inclinação de 98,6° sobre o plano do equador e órbita hélio-síncrona, com repetição de órbita a cada 24 dias e disponibilizando dados em 6 modos de aquisição (*Fine, Standard, Wide, ScanSAR Narrow, ScanSAR Wide e Extended*).

O sensor tem a capacidade de adquirir imagens com ângulos de incidência variados, de 10° a 60°, com largura de faixa imageada variando de 50 a 500 km e resoluções nominais que vão de 8 a 100 metros, dependendo do modo de aquisição. Os dados podem ser disponibilizados em 4 horas após a sua aquisição (RADARSAT International, 1995).

As características e os modos de aquisição do satélite RADARSAT-1 são apresentados na Tabela 2.6.

TABELA 2.6 – Características dos Modos do RADARSAT-1.

Modo	Posição	Ângulos de Incidência	Resolução Nominal	Área Nominal
<i>Fine</i>	F1	36,4° – 40,3°	8 m	50 × 50 km
	F2	38,8° – 42,5°		
	F3	41,1° – 44,3°		
	F4	43,1° – 46,1°		
	F5	45° – 47,8°		
<i>Standard</i>	S1	20° – 27°	25 m	100 × 100 km
	S2	24° – 31°		
	S3	30° – 37°		
	S4	34° – 40°		
	S5	36° – 42°		
	S6	41° – 46°		
	S7	45° – 49°		
<i>Wide</i>	W1	20° – 31°	30 m	165 × 165 km
	W2	31° – 39°		150 × 150 km
	W3	39° – 45°		130 × 130 km
<i>ScanSAR Narrow</i>	SNA	20° – 40°	50 m	300 × 300 km
	SNB	31° – 46°		
<i>ScanSAR Wide</i>	SWA	20° – 49°	100 m	500 × 500 km
	SWB	20° – 46°		450 × 450 km
<i>Extended High</i>	H1	49° – 52°	25 m	75 × 75 km
	H2	50° – 53°		
	H3	52° – 55°		
	H4	54° – 57°		
	H5	56° – 58°		
	H6	57° – 59°		
<i>Extended Low</i>	L1	10° – 23°	35 m	170 × 170 km

FONTE: Adaptada de RADARSAT International (1995).

As imagens do RADARSAT-1 são muito favoráveis para se trabalhar em estereoscopia, pois podem ser adquiridas de diferentes ângulos de incidência, modos, posições e com

resoluções capazes de fornecer alto nível de detalhe da superfície da Terra (Toutin e Vester, 1997).

Assim como fotografias aéreas, os pares de imagens do RADARSAT-1 e de outros satélites são adquiridas em imagens seqüenciais, uma à esquerda e outra à direita, dependendo da posição da plataforma e do tempo em que foram adquiridas. Os pares de imagens do RADARSAT-1 dependem de dois fatores: (a) o modo de aquisição e (b) a órbita de passagem, ascendente ou descendente (Toutin e Vester, 1997).

Se uma imagem de uma mesma região geográfica for coberta por imagens do modo *Standard* nas posições S1 e S3, em órbita descendente, a imagem S3 estará posicionada à Leste ou à direita da imagem S1. Isto ocorre pelo fato da imagem S3 possuir um ângulo de incidência mais rasante que a S1. Assim, a imagem S1 estará na posição à esquerda do par coletado em órbita descendente (S1/S3). Se as imagens forem coletadas em uma órbita ascendente, a ordem das imagens é trocada, como pode ser visto na Figura 2.7 (Toutin e Vester, 1997).

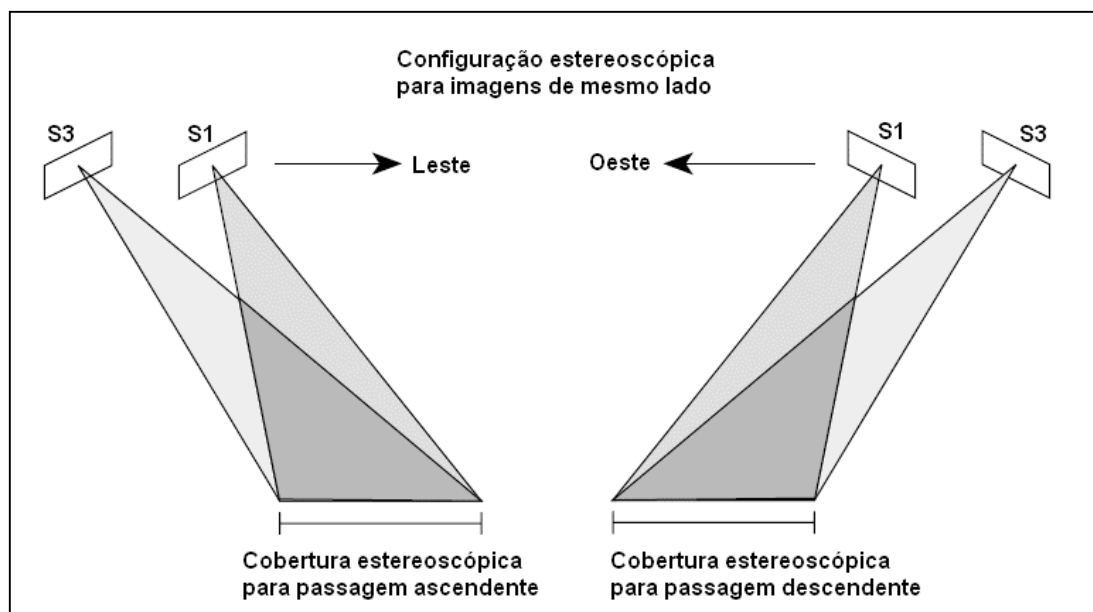


FIGURA. 2.7 – Configuração estereoscópica para imagens RADARSAT-1 de mesmo lado

FONTE: Adaptada de Toutin e Vester (1997).

No caso de imagens em configuração estereoscópica de visadas opostas, a imagem descendente é visualizada do lado esquerdo enquanto a imagem ascendente é visualizada do lado direito (Toutin e Vester, 1997).

Por analogia com a fotogrametria, o critério utilizado para analisar a configuração em estéreo e seu potencial em precisão de elevação é o ângulo de intersecção (θ) equivalente a razão Base/Altura (B/H) (Toutin, 1998).

A Figura 2.8 ilustra os modos de aquisição do RADARSAT-1, configuração da visada e ângulos de incidência.

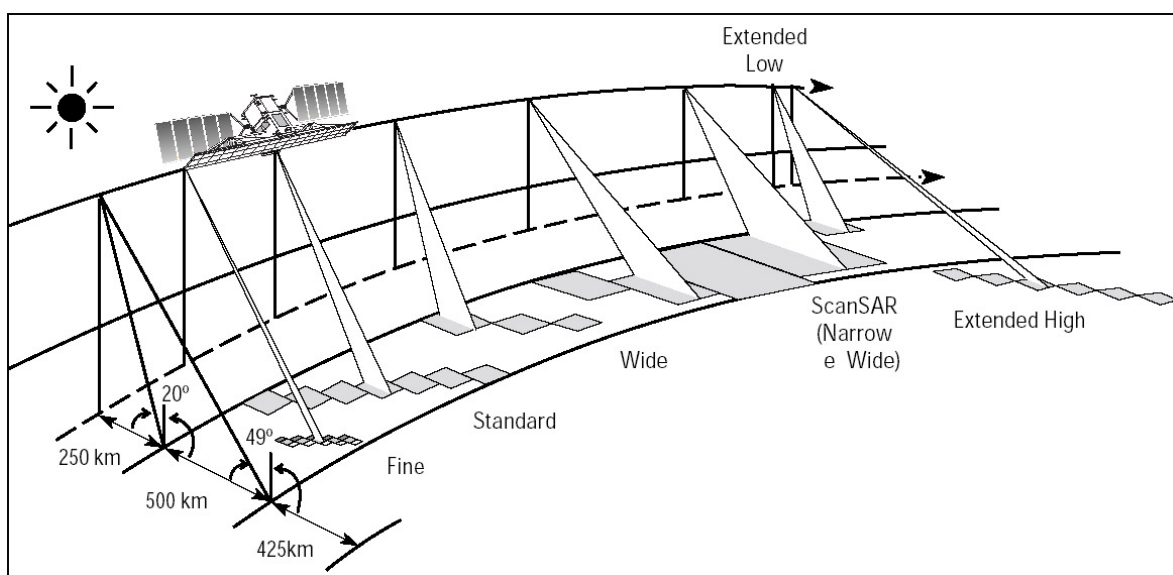


FIGURA 2.8 – Modos de aquisição, configuração de visada e ângulos de incidência das imagens RADARSAT-1.

FONTE: Adaptada de RADARSAT International (1995).

A paralaxe em elevação com imagens SAR (*ground range*), em estéreo, pode ser aproximada por (Toutin, 1998):

$$p = h (\cot \theta_R - \cot \theta_L) \quad (2.1)$$

onde:

p é a paralaxe em elevação,

h é a elevação do alvo,

θ_R e θ_L são os ângulos de incidência das imagens da direita e da esquerda, respectivamente.

Toutin (1998) considera que a razão de paralaxe vertical p/h (*Vertical Parallax Ratio – VPR*) parece ser um critério melhor, a ser utilizado com imagens SAR em estéreo, do que o tradicional ângulo de intersecção ou razão Base/Altura (B/H) utilizado em imagens ópticas em estéreo.

O autor gerou DEMs a partir de nove pares de imagens RADARSAT-1, de mesmo lado e lados opostos na região de Sherbrooke, Canadá, e realizou uma comparação do resultado entre relevos moderados e planos.

O autor reporta ainda que experimentos anteriores ao realizado em seu trabalho com os mesmos conjuntos de dados e com os mesmos GCPs, selecionados com recurso de visualização em estereoscopia (estéreo GCPs), houve uma melhora de 20 a 40% na precisão dos modelos estereoscópicos. Isto foi confirmado com a pontaria dos GCPs monoscópicamente.

Com os resultados alcançados, o autor conclui que os estéreo-pares com disparidades geométricas equivalentes, valores de VPR próximos, geraram os melhores resultados (F5-F1 contra S7-H6, S1-S4 contra S2-S7, F4-F5 filtrado contra F4-F5 no relevo moderado). Para imagens com disparidades radiométricas equivalentes, a melhor geometria resulta nos melhores resultados (S1-S4 contra S4-S7, S1-S7 contra S2-S7, etc.).

Na Tabela 2.7 são apresentados os resultados dos DEMs gerados com valores de LE90 (Erro Linear com 90% de nível de confiança), Razão de Paralaxe Vertical (VPR), *Bias* (média), Erro Máximo (Erro Max.) e Erro Mínimo (Erro Min.).

TABELA 2.7 – Precisão de DEMS Gerados com Imagens RADARSAT-1.

Estéreo Par	VPR	Relevo	LE90	Bias (média)	Erro Máximo
F5/F1 (mesmo lado)	0,37	Plano	12 m	-3,3 m	33,2 m
		Moderado	36 m	4,2 m	95 m
		DEM inteiro	25 m	-1,1 m	95 m
S7/H6 (mesmo lado)	0,31	Plano	44 m	-8,9 m	89,4 m
		Moderado	58 m	-7,1 m	153,4 m
		DEM inteiro	85 m	-5,9 m	270 m
S4/S7 (mesmo lado)	0,39	Plano	24 m	25,8 m	58,6 m
		Moderado	46 m	-6,5 m	81,2 m
		DEM inteiro	45 m	-1,3 m	150,3 m
S4/H3 (mesmo lado)	0,59	Plano	23 m	11,7 m	101,7 m
		Moderado	59 m	-18 m	116,6 m
		DEM inteiro	54 m	-1,9 m	161,8 m
S1/S4 (mesmo lado)	0,97	Plano	15 m	-7,1 m	40,2 m
		Moderado	29 m	10,9 m	66,6 m
		DEM inteiro	23 m	-1,9 m	82 m
S2/S7 (mesmo lado)	0,99	Plano	16 m	-9,3 m	44,2 m
		Moderado	43 m	-2 m	64,7 m
		DEM inteiro	39 m	-3,9 m	148,7 m
S1/S7 (mesmo lado)	1,37	Plano	11 m	-3,7 m	25,3 m
		Moderado	27 m	6,6 m	65,6 m
		DEM inteiro	14 m	-5 m	71,3 m
F4/F5 (lados opostos)	1,97	Plano	16 m	-15 m	108,6 m
		Moderado	107 m	-7,4 m	199 m
		DEM inteiro	34 m	-11,8 m	199 m
F4/F5 (lados opostos com filtro)	1,97	Plano	21 m	-17,4 m	312,7 m
		Moderado	77 m	-2,2 m	132,8 m
		DEM inteiro	47 m	-14,3 m	289,5 m

FONTE: Adaptada de Toutin (1998).

Considerando que o relevo é um parâmetro importante na precisão final de um DEM, Toutin (1998) conclui que deve existir um compromisso entre disparidades geométrica e radiométrica na seleção de estéreo-pares do RADARSAT-1 para geração de DEMs.

A relação entre disparidade geométrica e radiométrica é mostrada na Tabela 2.8.

TABELA 2.8 – Disparidade Geométrica e Radiométrica de Pares de Imagens RADARSAT-1 em Estéreo.

Declividade do Terreno	Terreno Plano 0° a 10°	Terreno Colinoso 10° a 30°	Terreno Montanhoso 30° a 50°
Disparidade Radiométrica	Pequena	Média	Grande
Disparidade Geométrica	Grande	Média	Pequena
Alternativas para escolha de par de imagens	Lados opostos.	Mesmo lado com ângulo de intersecção grande ou lados opostos.	Mesmo lado com ângulo de intersecção pequeno.
Configuração RADARSAT-1 em estéreo	S1(desc.)/S1(asc.) F1(desc.)/F1(asc.)	S1/S7 (desc. ou asc.) F1/F5 (desc. ou asc.) ou S7(desc.)/S7(asc.) F5(desc)/F5(asc.)	S1/S4 (desc. ou asc.) F2/F5 (desc. ou asc.) S4/S7 (desc. ou asc.) F1/F4 (desc. ou asc.)

FONTE: Adaptada de Toutin (1998).

Toutin (1999) considera que o *speckle* dificulta a restituição de pontos de controle (GCPs), mas não degrada a precisão de DEMs porque os métodos de correlação ou a “visão estereoscópica humana” se comportam como um filtro. Segundo o autor, o pré-processamento das imagens com aplicação de filtros adaptativos não melhoram a precisão dos DEMs, porque esses filtros podem reduzir o contraste das imagens e causar uma suavização do relevo.

Paradella et al. (2001), avaliaram, pela primeira vez, a geração de DEMs absolutos a partir de imagens RADARSAT-1 (Standard 5 e 7; Fine 1 e 4), para a região da Serra dos

Carajás (Estado do Pará), correspondente à área da carta topográfica SB-22-Z-A-II (Folha Serra dos Carajás) de escala 1:100.000 (IBGE 1981a).

Inicialmente, na geração do DEM Standard S5/S7 os autores coletaram pontos de controle (GCPs) da carta topográfica 1:100.000 e a partir das duas imagens originais aplicaram a filtragem *Enhanced Frost*, para diminuir a influência do ruído *speckle* (característico de imagens de radar) no processo de correlação das imagens. O melhor resultado do Erro Médio Quadrático (ou RMSE) alcançado em elevação foi de 60 m.

Visando melhorar a precisão do DEM gerado inicialmente, os autores utilizaram uma imagem TM Landsat ortorretificada com pontos de controle e DEM da carta topográfica para melhorar a quantidade e distribuição dos pontos de controles utilizados inicialmente. Ao todo, foram coletados 31 novos pontos de controle e gerou-se um novo DEM com RMSE de 42,2 metros em elevação.

O mesmo procedimento foi realizado para a geração do DEM com as imagens Fine, com 20 pontos de controle. O DEM gerado apresentou um RMSE em elevação de 62 metros. Embora este valor tenha sido muito superior ao gerado pelo par de imagens Standard, os autores indicaram o DEM fine como o de melhor qualidade de contraste de tonalidade e maior distribuição de linhas de contorno.

Em nova investigação, Paradella et al. (2003a) avaliaram a geração de dois tipos de DEMs radargramétricos (relativo e absoluto) para uma área de relevo plano na Floresta Nacional de Tapajós (Estado do Pará).

Para a seleção do estéreo-par de imagens RADARSAT-1 de alta resolução (modo Fine), os autores analisaram duas possibilidades: F1/F4 ou F2/F5. Apesar dos pares apresentarem o mesmo ângulo de intersecção (6 graus) e critérios de razão de paralaxe vertical (VPR) muito próximos ($VPR_{F1/F4} = 0,239$ e $VPR_{F2/F5} = 0,221$), a porcentagem de área de sobreposição favoreceu a escolha do par de imagens F2/F5 com 99% de sobreposição, contra 90% do par F1/F4. As imagens foram adquiridas com apenas uma semana de intervalo entre cada passagem.

Os autores determinaram as coordenadas de 44 pontos notáveis em campo (GCPs), além de uma referência de nível (RN) do IBGE.

Segundo os mesmos autores, na escolha dos pontos notáveis, além de premissas básicas (número razoável, distribuição em área, localização fora das bordas das imagens e abrangência de variação altimétrica), devem ser considerados aspectos de variação temporal, com pontos mais estáveis sendo selecionados (intersecções de estradas, limites de propriedades bem definidos, obras de engenharia, etc.).

Os resultados alcançados para os DEMs absoluto e relativo, RMSE de 16,63 m e 35,91 m respectivamente, classificam os dois produtos cartográficos como classe A para as escalas de mapeamento 1:100.000 e 1:250.000. A tabela 2.9 apresenta os resultados da geração dos DEMs absoluto e relativo gerados, com valores de RMSE e LE90.

TABELA 2.9 – Resultados da Geração de DEMs RADARSAT FINE Absoluto e Relativo para Relevo Plano.

DEM	RMSE	LE90
Absoluto	14,63 m	24,12 m
Relativo	35,91 m	59,07 m

FONTE: Adaptada de Paradella et al. (2003a).

O resultado alcançado por Paradella et al. (2003a), para o DEM absoluto, confirma os resultados obtidos por Toutin (1998), apresentados anteriormente. Mas tal resultado deve ser considerado apenas para relevos planos, pois a variação em elevação da área estudada não é superior a 200 metros.

Em complemento à pesquisa em Tapajós, Paradella et al. (2003b) avaliaram a geração de DEMs radargramétricos absoluto e relativo a partir de 2 pares de imagens RADARSAT-1 Fine 2 e Fine 5 em aquisições sob órbitas descendentes, com uso do modelo *RADARSAT Specific* do *software* PCI Geomatica (versão 8.2). A área da investigação correspondeu a 3.736 km², englobando parte da folha topográfica Serra dos Carajás (SB-22-Z-A-II) de escala 1:100.000.

As quatro imagens RADARSAT-1, compondo dois estéreo-pares Fine (F2/F5), foram adquiridas pelo INPE em dezembro de 2001, com um intervalo de uma semana entre as aquisições. A proporção de sobreposição (*overlap*) entre as imagens do estéreo-par F2/F5 foi de 99%.

Os autores avaliaram as precisões altimétricas de DEMs RADARSAT Fine absoluto e relativo. Para isto, foram utilizadas coordenadas planialtimétricas de 50 pontos obtidos em campo com equipamentos GPS de dupla frequência. Estes pontos foram utilizados como GCPs, na geração do DEM absoluto ou como ICPs na avaliação estatística dos DEMs absoluto e relativo.

Com uso do modelo *RADARSAT Specific*, os autores utilizaram 20 GCPs para a geração do DEM absoluto e para o cálculo do RMSE e LE90 dos DEMs absoluto e relativo, foram utilizados 14 e 29 ICPs respectivamente. A tabela 2.10 apresenta os resultados alcançados no cálculo do RMSE e LE90 dos DEMs gerados.

TABELA 2.10 – Resultados da Geração dos DEMs RADARSAT FINE Absoluto e Relativo para Relevo Montanhoso.

DEM	GCPs	ICPs	RMSE	LE90
Absoluto	20	14	20,11 m	33,16 m
Relativo	0	29	33,97 m	56,03 m

FONTE: Adaptada de Paradella et al. (2003b).

O resultado obtido da avaliação altimétrica do DEM relativo em Carajás (RMSE = 33,97 m), está próximo da classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica na escala de 1:250.000 (Erro Padrão \leq 33,33 m). Já o resultado obtido da avaliação altimétrica do DEM absoluto (RMSE = 20,11 m), está próximo da classe B do Padrão de Exatidão Cartográfica na escala de 1:100.000 (Erro Padrão \leq 20 m).

2.4 SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

A *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi resultado de uma cooperação entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), com participação das agências espaciais da Alemanha (DLR – *Deutschen Zentrum für Luft - und Raumfahrt*) e Itália (ASI - *Agenzia Spaziale Italiana*) (Bamler, 1999).

O ônibus espacial *Endeavour*, veículo espacial utilizado para a missão, foi lançado no dia 11 de fevereiro de 2000 para uma órbita de 233 km de altitude e com inclinação de 57°. Durante a missão foram completadas 176 órbitas e 159 destas órbitas foram utilizadas para mapeamento (Rabus et. al, 2003).

Entre os dias 11 e 22 de fevereiro de 2000, a *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) coletou dados através de um SAR Interferométrico (InSAR), para a região da Terra entre as latitudes 60° N e 56° S (Koch et al., 2002; Rabus et. al, 2003).

Sete horas após o lançamento, o mastro da linha base (figura 2.4) foi desdobrado com sucesso e 90 minutos mais tarde os primeiros dados eram gravados. Imediatamente após a gravação, os dados foram enviados para a estação terrestre e foram analisados por cientistas do JPL e DLR. Logo depois o primeiro DEM da banda X foi gerado (Rabus et. al, 2003).

A missão gerou um DEM de cobertura global com resoluções de 1 e 3 arco-segundos (Rabus et. al, 2003). Duas antenas foram utilizadas: SIR-C (Estados Unidos) e X-SAR (Alemanha/Itália). O sistema utilizou os comprimentos de onda (λ) de 6,0 cm para a banda C e 3,1 cm para a banda X (Koch et al., 2002).

Segundo Bamler (1999) os produtos da SRTM são classificadas em:

- DEMs ITED-2 Banda X: 1 arco-segundo de resolução;
- DEMs ITED-2 Banda C: 1 arco-segundo de resolução;
- DEMs ITED-3 Banda C: 3 arco-segundos de resolução.

As antenas principais (figura 2.9), posicionadas dentro do módulo de carga do ônibus espacial *Endeavour*, transmitiram e receberam o pulso de energia. As antenas secundárias (figura 2.9), posicionadas a 60 metros da espaçonave por meio de um mastro, funcionaram apenas como receptor do pulso de energia. (Koch et al., 2002).

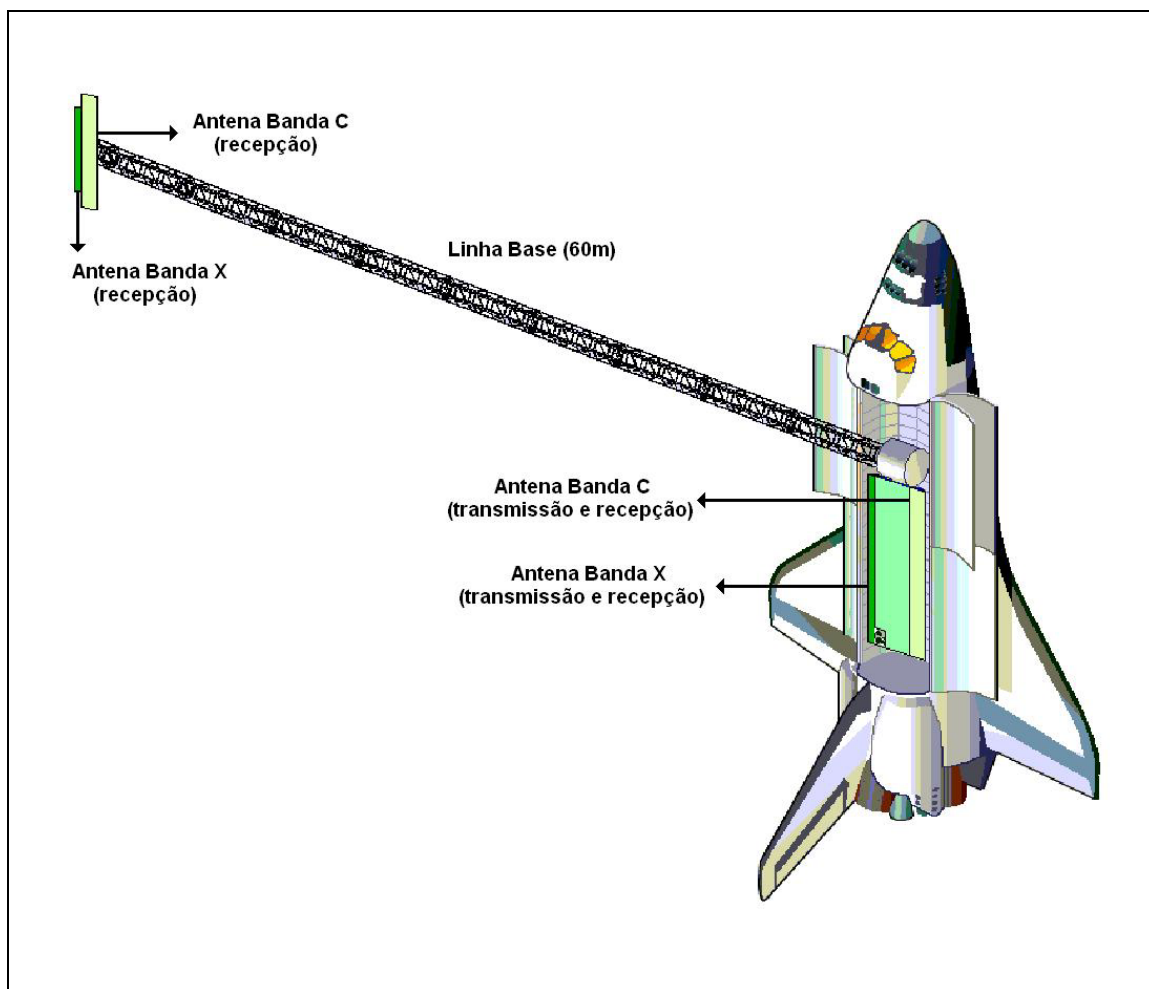


FIGURA 2.9 – Posição das antenas primárias e secundárias da SRTM.

FONTE: Adaptada de Bamler (1999).

A geometria de aquisição dos dados é ilustrada na figura 2.10. Mais detalhes podem ser vistos em Rabus et. al (2003).

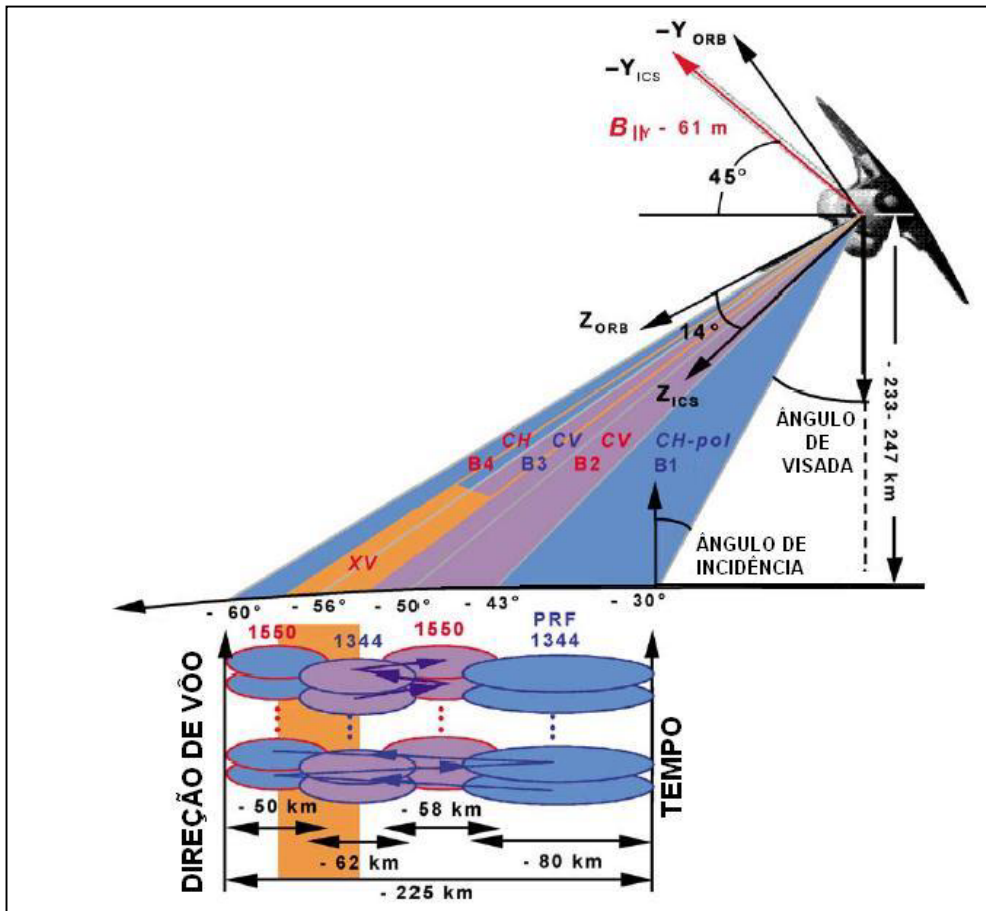


FIGURA 2.10 – Geometria de aquisição dos dados da SRTM.

FONTE: Adaptada de Rabus et. al (2003).

A posição dos sensores para cada uma das imagens foi conhecida precisamente. O JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) desenvolveu o sistema AODA (*Attitude and Orbit Determination Avionics*), que fez parte da carga útil da missão, para fazer medidas da linha de base. (Werner, 2001).

Segundo Duren et. al (1998), o sistema AODA foi desenvolvido para garantir que as medidas da linha de base interferométrica, atitude e posição atingissem os níveis desejados de precisão (2 mm, 9 arco-segundos e 1 m respectivamente), para a obtenção de medidas precisas da elevação do terreno.

Os movimentos dos sensores causados pela oscilação do mastro influenciaram consideravelmente as observações do radar. O sistema AOAD forneceu dados

extremamente precisos sobre a geometria de observação, mas foi necessário um ano para melhorar o conjunto de dados de atitude e corrigir alguns erros (Werner, 2001).

Koch et al. (2002), compararam um conjunto de dados de elevação da SRTM banda X (ITED-2) com dados de referência de uma área situada ao sul de Hannover (Alemanha). A área teste correspondeu a 2.500 km² e a máxima diferença em elevação observada correspondeu a 450 metros.

Foram calculadas as diferenças entre um DEM de referência com o DEM SRTM ITED-2 apenas em áreas sem vegetação e construções. Como resultado, verificou-se um erro médio de 2,6 metros e desvio padrão de 3,3 metros.

2.5 Controle de Qualidade de Produtos Cartográficos

O controle da qualidade de um produto cartográfico é uma fase importante e é poucas vezes realizado no Brasil nos processos de mapeamento. Em geral, a comunidade não valoriza esta etapa, seja por parte do produtor do mapa, dos usuários e dos contratantes desses produtos, além da necessidade de processo sistemático de fiscalização (Galo e Camargo, 1994).

Para a realização da análise, tanto quantitativa quanto qualitativa, de produtos cartográficos, inclusive dos DEMs, é importante considerar os documentos que estabelecem normas para a classificação dos produtos cartográficos (Itame, 2001).

Os documentos que estabelecem as normas para a classificação de produtos cartográficos podem ser consultados em Brasil.CONCAR (2004), onde o Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 apresenta as normas para a classificação de um produto cartográfico.

Os Artigos 8º e 9º, do Decreto nº 89.817, que classificam uma carta quanto à exatidão e classes de cartas, respectivamente, são transcritos a seguir:

Art. 8º As cartas quanto à sua exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC, segundo o critério abaixo indicado:

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico - estabelecido.

2. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico - estabelecido.

§1º Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.

§2º A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão - $PEC = 1,6449 EP$.

§3º O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

§4º Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes às expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

Art. 9º As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas Classes A, B e C, segundo os critérios seguintes:

a - Classe A

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,5 mm na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2. Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: metade da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

b - Classe B

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,8 mm na escala da carta, sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2. Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quintos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de dois quintos o Erro-Padrão correspondente.

c - Classe C

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 1,0 mm na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2. Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quartos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de metade desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

A Tabela 2.11 apresenta os valores do Padrão de Exatidão Cartográfica Planimétrico e Altimétrico para as classes A, B e C.

TABELA 2.11 – Valores do Padrão de Exatidão Cartográfica.

Classe da Carta	Planimetria		Altimetria	
	PEC	EP	PEC	EP
A	0,5 mm na escala da carta	0,3 mm na escala da carta	1/2 equidistância	1/3 equidistância
B	0,8 mm na escala da carta	0,5 mm na escala da carta	3/5 equidistância	2/5 equidistância
C	1 mm na escala da carta	0,6 mm na escala da carta	3/4 equidistância	1/2 equidistância

Apesar do Decreto nº 89.817 classificar uma carta, não apresenta o número de pontos de campo necessários para fazer o controle de qualidade.

Para Merchant (1982), pelo menos vinte pontos bem distribuídos, cinco em cada quadrante da área de uma carta, devem ser utilizados para testar a exatidão de um mapa. Os pontos devem ser obtidos por equipamentos que garantam que o erro obtido em sua coleta não ultrapasse a 1/3 do erro padrão para a classe da carta.

A tabela 2.12 apresenta as tolerâncias altimétricas que devem ser consideradas para as escalas de mapeamento 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000, considerando como 1/3 do Erro Padrão o valor máximo do erro do ponto de verificação obtido em levantamento de campo.

TABELA 2.12 – Tolerâncias Altimétricas dos Pontos de Verificação Considerando 1/3 do Erro Padrão.

Escala	Eqüidistância das curvas	1/3 do EP para a Classe A	1/3 do EP para a Classe B	1/3 do EP para a Classe C
1:50.000	20	2,22 m	2,67 m	3,33 m
1:100.000	50	5,56 m	6,67 m	8,33 m
1:250.000	100	11,11 m	13,33 m	16,67 m

Na literatura internacional ocorrem dois vocábulos, *accuracy* e *precision*, que apesar de aparentados não são sinônimos e podem ser traduzidos para acurácia e precisão. O termo precisão está vinculado apenas a efeitos aleatórios (à dispersão das observações) enquanto acurácia vincula-se a ambos, efeitos aleatórios e sistemáticos (Gemael, 1994).

Como índice de precisão utiliza-se o desvio padrão (medida de dispersão), ou, na terminologia do geodesta, o Erro Médio Quadrático (Gemael, 1994).

O Levantamento Geológico Americano (USGS), em suas instruções técnicas e padrões para a geração e avaliação de DEMs, utiliza o Root-Mean-Square Error (RMSE), ou Erro Médio Quadrático (EMQ), para calcular a acurácia vertical de um DEM (USGS, 1998).

A equação que permite calcular o RMSE é apresentada a seguir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Z_i - Z_t)^2}{n}} \quad (2.2)$$

onde

Z_i = elevação de um ponto do DEM

Z_t = elevação do ponto levantado em campo

n = número de pontos testados.

A quantidade mínima de pontos de verificação, para o cálculo do RMSE, é de vinte e oito pontos. Destes, vinte pontos devem estar localizados na porção central, ou interior, e oito pontos nas bordas do DEM (USGS, 1998).

2.6 Análise de Tendência e Precisão

Segundo Galo e Camargo (1994), a análise da exatidão de uma carta é baseada na análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas observadas na carta e as coordenadas de referência, calculada para cada ponto i por:

$$\Delta X_i = X_i - X_i^r \quad (2.3)$$

onde X_i são os valores calculados e X_i^r são os valores de referência.

A média e o desvio padrão das diferenças amostrais são calculados como segue:

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (2.4)$$

e

$$S_{\Delta X}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \overline{\Delta X})^2 \quad (2.5)$$

No teste de tendência são avaliadas as seguintes hipóteses:

$$H_0 : \overline{\Delta X} = 0, \text{ contra}$$

$$H_1 : \overline{\Delta X} \neq 0$$

Para este teste calcula-se a estatística amostral t , e verifica-se se o valor encontra-se no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula.

O valor de t amostral é calculado por:

$$t_X = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}} \sqrt{n} \quad (2.6)$$

e o intervalo de confiança por:

$$|t_X| < t_{(n-1; \alpha/2)} \quad (2.7)$$

Segundo Galo e Camargo (1994), se a estatística amostral t estiver fora do intervalo de confiança, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, a carta não pode ser considerada como livre de tendências significativas na coordenada testada, para um determinado nível de confiança.

Para verificar a precisão, a análise é realizada comparando-se o desvio padrão das discrepâncias com o desvio padrão esperado para a classe desejada, formulando-se a seguinte hipótese (Itame, 2001):

$$H_0 : S_X^2 = \sigma_X^2, \text{ contra}$$

$$H_1 : S_X^2 > \sigma_X^2$$

onde, σ_X é o desvio padrão esperado para a classe de interesse.

Calculado o desvio padrão esperado, realiza-se a estatística através da expressão:

$$\chi_X^2 = (n-1) \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \quad (2.8)$$

e verifica-se se o valor está no intervalo de aceitação, como segue:

$$\chi_X^2 \leq \chi_{(n-1; \alpha)}^2 \quad (2.9)$$

Se a expressão anterior não for obedecida, rejeita-se a hipótese H_0 de que a carta atenda à precisão pré-estabelecida (Itame, 2001).

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

Neste Capítulo são apresentadas as características da área de estudo, o material utilizado e as abordagens metodológicas adotadas na investigação para a geração dos Modelos Digitais de Elevação. As etapas de trabalho são apresentadas no esquema da figura 3.1 e os fluxos detalhados de cada etapa são apresentados ao longo do capítulo.

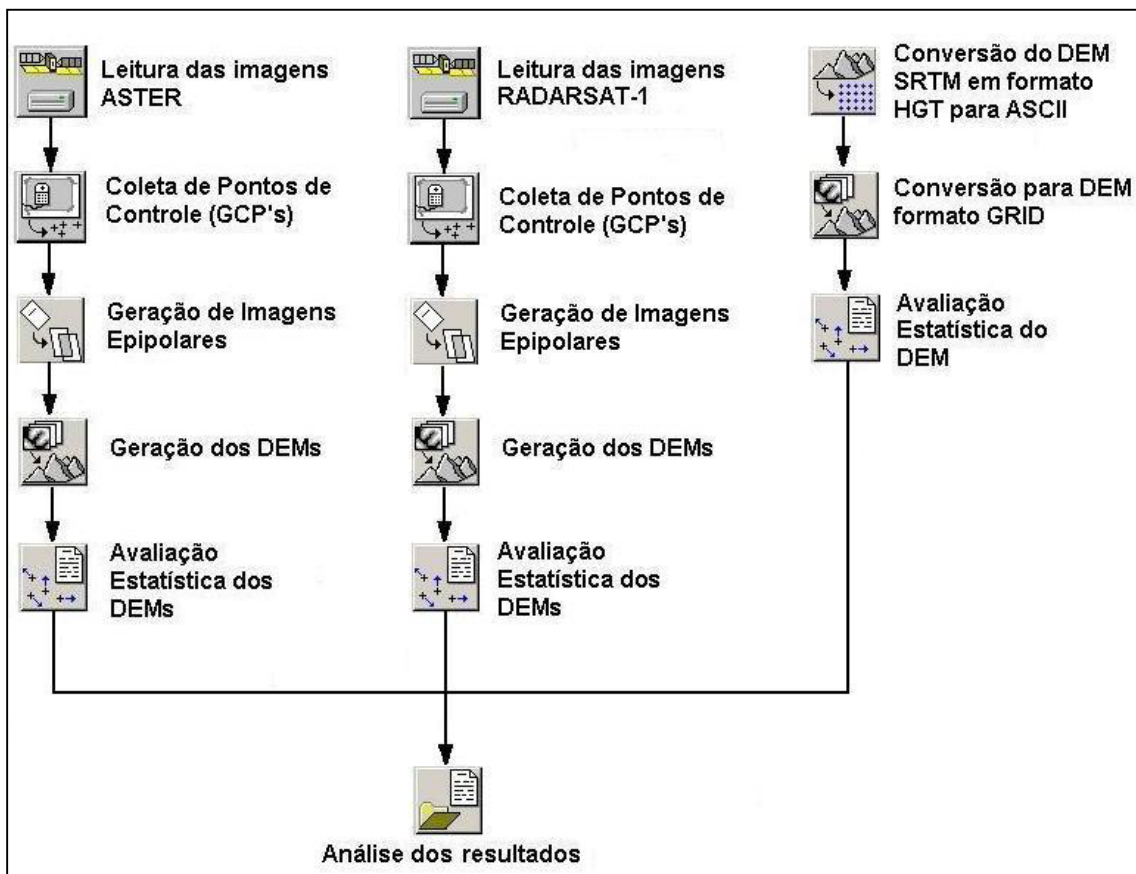


FIGURA. 3.1 – Esquema das etapas de trabalho.

3.1 Área De Estudo

3.1.1 Localização

A área de estudo está localizada no Estado do Pará, na região da Serra dos Carajás, cobrindo parte dos Municípios de Água Azul do Norte, Canaã dos Carajás, Curionópolis, Marabá e Parauapebas, entre as coordenadas 5° S, 51° W e 7° S e 49° W (Figura 3.2).

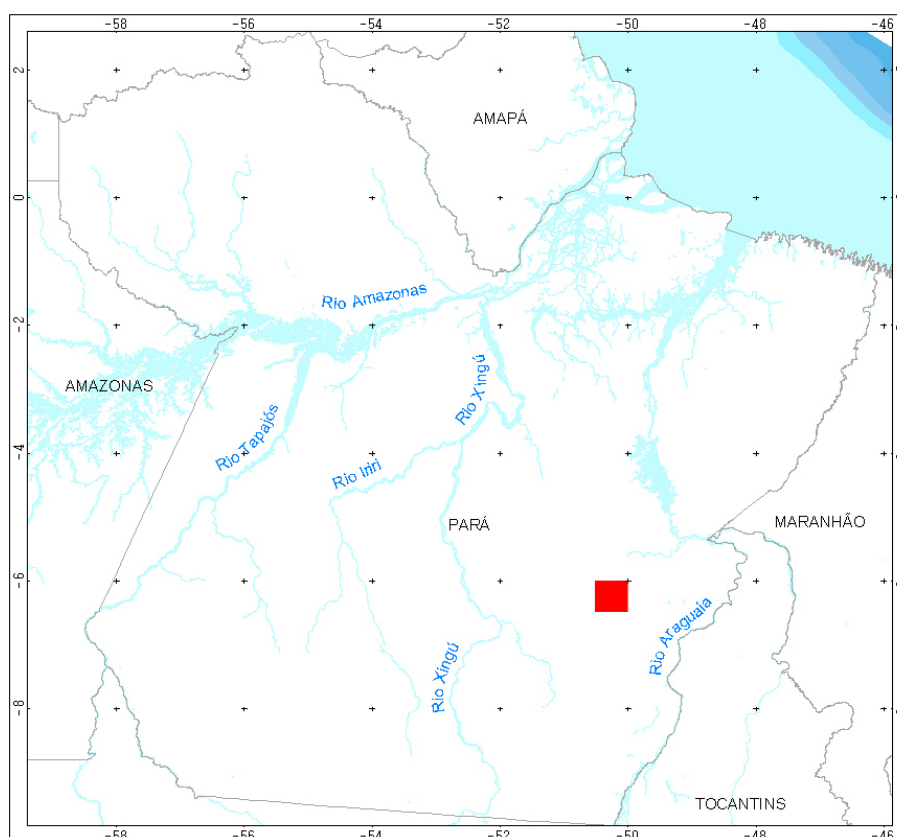


FIGURA 3.2 – Localização da área de estudo.

A topografia da região é caracterizada por um relevo montanhoso com altitudes que variam de 200 até 900 metros. Na região central da Serra dos Carajás o relevo é caracterizado por colinas com altitudes em torno de 500 metros. Já no entorno da Serra o relevo é plano com altitude em torno de 200 metros (figura 3.3).

O clima da área é descrito como tropical úmido de monção apresentando uma temperatura média mínima de 10 a 26° C e média máxima de 25 a 35° C, predominando

o regime de precipitação tropical caracterizado por duas estações bem definidas: uma chuvosa e outra seca. A estação chuvosa tem duração de novembro a maio e o período de seca compreende o intervalo de junho a novembro (Dias, 1995).

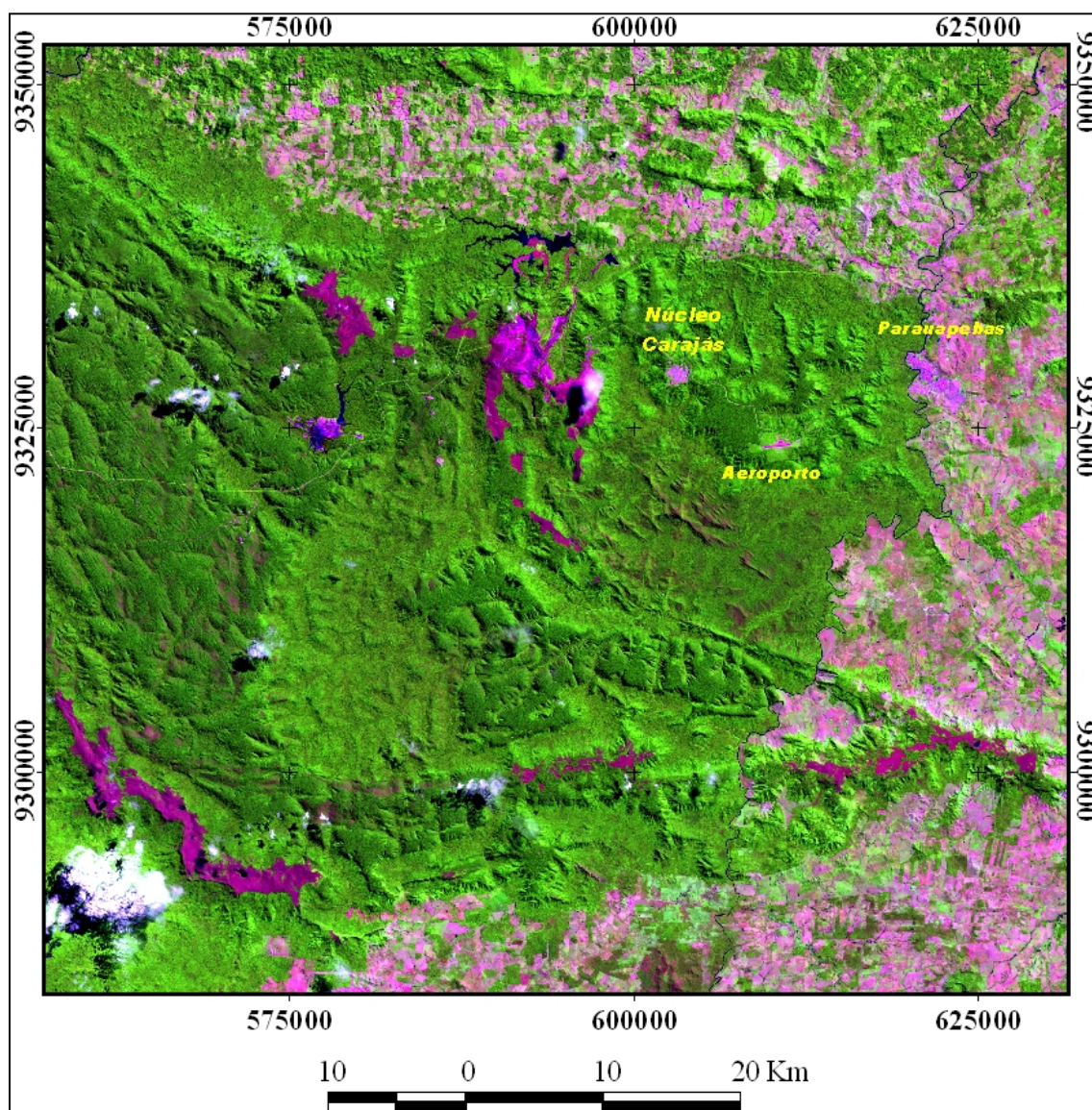


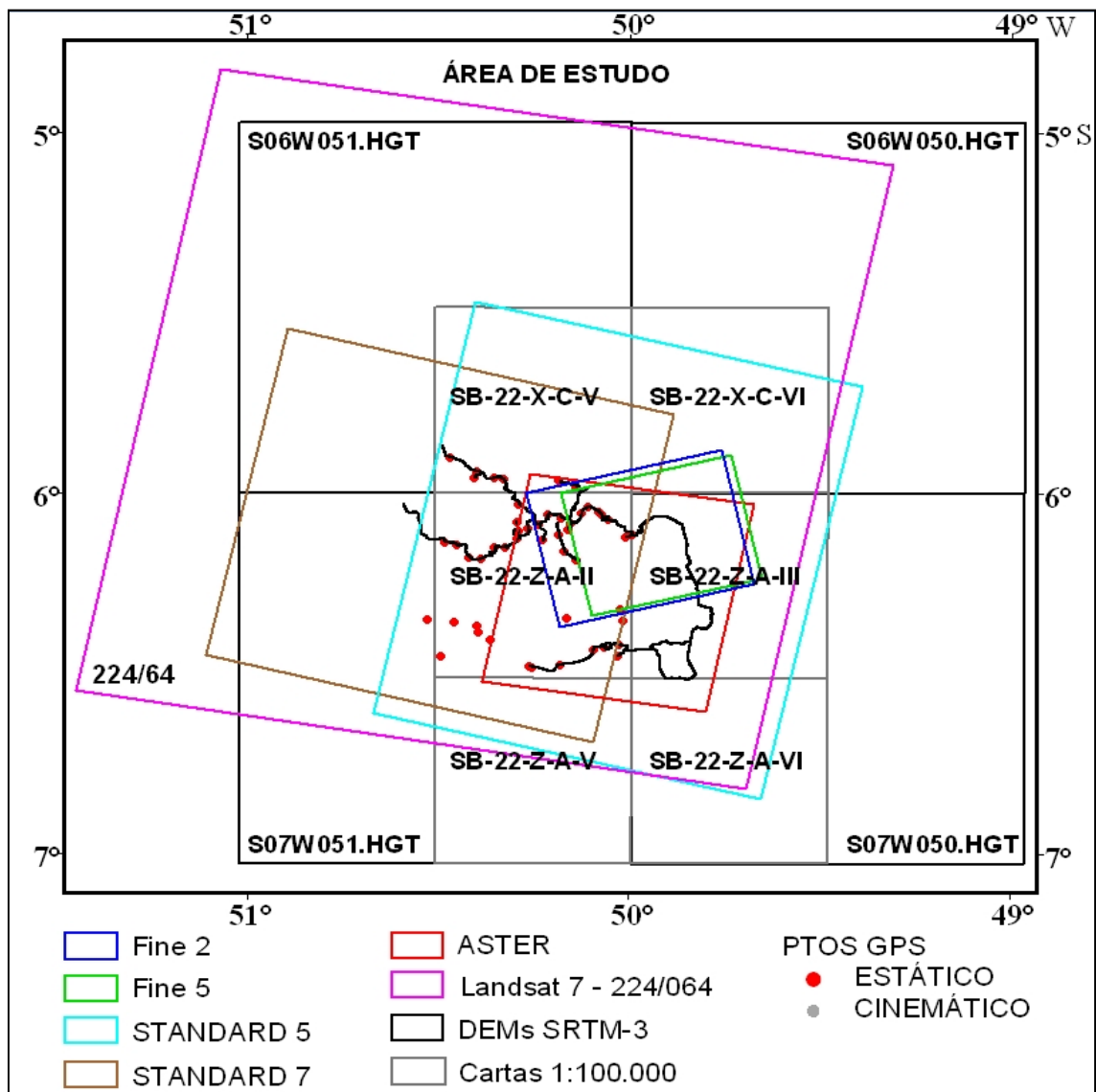
FIGURA. 3.3 – Imagem ETM+ Landsat 7 correspondente à região da Serra dos Carajás, na composição colorida 5R4G3B.

3.2 Material

O seguinte material foi utilizado na investigação:

- Imagem ASTER, L1A, aquisição de 16 de agosto de 2001, fornecida pela empresa Geoimage (Austrália);
- Imagem RADARSAT-1, Fine 2, ascendente, datada de 13 de fevereiro de 2002 (INPE);
- Imagem RADARSAT-1, Fine 5, ascendente, adquirida em 20 de dezembro de 2001 (INPE);
- Imagem RADARSAT-1, Standard 5, descendente, passagem de 31 de maio de 1996 (ADRO);
- Imagem RADARSAT-1, Standard 7, descendente, aquisição de 11 de setembro de 1996 (ADRO);
- DEM SRTM-3 da área de estudo correspondente aos arquivos S06W050.hgt, S06W051.hgt, S07W050.hgt e S07W051.hgt;
- Imagem ETM+ Landsat 7, WRS 224/064, passagem de 13 de agosto de 2002 (INPE);
- Dados de campo coletados em setembro de 2002, com equipamentos GPS Geodésicos de frequência dupla e simples nos modos estático e cinemático;
- Cartas Topográficas SB-22-X-C-V (DSG, 1983a), SB-22-X-C-VI (DSG, 1983b), SB-22-Z-A-II, (IBGE, 1981a) SB-22-Z-A-III, (IBGE, 1981b), SB-22-Z-A-V, (IBGE,1981c) e SB-22-Z-A-VI (IBGE, 1981 d).
- Software de Processamento Digital de Imagens PCI Geomatica Versão 9.0 (PCI Geomatics Enterprises Inc.®);

A Figura 3.4 exibe a cobertura em área das referentes fontes de dados usadas na pesquisa: arquivos HGT correspondentes aos DEMs do SRTM ($1^\circ \times 1^\circ$), abrangência



das cartas topográficas 1:100.000, e recobrimento das imagens ASTER, ETM+ Landsat e RADARSAT-1 (Fine e Standard).

FIGURA 3.4 – Imagens ASTER, Landsat, RADARSAT-1, DEMs SRTM, cartas topográficas e pontos GPS sobre a área de estudo.

3.3 Trabalho de Campo

Como fonte de informações planialtimétricas de campo foram utilizados dados adquiridos da campanha realizada entre 22 de setembro a 2 de outubro de 2002, no âmbito do projeto Geoambiente/INPE (PIPE-FAPESP). A campanha teve como objetivo coletar pontos de controle para a geração de DEMs Radargramétricos e ortorretificação de imagens RADARSAT-1 (Fine 2 e 5 descendentes) e ETM+ Landsat 7 em um estudo prévio de viabilidade de geração de carta topográfica (Paradella et al. 2003b).

O planejamento e logística do trabalho de campo foram realizados com uso de imagens ETM+ Landsat 7 e RADARSAT-1 (Fine) ortorretificadas a partir da cartografia em escala 1:100.000 existente. Foram selecionados aproximadamente 100 pontos de controle em escritório para posterior levantamento de campo, realizado por equipe conjunta do INPE, Geoambiente e empresa SurveyGPS, responsável pelo levantamento e processamento dos pontos de controle necessários para o projeto PIPE-FAPESP.

Na campanha, foram utilizados três receptores GPS Geodésicos, sendo dois receptores Legacy GGD da Javad de duas frequências (para levantamento estático) e um receptor Reliance da Ashtech de uma frequência (levantamento cinemático).

Dos 100 pontos selecionados inicialmente foram levantados 50 pontos de controle no modo estático (tempo médio de ocupação de 30 minutos) e aproximadamente 33.500 pontos de controle no modo cinemático (intervalo de aquisição de 2 segundos), com utilização de uma camionete Mitsubishi L200. Para a coleta de partes dos pontos estáticos foi necessário contar com o auxílio de um helicóptero MBB (*Messerschmitt-Bolkow-Blohm*), da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD).

Além dos pontos de controle uma Referência de Nível do IBGE (RN1612-D), localizada sobre a ponte do Rio Parauapebas, também foi rastreada. O tempo de ocupação para o levantamento da RN foi de aproximadamente uma hora. Isto foi realizado para a determinação das altitudes ortométricas dos pontos de controle levantados em campo.

Um método utilizado para a determinação da altitude ortométrica (H) é o nivelamento por GPS, que envolve o posicionamento relativo dos pontos de interesse, as diferenças entre as alturas ou ondulações geoidais em relação a um ponto de referência (RN) (Camargo, 2003).

A relação entre a altitude ortométrica determinada com GPS (H_{GPSi}) nos pontos de interesse com a diferença de altitude geométrica ($\Delta h_i = h_i - h_{ref}$) e de altura geoidal ($\Delta N_i = N_i - N_{ref}$) é apresentada por Camargo (2003) e expressa por:

$$H_{GPSi} = H_{ref} + \Delta h_i - \Delta N_i \quad (3.1)$$

Foi utilizado como estação base de referência para o trabalho de campo, um vértice implantado nas dependências da CVRD, que foi determinado a partir de transporte de coordenadas da estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) de Imperatriz (MA). Assim, todos os pontos estáticos e cinemáticos foram processados em função da estação base da CVRD. E para a obtenção da altitude ortométrica foi a RN 1612-D do IBGE.

Os processamentos dos dados de campo foram realizados pela empresa SurveyGPS, sendo a listagem das coordenadas dos pontos estáticos apresentada na tabela 3.1, contendo a identificação dos pontos, as coordenadas planas UTM (E,N), a ondulação geoidal calculada para cada ponto a partir do MAPGEO92 (Mapa Geoidal do Brasil 1992) e as altitudes elipsoidal (h) e ortométrica (H).

TABELA 3.1 – Pontos de Controle Coletados em Campo com Altitudes Ortométricas Calculadas pelo MAPGEO92.

Pontos de Controle	Este (m) SAD 69	Norte (m) SAD 69	h (m)	N (m) MAPGEO92	H (m)
GCP01	609.321,39	9.323.586,87	623,75	-2,61	624,62
GCP02	601.581,52	9.331.068,27	652,95	-2,66	653,87
GCP03	598.800,79	9.332.642,23	667,53	-2,68	668,47
GCP04	596.760,12	9.330.587,58	685,93	-2,66	686,85
GCP05	593.846,75	9.327.791,34	652,77	-2,64	653,67
GCP06	592.854,38	9.325.872,66	503,22	-2,63	504,11
GCP07	579.175,70	9.333.488,83	709,47	-2,68	710,40
GCP08	584.821,18	9.327.330,59	684,70	-2,63	685,58
GCP09	585.693,55	9.322.651,96	506,71	-2,60	507,56

Continua...

TABELA 3.1 – Conclusão.

GCP10	578.578,32	9.328.120,83	496,19	-2,64	497,09
GCP11	579.116,55	9.325.309,03	499,91	-2,62	500,79
GCP12	560.980,20	9.298.196,16	710,29	-2,45	711,00
GCP13	567.367,72	9.297.254,32	696,61	-2,44	697,31
GCP14	567.786,33	9.295.164,36	725,08	-2,42	725,76
GCP15	571.015,33	9.292.878,00	728,30	-2,41	728,97
GCP16	592.605,00	9.299.459,31	723,46	-2,44	724,15
GCP17	591.056,55	9.329.310,05	713,15	-2,65	714,06
GCP18	595.263,21	9.316.776,10	702,83	-2,56	703,65
GCP19	591.657,29	9.319.554,75	679,80	-2,58	680,64
GCP20	590.341,68	9.324.167,65	687,80	-2,61	688,67
GCP21	587.177,79	9.330.438,52	701,53	-2,66	702,45
GCP22	608.266,78	9.298.731,88	190,61	-2,42	191,29
GCP23	607.569,99	9.301.950,03	187,37	-2,45	188,08
GCP24	581.715,90	9.326.163,14	684,78	-2,63	685,67
GCP25	578.740,99	9.322.979,72	668,11	-2,60	668,97
GCP26	575.161,49	9.320.482,96	603,53	-2,59	604,38
GCP27	572.127,32	9.320.431,71	360,68	-2,59	361,53
GCP28	568.283,30	9.316.952,82	696,09	-2,56	696,90
GCP29	565.024,18	9.317.648,56	700,06	-2,57	700,89
GCP30	561.610,24	9.321.231,07	673,27	-2,59	674,12
GCP31	558.318,20	9.322.155,98	669,20	-2,60	670,06
GCP32	566.585,63	9.341.446,11	215,19	-2,72	216,17
GCP33	559.745,06	9.347.315,55	170,90	-2,75	171,91
GCP34	567.196,42	9.343.322,07	192,25	-2,73	193,24
GCP35	572.294,69	9.341.281,33	195,55	-2,72	196,53
GCP36	574.815,04	9.340.802,29	211,55	-2,72	212,53
GCP37	595.304,52	9.338.722,77	215,96	-2,72	216,94
GCP38	590.503,72	9.340.471,38	212,07	-2,73	213,06
GCP39	553.458,21	9.299.104,35	200,64	-2,46	201,36
GCP40	556.981,49	9.288.188,11	219,86	-2,39	220,51
GCP41	607.293,07	9.291.424,26	196,08	-2,37	196,71
GCP42	599.947,67	9.290.074,17	253,57	-2,36	254,18
GCP43	590.693,74	9.285.482,84	262,56	-2,34	263,16
GCP44	582.126,26	9.284.910,77	293,22	-2,34	293,81
GCP45	582.842,37	9.284.824,39	273,81	-2,34	274,41
GCP46	602.965,31	9.290.538,28	206,72	-2,36	207,33
GCP47	606.877,47	9.287.875,44	193,87	-2,34	194,47
GCP48	604.140,94	9.328.835,78	652,30	-2,65	653,20
GCP49	602.429,25	9.330.164,45	656,14	-2,66	657,05
GCP50	611.151,92	9.324.221,10	618,66	-2,61	619,53

As Figuras 3.5 e 3.6 ilustram detalhes de alguns pontos GPS levantados no modo estático.

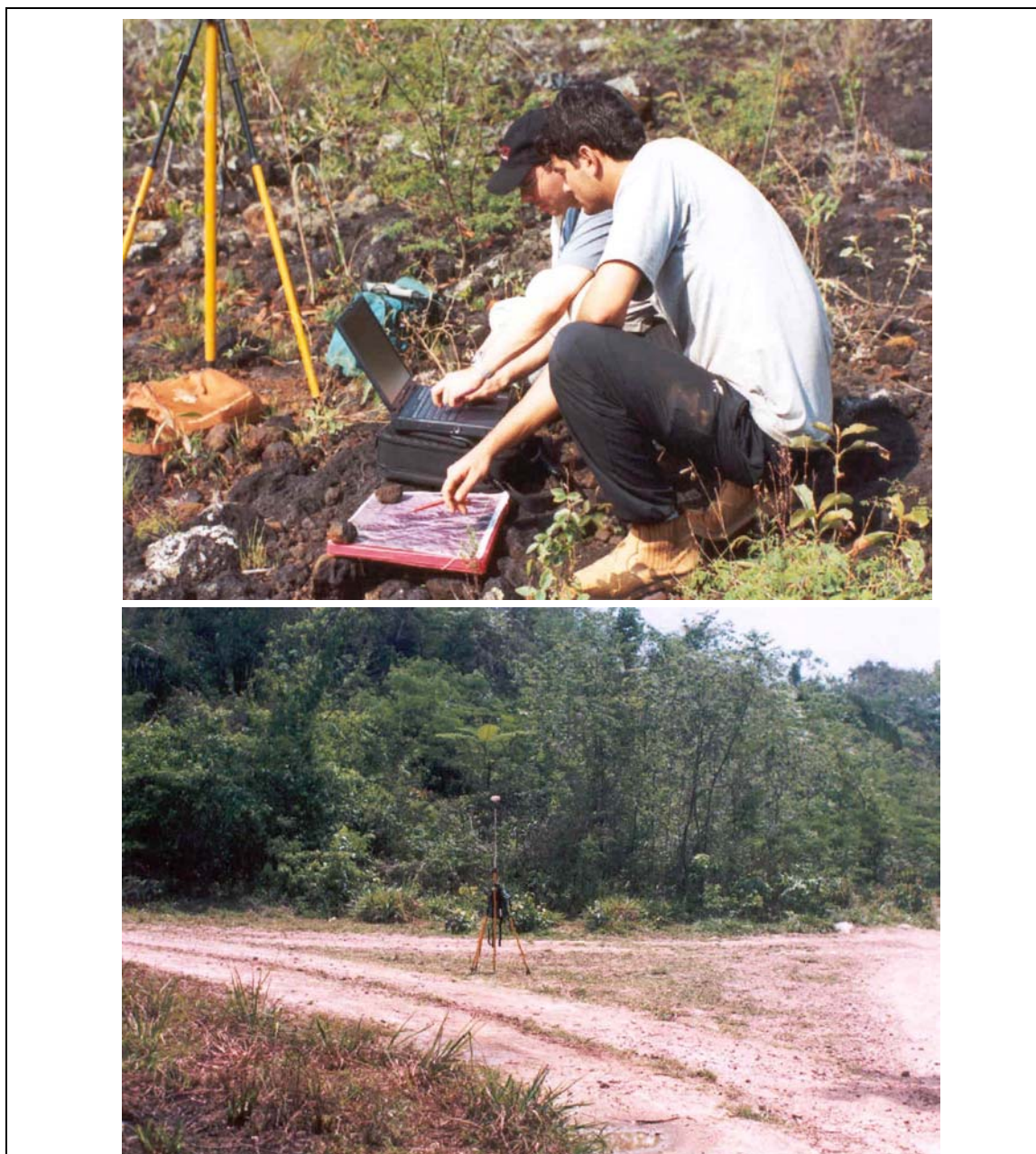


FIGURA 3.5 – Levantamento de pontos GPS em clareira notável sobre imagens (foto superior) e intersecção de estrada (foto inferior).



FIGURA 3.6 – Levantamento de pontos de controle no Rio Itacaiunas (foto superior) e RN sobre ponte do Rio Parauapebas (foto inferior).

3.4 Geração dos Modelos Digitais de Elevação Absolutos

A geração dos Modelos Digitais de Elevação Absolutos, isto é, com GCPs, das imagens ASTER e RADARSAT-1, foi baseada nas funções disponíveis no *software* Geomatica OrthoEngine 9.0 (PCI Geomatics Enterprises Inc.®). O software permite a leitura das imagens brutas, a inserção de pontos de controle (GCPs) de várias fontes, a realização de modelagem geométrica, a geração e edição de DEMs, além de ortorretificação e mosaico de imagens. Duas modelagens foram utilizadas: *Toutin* (concebido para sensores ópticos e radares imageadores) e *RADARSAT Specific* (restrito para radares imageadores).

O modelagem *Toutin* foi desenvolvida pelo Dr. Thierry Toutin cientista do Centro Canadense de Sensoriamento Remoto (*Canada Centre for Remote Sensing – CCRS*) e apresenta esta formulação apoiada em princípios relacionados com a Fotogrametria, Ciências Geodésicas e Cartográficas. A modelagem reflete a realidade física da geometria de aquisição da imagem, permitindo corrigir as distorções da imagem referentes à plataforma, sensor, Terra e projeção cartográfica (Toutin e Cheng, 2001).

A modelagem é baseada na coleta de GCPs de boa qualidade, com uma precisão, para imagens da faixa do visível, na ordem de 1/3 do tamanho do pixel e para imagens SAR em torno de 1 elemento de resolução (Toutin e Cheng, 2001).

No caso da modelagem *RADARSAT Specific*, sua concepção busca aproveitar ao máximo as informações do posicionamento do satélite e do sensor na plataforma. Apresenta como maior vantagem em relação ao modelo anterior, uma dependência menor de informações de campo (GCPs), tanto em termos de quantidade quanto em distribuição em área, ao mesmo tempo em que procura preservar a acurácia altimétrica e o detalhamento na extração do DEM (Paradella et al., 2003a).

Para calcular a posição do sensor/plataforma e extrair distâncias em alcance (*slant range*) da antena/terreno, a modelagem utiliza as informações contidas na estrutura de dados no formato CEOS (Committee for Earth Observation Satellites) (Paradella et al., 2003a).

3.4.1 Geração de Modelos Digitais de Elevação ASTER

Na geração dos DEMs a partir das imagens ASTER, foi utilizada a seguinte seqüência de passos: leitura das imagens 3N e 3B do ASTER; seleção e identificação dos pontos de controle (GCPs) nas imagens; utilização da modelagem *Toutin*; geração de imagens epipolares; geração e geocodificação dos DEMs ASTER; cálculo do RMSE dos DEMs.

O fluxograma das etapas na geração e avaliação de DEMs ASTER é apresentado na figura 3.7.

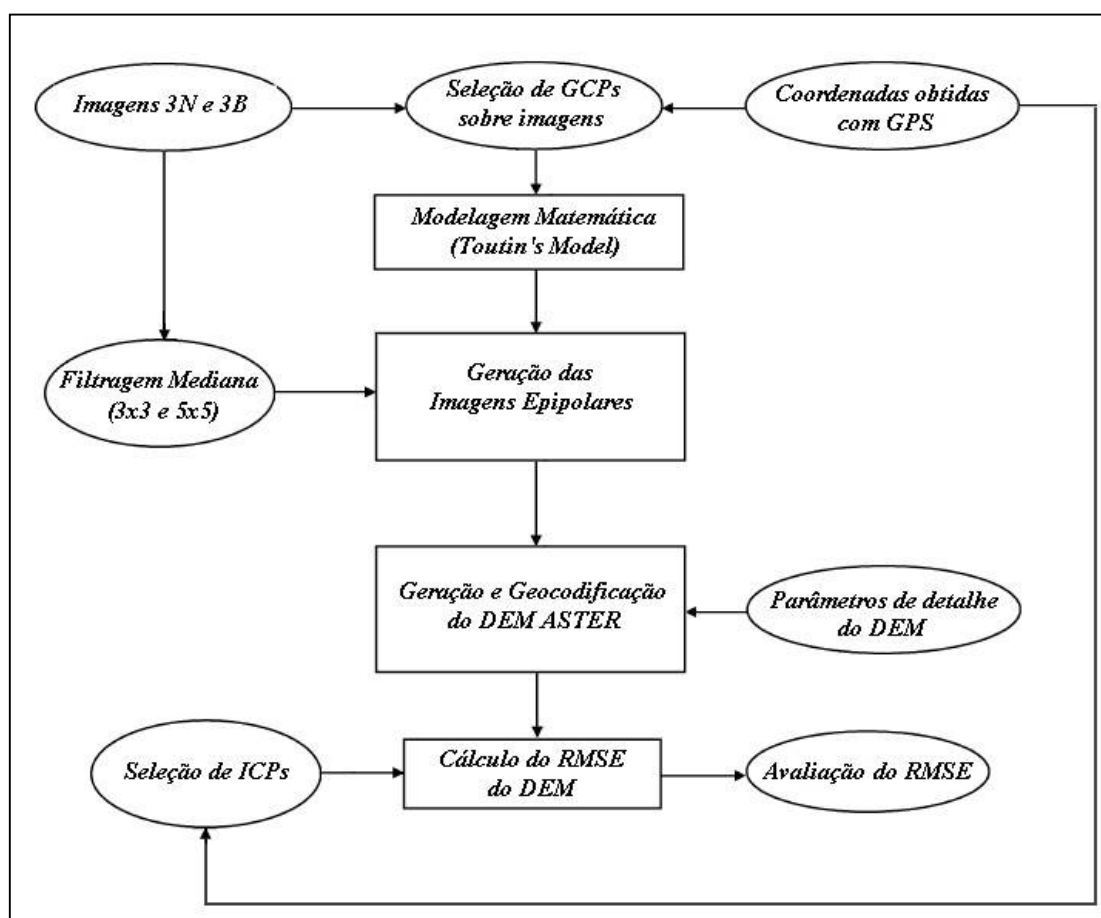


FIGURA. 3.7 – Fluxo para a geração e avaliação dos DEMs ASTER.

As 14 bandas da cena foram convertidas para o formato PIX (PCI Geomatics), agrupadas em três arquivos correspondentes a cada subsistema (VIR, SWIR e TIR). No caso da banda 3B houve a conversão para um arquivo diferente das bandas 1, 2 e 3N, pois o número de linhas e colunas é diferente das três bandas do mesmo subsistema.

Para a geração dos DEMs, foram utilizadas as imagens 3N e 3B em formato PIX por meio da importação destas imagens para um projeto do software Geomatica OrthoEngine, definido no sistema de projeção UTM, zona 22 (Meridiano Central 51° W de Greenwich), e datum horizontal (SAD 69 - *South America Datum* 1969).

Antes do processamento, realizou-se uma verificação visual nas imagens 3N, 3B e na composição colorida 1(R)3N(G)2(B), para identificar possíveis ruídos que pudessem interferir na qualidade dos DEMs. Nenhum ruído foi identificado, mas identificou-se a presença de três nuvens (pequenas) na porção central das imagens (figura 3.8), que pelos seus tamanhos não irão comprometer a geração dos DEMs.

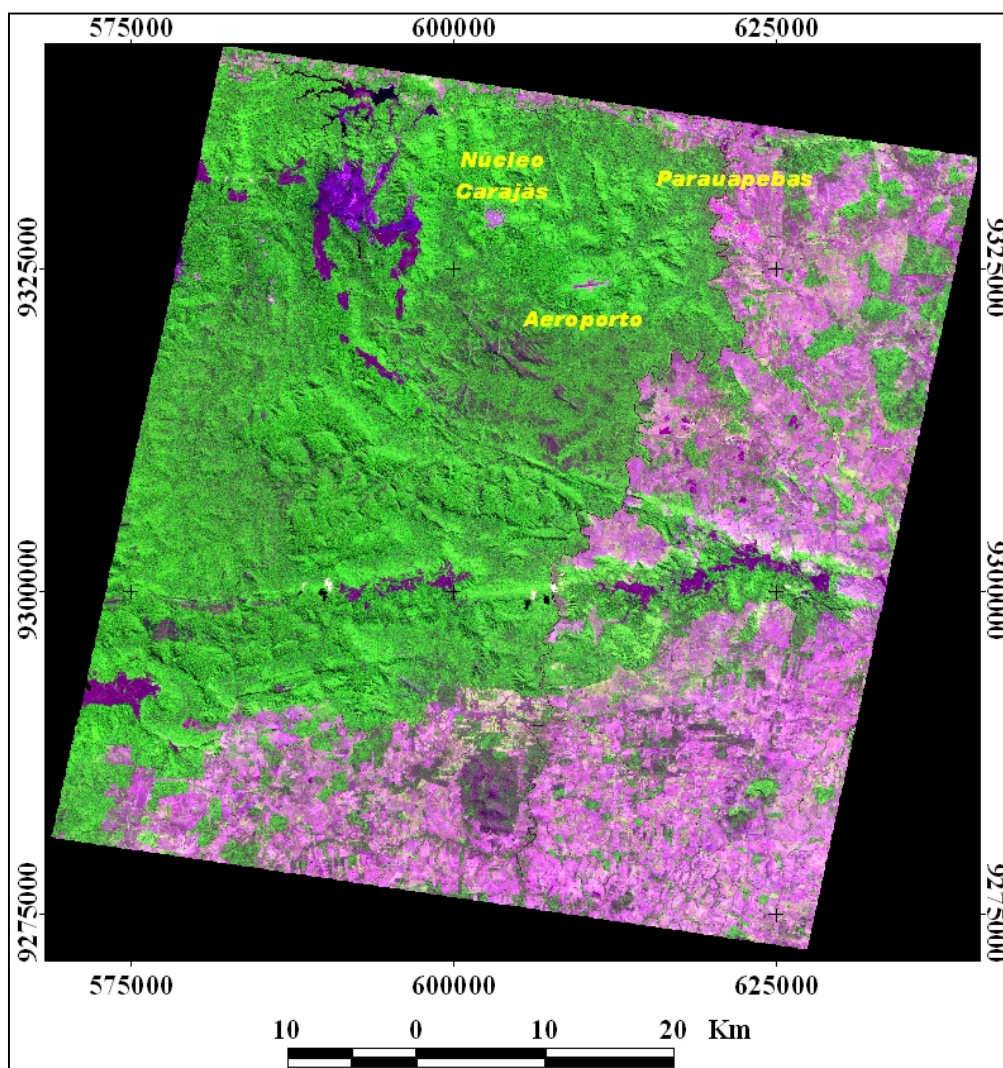


FIGURA 3.8 – Composição colorida 1R3G2B ASTER.

Baseado no trabalho de Hirano et al. (2003), optou-se pela aplicação nas imagens 3N e 3B do filtro mediana 3×3 e 5×5 para avaliação da influência da filtragem no resultado final dos DEMs. A correção radiométrica sugerida por Toutin (2002) não foi aplicada, pois na análise visual das imagens 3N, 3B e da composição colorida não foi observado nenhum efeito aparente de *strips* nas imagens (Figura 3.9).

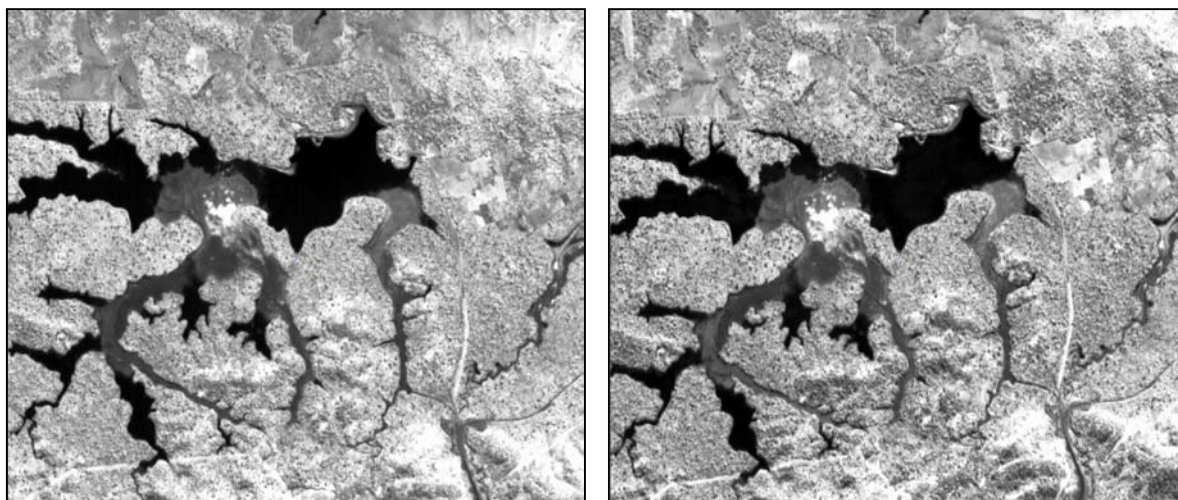


FIGURA. 3.9 – Imagens 3N (esquerda) e 3B (direita) sem efeito de *strips*.

Após a importação e filtragem das imagens 3N e 3B do ASTER, foram selecionados os pontos nas imagens correspondentes aos GCPs determinados com o GPS. No processo de inserção dos GCPs tomou-se o cuidado de utilizar um conjunto de pontos bem distribuídos em área e elevação.

Foram identificados monoscópicamente sobre as imagens 20 pontos de controle (GCPs), do total de pontos levantados em campo. Dos 20 GCPs selecionados, 6 corresponderam ao levantamento pelo método estático e 14 pelo método cinemático. Cabe ainda salientar que, além dos 20 GCPs, foram identificados e selecionados entre as imagens 3N e 3B 15 pontos de amarração (*Tie Points* – TPs). Os pontos de amarração são pontos auxiliares que não possuem coordenadas conhecidas no terreno, apenas coordenadas de imagem (linha e coluna), sendo coletados em áreas desprovidas de GCPs e tornando a modelagem em estéreo mais estável.

Vale ressaltar que a quantidade de GCPs disponíveis do levantamento de campo do projeto PIPE-FAPESP apresentou uma boa distribuição para o par de imagens 3N e 3B do ASTER.

Após a identificação dos pontos de controle sobre as imagens 3N e 3B, foi realizada a modelagem matemática (*Toutin*) para imagens ASTER. A modelagem utilizada leva em consideração a posição e orientação do sensor no momento de aquisição das imagens, a utilização de pontos de controle (GCPs) e pontos de amarração (TPs).

Selecionados os pontos de controle (GCPs) e pontos de amarração (TPs) sobre as imagens 3N e 3B, a modelagem matemática possibilitou ajustar o modelo estereoscópico.

A fase seguinte do processo envolveu a transformação de duas ou mais imagens de uma única cena em uma geometria chamada de epipolar (Lee e Park, 2002). Assim, foram geradas imagens epipolares ASTER a partir das imagens 3N e 3B brutas, além das imagens com filtragem mediana 3×3 e 5×5 . Para isto, a imagem 3N foi selecionada como imagem da esquerda e a imagem 3B da direita.

Após a geração das imagens epipolares, os DEMs absolutos foram gerados automaticamente através do processo de correlação cruzada normalizado das imagens epipolares. Os parâmetros utilizados para a geração dos DEMs ASTER foram:

- Elevação mínima e máxima: 100 metros e 1000 metros;
- Detalhe na geração do DEM: alto detalhe;
- Fator de amostragem: 2 (correspondente a 30 metros).

Após a geração dos DEMs absolutos, foi realizado o processo de geocodificação (georreferenciamento) a partir dos mesmos GCPs utilizados na geração dos DEMs.

3.4.2 Geração de Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1

A geração de Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 foi realizada a partir de imagens no modo Standard e modo Fine. A tabela 3.2 apresenta as características das imagens utilizadas.

TABELA 3.2 – Características das Imagens RADARSAT-1 Utilizadas na Geração dos Modelos Digitais de Elevação.

IMAGEM	ÓRBITA	DATA DE AQUISIÇÃO	INCIDÊNCIA	TAMANHO PIXEL	RESOLUÇÃO ESPACIAL
Fine 2	Ascendente	13/2/2002	39°- 42°	6,25 m	8,7 m (range) × 8,4 m (azimute)
Fine 5	Ascendente	20/12/2001	45°- 48°	6,25 m	7,8 m (range) × 8,4 m (azimute)
Standard 5	Descendente	31/5/1996	36°- 42°	12,50 m	24,2 m (range) × 27 m (azimute)
Standard 7	Descendente	11/9/1996	45°- 49°	12,50 m	22 m (range) × 27 m (azimute)

3.4.2.1 Geração dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 Standard

A partir de imagens RADARSAT-1 Standard 5 e 7 (descendentes) e de GCPs, foram gerados os DEMs Standard utilizando o modelo *Toutin*. O fluxograma com as etapas para geração e avaliação de DEMs RADARSAT Standard (imagens S5 e S7), é apresentado na Figura 3.10.

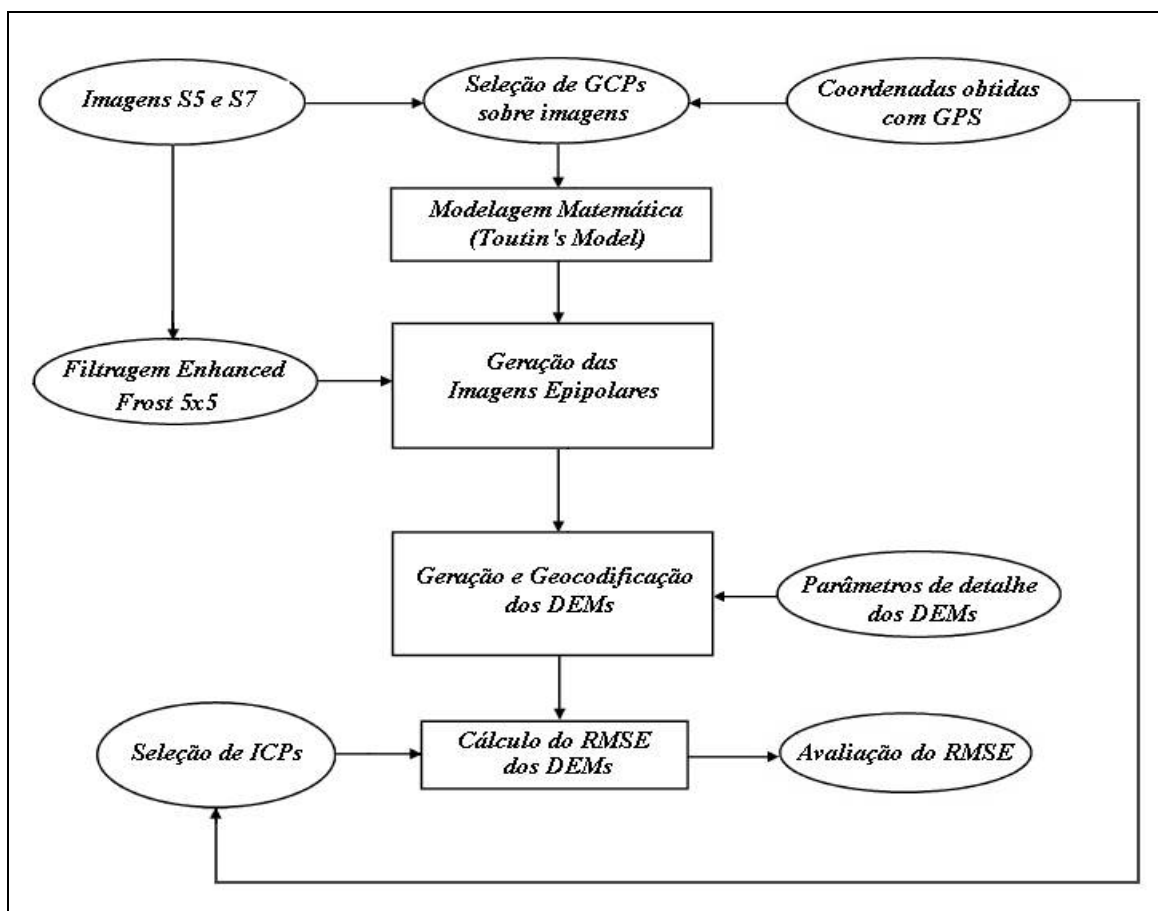


FIGURA 3.10 – Fluxograma para a geração e avaliação dos DEMs RADARSAT Standard.

As imagens RADARSAT-1 Standard 5 e 7 foram fornecidas pelo INPE em formato PIX. As imagens foram importadas para um projeto do *software* Geomatica OrthoEngine com as mesmas informações de sistema de projeção e datum do projeto definido para as imagens ASTER.

Assim como no caso das imagens ASTER, foi realizada uma verificação visual nos estéreo-par Standard (S5/S7), para identificar possíveis ruídos que pudessem interferir na qualidade dos DEMs, sendo que nenhum ruído foi identificado. As imagens S5 e S7 são apresentadas nas Figuras 3.11 e 3.12 respectivamente.

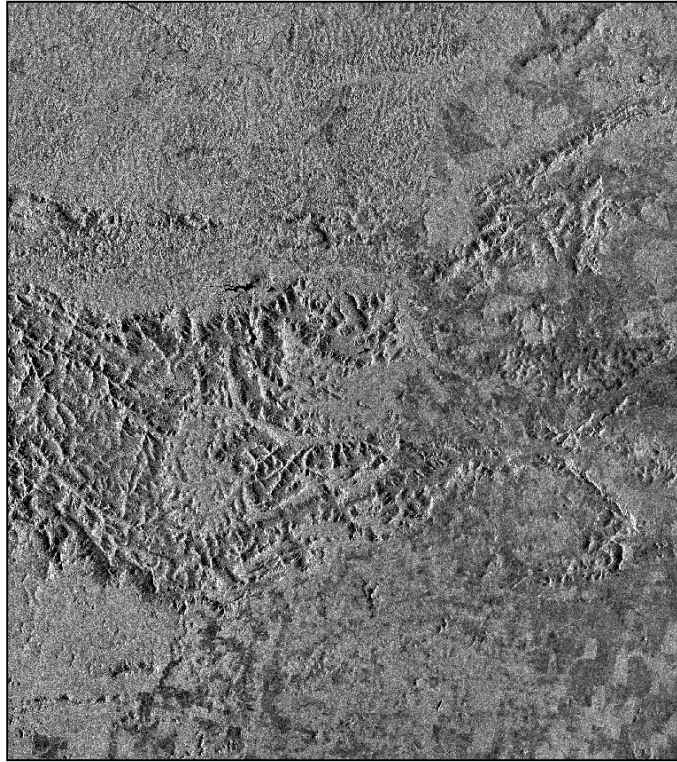


FIGURA 3.11 – Imagem RADARSAT-1 Standard 5 (S5).



FIGURA 3.12 – Imagem RADARSAT-1 Standard 7 (S7).

Com o propósito de investigar a influência do ruído *speckle* nos resultados dos DEMs, foi utilizado o filtro *Enhanced Frost* 5×5. Após a importação e filtragem do estéreo-par S5/S7, foram localizadas nas duas cenas, alvos notáveis correspondentes aos locais em que se dispunha de informação planialtimétrica de precisão (pontos GPS). Procurou-se preservar uma configuração de pontos bem distribuídos em área e elevação.

Foram selecionados 17 pontos de controle (GCPs) para as imagens S5 e S7. Deste conjunto, apenas 2 GCPs coincidiram com os selecionados para as imagens 3N e 3B do ASTER. Apesar da área de sobreposição do par S5 e S7 cobrir quase a metade da área do par 3N e 3B, as diferentes respostas dos alvos nas imagens SAR e a grande diferença entre as datas de aquisição das imagens (1996 para as imagens Standard e 2001 para a ASTER), não permitiram utilizar a mesma população de pontos utilizados anteriormente na geração dos DEMs ASTER.

Os 17 GCPs foram identificados monoscópicamente sobre a imagem S5 e os pontos correspondentes foram identificados posteriormente sobre a imagem S7 (tomando como referência a imagem S5). Dos 17 GCPs selecionados, 16 foram levantados pelo método estático e 1 pelo método cinemático.

Além dos 17 GCPs identificados e selecionados entre as imagens S5 e S7, foram identificados e selecionados 13 pontos de amarração (*Tie Points* – TPs) entre as duas imagens.

Selecionados os pontos de controle (GCPs) e pontos de amarração (TPs) sobre as imagens S5 e S7, a modelagem *Toutin* foi utilizada para fazer o ajustamento do par estereoscópico e calcular os resíduos dos pontos de controle.

Cabe mencionar que os pontos possíveis de identificação nas imagens do estéreo-par Standard, apresentaram uma distribuição satisfatória em área, com maior concentração nas porções central e sul da área de sobreposição e ausência de pontos na porção norte.

Com os GCPs e TPs identificados sobre as imagens S5 e S7, as imagens epipolares para as imagens brutas e para as imagens com filtragem *Enhanced Frost* 5×5 foram geradas.

Em função do ângulo de incidência de cada imagem, a imagem S5 foi selecionada como imagem da esquerda e a imagem S7 da direita.

A partir das imagens epipolares, foram gerados DEMs absolutos correspondentes a cada par de imagens, sem filtragem e com filtragem (*Enhanced Frost 5×5*).

Os parâmetros utilizados para a geração dos DEMs Standard foram:

- elevação mínima e máxima: 100 metros e 1000 metros;
- detalhe na geração do DEM: médio detalhe;
- fator de amostragem: 4 (correspondente a 50 metros).

Após a geração dos DEMs absolutos, realizou-se o processo de geocodificação (georreferenciamento), utilizando os mesmos GCPs utilizados na geração dos DEMs.

3.4.2.2 Geração dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 Fine

A partir de imagens RADARSAT-1 Fine 2 e 5 (ascendentes) e de GCPs, foram gerados DEMs Fine utilizando as modelagens *Toutin* e *RADARSAT Specific*.

O fluxograma com as etapas para geração e avaliação de DEMs RADARSAT Fine (imagens F2 e F5) é apresentado na Figura 3.13.

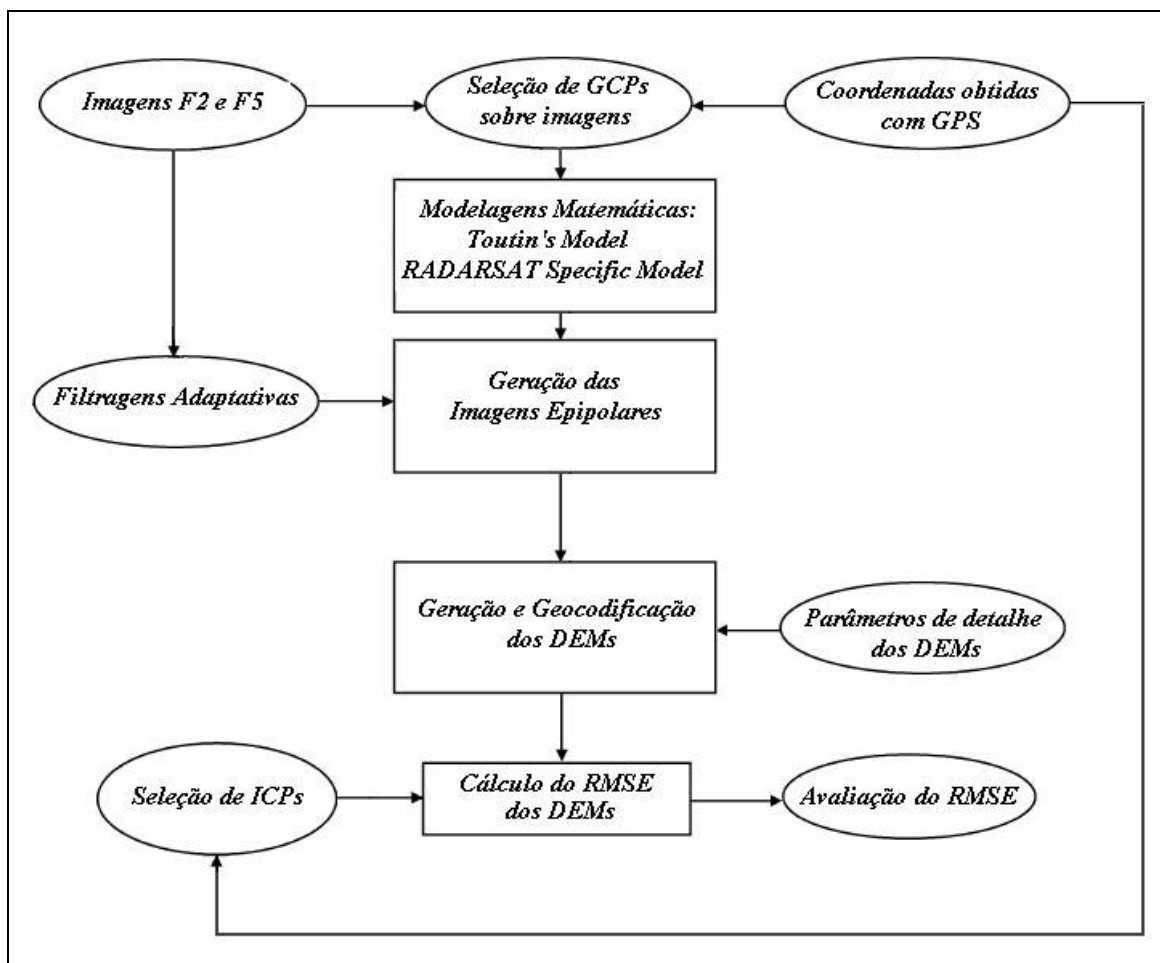


FIGURA 3.13 – Fluxograma para geração e avaliação dos DEMs RADARSAT Fine.

As imagens RADARSAT-1 Fine 2 e 5 foram adquiridas e processadas pela Divisão de Geração de Imagens (DGI) do INPE. Assim como nos casos anteriores, as imagens foram importadas para um projeto do software Geomatica OrthoEngine, com as mesmas informações de sistema de projeção e datum.

Repetindo o procedimento realizado para as imagens ASTER e RADARSAT-1 Standard, foi realizada uma verificação visual nas imagens Fine 2 (F2) e Fine 5 (F5)

para identificar possíveis ruídos que pudessem interferir na qualidade dos DEMs, sendo que nenhum ruído foi identificado. As Figuras 3.14 e 3.15 apresentam as imagens F2 e F5 respectivamente.

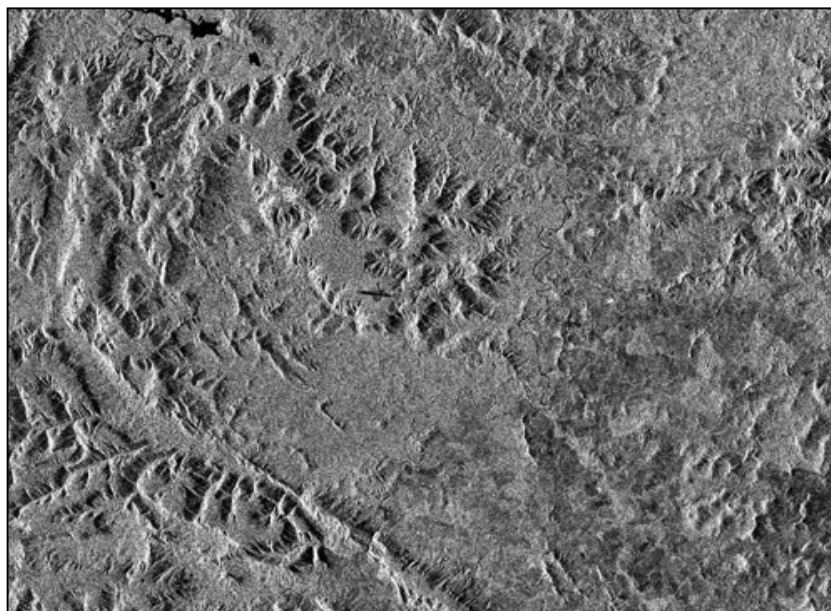


FIGURA 3.14 – Imagem RADARSAT-1 Fine 2 (F2).



FIGURA 3.15 – Imagem RADARSAT-1 Fine 5 (F5).

Para avaliar a influência do ruído *speckle* nas imagens originais quando da geração dos DEMs Fine, foram utilizados diferentes filtros: *Frost*, *Enhanced Frost*, *Lee*, *Enhanced*

Lee, Gamma, Kuan, Touzi e Average. Estes filtros são utilizados inicialmente para remover os ruídos de alta frequência (*speckle*), preservando as bordas das feições (PCI Geomatics, 2003).

Para os filtros *Frost, Enhanced Frost, Lee, Enhanced Lee, Gamma, Kuan, e Average*, foram aplicados tamanhos de filtro entre 3×3 a 11×11, totalizando 5 filtragens para cada tipo de filtro. Para o filtro *Touzi* os tamanhos do filtro variaram entre 5×5 a 11×11, pois 5×5 é o tamanho mínimo permitido para este tipo de filtragem.

Para a aplicação das filtragens foram necessários criar 39 canais para cada arquivo correspondente as imagens Fine 2 e Fine 5. A tabela 3.3 apresenta o conteúdo dos 40 canais de cada arquivo.

TABELA 3.3 – Conteúdos dos 40 Canais de cada Arquivo Correspondente as Imagem FINE 2 E FINE 5.

CANAL	FILTRO	TAMANHO DO FILTRO	CANAL	FILTRO	TAMANHO DO FILTRO
1	IMAGEM BRUTA	-	21	GAMMA	11 x 11
2	ENHANCED FROST	3 x 3	22	KUAN	3 x 3
3	ENHANCED FROST	5 x 5	23	KUAN	5 x 5
4	ENHANCED FROST	7 x 7	24	KUAN	7 x 7
5	ENHANCED FROST	9 x 9	25	KUAN	9 x 9
6	ENHANCED FROST	11 x 11	26	KUAN	11 x 11
7	ENHANCED LEE	3 x 3	27	LEE	3 x 3
8	ENHANCED LEE	5 x 5	28	LEE	5 x 5
9	ENHANCED LEE	7 x 7	29	LEE	7 x 7
10	ENHANCED LEE	9 x 9	30	LEE	9 x 9
11	ENHANCED LEE	11 x 11	31	LEE	11 x 11
12	FROST	3 x 3	32	AVERAGE	3 x 3
13	FROST	5 x 5	33	AVERAGE	5 x 5
14	FROST	7 x 7	34	AVERAGE	7 x 7
15	FROST	9 x 9	35	AVERAGE	9 x 9
16	FROST	11 x 11	36	AVERAGE	11 x 11
17	GAMMA	3 x 3	37	TOUZI	5 x 5
18	GAMMA	5 x 5	38	TOUZI	7 x 7
19	GAMMA	7 x 7	39	TOUZI	9 x 9
20	GAMMA	9 x 9	40	TOUZI	11 x 11

A Figura 3.16 apresenta o resultado da aplicação da filtragem *Enhanced Frost* (3×3, 5×5, 7×7, 9×9 e 11×11) sobre uma sub-área da imagem F5 sem filtragem.

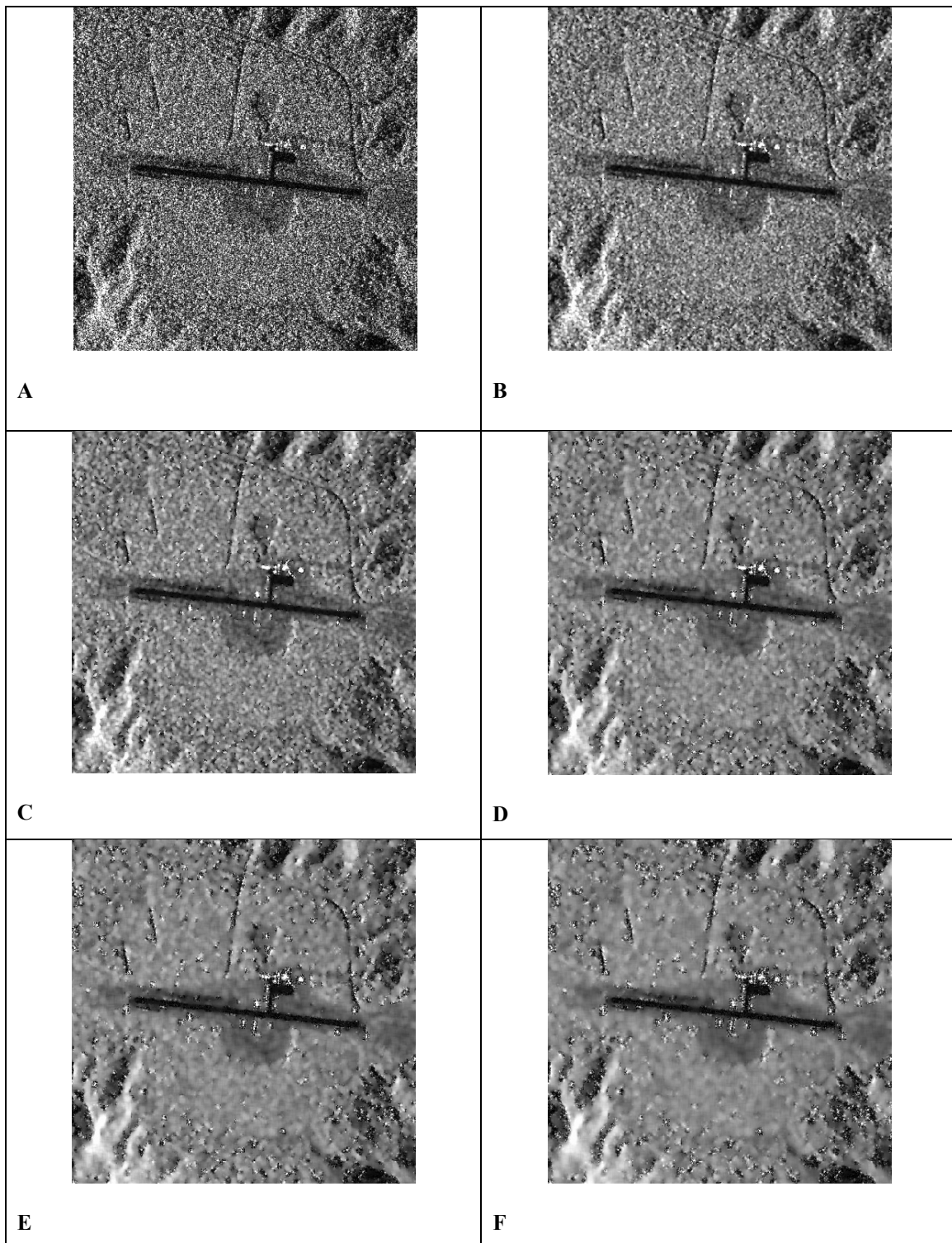


FIGURA 3.16 – Imagem Fine 5 sem filtragem (A) e com filtragens *Enhanced Frost* 3×3 (B), 5×5 (C), 7×7 (D), 9×9 (E) e 11×11 (F).

Os tamanhos diferentes de filtros afetam a qualidade dos processamentos das imagens. Se o filtro for muito pequeno (3×3), o algoritmo de filtragem não terá muito efeito. Se o

filtro for muito grande (maior que 11×11), os detalhes sutis nas imagens serão perdidos após o processo de filtragem. Usualmente um filtro de tamanho 7×7 fornece bons resultados (PCI Geomatics, 2003).

A seleção dos GCPs para as imagens Fine foi realizada da mesma forma como nos casos anteriores, ou seja, após a importação e filtragem das imagens F2 e F5.

A coleta de GCPs, isto é, pontos bem localizados nas imagens que inequivocamente representavam feições em campo, onde foram coletadas informações planialtimétricas de precisão (GPS), indicou que apenas 8 GCPs estáticos poderiam ser utilizados, concentrados na borda ocidental da área de sobreposição do estéreo-par F5/F2. Além disso, a distribuição da aquisição de GCPs no modo cinemático cobria apenas o setor central e ocidental da área de sobreposição (figura 3.17). Esta configuração não atenderia aos requisitos de distribuição de GCPs na geração de DEMs com dados RADARSAT-1 pelo modelo *Toutin*.

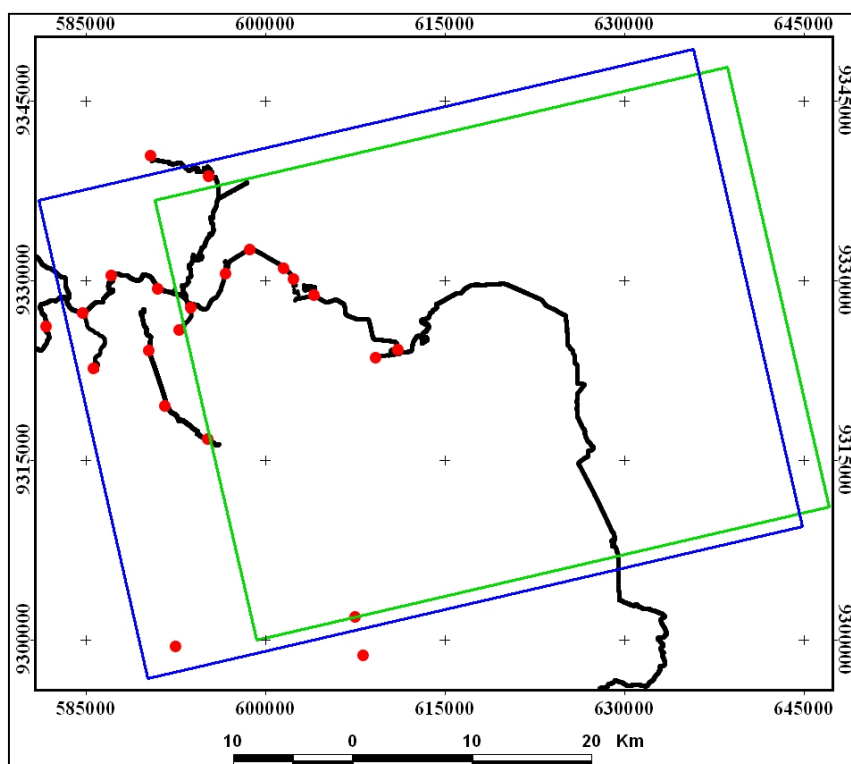


FIGURA 3.17 – Distribuição dos GCPs adquiridos no modo estático (pontos na cor vermelha) e cinemático (conjunto de pontos na cor preta) sobre estéreo-par F5 (verde)/F2 (azul).

Com isso, testou-se gerar um DEM com 13 pontos de controle (GCPs), adquiridos no modo estático e cinemático, selecionados e identificados sobre as imagens F2 e F5. Desses pontos, 2 GCPs coincidiram com os selecionados para as imagens Standard e 3 GCPs com os selecionados para as imagens 3N e 3B do ASTER.

Os 13 GCPs foram identificados monoscópicamente sobre a imagem F5 e posteriormente sobre a imagem F2 (tomando como referência a imagem F5). Do total de GCPs selecionados, 4 foram levantados pelo método estático e 9 pelo método cinemático. Além disso, 22 pontos de amarração (*Tie Points* – TPs) foram identificados e selecionados entre as duas imagens.

Selecionados os pontos de controle (GCPs) e pontos de amarração (TPs) sobre as imagens F2 e F5, a modelagem *Toutin* foi calculada e os resíduos estereoscópicos para os pontos de controle foram gerados.

Para a geração das imagens epipolares optou-se em utilizar também a modelagem *RADARSAT Specific*, além da modelagem *Toutin*, que é muito dependente de GCPs bem distribuídos em área e elevação. Isto foi realizado em função da quantidade e distribuição dos 13 GCPs selecionados.

No processo de geração das imagens epipolares a imagem F5 foi selecionada como imagem da esquerda e a imagem F2 da direita, em função dos ângulos de incidência das imagens e de suas órbitas (ascendente).

A partir das imagens epipolares foram gerados DEMs absolutos com os seguintes parâmetros:

- elevação mínima e máxima: 100 metros e 1000 metros;
- detalhe na geração do DEM: médio detalhe;
- fator de amostragem: 4 (25 metros).

Após a geração dos DEMs *Toutin* e *RADARSAT Specific*, foi realizado o processo de geocodificação (georreferenciamento) dos DEMs a partir dos 13 GCPs utilizados anteriormente.

Numa tentativa de ampliar a distribuição dos GCPs em área, foi avaliada a adição de pontos de controle obtidos de uma imagem ETM+ Landsat (WRS 224/064), banda pancromática (15 metros), passagem de 13 de agosto de 2002, ortorretificada a partir de pontos de controle coletados em campo com GPS e de um DEM gerado a partir das cartas topográficas em escala 1:100.000.

Partindo dos 13 GCPs coletados anteriormente para a geração do DEM Fine na modelagem *Toutin*, foram coletados mais 7 GCPs a partir da imagem Landsat 7 ortorretificada e do DEM gerado a partir das cartas topográficas em escala 1:100.000.

A partir desse novo conjunto de GCPs a geração dos DEMs Fine foi realizada utilizando-se as modelagens *Toutin* e *RADARSAT Specific*. Vale destacar que apenas a modelagem *Toutin* utilizou os TPs coletados anteriormente.

3.4.2.3 Geração de 40 DEMs Fine pela modelagem Toutin

Assim como nos casos anteriores, selecionados os pontos de controle (GCPs) e os pontos de amarração (TPs) sobre as imagens F2 e F5, a modelagem matemática foi calculada e os resíduos estereoscópicos para os pontos de controle foram gerados.

A partir do cálculo da modelagem matemática, foram gerados 40 pares de imagens epipolares Fine 2 (F2) e Fine 5 (F5), correspondentes aos canais listados da tabela 3.3.

A partir das 80 imagens epipolares geradas, 40 para as imagens F2 (direita) e 40 para as imagens F5 (esquerda), foram gerados DEMs com os seguintes parâmetros:

- elevação mínima e máxima: 100 metros e 1000 metros;
- detalhe na geração do DEM: médio detalhe;
- fator de amostragem: 4 (25 metros).

Após a geração de cada DEM *Toutin*, foi realizado o processo de geocodificação (georreferenciamento) a partir dos 20 GCPs utilizados na geração dos DEMs.

3.4.2.4 Geração de 40 DEMs Fine pela modelagem RADARSAT Specific

Baseado no trabalho de Paradella et al. (2003), a modelagem *RADARSAT Specific* foi utilizada para a geração de 40 DEMs a partir dos mesmos pontos de controle (20 GCPs) utilizados na modelagem *Toutin*.

Apesar desta modelagem apresentar a vantagem de ser pouco dependente de GCPs, apresenta a desvantagem de não gerar relatório dos resíduos estereoscópicos para os pontos de controle coletados sobre as imagens. Assim, o controle dos resíduos é realizado no momento da seleção dos pontos de controle sobre as imagens, ou sobre o relatório da modelagem *Toutin*, devendo ser observado os resíduos individuais em X (E) e Y (N).

Para a geração dos DEMs, nesta modelagem, foi criado um novo projeto no *software* Geomatica OrthoEngine e as imagens com os 40 canais criados anteriormente foram inseridas no projeto.

Os 20 pontos de controle coletados anteriormente para a geração dos DEMs na modelagem *Toutin*, foram importados para o novo projeto e inseridos nas imagens F2 e F5. Dessa forma, manteve-se a mesma distribuição em área e elevação dos pontos de controle selecionados anteriormente.

Na modelagem *RADARSAT Specific* a geração das imagens epipolares foi realizada após a inserção dos pontos de controle sobre as imagens F2 e F5. O cálculo da modelagem matemática é realizado no momento da geração das imagens epipolares, ao contrário da modelagem *Toutin* onde o cálculo é realizado pelo *software* antes da geração das imagens epipolares.

Assim, foram gerados 40 pares de imagens epipolares correspondentes aos canais listados da tabela 3.3 e a partir destas imagens foram gerados 40 DEMs com os seguintes parâmetros:

- elevação mínima e máxima: 100 metros e 1000 metros;
- detalhe na geração do DEM: médio detalhe;
- fator de amostragem: 4 (25 metros).

Após a geração de cada DEM *RADARSAT Specific*, foi realizado o processo de geocodificação (georreferenciamento) a partir dos 20 GCPs utilizados na geração dos DEMs.

3.5 Seleção de Pontos de Verificação para Controle de Qualidade dos Modelos Digitais de Elevação

A seleção dos pontos de verificação necessários para realizar o controle de qualidade dos Modelos Digitais de Elevação, gerados a partir de imagens ASTER e RADARSAT (Standard e Fine), foi realizada a partir das metodologias propostas por Merchant (1982) e USGS (1998).

Além dos pontos de verificação selecionados para os DEMs gerados a partir das imagens, foi também realizada a seleção de pontos de verificação, para o controle de qualidade do DEM das cartas topográficas em escala 1:100.000 e nos DEMs gerados pela SRTM.

Como mencionado anteriormente, a metodologia proposta no trabalho de Merchant (1982) recomenda que no mínimo 20 pontos de verificação sejam utilizados para a análise da qualidade. Já a metodologia proposta pelo USGS, baseada nos padrões e procedimentos internos da instituição para geração e avaliação de DEMs, recomenda a quantidade mínima de 28 pontos para a análise da qualidade de DEMs.

3.5.1 Seleção dos pontos de verificação

Os pontos de verificação (ou *Independent Check Points* – ICPs) foram obtidos através do levantamento realizado em campo com equipamentos GPS, assim como os pontos de controle obtidos em campo (GCPs).

Os pontos de verificação foram selecionados visualmente sobre o conjunto de observações GPS disponíveis, procurando garantir uma boa distribuição em área e elevação. Os ICPs localizados em áreas sem informação nos DEMs gerados foram descartados. Assim, foram selecionados 20 e 28 pontos de verificação sobre as áreas dos DEMs ASTER, RADARSAT Standard, cartas topográficas e SRTM.

A seleção dos ICPs para os DEMs RADARSAT Fine foram realizada a partir de dois conjuntos diferentes de ICPs: um para os DEMs gerados a partir de 13 GCPs e outro para os DEMs gerados a partir de 20 GCPs obtidos do levantamento GPS e imagem Landsat ortorretificada.

Para os DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 13 GCPs, foram selecionados 20 e 28 ICPs das medidas de campo (GPS). Estes pontos foram selecionados apenas na área onde as medidas GPS foram obtidas, ou seja, a distribuição dos pontos em área foi prejudicada pela impossibilidade de realizar medidas GPS em toda a área do estéreo-par F5/F2.

Para os DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs, foram selecionados 20 e 28 ICPs das medidas de campo (GPS) e de pontos cotados extraídos das cartas topográficas da área de estudo. Isto foi realizado para melhorar a distribuição dos ICPs por toda a área dos DEMs gerados.

Do conjunto de 20 ICPs selecionados sobre a área dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs, 9 ICPs foram selecionados a partir de pontos cotados extraídos das cartas topográficas 1:100.000 e o restante (11 ICPs) foram selecionados a partir do conjunto de pontos levantados em campo com equipamento GPS.

Do conjunto de 28 ICPs selecionados sobre a área dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs, 17 ICPs foram selecionados a partir de pontos cotados extraídos das carta topográficas 1:100.000 e o restante (11 ICPs) foram selecionados a partir do conjunto de pontos de controle obtidos em campo com equipamento GPS.

Para os DEMs SRTM em sistema de coordenadas geodésicas/WGS-84, foi necessário converter os arquivos em formato HGT para o formato PIX. Após isto, os arquivos foram mosaicados e convertidos do sistema de coordenadas geodésicas/WGS-84 para o sistema de coordenadas UTM/SAD-69. Estes procedimentos foram realizados no software PCI Geomatica.

3.5.2 Cálculo do Erro Médio Quadrático dos Modelos Digitais de Elevação

A partir da seleção dos pontos de verificação, foram realizados os cálculos dos erros médios quadráticos (RMSE) dos Modelos Digitais de Elevação, gerados a partir de imagens ASTER, RADARSAT-1 (Standard e Fine), do DEM das cartas topográficas 1:100.000 e dos DEMs SRTM da área de estudo.

A partir das coordenadas UTM (E,N) de cada ICP, foram obtidos os valores da elevação dos pontos nos DEMs e a partir disso os valores do RMSE altimétrico de cada DEM foi calculado através da equação 2.2.

3.5.3 Análise de tendência e precisão dos Modelos Digitais de Elevação

Com base na metodologia proposta por Galo e Camargo (1994), os procedimentos adotados para a análise de tendência e precisão para todos os DEMs gerados a partir das imagens ASTER, RADARSAT (Standard e Fine), das cartas topográficas e da SRTM foram realizados a partir das seguintes etapas:

- cálculo das discrepâncias entre os valores das elevações observadas nos DEMs e as elevações de referência (ICPs);
- cálculo da média (equação 2.4) e desvio padrão (equação 2.5) das discrepâncias amostrais;
- cálculo da estatística amostral t (equação 2.6) e respectivo intervalo de confiança (equação 2.7);
- cálculo do desvio padrão esperado (equação 2.8) e intervalo de aceitação (equação 2.9)

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Geração dos DEMS ASTER

4.1.1 Pontos de controle para as imagens ASTER

A Figura 4.1 apresenta a localização de um GCP sobre a imagem 3N e a Figura 4.2 apresenta a distribuição dos 20 GCPs (vermelho) e 15 TPs (azul) sobre as imagens 3N e 3B. Vale ressaltar que a distribuição dos GCPs sobre o estéreo-par de imagens ASTER cobriu praticamente toda a área do estéreo-par de imagens.

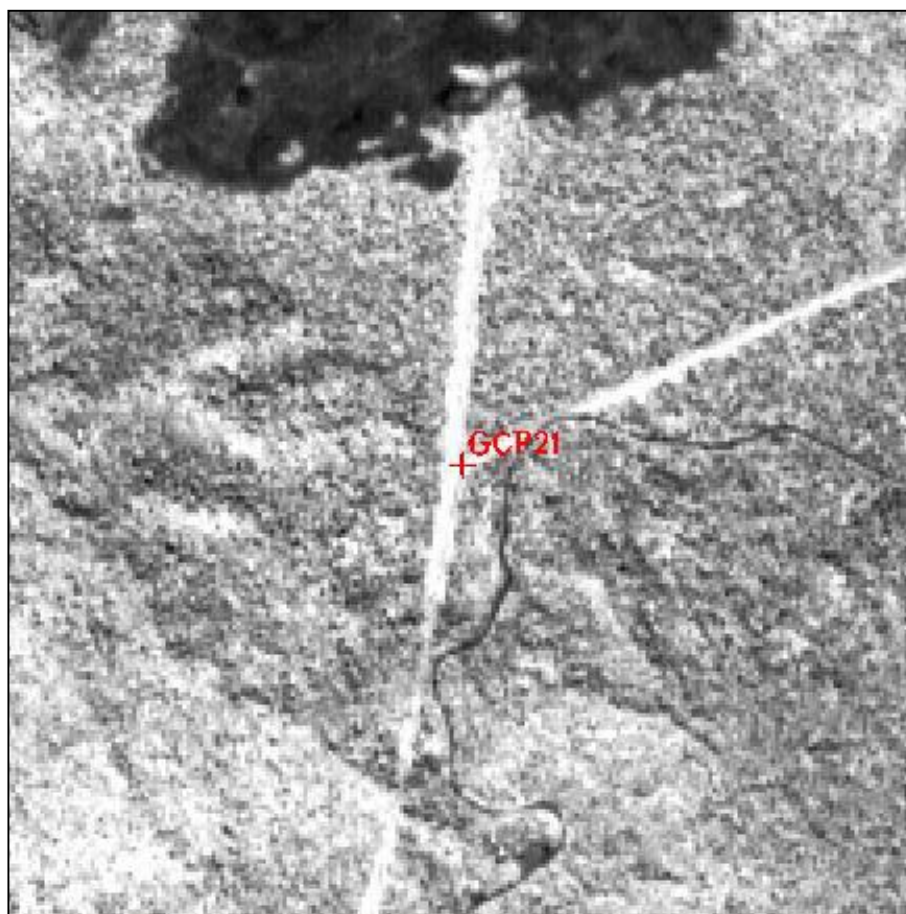


FIGURA. 4.1 – Localização de um GCP sobre a imagem ASTER 3N.

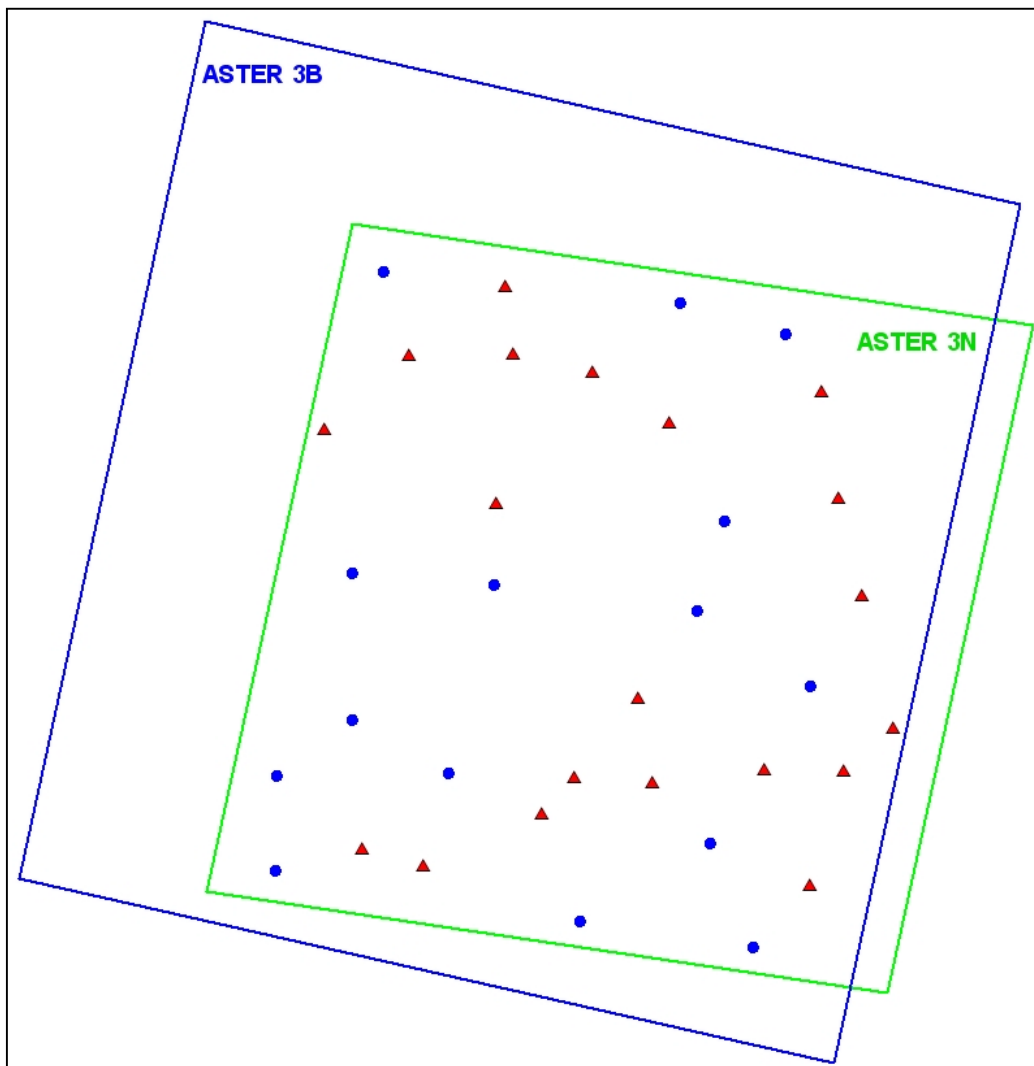


FIGURA. 4.2 – Distribuição dos 20 GCPs (cor vermelha) e 15 TPs (cor azul) sobre imagens ASTER 3N e 3B.

Na figura 4.2, pode-se verificar que a distribuição dos GCPs em toda a área do estereopar 3N/3B e dos TPs nas áreas onde os GCPs não estavam disponíveis.

4.1.2 Resíduos estereoscópicos dos pontos de controle das imagens ASTER

Os resíduos estereoscópicos para os pontos de controle foram gerados a partir dos GCPs, da modelagem *Toutin* e são apresentados na tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Resíduos Planimétrico e Altimétrico dos 20 Pontos de Controle Utilizados para o Par Estereoscópico 3N/3B ASTER.

ID	Tipo	Resíduo Total (m)	Resíduo E (m)	Resíduo N (m)	Resíduo H (m)
1	Cinemático	31,99	8,49	-18,16	-24,93
2	Cinemático	25,84	-25,60	2,56	-2,42
3	Cinemático	25,32	-12,08	4,84	-21,72
4	Cinemático	24,49	-2,32	-13,07	-20,58
5	Estático	23,04	16,95	-2,45	-15,41
6	Estático	22,64	0,02	3,40	22,38
7	Estático	20,86	12,95	1,74	16,26
8	Cinemático	20,84	-11,54	-4,34	-16,80
9	Estático	20,67	-10,18	-9,61	15,21
10	Cinemático	20,42	1,00	7,42	19,00
11	Cinemático	19,75	2,65	2,21	19,45
12	Cinemático	19,72	5,97	-0,49	18,79
13	Cinemático	19,52	1,38	-12,63	-14,82
14	Cinemático	18,15	-4,89	8,36	15,36
15	Cinemático	16,98	6,13	12,41	-9,84
16	Estático	16,04	-9,51	12,87	1,00
17	Estático	13,36	11,52	-4,05	5,41
18	Cinemático	11,85	-0,78	2,44	-11,57
19	Cinemático	10,35	5,41	8,82	0,24
20	Cinemático	7,06	4,46	-2,29	4,96

Da Tabela 4.1, pode-se verificar que a média do resíduo total (estereoscópico) ficou em torno de 20 metros, um pouco acima de um elemento de resolução espacial das imagens 3N e 3B do ASTER (15 metros).

4.1.3 Imagens epipolares ASTER

A Figuras 4.3 e 4.4 ilustram as imagens epipolares ASTER 3N e 3B geradas sobre as imagens sem filtragem.

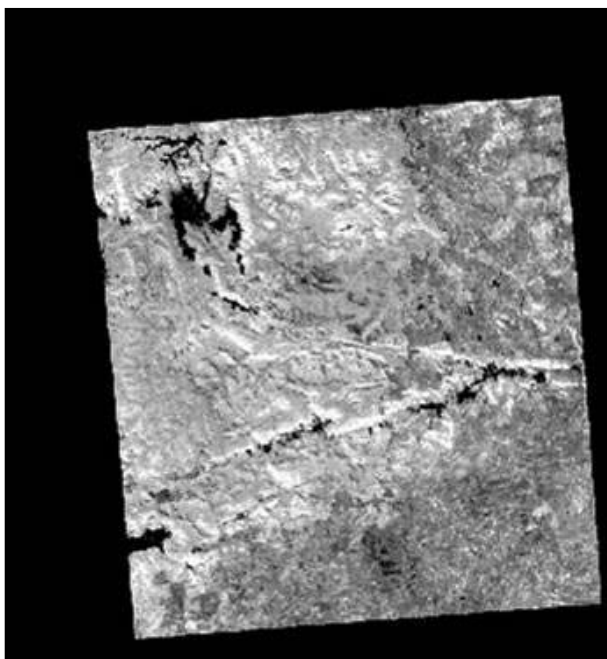


FIGURA. 4.3 – Imagem epipolar ASTER 3N gerada sobre imagem sem filtragem.

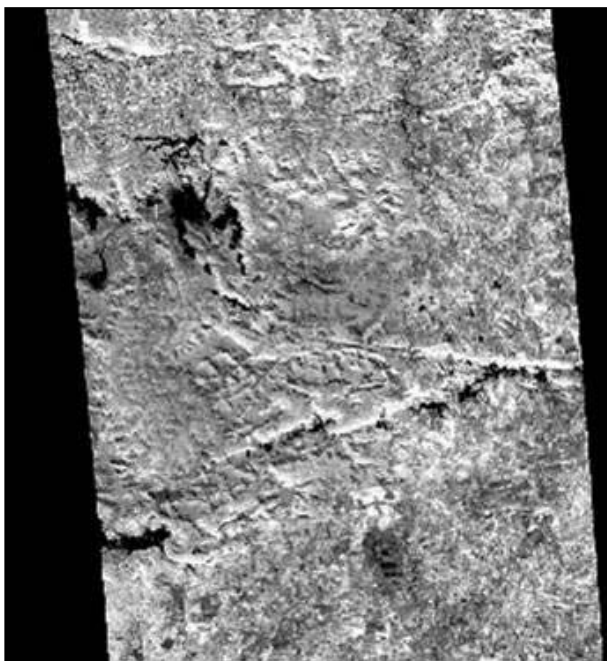


FIGURA. 4.4 – Imagem epipolar ASTER 3B gerada sobre imagem sem filtragem.

4.1.4 Resultados da Geração e Geocodificação dos DEMs ASTER

As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 ilustram os DEMs gerados a partir das imagens 3N e 3B sem filtragem e com aplicação de filtragem mediana 3×3 e 5×5 respectivamente.

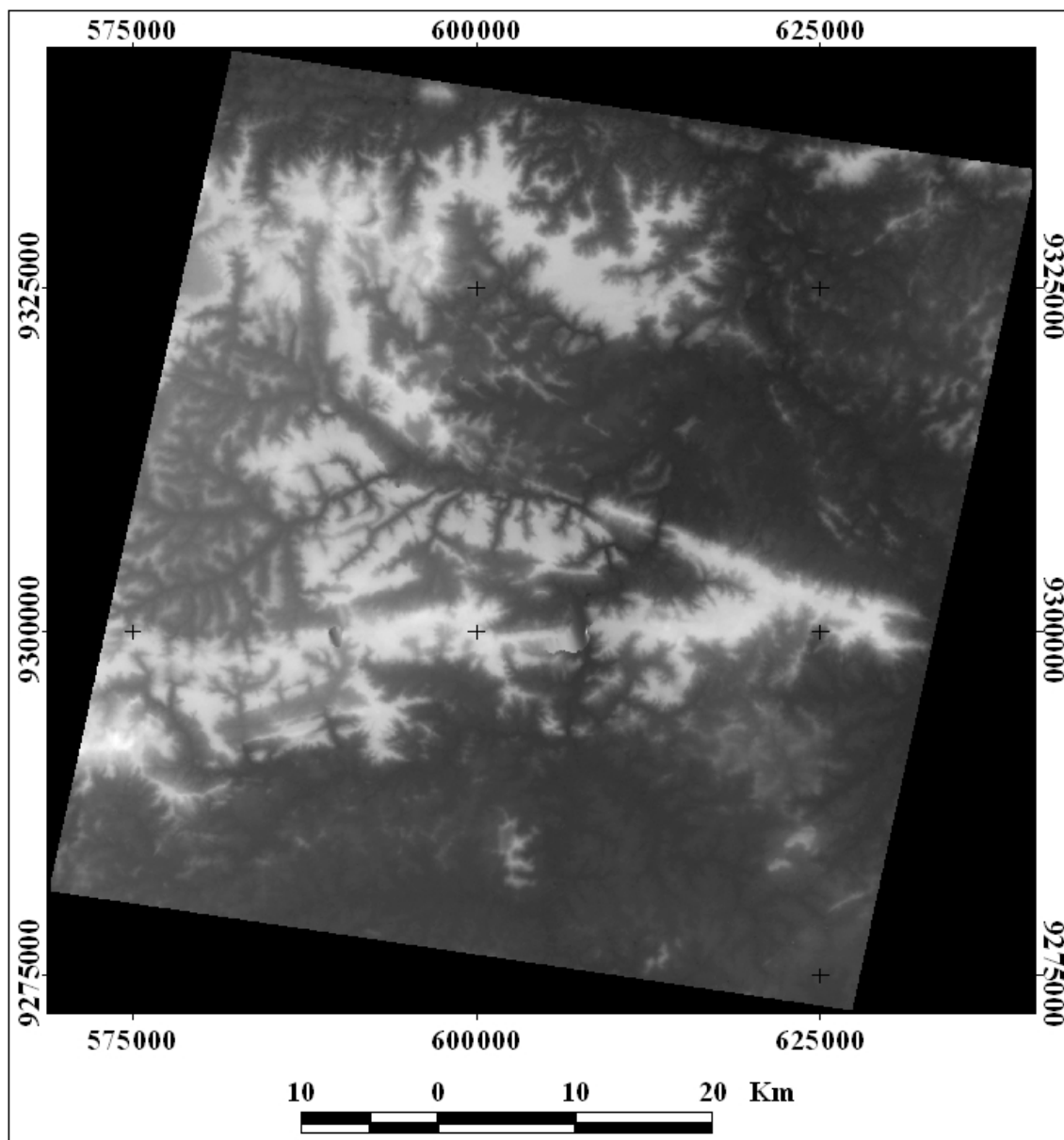


FIGURA 4.5 – DEM ASTER gerado a partir de imagens 3N e 3B brutas (sem filtragem), com 20 pontos de controle (GCPs) e 15 pontos de amarração (TPs).

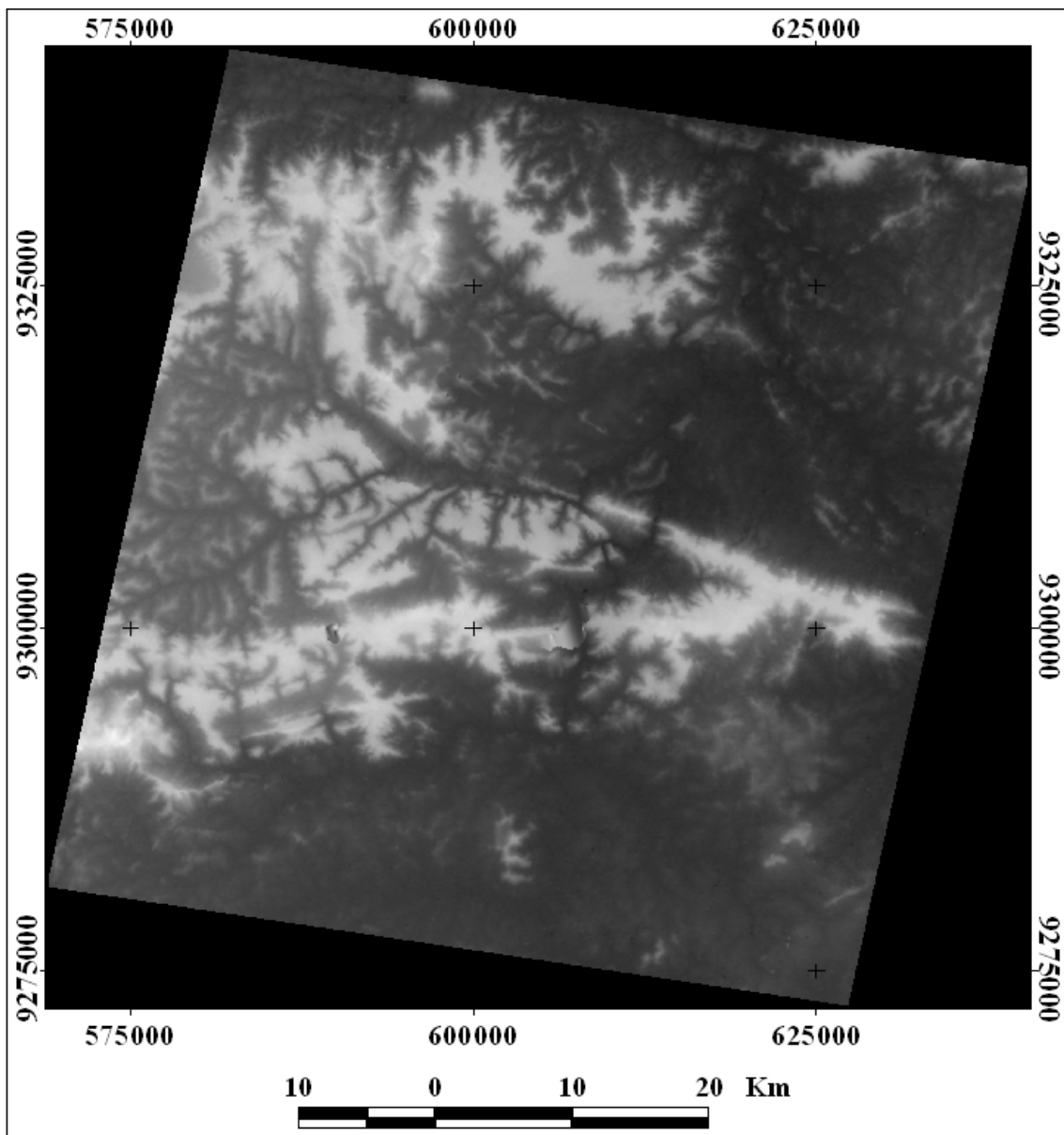


FIGURA 4.6 – DEM ASTER gerado a partir de imagens 3N e 3B com filtro mediana 3×3, com 20 pontos de controle (GCPs) e 15 pontos de amarração (TPs).

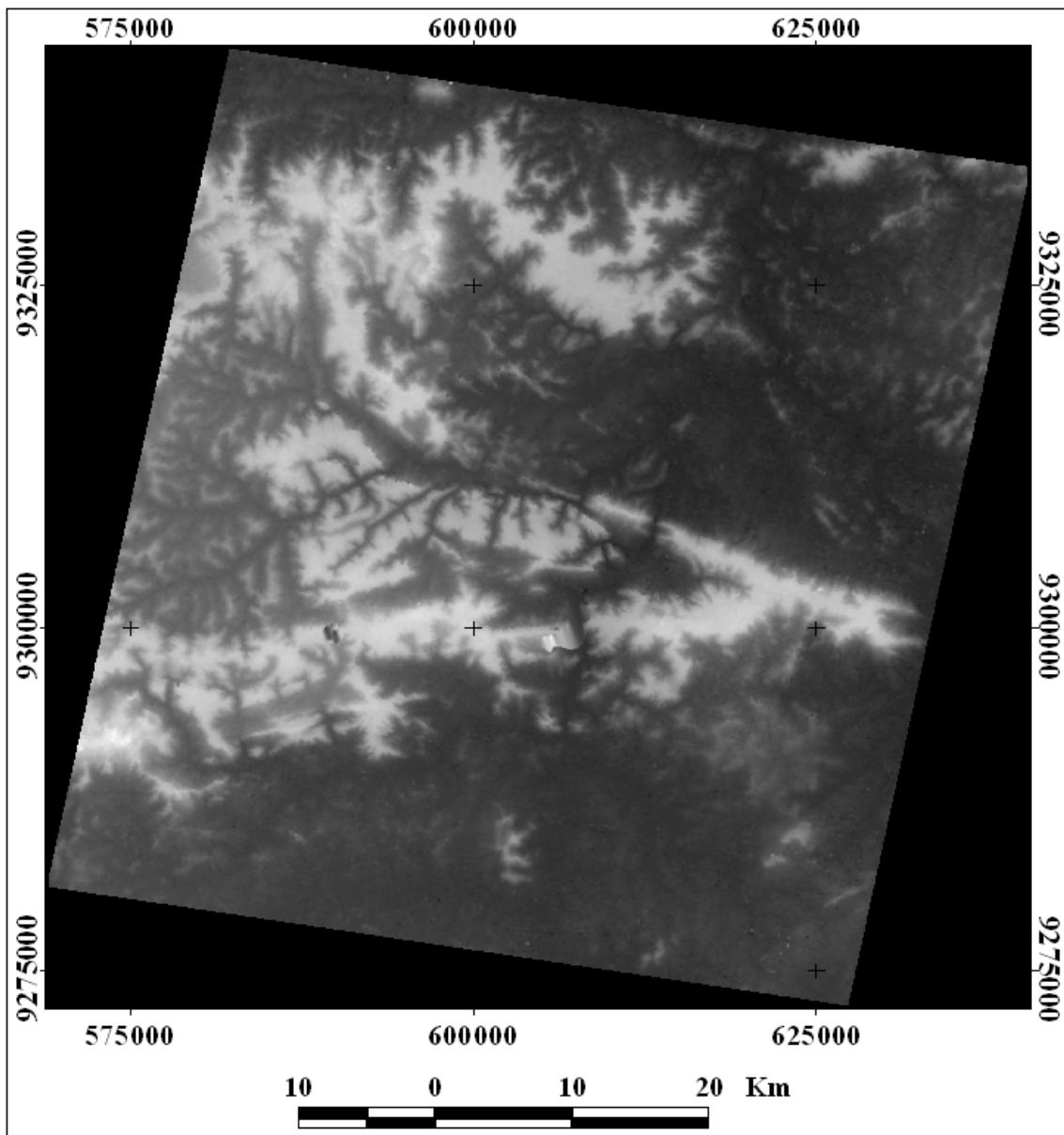


FIGURA 4.7 – DEM ASTER gerado a partir de imagens 3N e 3B com filtro mediana 5×5, com 20 pontos de controle (GCPs) e 15 pontos de amarração (TPs).

Um detalhe de cada DEM ASTER gerado, mostrando a influência da filtragem na qualidade visual dos DEMs, é apresentado na Figura 4.8.

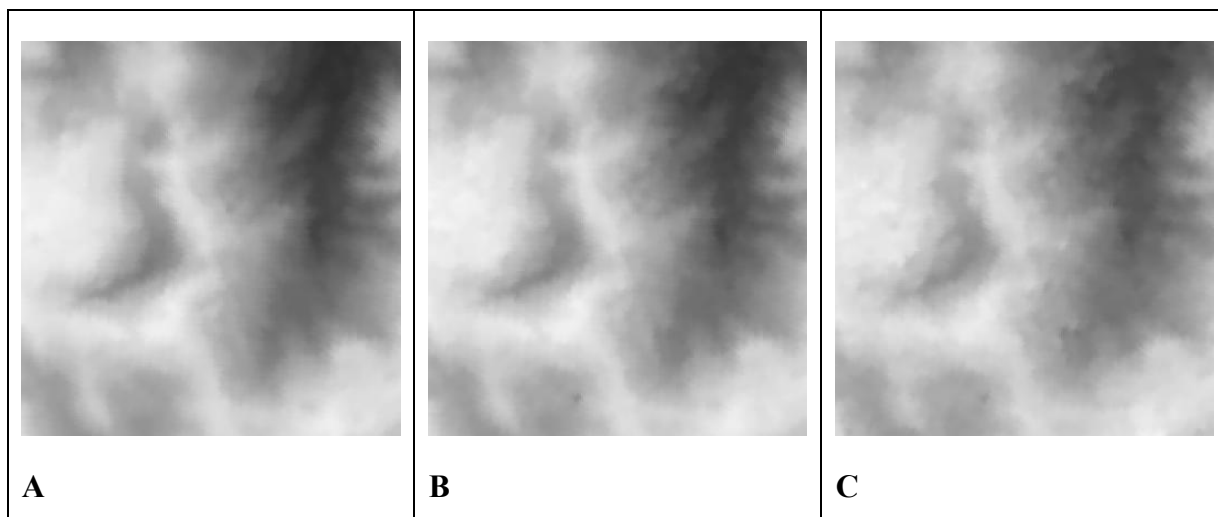


FIGURA 4.8 – Detalhes dos DEMs ASTER gerados a partir das imagens 3N e 3B sem filtragem (A), com filtragem mediana 3×3 (B) e 5×5 (C).

Comparando o DEM gerado a partir das imagens 3N e 3B sem filtragem, pode-se verificar que a aplicação das filtragens mediana 3×3 e 5×5 não melhorou o aspecto visual dos DEMs.

4.2 D DEMs RADARSAT Standard

4.2.1 Pontos de Controle para as Imagens RADARSAT Standard

A Figura 4.9 apresenta a localização de um GCP sobre a imagem S5 e a Figura 4.10 apresenta a distribuição dos 17 GCPs e 13 TPs sobre a área das imagens S5 e S7.

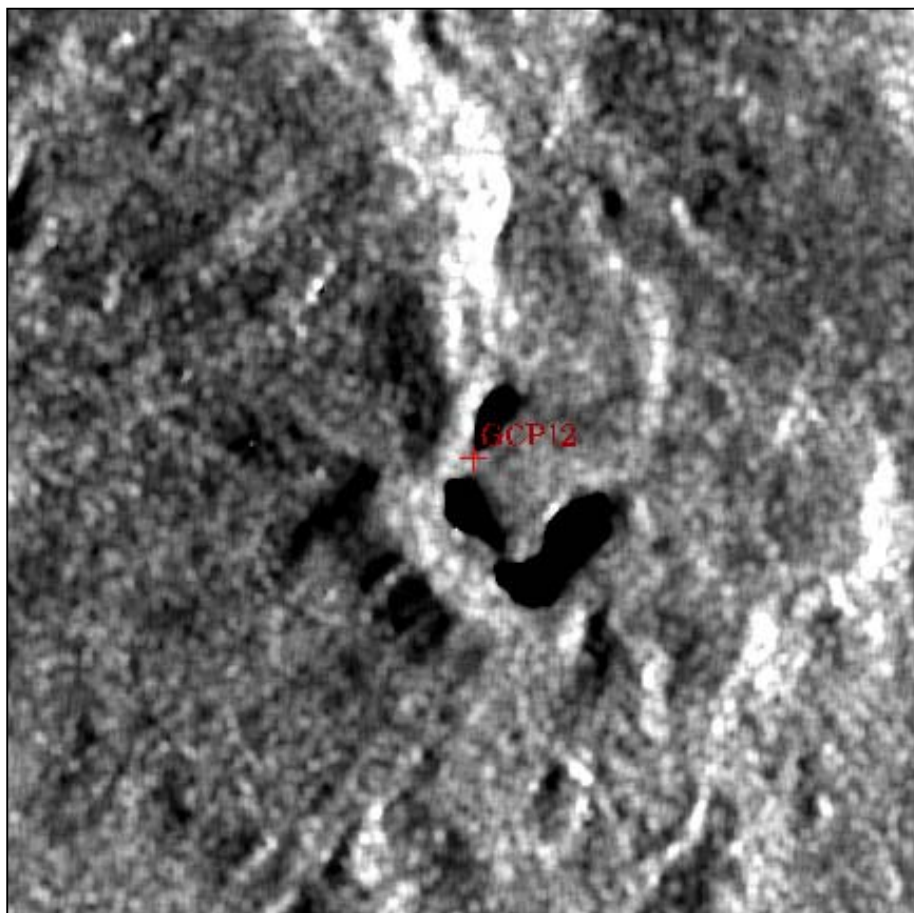


FIGURA. 4.9 – Localização do GCP 12 sobre imagem S5.

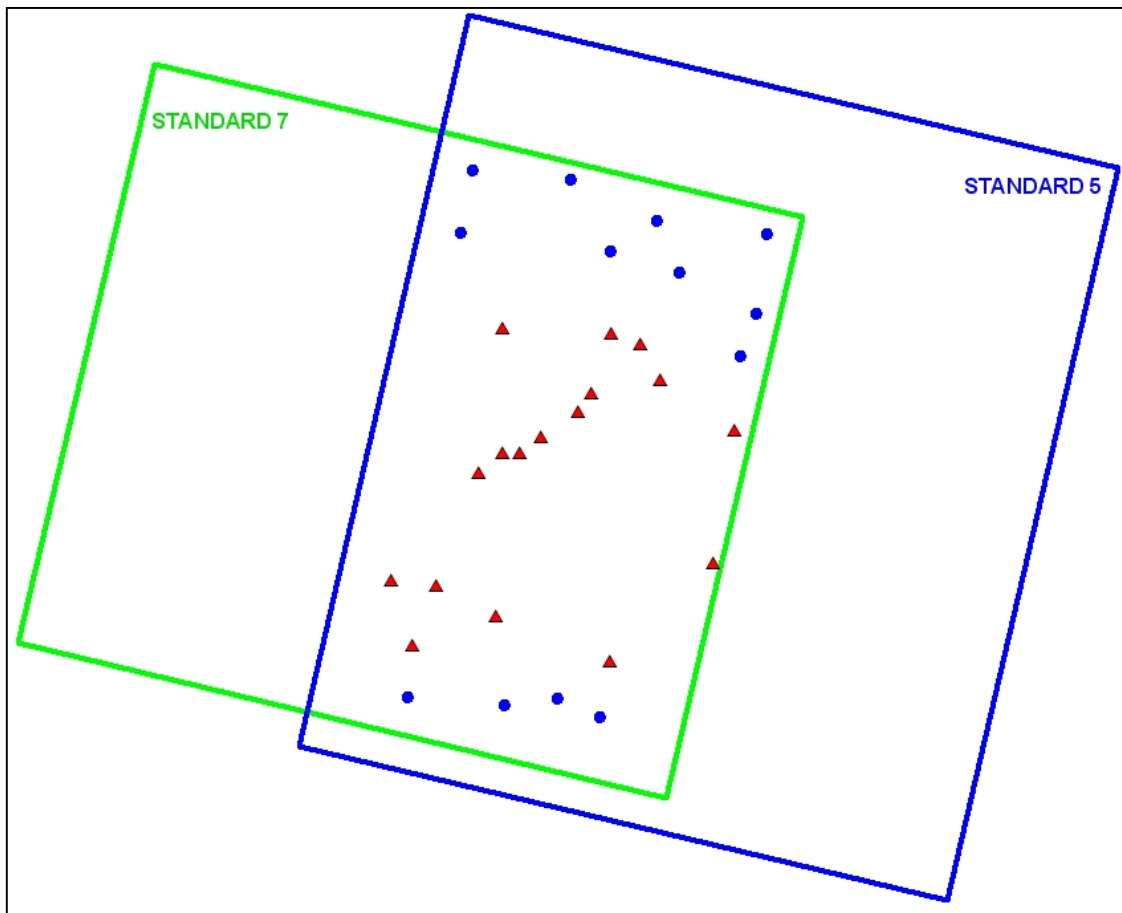


FIGURA. 4.10 – Distribuição dos 17 GCPs (cor vermelha) e 13 TPs (cor azul) sobre imagens S5 e S7.

Na Figura acima, pode-se verificar que os GCPs concentraram-se na região central do estéreo-par S5/S7 em função das observações de campo (pontos GPS) terem sido coletados apenas nas áreas onde foi possível o acesso. Visando minimizar a falta de GCPs nas áreas norte e sul do estéreo-par, foram coletados vários TPs nestas áreas.

4.2.2 Resíduos Estereoscópicos dos Puntos de Controle das Imagens RADARSAT Standard

Os resíduos estereoscópicos para os pontos de controle utilizados para o par estereoscópico S5/S7 foram gerados a partir dos GCPs, da modelagem *Toutin* e são apresentados na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 – Resíduos Planimétrico e Altimétrico dos 17 Pontos de Controle Utilizados para o Par Estereoscópico S5/S7.

ID	Tipo GCP	Resíduo Total (m)	Resíduo E (m)	Resíduo N (m)	Resíduo H (m)
1	Estático	14,62	-8,58	-11,12	4,04
2	Estático	15,89	13,96	-4,62	6,00
3	Estático	9,72	-5,66	-0,54	-7,88
4	Estático	16,19	15,96	-2,50	-0,97
5	Estático	10,81	10,21	-3,53	0,13
6	Estático	17,64	9,28	-14,45	-4,03
7	Estático	19,99	-17,32	-8,66	-4,95
8	Estático	9,27	-7,96	4,74	-0,31
9	Estático	19,14	11,33	8,25	13,02
10	Estático	16,70	-3,82	15,56	-4,69
11	Estático	18,22	2,88	-17,48	4,23
12	Estático	9,01	2,71	7,14	-4,77
13	Estático	19,05	-4,73	16,41	-8,43
14	Estático	11,91	-9,32	2,70	-6,89
15	Estático	16,91	8,08	-10,54	10,46
16	Estático	7,32	-3,38	4,95	4,20
17	Cinemático	19,49	-13,55	13,97	0,85

Da Tabela 4.2, pode-se verificar que a média do resíduo total (estereoscópico) ficou em torno de 15 metros, quase a metade da resolução nominal das imagens Standard (25 metros).

4.2.3 Imagens Epipolares RADARSAT Standard

A Figuras 4.11 e 4.12 ilustram as imagens epipolares S5 e S7 (respectivamente) geradas sobre as imagens sem filtragem.

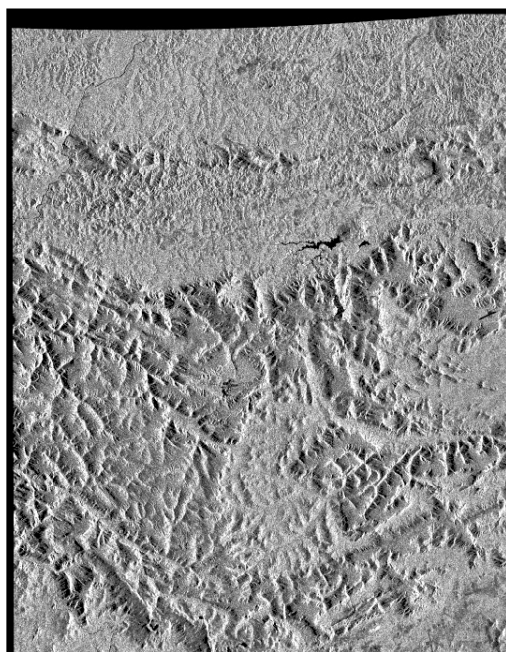


FIGURA. 4.11 – Imagem epipolar S5 gerada sobre imagem sem filtragem.

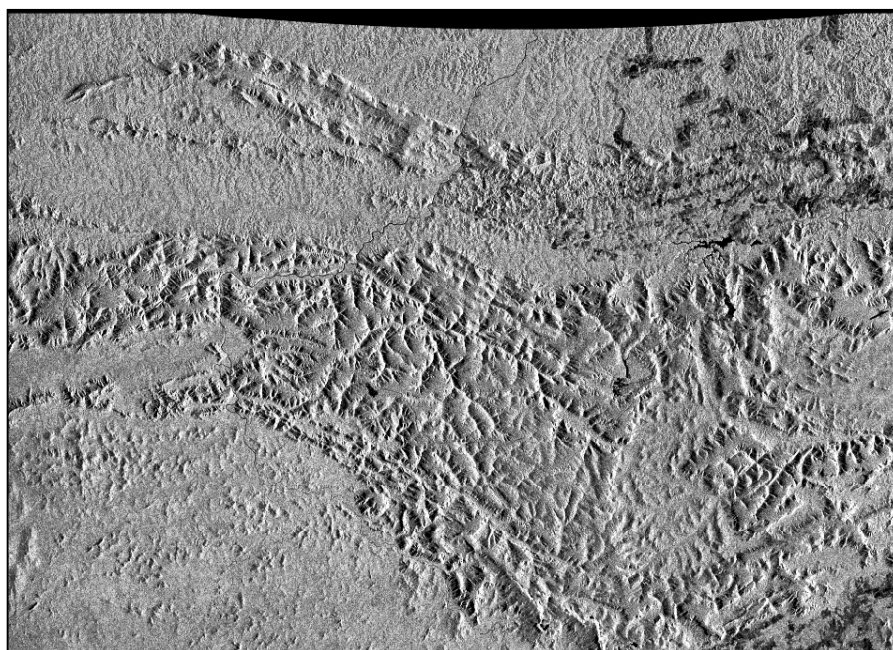


FIGURA 4.12 – Imagem epipolar S7 gerada sobre imagem sem filtragem.

4.2.4 Resultados da Geração e Geocodificação dos DEMs RADARSAT Standard

Os resultados da geração e geocodificação dos dois DEMs Standard são apresentados nas Figuras 4.13 e 4.14.

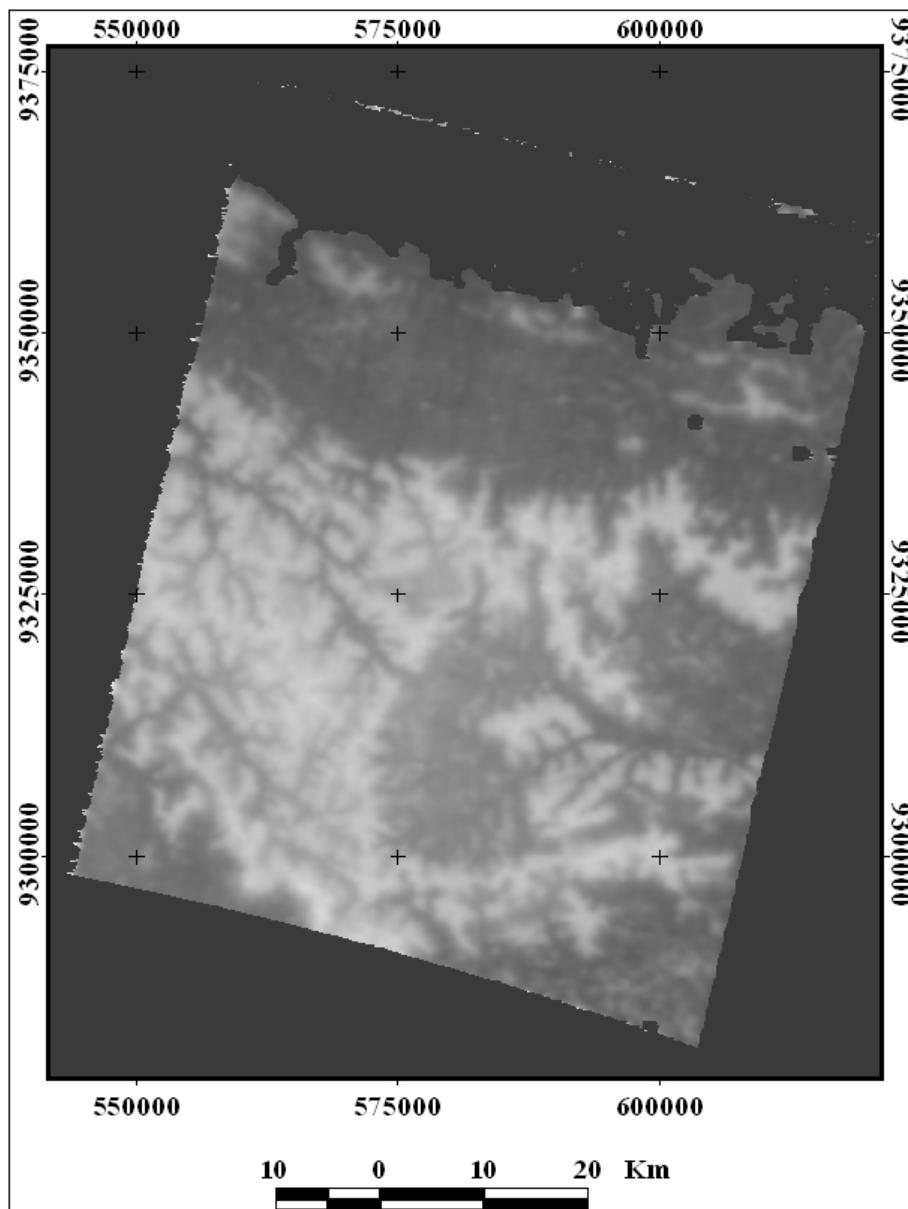


FIGURA 4.13 – DEM Standard gerado a partir de imagens S5 e S7 sem filtragem.

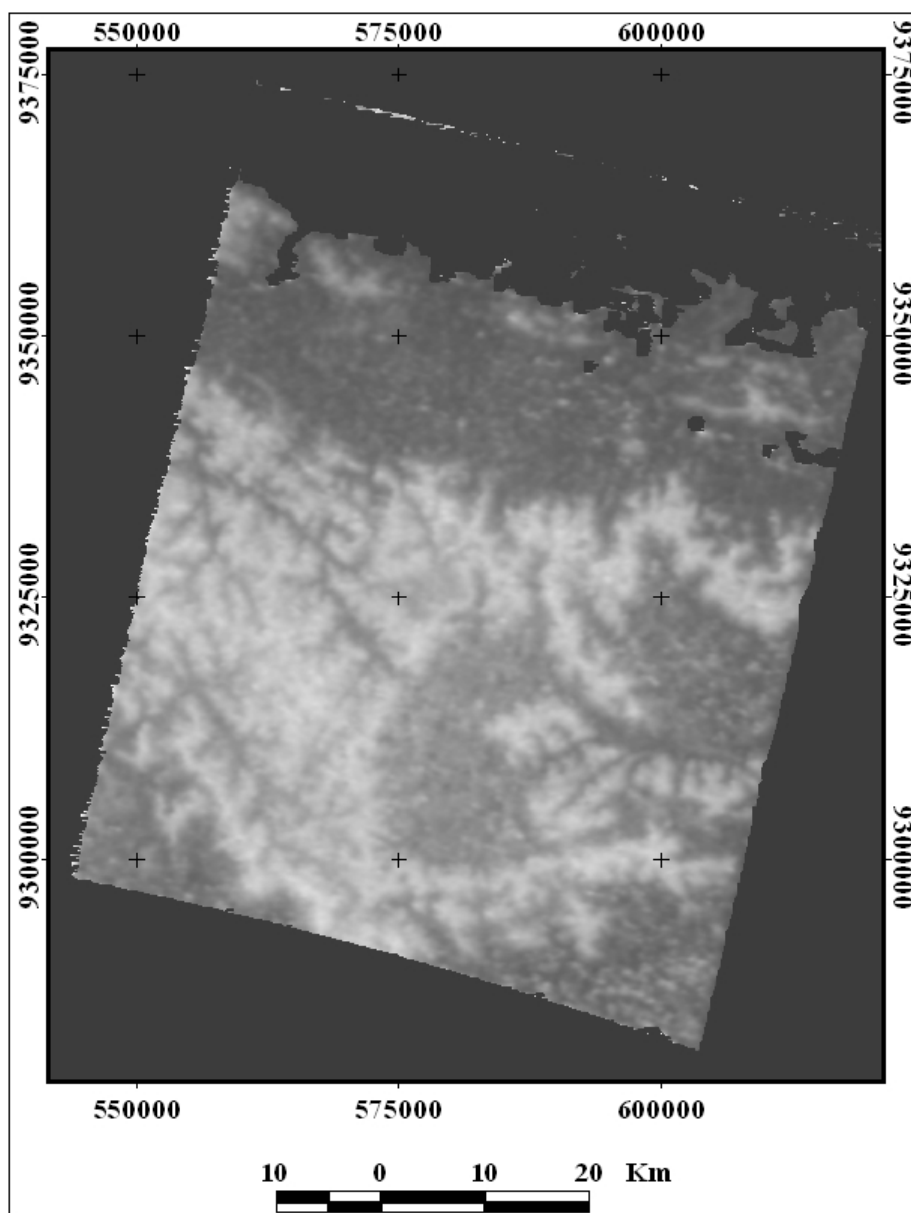


FIGURA 4.14 – DEM Standard gerado a partir de imagens S5 e S7 com filtragem Enhanced Frost 5×5.

A falta de informação na região superior dos DEMs gerados a partir do estéreo-par S5/S7, pode ser explicada pela falta de correlação entre as imagens do par nesta área. A grande diferença entre as datas de aquisição das duas imagens (S5 de 31 de maio de 1996 e S7 de 11 de setembro de 1996), pode ter contribuído para este resultado. Além disso, a não disponibilidade de pontos de controle nesta área também contribuiu para a

falta de correlação das imagens, já que a modelagem utilizada é muito dependente de pontos de controle.

Um detalhe de cada DEM Standard, mostrando a influência da filtragem na qualidade visual dos DEMs, é apresentado na Figura 4.15.

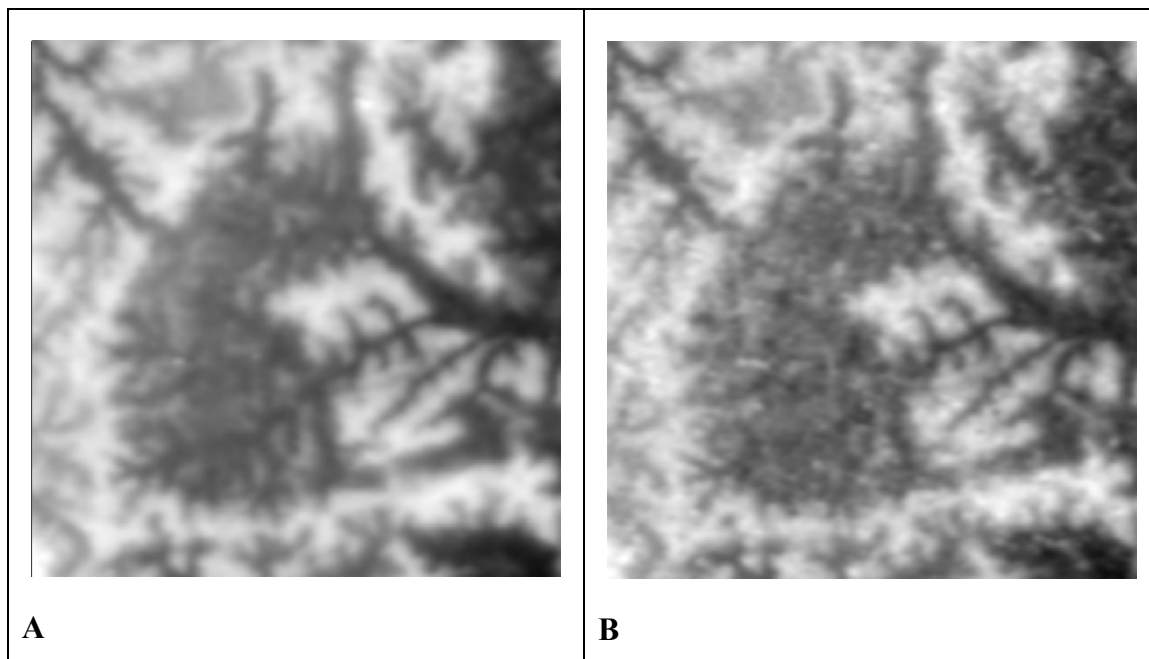


FIGURA 4.15 – Detalhe dos DEMs Standard gerados a partir de imagens sem filtragem (A) e com filtragem *Enhanced Frost 5×5*.

Na figura acima pode-se observar que o DEM Standard gerado a partir de imagens sem filtragem apresentou um resultado visualmente melhor do que o DEM gerado a partir das imagens com filtragem *Enhanced Frost 5×5*.

4.3 Geração dos DEMs RADARSAT Fine

4.3.1 Geração de DEMs RADARSAT Fine a partir de 13 GCPs

4.3.1.1 Localização dos 13 GCPs das imagens RADARSAT Fine

A Figura 4.16 ilustra a distribuição dos 13 GCPs selecionados sobre o estéreo-par F5/F2.

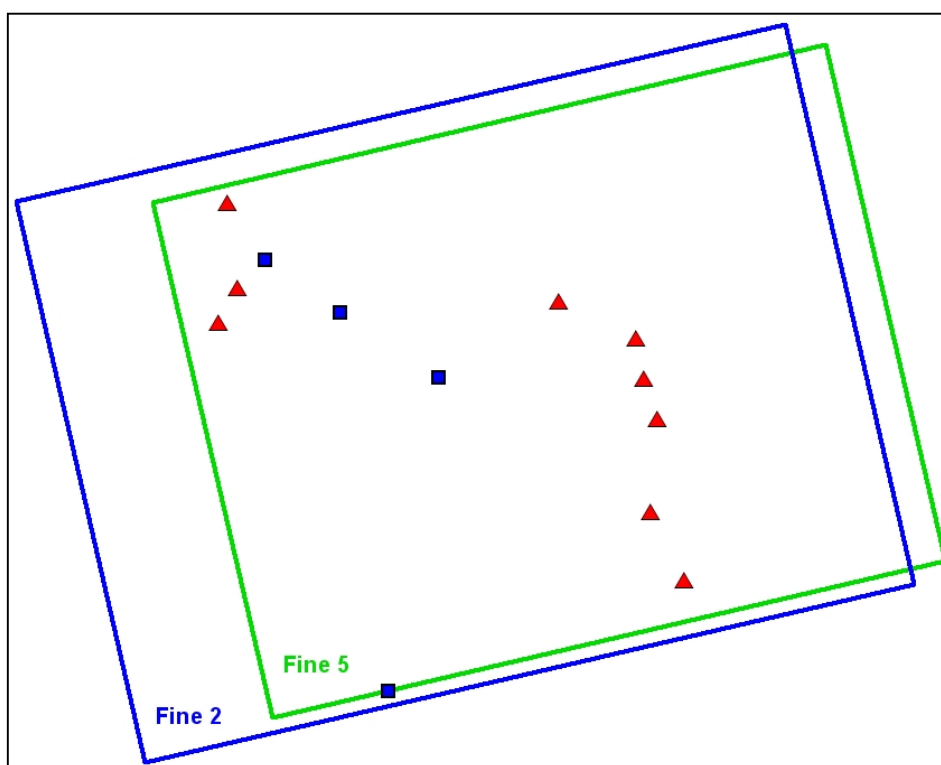


FIGURA 4.16 – Distribuição dos 4 pontos de controle adquiridos no modo estático (pontos na cor vermelha) e 9 pontos no modo cinemático (pontos na cor azul) sobre estéreo-par F5/F2.

Na Figura 4.16 fica evidente que a distribuição dos GCPs sobre a área do estéreo-par de imagens Fine 2 e Fine 5 não foi a mais adequada, ou seja, não foram selecionados GCPs distribuídos em toda a área do estéreo-par de imagens. Isto ocorreu pela pouca disponibilidade de GCPs na área do estéreo-par de imagens Fine, estando disponíveis apenas nas áreas onde foram realizados os levantamentos de campo.

A Figura 4.17 apresenta a localização de um GCP sobre a imagem F5 e a Figura 4.18 apresenta a distribuição dos 13 GCPs e 22 TPs sobre a área das imagens F2 e F5.

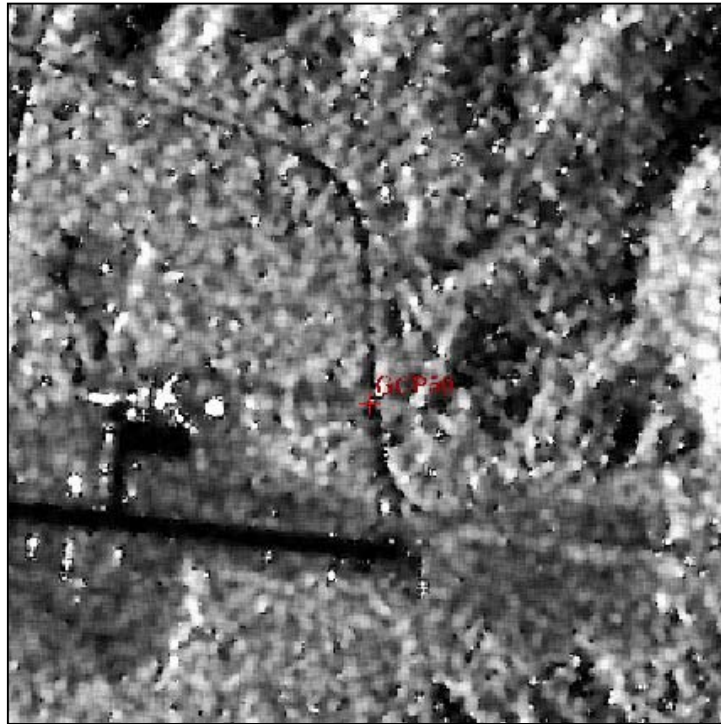


FIGURA. 4.17 – Localização de um GCP sobre a imagem F5.

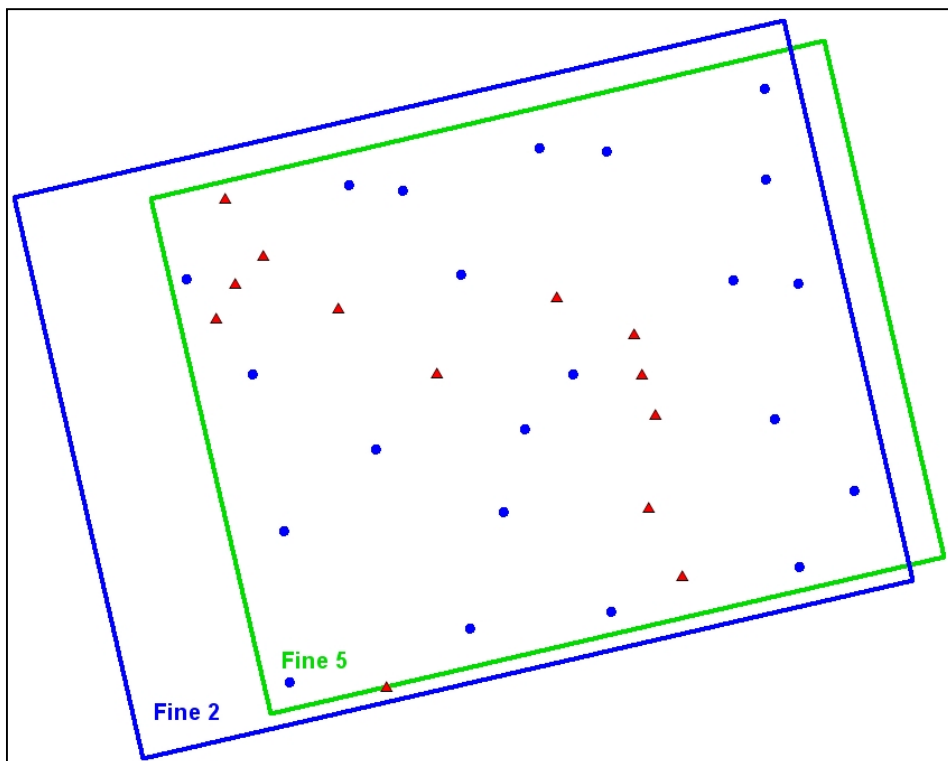


FIGURA 4.18 – Distribuição dos 13 GCPs (cor vermelha) e 22 TPs (cor azul) sobre imagens F2 e F5.

Para tornar o estéreo-par mais consistente geometricamente na modelagem *Toutin*, foram coletados vários TPs distribuídos por toda a área do estéreo-par. Estes TPs não foram utilizados na geração do DEM Fine pela modelagem *RADARSAT Specific*, pois como já foi abordado anteriormente esta modelagem não depende de GCPs distribuídos por toda a área do estéreo-par de imagens, além de não utilizar TPs na geração de DEMs.

4.3.1.2 Resíduos Estereoscópicos dos 13 GCPs das Imagens RADARSAT Fine

Os resíduos estereoscópicos para os pontos de controle, utilizados para o estéreo-par F5/F2, foram gerados a partir da modelagem *Toutin* e são apresentados na tabela 4.3.

TABELA 4.3 – Resíduos dos 13 Pontos de Controle Utilizados para o Par Estereoscópico F5/F2.

ID	Tipo GCP	Resíduo Total (m)	Resíduo E (m)	Resíduo N (m)	Resíduo H (m)
1	Estático	15,13	13,02	5,84	5,01
2	Cinemático	14,51	10,19	2,15	10,11
3	Cinemático	14,30	-11,25	-7,00	-5,38
4	Cinemático	14,25	11,69	-3,09	7,54
5	Cinemático	13,28	-9,62	-1,57	-9,02
6	Cinemático	12,69	11,01	-0,98	6,22
7	Cinemático	9,75	-1,21	8,05	-5,37
8	Estático	9,38	-5,46	-1,45	-7,49
9	Estático	8,06	-6,81	3,88	1,87
10	Cinemático	7,87	-7,46	-1,08	-2,27
11	Cinemático	5,09	-0,66	-4,97	0,92
12	Cinemático	3,62	-3,11	0,58	-1,77
13	Estático	1,88	1,31	0,15	1,33

Da Tabela acima, foi realizado o cálculo da média do resíduo total (estereoscópico) e este ficou em torno de 10 metros, quase a resolução nominal das imagens Fine (8 metros).

4.3.1.3 Imagens Epipolares RADARSAT Fine Geradas a Partir de 13 GCPs

As Figuras 4.19 e 4.20 ilustram respectivamente as imagens epipolares F2 (direita) e F5 (esquerda) geradas a partir das imagens sem filtragem e modelagem *Toutin*.

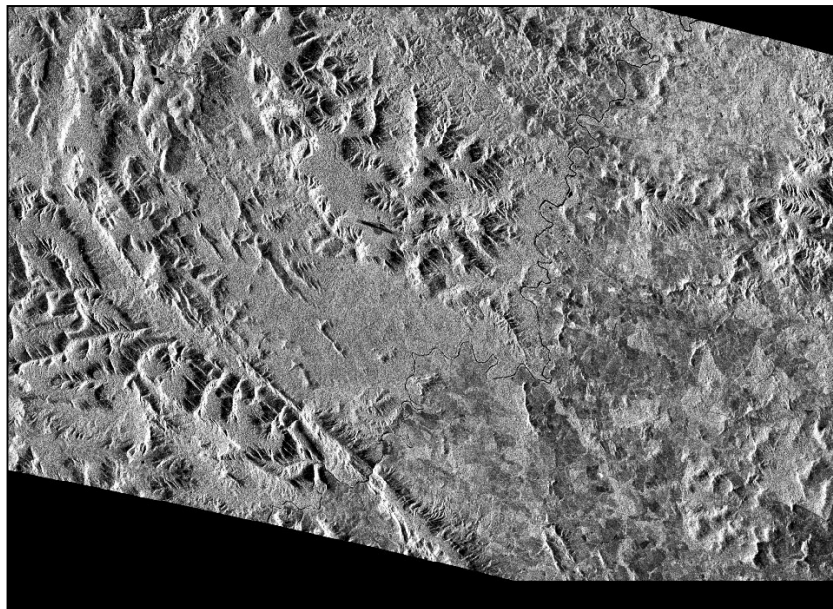


FIGURA 4.19 – Imagem epipolar gerada a partir de 13 GCPs sobre a imagem F2 (direita) sem filtragem e modelagem *Toutin*.

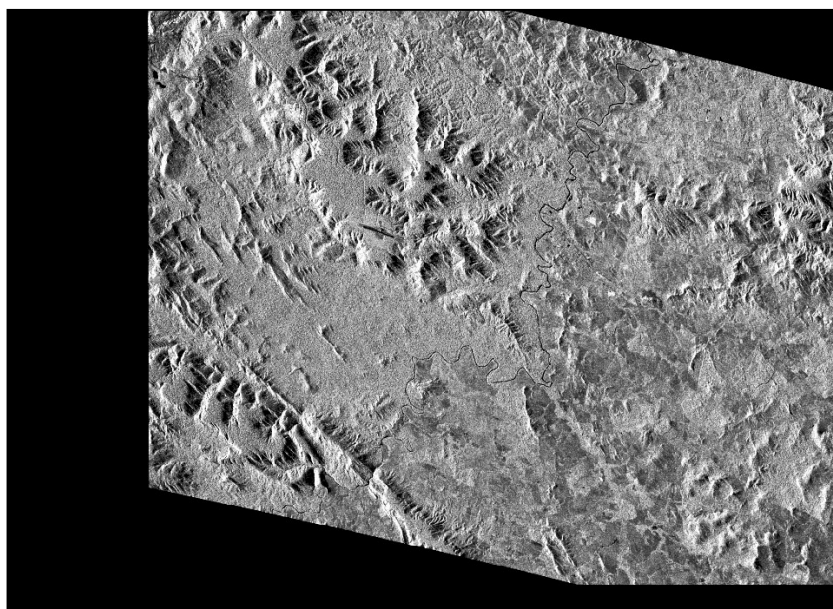


FIGURA 4.20 – Imagem epipolar gerada a partir de 13 GCPs sobre a imagem F5 (esquerda) sem filtragem e modelagem *Toutin*.

As Figuras 4.21 e 4.22 ilustram respectivamente as imagens epipolares F2 (direita) e F5 (esquerda) geradas a partir das imagens sem filtragem e modelagem *RADARSAT Specific*.

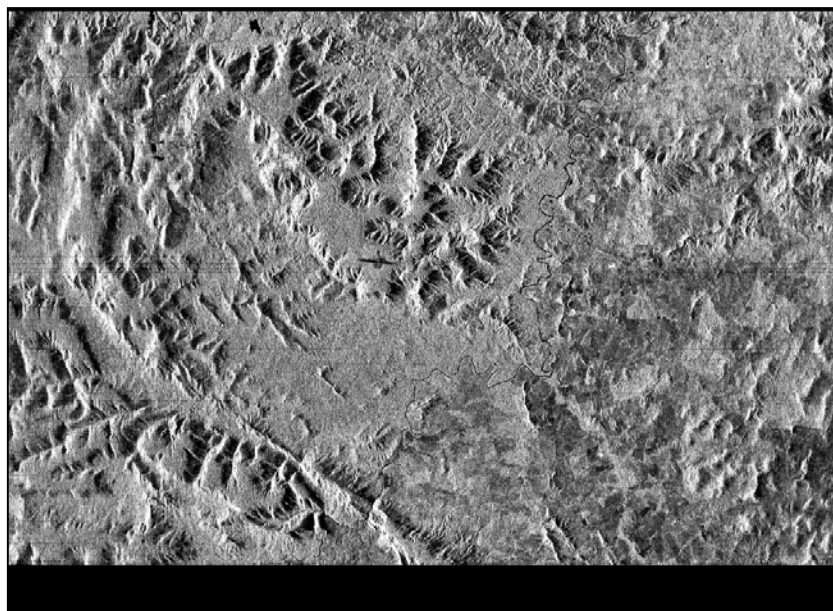


FIGURA. 4.21 – Imagem epipolar gerada a partir de 13 GCPs sobre a imagem F2 (direita) sem filtragem e modelagem *RADARSAT Specific*.

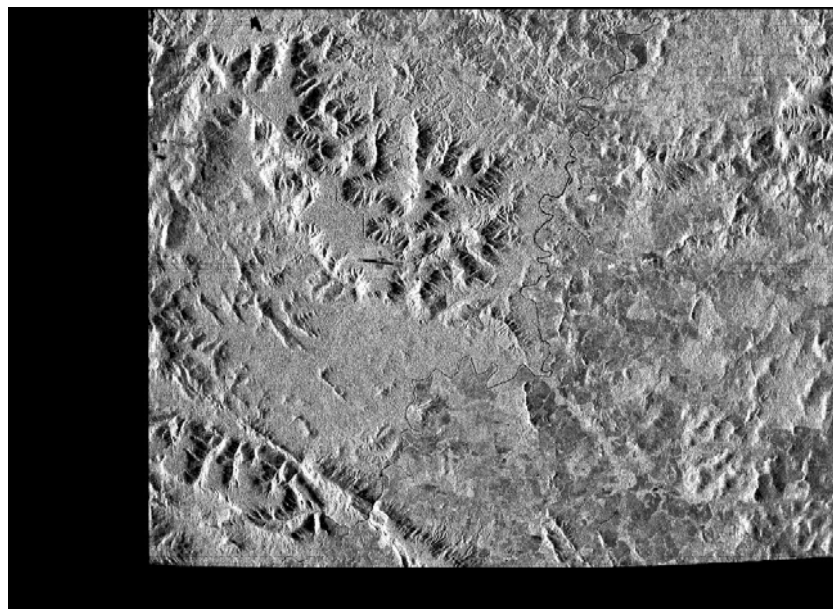


FIGURA. 4.22 – Imagem epipolar gerada a partir de 13 GCPs sobre a imagem F5 (esquerda) sem filtragem e modelagem *RADARSAT Specific*.

A partir das imagens epipolares geradas nas duas modelagens, verificou-se que as imagens geradas a partir da modelagem *RADARSAT Specific*, apresentaram resultado melhor do que as imagens geradas na modelagem *Toutin*, pois a distribuição dos GCPs sobre a área do estéreo-par de imagens Fine prejudicou o resultado da geração das imagens epipolares na modelagem *Toutin* (mais dependente da distribuição dos GCPs).

4.3.1.4 Resultados da Geração e Geocodificação dos DEMs RADARSAT Fine Gerados a Partir de 13 GCPs

Os resultados da geração e geocodificação dos dois DEMs Fine gerados a partir de 13 GCPs são apresentados nas Figuras 4.23 e 4.24.

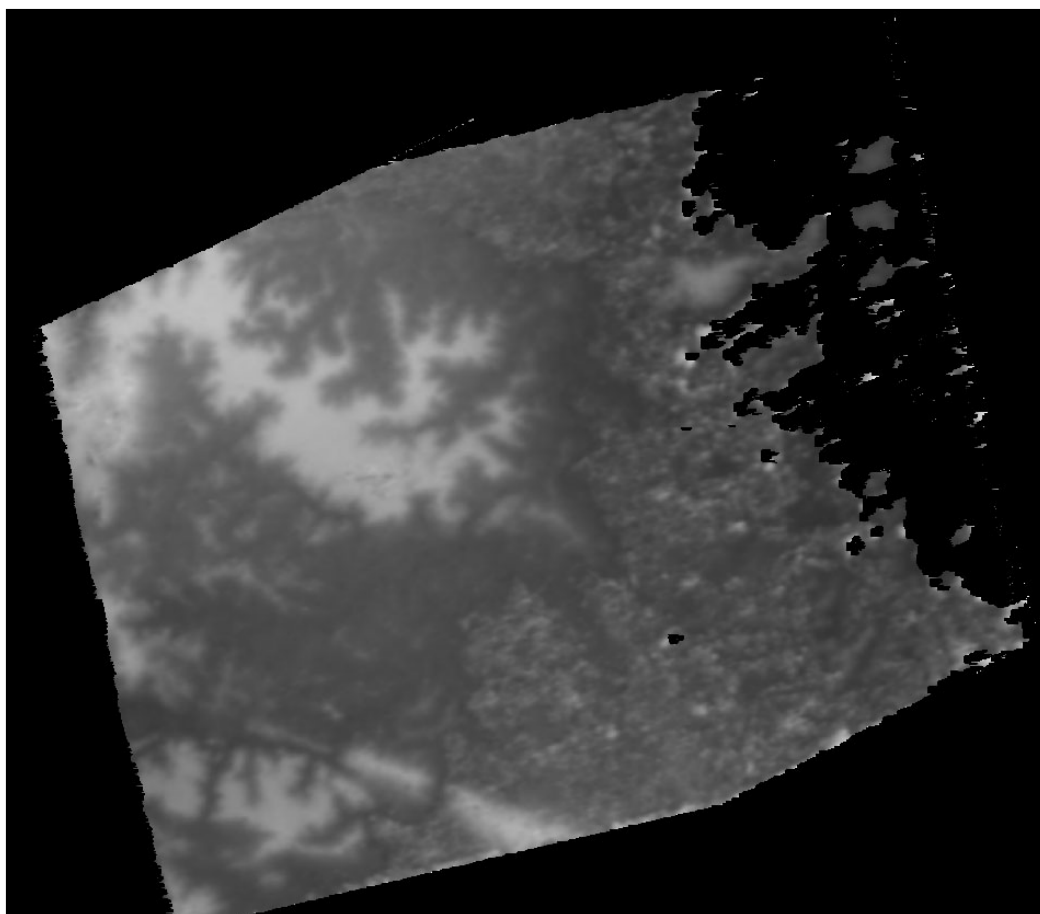


FIGURA 4.23 – DEM Fine gerado a partir de 13 GCPs e modelagem *Toutin*. A área sem informação do DEM gerado pela modelagem *Toutin*, causado pela falta de correlação das imagens epipolares, confirma a necessidade dos GCPs estarem bem

distribuídos em área e elevação. A utilização dos TPs nas áreas sem informação não garantiu um bom resultado do DEM.

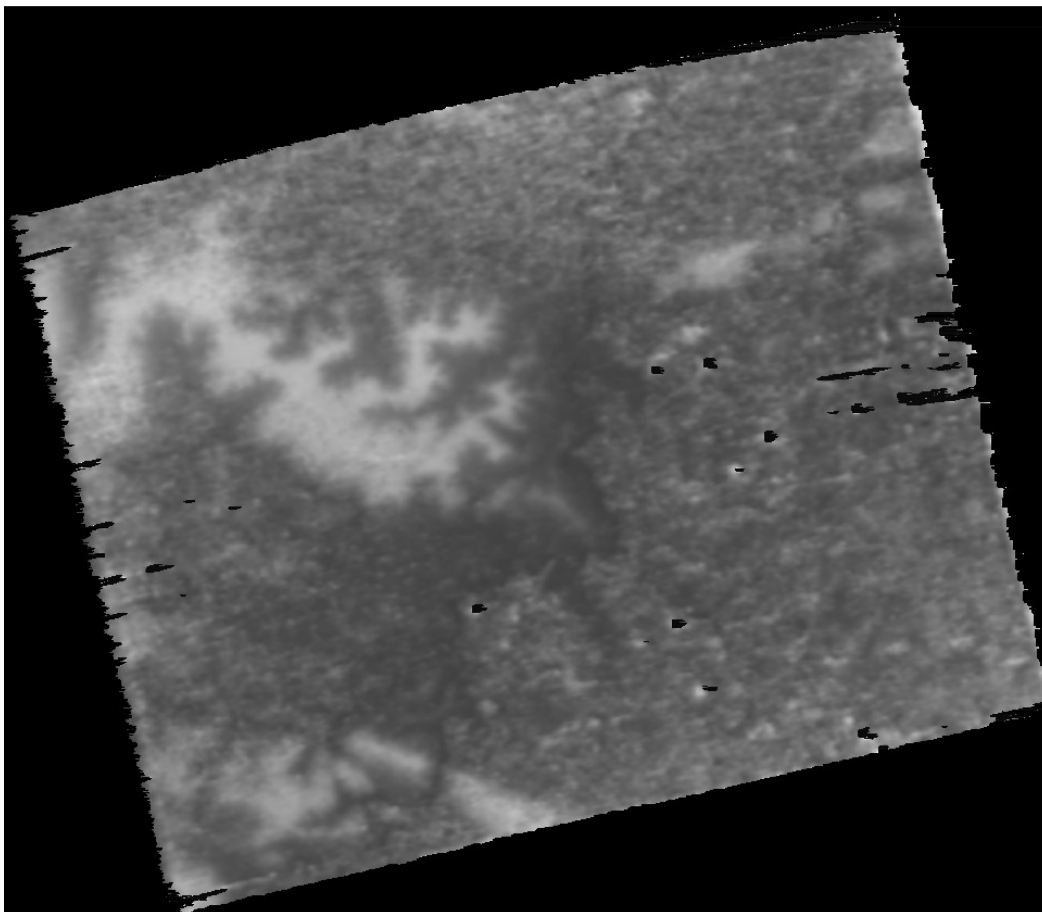


FIGURA 4.24 – DEM Fine gerado a partir de 13 GCPs e modelagem *RADARSAT Specific*.

O DEM Fine gerado a partir da modelagem *RADARSAT Specific*, apresentou um resultado visual melhor que o DEM gerado na modelagem *Toutin*, comprovando que esta modelagem apresenta pouca dependência de GCPs distribuídos em área e elevação, ou seja, apresenta uma vantagem sobre a modelagem *Toutin* com relação à quantidade e distribuição dos GCPs.

4.3.2 Geração de DEMs RADARSAT Fine a Partir de 20 GCPs

4.3.2.1 Ortorretificação da Imagem ETM+ Landsat 7

A banda pancromática da imagem ETM+ Landsat 7 (WRS 224/064) foi utilizada como fonte de informação planimétrica para melhorar a distribuição de GCPs utilizados na geração dos DEMs RADARSAT Fine. A ortorretificação da banda pancromática foi realizada a partir de 28 GCPs coletados em campo com GPS (16 coletados no método estático e 12 no método cinemático) e de um DEM gerado a partir das curvas de nível e pontos cotados das cartas topográficas da área de estudo. A Figura 4.25 apresenta a distribuição dos pontos de controle.

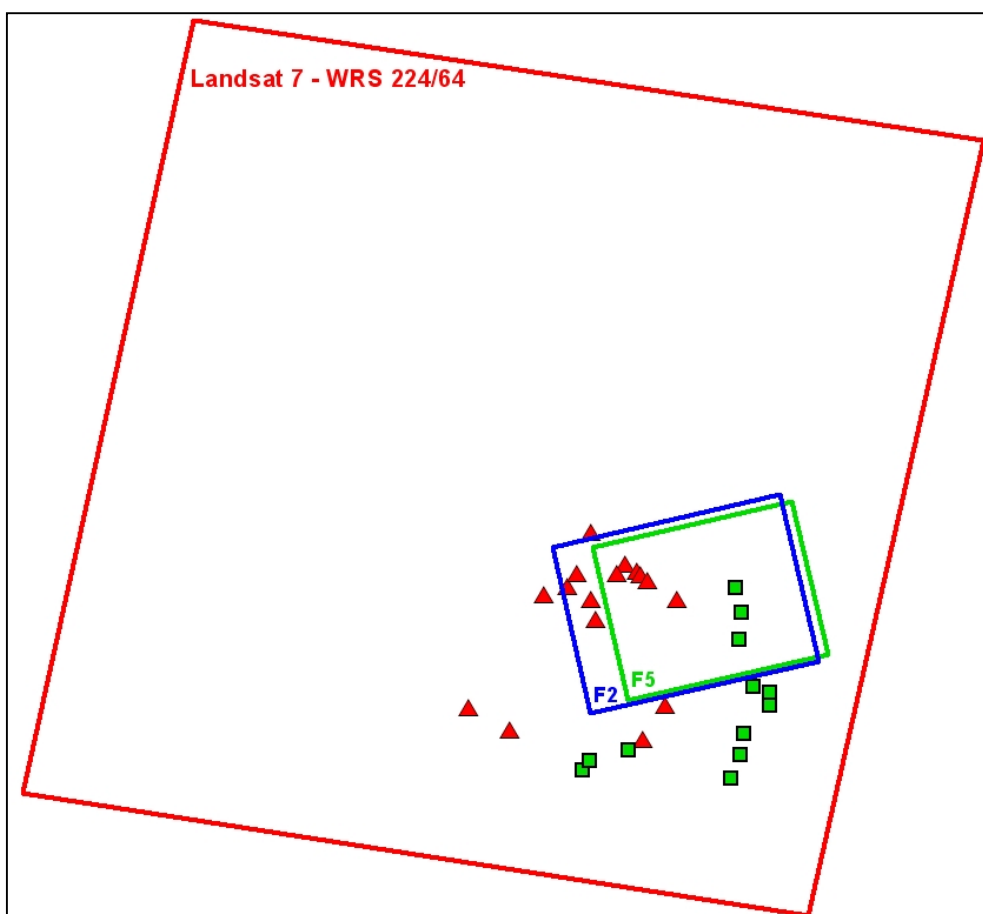


FIGURA 4.25 – Distribuição dos 16 GCPs obtidos pelo método estático (cor verde) e 12 GCPs obtidos pelo método cinemático (cor vermelha) utilizados na ortorretificação da imagem pancromática do satélite Landsat 7.

Os valores de erro médio quadrático (RMSE) alcançados na ortorretificação da imagem ETM+ Landsat foram 10,12 metros em E e 6,37 metros em N.

4.3.2.2 Localização dos 20 GCPs das Imagens RADARSAT Fine

A Figura 4.26 apresenta a distribuição dos 13 GCPs coletados anteriormente (pontos GPS) e os novos 7 GCPs coletados a partir da imagem ETM+ Landsat ortorretificada, totalizando 20 GCPs.

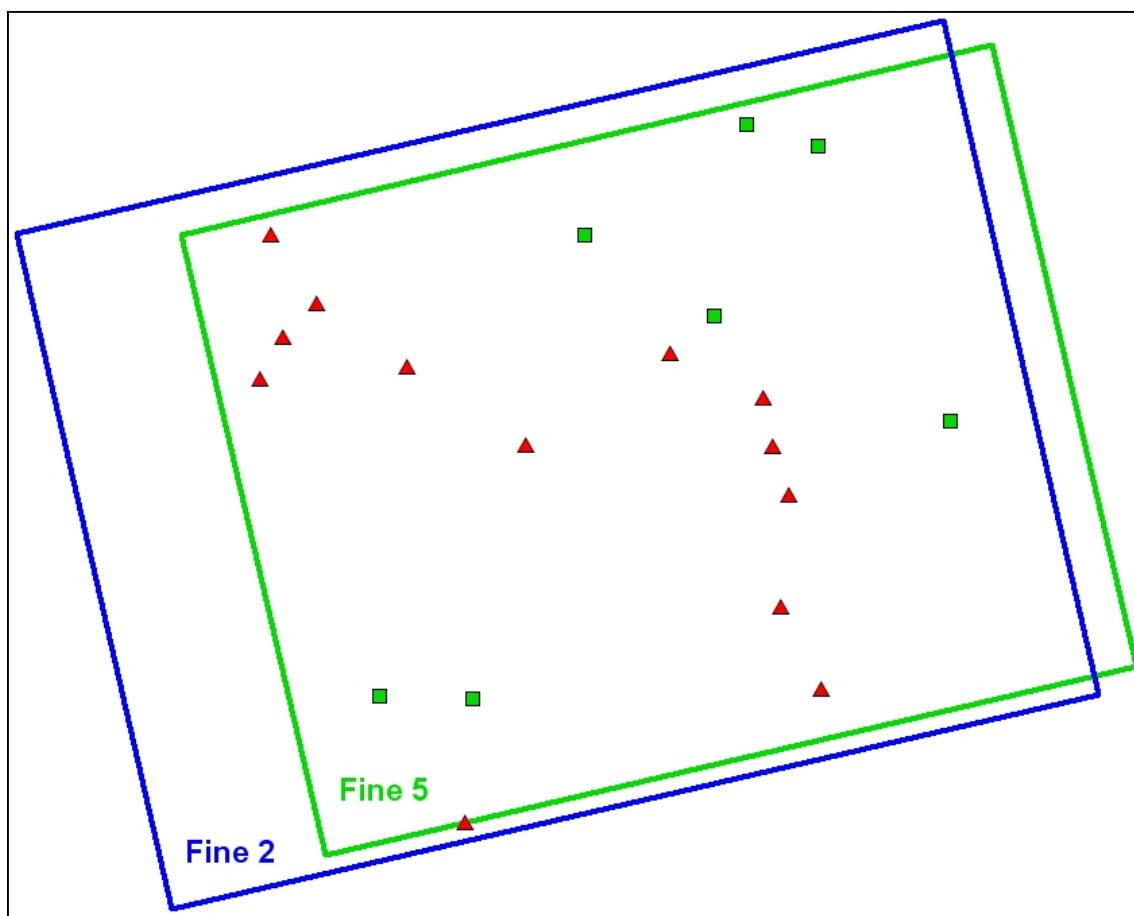


FIGURA 4.26 – Distribuição dos 13 GCPs (triângulos na cor vermelha) coletados em campo com equipamento GPS e 7 GCPs (quadrados na cor verde) coletados a partir de imagem ETM+ Landsat ortorretificada.

4.3.2.3 Resíduos Estereoscópicos dos 20 GCPs das Imagens RADARSAT Fine

Os resíduos estereoscópicos para os 20 pontos de controle utilizados para o estéreo-par F5/F2 foram gerados a partir da modelagem *Toutin* e são apresentados na Tabela 4.4.

TABELA 4.4 – Resíduos dos 20 Pontos de Controle Utilizados para o Par Estereoscópico F5/F2 na Modelagem *Toutin*.

ID	Tipo GCP	Resíduo Total (m)	Resíduo E (m)	Resíduo N (m)	Resíduo H (m)
1	Carta/Imagem	26,51	21,63	10,68	-10,98
2	Carta/Imagem	30,24	-22,36	-2,25	20,25
3	Cinemático	7,91	6,62	-1,70	-3,97
4	Cinemático	32,76	-22,80	-11,54	20,50
5	Carta/Imagem	9,86	-0,29	8,52	-4,95
6	Cinemático	28,99	25,01	7,78	-12,43
7	Estático	12,85	11,31	6,03	-0,86
8	Carta/Imagem	24,36	13,31	2,22	-20,28
9	Estático	9,72	2,43	9,38	-0,72
10	Carta/Imagem	23,51	-8,07	-11,00	19,14
11	Cinemático	10,92	-9,36	2,37	5,10
12	Cinemático	12,37	-8,56	6,15	-6,47
13	Cinemático	35,42	21,22	11,48	-25,93
14	Carta/Imagem	24,79	-14,90	-18,56	6,92
15	Estático	25,29	-16,24	1,11	19,35
16	Cinemático	16,25	-14,59	-6,01	3,88
17	Cinemático	36,27	27,09	-2,14	-24,02
18	Carta/Imagem	30,01	-20,64	-3,00	21,58
19	Cinemático	11,39	6,38	-0,59	-9,42
20	Estático	9,86	2,71	-8,85	3,38

A média do resíduo total (estereoscópico) do par de imagens Fine ficou em torno de 21 metros, quase três vezes mais que um elemento de resolução das imagens (8 metros).

4.3.2.4 Imagens Epipolares RADARSAT Fine Geradas a Partir de 20 GCPs

As Figuras 4.27 e 4.28 ilustram as imagens epipolares F2 (direita) e F5 (esquerda), respectivamente, geradas a partir das imagens sem filtragem e modelagem *Toutin*.

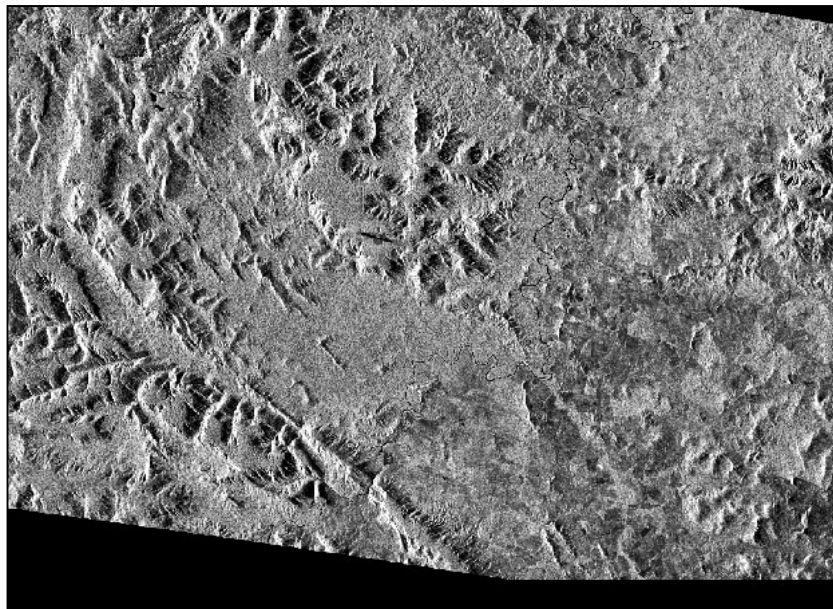


FIGURA 4.27 – Imagem epipolar gerada a partir de 20 GCPs sobre a imagem F2 (direita) sem filtragem e modelagem *Toutin*.

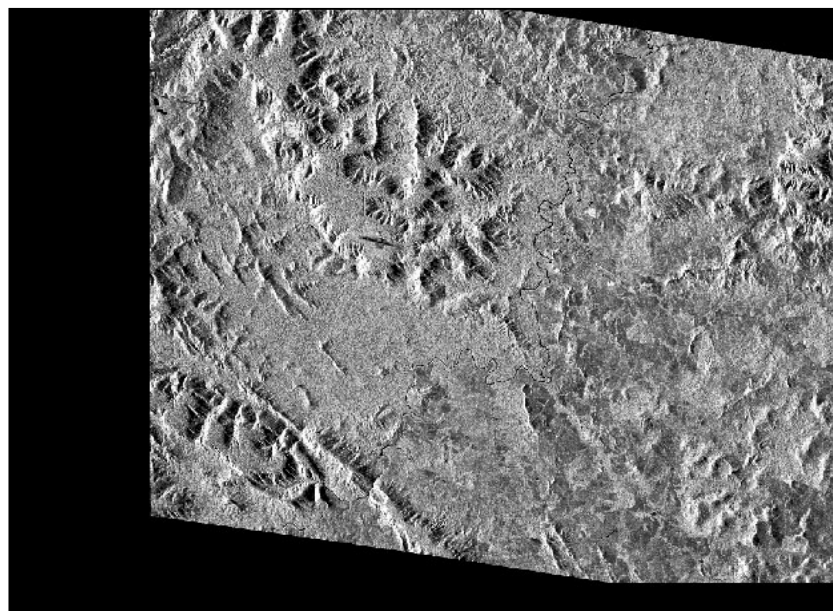


FIGURA 4.28 – Imagem epipolar gerada a partir de 20 GCPs sobre a imagem F5 (esquerda) sem filtragem e modelagem *Toutin*.

As Figuras 4.29 e 4.30 ilustram as imagens epipolares F2 (direita) e F5 (esquerda), respectivamente, geradas a partir das imagens sem filtragem e modelagem *RADARSAT Specific*.

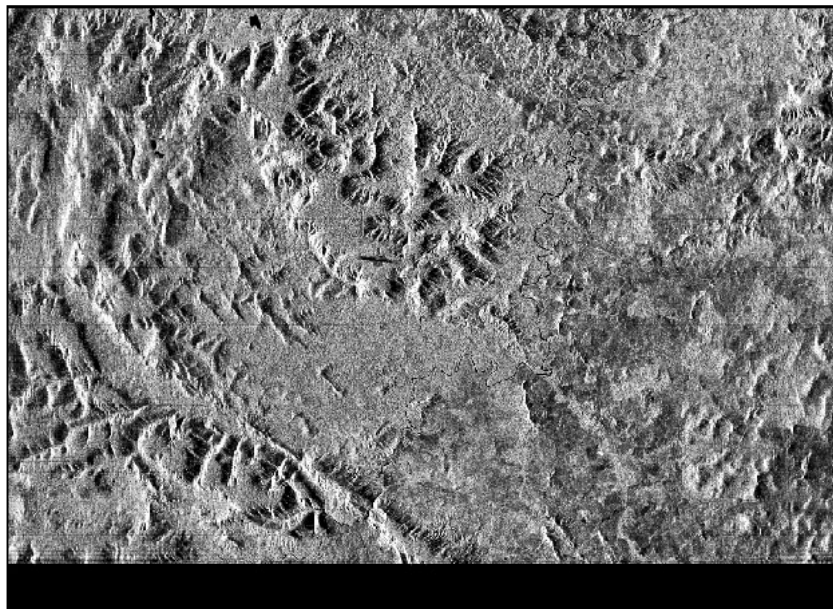


FIGURA 4.29 – Imagem epipolar gerada a partir de 20 GCPs sobre a imagem F2 (direita) sem filtragem e modelagem *RADARSAT Specific*.

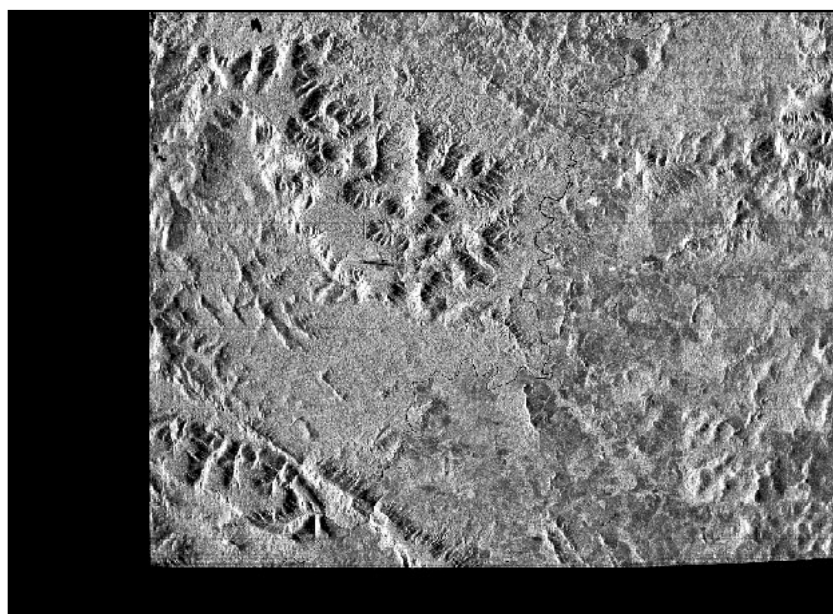


FIGURA 4.30 – Imagem epipolar gerada a partir de 20 GCPs sobre a imagem F5 (esquerda) sem filtragem e modelagem *RADARSAT Specific*.

Com os resultados da geração das imagens epipolares com 13 GCPs (Figuras 4.19 e 4.20) e 20 GCPs (Figuras 4.27 e 4.28), na modelagem *Toutin*, observa-se que as imagens geradas com 20 GCPs apresentaram menos distorções.

4.3.2.5 Resultados da Geração e Geocodificação dos DEMs RADARSAT Fine Gerados a Partir de 20 GCPs

Os resultados da geração e geocodificação dos dois DEMs Fine gerados a partir dos 20 GCPs são apresentados nas Figuras 4.31 e 4.32.

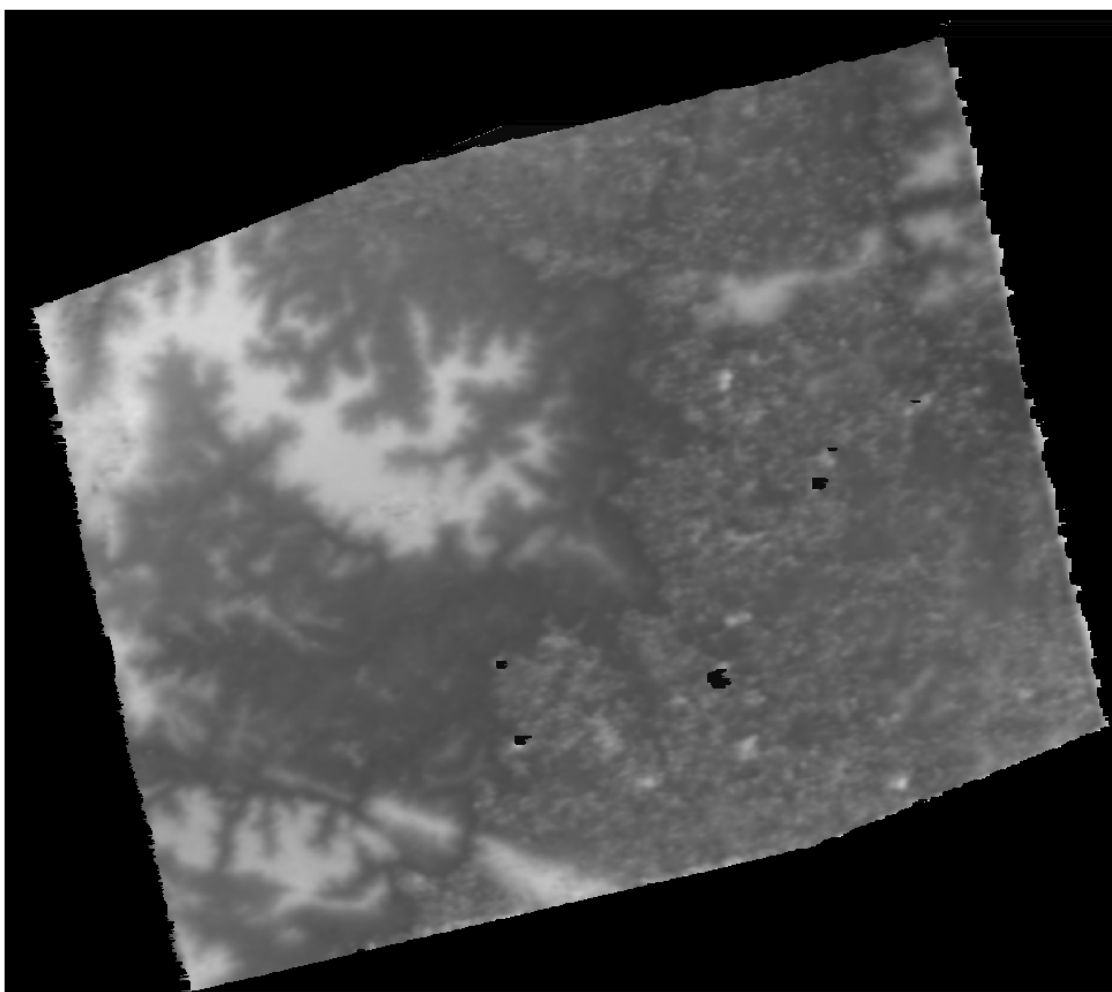


FIGURA 4.31 – DEM RADARSAT Fine gerado a partir de 20 GCPs sobre imagens F2 e F5 sem filtragem utilizando a modelagem *Toutin*.

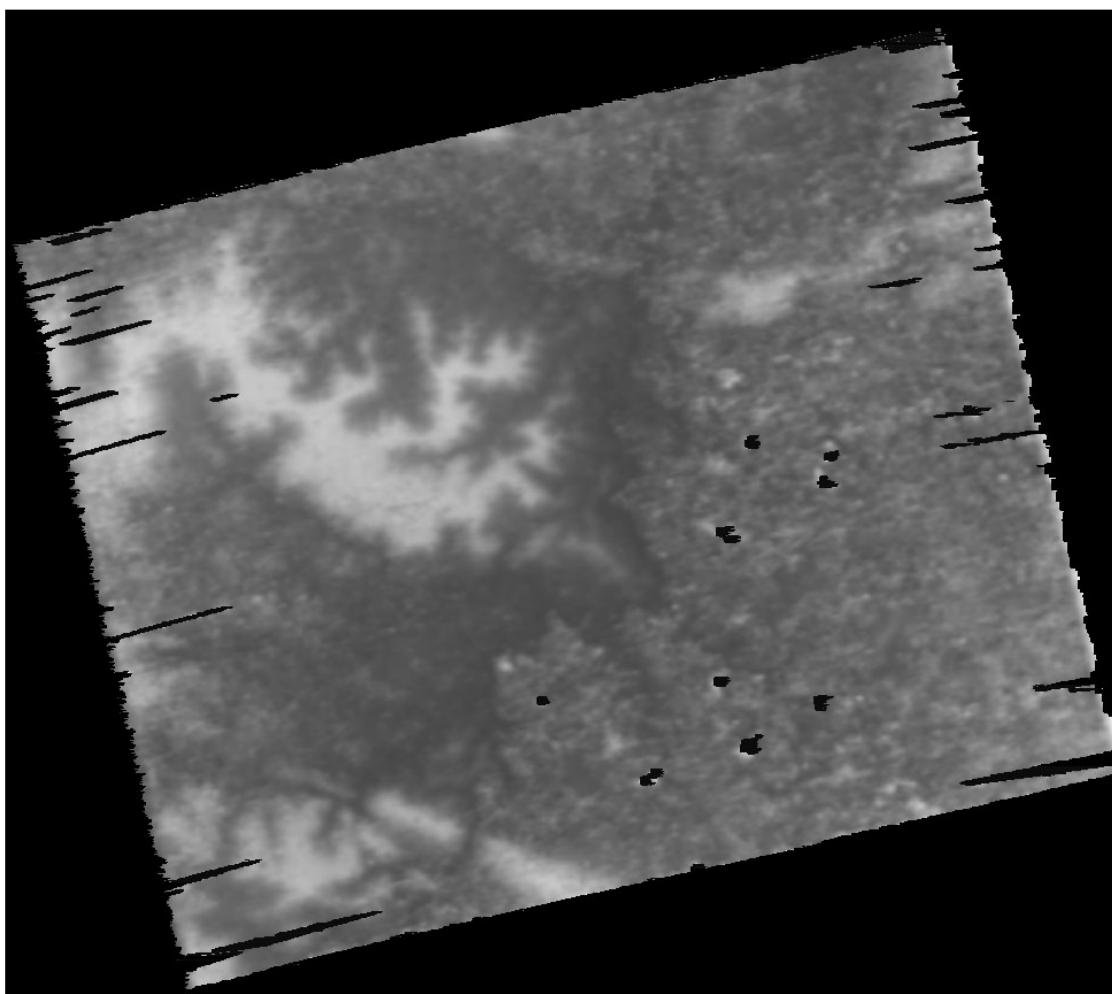


FIGURA 4.32 – DEM RADARSAT Fine gerado a partir de 20 GCPs sobre imagens F2 e F5 sem filtragem utilizando a modelagem *RADARSAT Specific*.

Com a utilização dos 20 GCPs restaram apenas algumas áreas sem informação no DEM gerado na modelagem *Toutin*, ao contrário do que ocorreu na geração do DEM com 13 GCPs. Para o DEM gerado na modelagem *RADARSAT Specific* ocorreu um aumento de áreas sem informação em relação ao DEM gerado com 13 GCPs.

Os demais DEMs gerados nas duas modelagens, a partir de 20 GCPs, são apresentados nos Apêndices A (Modelagem *Toutin*) e B (Modelagem *RADARSAT Specific*).

4.4 Comparação entre Curvas-de-Nível Geradas a Partir dos DEMs ASTER, RADARSAT standard e Fine, das Cartas Topográficas e SRTM.

A partir dos DEMs ASTER, RADARSAT Fine e Standard, das cartas topográficas e da SRTM, foram geradas curvas-de-nível com equidistância de 50 metros. Para isto, foi utilizada a ferramenta *CONTOUR* do *software* PCI Geomatics.

As Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 apresentam os resultados da geração das curvas-de-nível geradas a partir dos três DEMs ASTER. A aplicação da filtragem mediana 3×3 e 5×5 nas imagens 3N e 3B alterou a forma das curvas-de-nível em relação às curvas geradas a partir do DEM das imagens sem filtragem.

A Figura 4.36 apresenta curvas-de-nível geradas a partir dos dois DEMs RADARSAT Standard. Nota-se que a aplicação da filtragem *Enhanced Frost* alterou a forma das curvas de nível em relação às curvas geradas sobre o DEM das imagens sem filtragem. Além disso, o DEM gerado a partir de imagens com filtragem apresenta curvas com valores de elevação de 750 metros, ao contrário do DEM gerado a partir de imagens sem filtragem que apresenta valor máximo de 700 metros na mesma região.

A Figura 4.37 apresenta os resultados da geração de curvas-de-nível dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de imagens sem filtragem, com 13 GCPs, nas modelagens *Toutin* e *RADARSAT Specific*. Nas curvas geradas a partir do DEM Fine *RADARSAT Specific*, nota-se uma grande quantidade de pequenas curvas-de-nível, ao contrário do resultado gerado a partir do DEM Fine *Toutin*. Os dois resultados apresentam a mesma faixa de elevação máxima (650 metros), mas as curvas geradas a partir do DEM Fine *RADARSAT Specific* apresentam valores de 250 metros, ao contrário dos valores de cota apresentados nas curvas-de-nível geradas do DEM Fine *Toutin* (300 m).

Já as curvas-de-nível geradas a partir do DEM SRTM estão próximas das formas das curvas geradas a partir do DEM das Cartas Topográficas e com a mesma variação de cota mínima e máxima, como pode ser visto na figura 4.38.

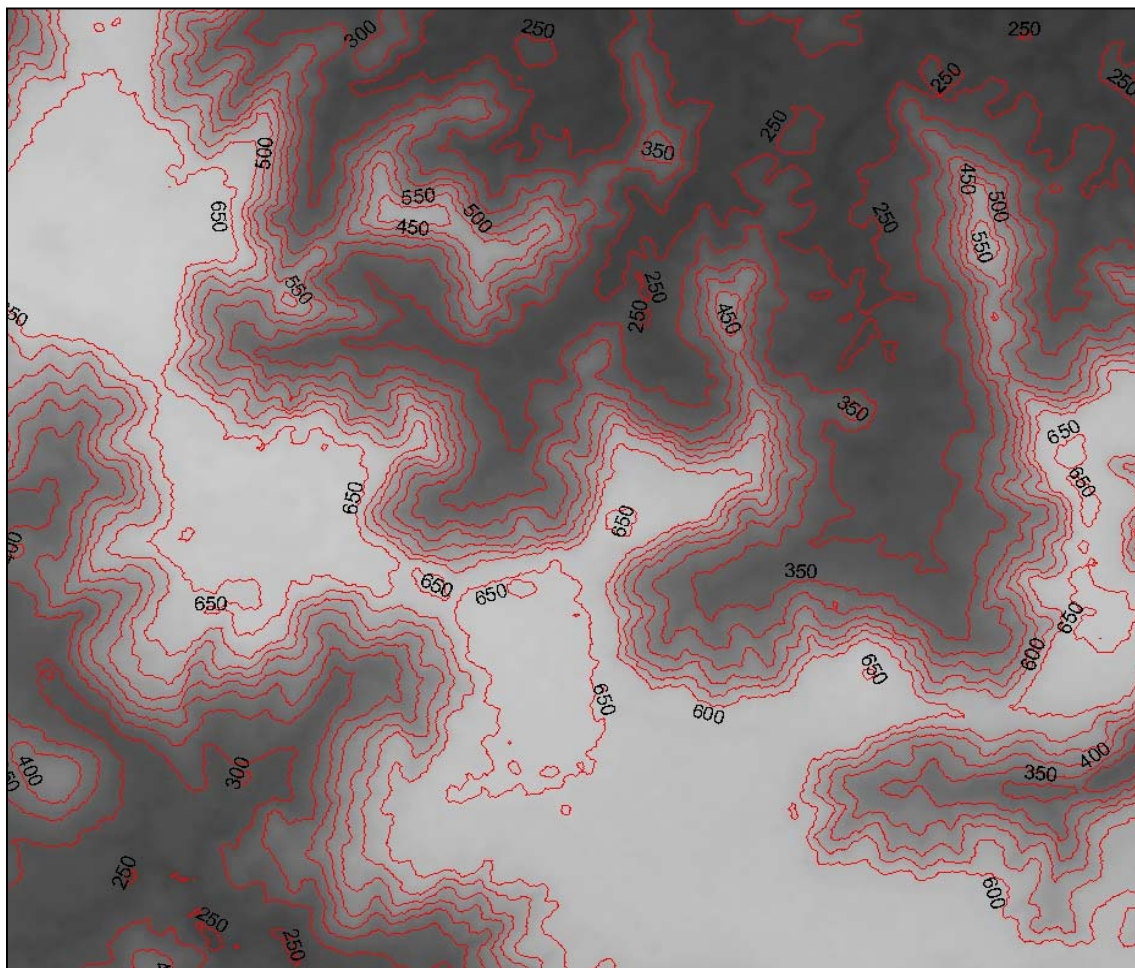


FIGURA 4.33 – Detalhe das curvas-de-nível geradas a partir do DEM ASTER gerado a partir das imagens 3N e 3B sem filtragem.

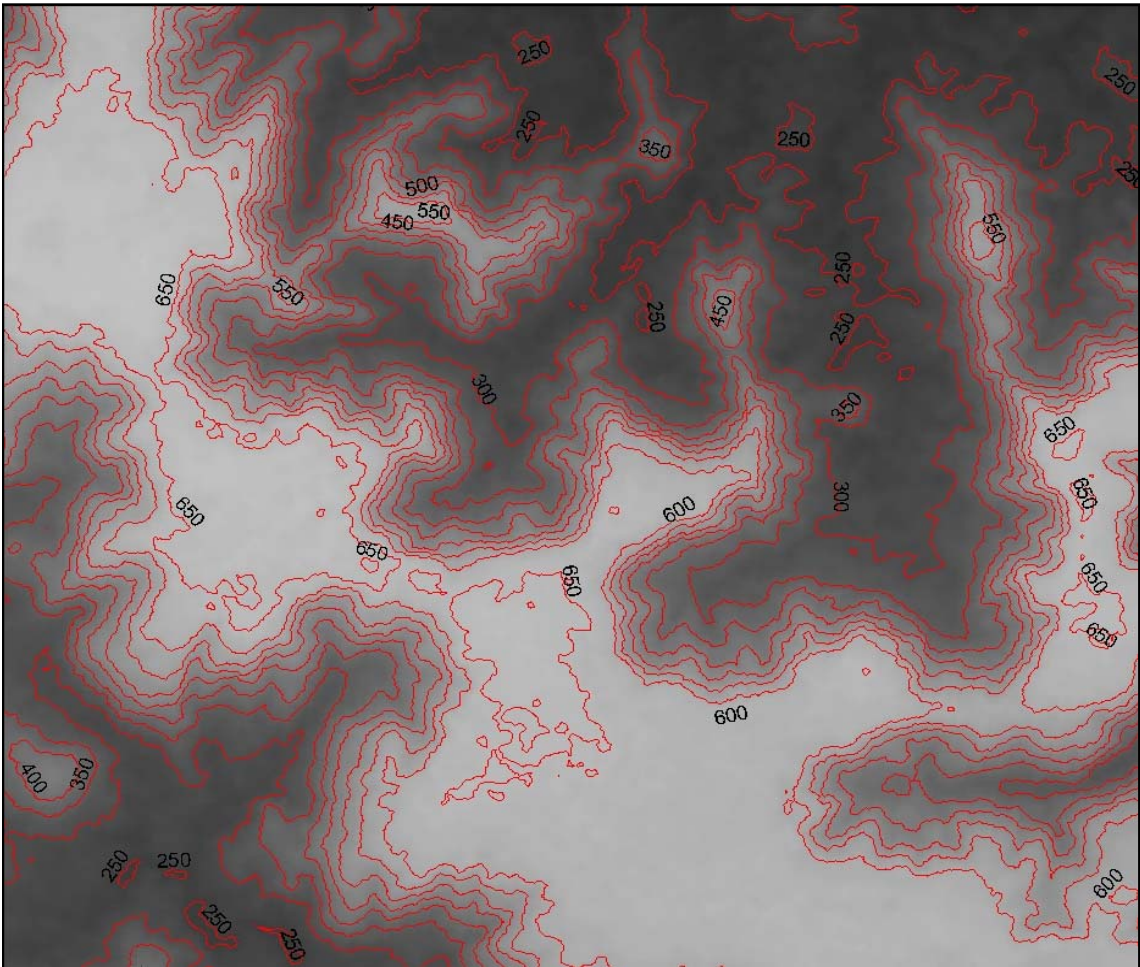


FIGURA. 4.34 – Detalhe das curvas-de-nível geradas a partir do DEM ASTER gerado a partir de imagens 3N e 3B com filtragem mediana 3×3.

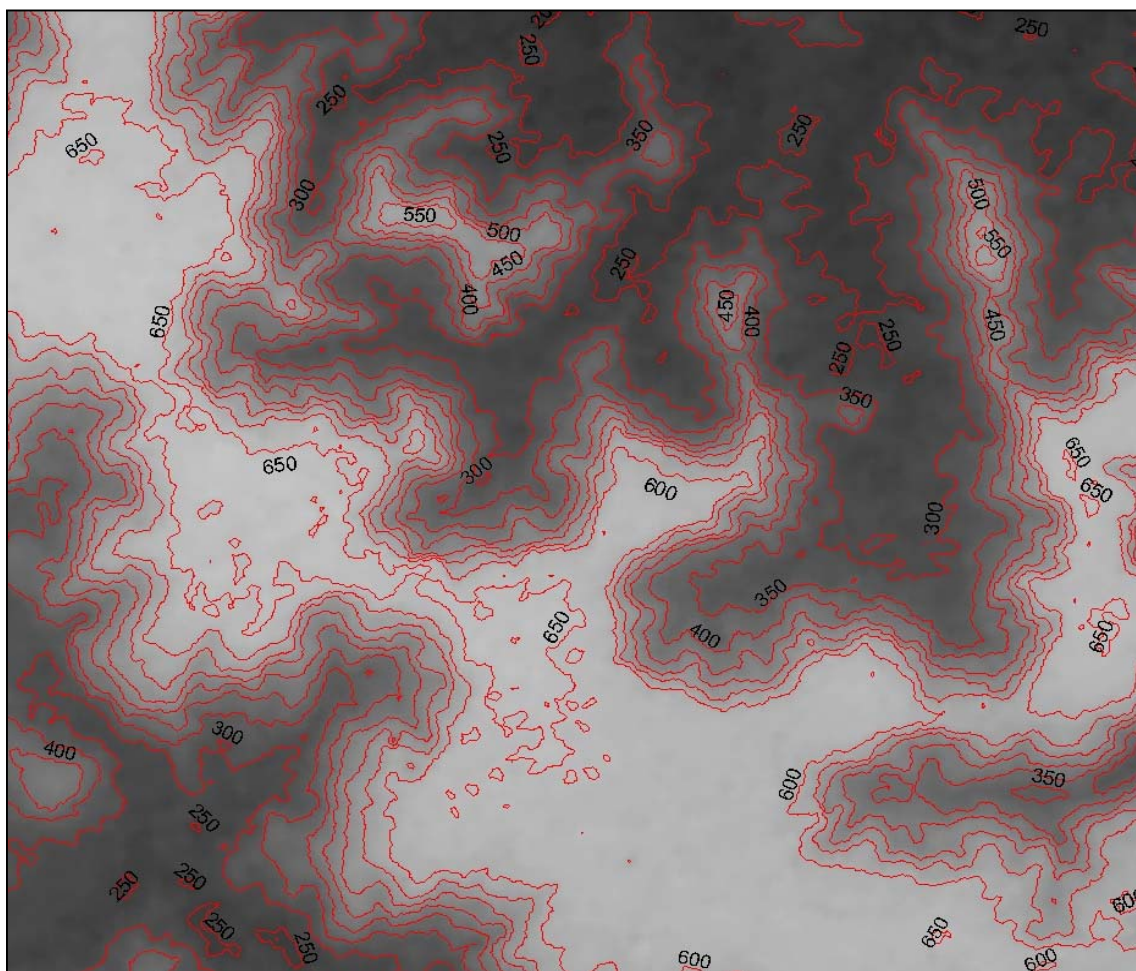


FIGURA 4.35 – Detalhe das curvas-de-nível geradas a partir do DEM ASTER gerado a partir de imagens 3N e 3B com filtragem mediana 5×5.

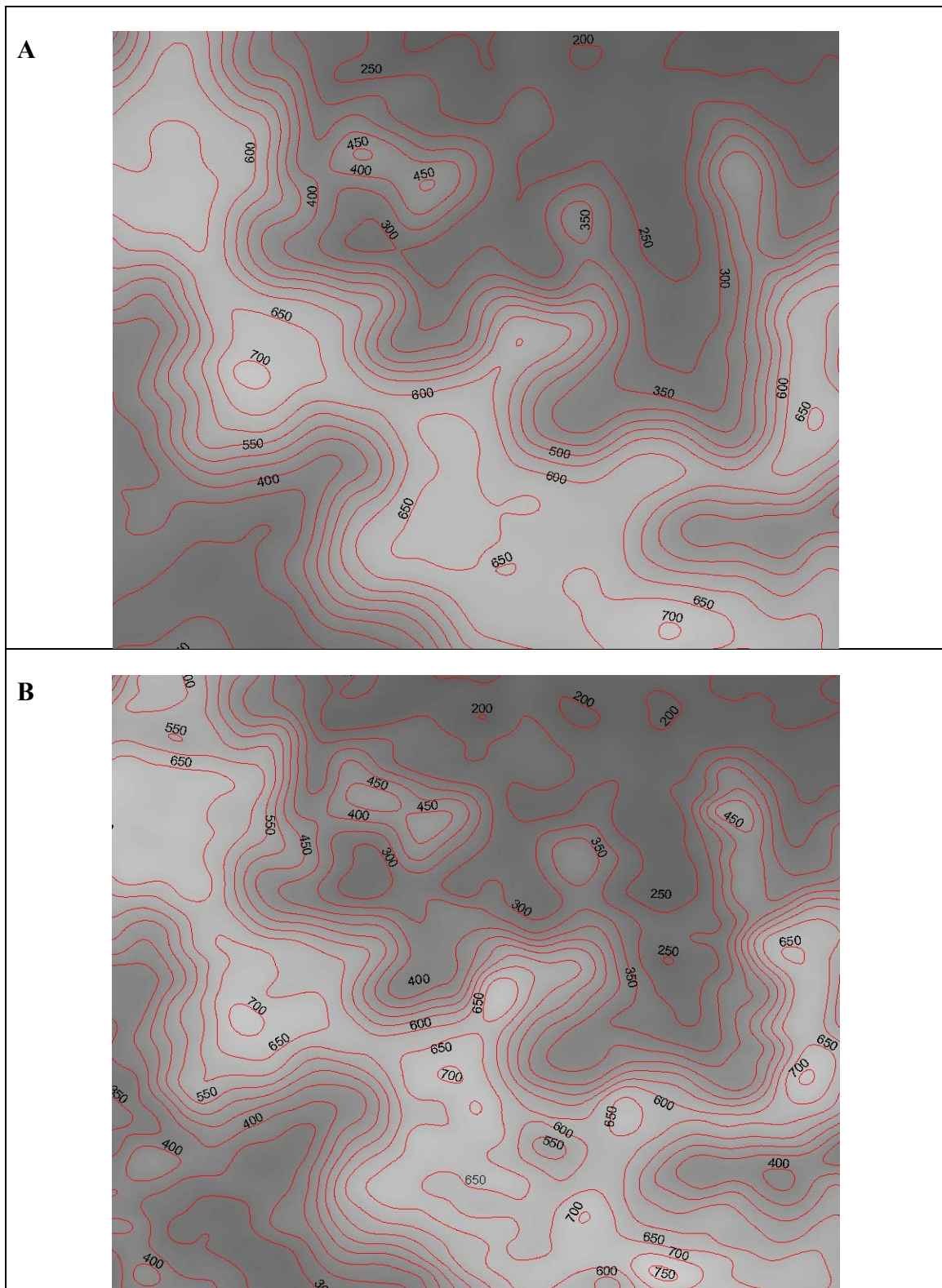


FIGURA. 4.36 – Detalhes dos DEMs RADARSAT Standard gerados a partir das imagens S5 e S7 sem filtragem (A) e com filtragem *Enhanced Frost 5x5* (B).

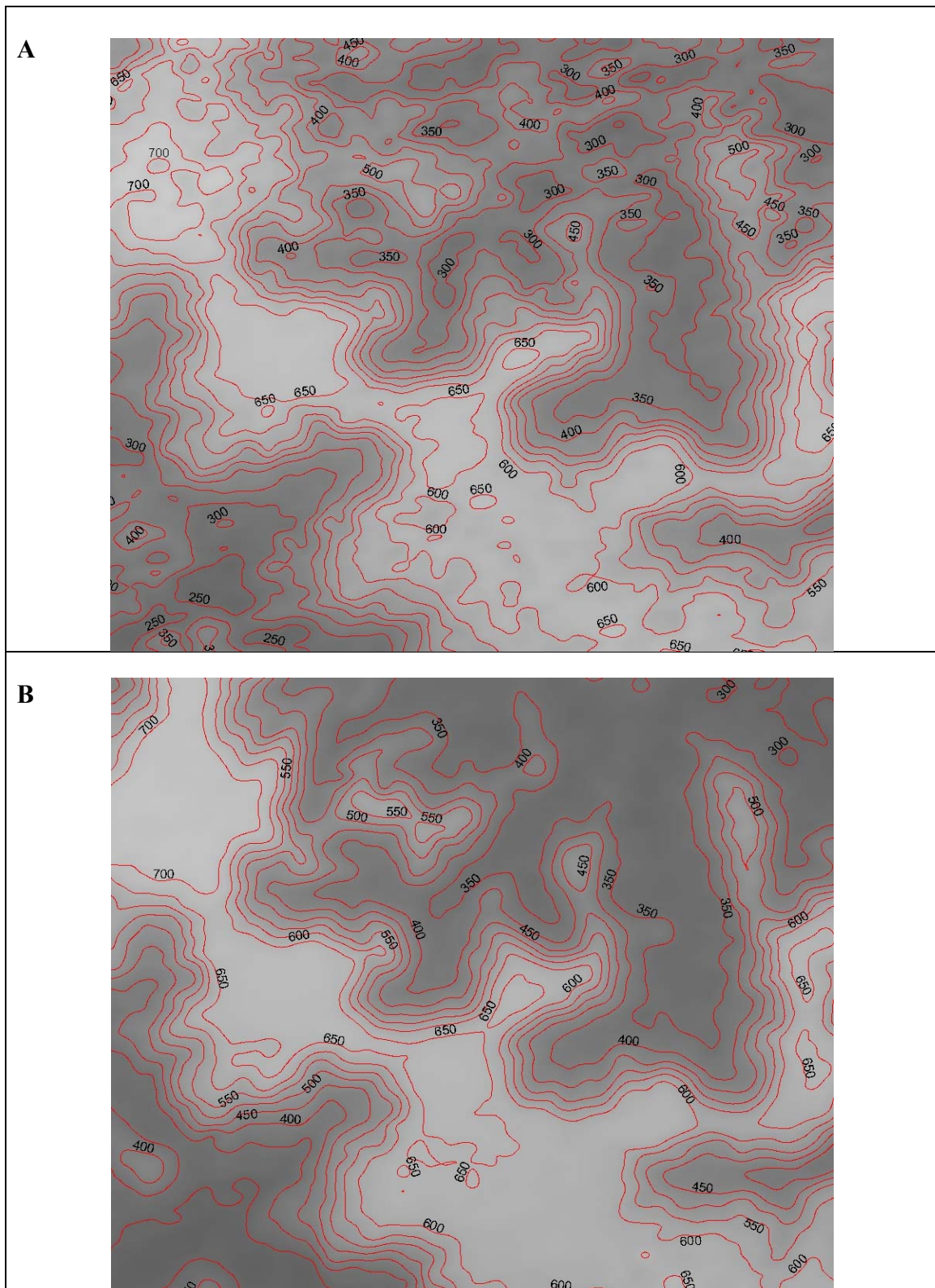


FIGURA 4.37 – Detalhes dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir das imagens F2 e F5 sem filtragem nas modelagens *RADARSAT Specific* (A) e *Toutin* (B) com 13 GCPs.

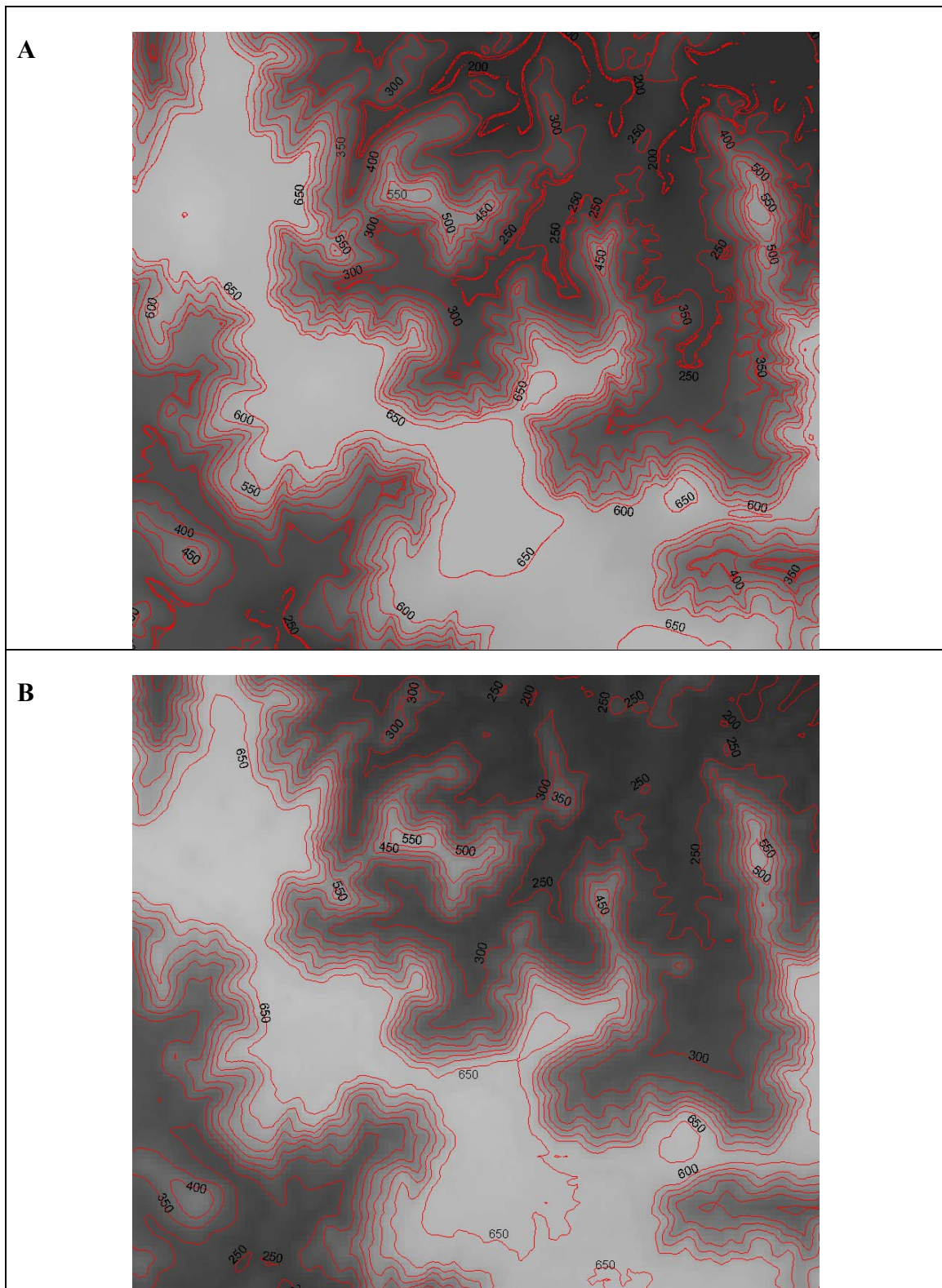


FIGURA 4.38 – Detalhes das curvas de nível geradas sobre os DEMs das Cartas Topográficas (A) e da SRTM (B).

4.5 Controle De Qualidade Dos Modelos Digitais De Elevação

4.5.1 Distribuição dos Pontos de Verificação para o Controle de Qualidade dos DEMs ASTER

A distribuição dos pontos de verificação (ICPs) selecionados para o controle de qualidade dos DEMs, gerados a partir das imagens ASTER, são apresentados nas figuras 4.39 (20 ICPs) e 4.40 (28 ICPs). Nota-se, nas duas figuras que os pontos foram distribuídos ao longo do percurso realizado para levantamento dos pontos GPS no modo cinemático e estático. Como os pontos disponíveis na área central foram utilizados como GCPs, esta região dos DEMs não pode ser avaliada.

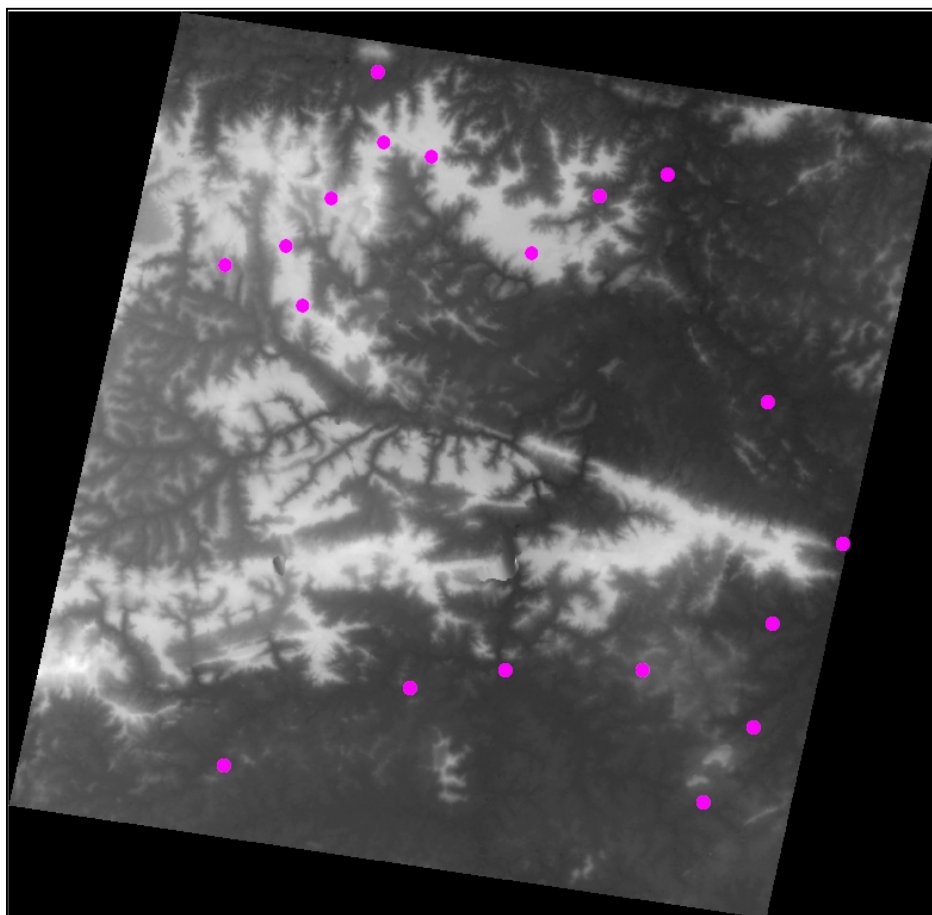


FIGURA 4.39 – Distribuição dos 20 ICPs selecionados sobre os DEMs gerados a partir das imagens ASTER.

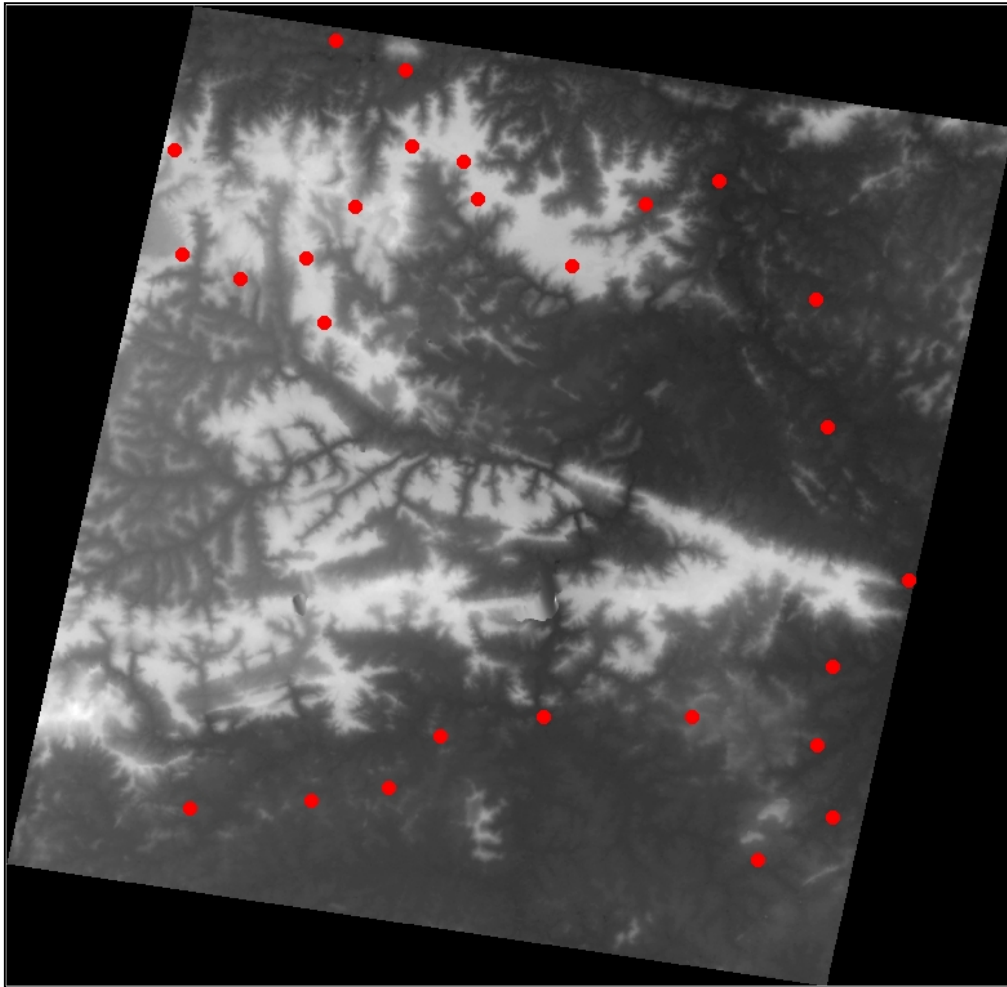


FIGURA 4.40 – Distribuição dos 28 ICPs selecionados sobre os DEMs gerados a partir das imagens ASTER.

Os ICPs utilizados na verificação do controle de qualidade dos DEMs ASTER apresentaram uma distribuição em área próxima do ideal, ou seja, apenas a porção central não possui pontos para a verificação dos DEMs. Isto ocorreu em função da dificuldade de acesso nesta área.

4.5.2 Distribuição dos Pontos de Verificação para o Controle de Qualidade dos DEMs RADARSAT Standard

A distribuição dos ICPs selecionados para a verificação do controle de qualidade dos DEMs gerados a partir das imagens RADARSAT Standard 5 e 7, são apresentados nas Figuras 4.41 (20 ICPs) e 4.42 (28 ICPs). A concentração dos pontos de verificação na porção central do DEM é consequência da disponibilidade de pontos GPS levantados em campo nos modos cinemático e estático.

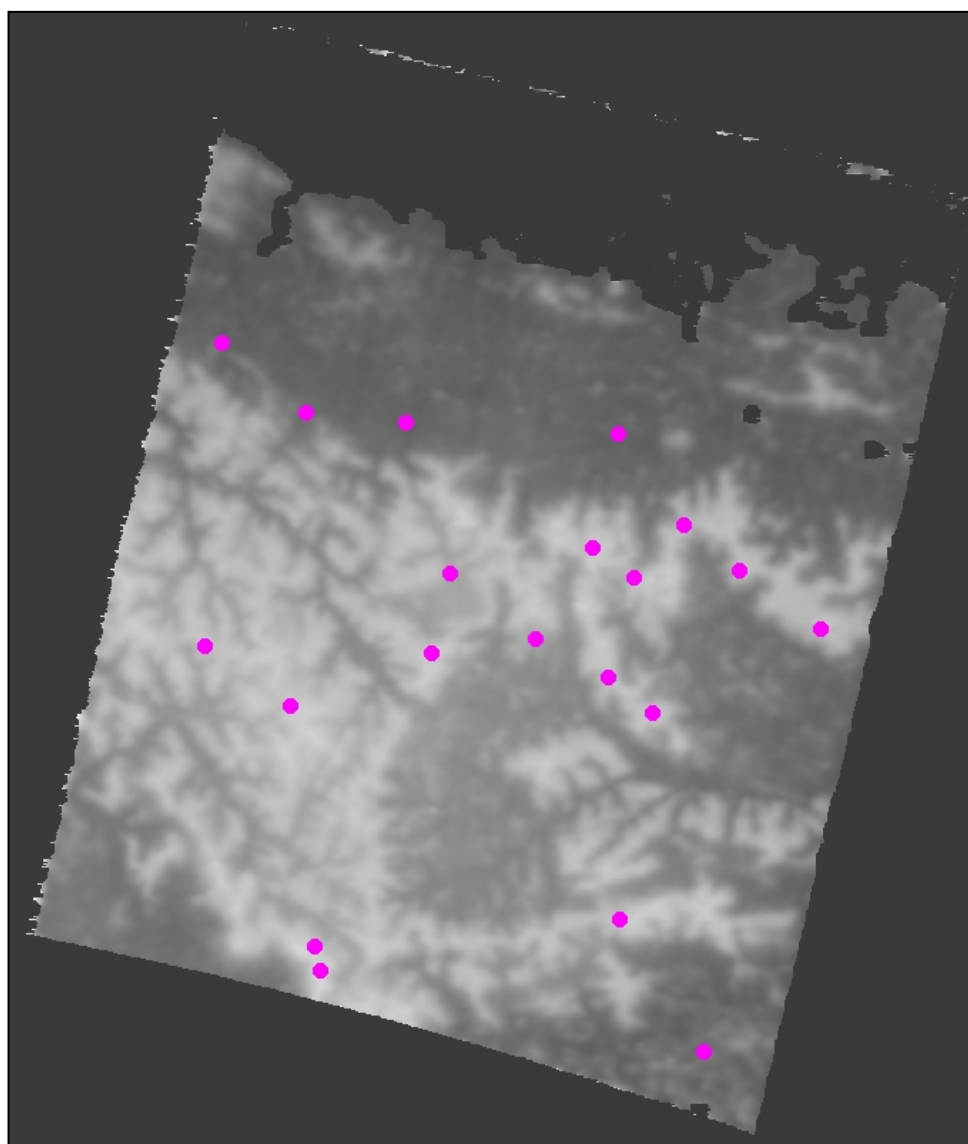


FIGURA 4.41 – Distribuição dos 20 ICPs selecionados sobre os DEMs gerados a partir das imagens RADARSAT Standard 5 e 7.

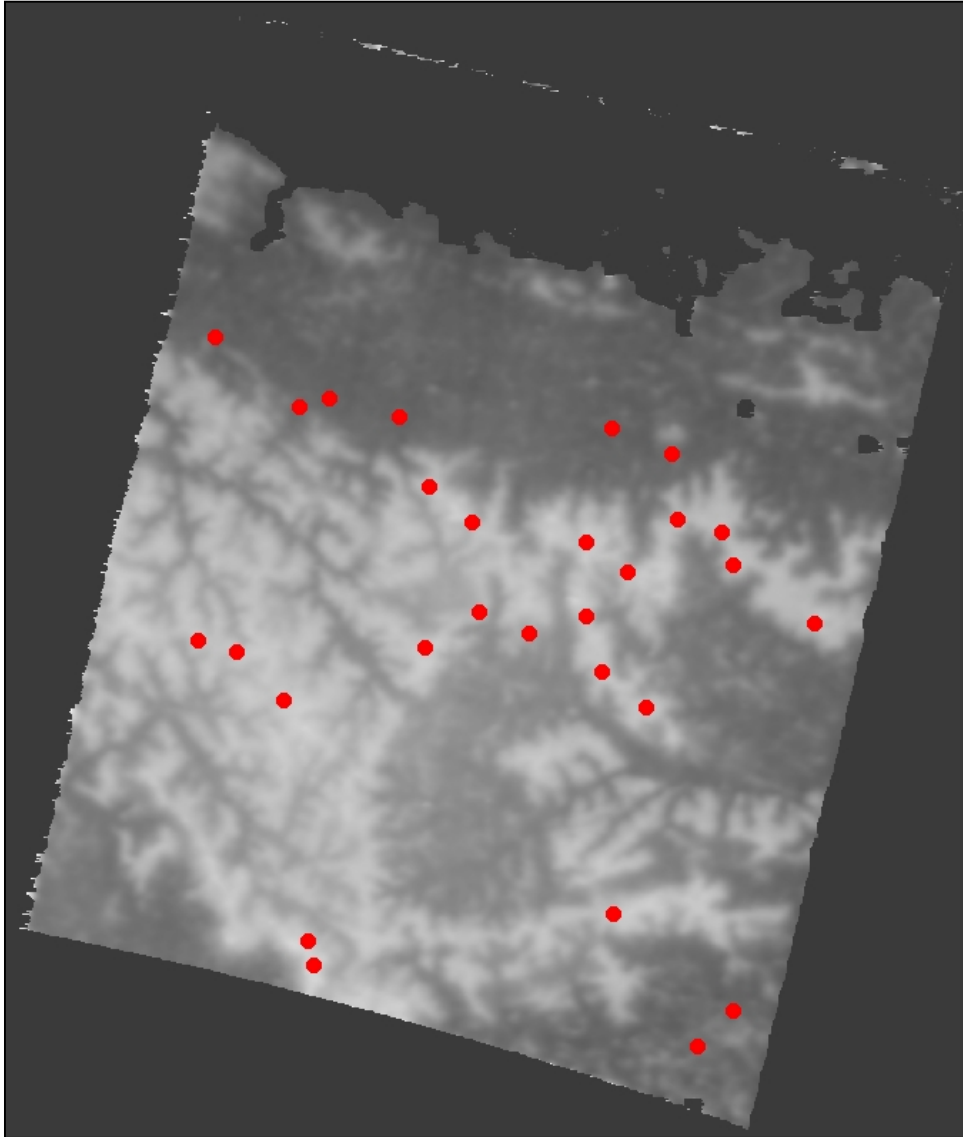


FIGURA 4.42 – Distribuição dos 28 ICPs selecionados sobre os DEMs gerados a partir das imagens RADARSAT Standard 5 e 7.

Ao contrário dos DEMs ASTER, a distribuição dos ICPs utilizados na avaliação dos DEMs RADARSAT Standard, não cobriram a porção superior dos DEMs e parte da região central.

4.5.3 Distribuição dos Pontos de Verificação para o Controle de Qualidade dos DEMs RADARSAT Fine Gerados a Partir de 13 GCPs

As distribuições dos ICPs selecionados sobre os DEMs gerados a partir das imagens RADARSAT Fine 2 e 5 nas modelagens *RADARSAT Specific* e *Toutin*, com 13 GCPs, são apresentados nas figuras 4.43 e 4.44. Nesta configuração de ICPs, verifica-se que os pontos selecionados para a verificação do controle de qualidade estão concentrados ao longo do trajeto que foi realizado na coleta dos pontos GPS, não sendo possível na época do levantamento de campo aumentar a área de cobertura de pontos GPS sem a utilização de mais horas de helicóptero.

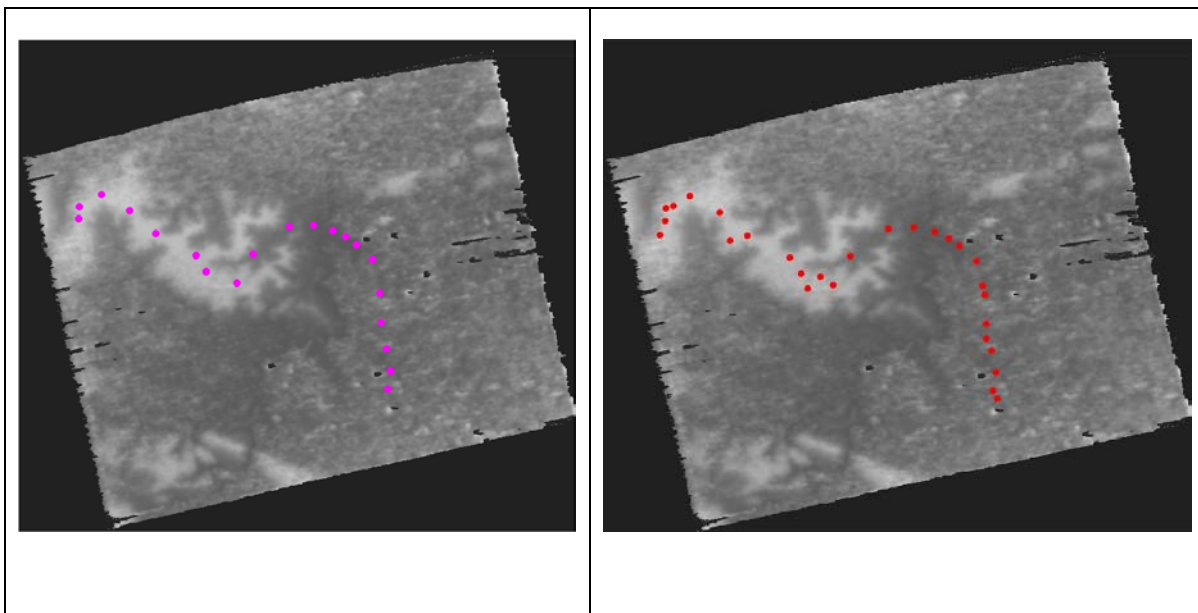


FIGURA 4.43 – Distribuição de 20 (magenta) e 28 (vermelho) ICPs selecionados sobre DEM gerado a partir das imagens RADARSAT Fine 2 e 5 na modelagem *RADARSAT Specific*, com 13 GCPs.

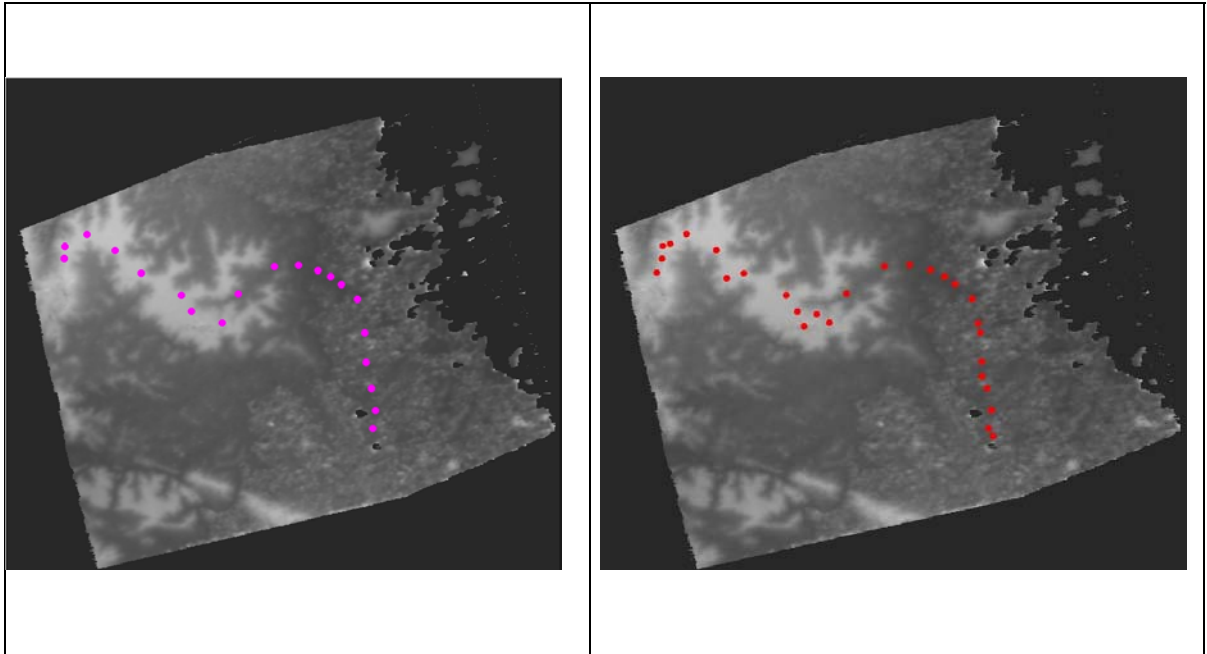


FIGURA 4.44 – Distribuição de 20 (magenta) e 28 (vermelho) ICPs selecionados sobre DEM gerado a partir das imagens RADARSAT Fine 2 e 5 na modelagem *Toutin*, com 13 GCPs.

Assim como no caso da distribuição dos ICPs dos DEMs RADARSAT Standard, os ICPs utilizados para avaliar os DEMs RADARSAT Fine gerados com 13 GCPs não apresentaram uma boa distribuição em área.

4.5.4 Distribuição dos Pontos de Verificação para o Controle de Qualidade dos DEMs RADARSAT Fine Gerados a Partir de 20 GCPs

As distribuições dos ICPs selecionados sobre os DEMs gerados a partir das imagens RADARSAT Fine 2 e 5 nas modelagens *RADARSAT Specific* e *Toutin*, com 20 GCPs, são apresentadas na Figura 4.45.

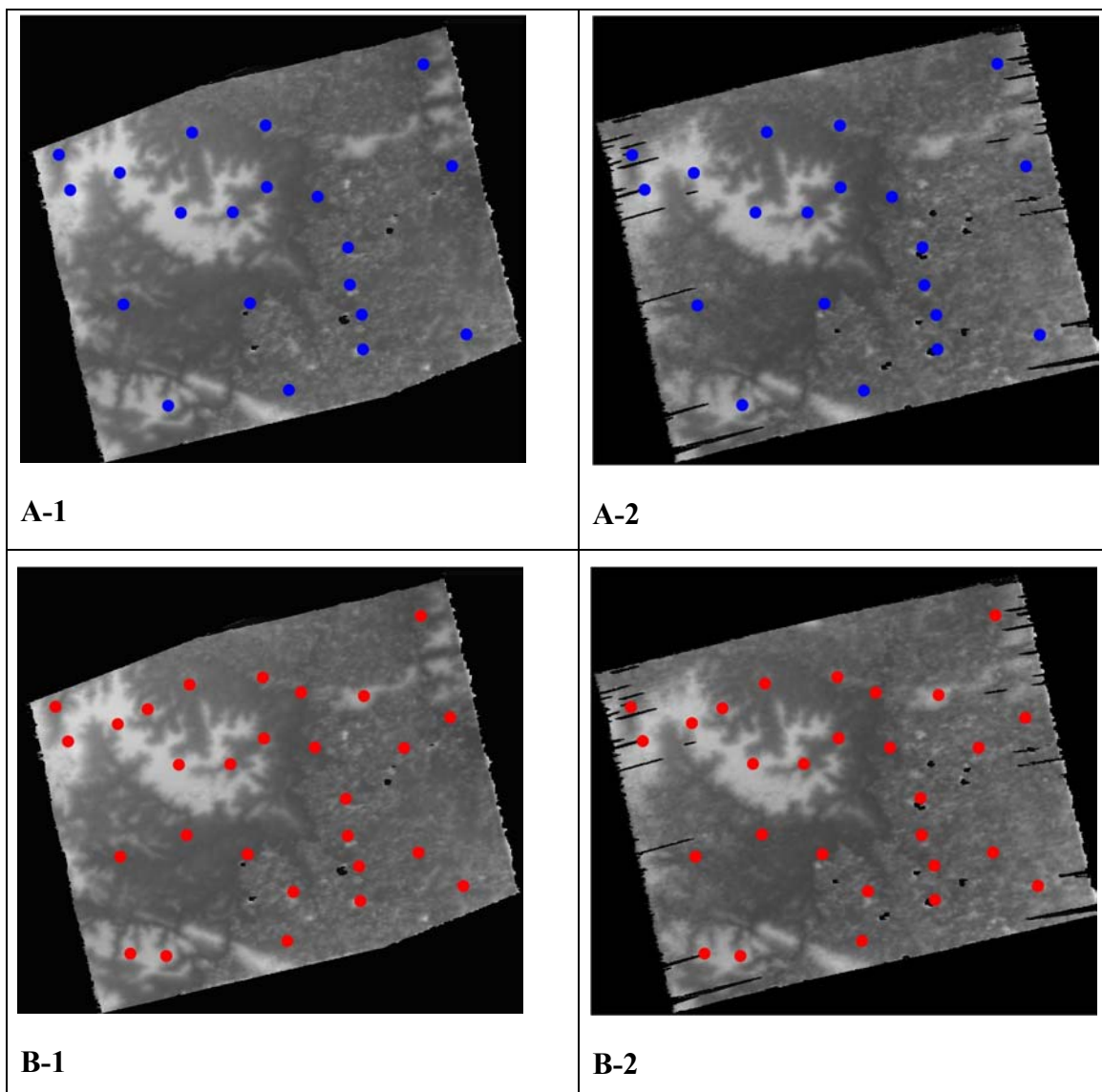


FIGURA 4.45 – Distribuição de 20 (A) e 28 (B) ICPs selecionados sobre os DEMs gerados a partir das imagens RADARSAT Fine 2 e 5 nas modelagens *Toutin* (1) e *RADARSAT Specific* (2).

Como a origem dos ICPs utilizados para o controle de qualidade dos DEMs Fine gerados a partir de 20 GCPs possuem precisões distintas (pontos GPS e pontos cotados

das cartas topográficas 1:100.000), com os resultados alcançados pretende-se avaliar apenas qual a melhor filtragem para as duas modelagens utilizadas na geração dos DEMs.

4.5.5 Distribuição dos Pontos de Verificação para o Controle de Qualidade do DEM das Cartas Topográficas 1:100.000 da Área de Estudo

As distribuições dos ICPs selecionados sobre o DEM gerado a partir das cartas topográficas 1:100.000 da área de estudo, são apresentadas na figura 4.46. Pode-se notar que os pontos estão bem distribuídos por quase toda a área e elevação do DEM das cartas.

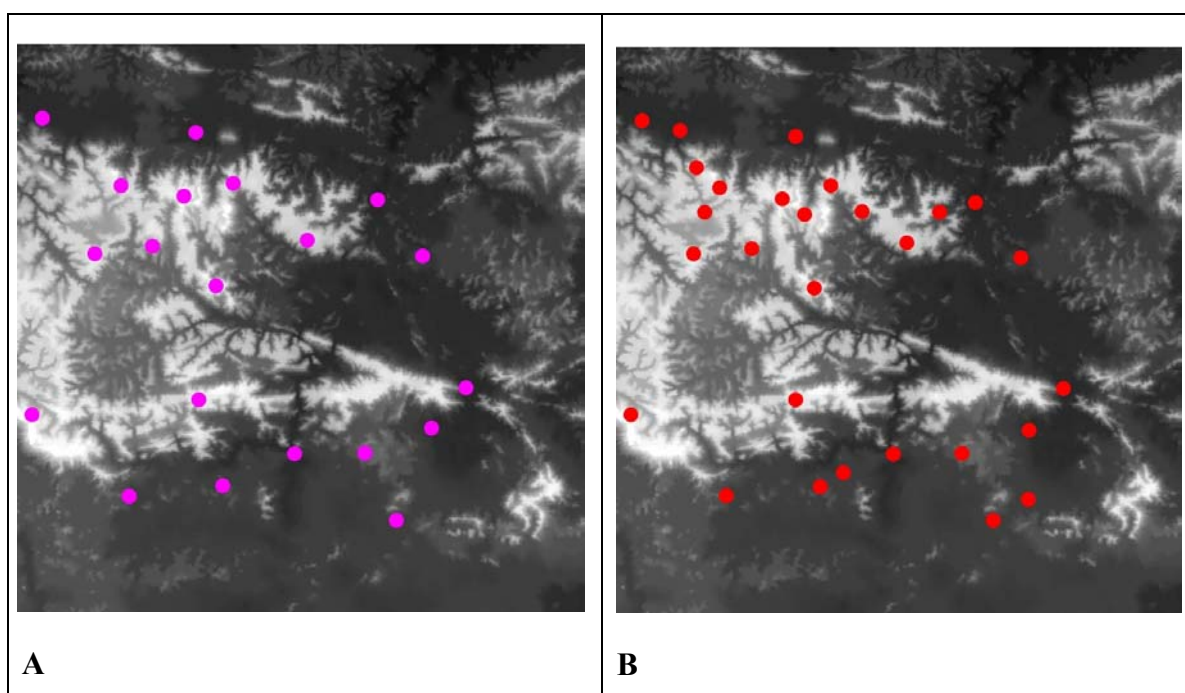


FIGURA 4.46 – Distribuição dos 20 (A) e 28 (B) ICPs sobre DEM gerado a partir das cartas topográficas em escala 1:100.000 da área de estudo.

Para o DEM das cartas topográficas 1:100.000, os ICPs cobriram quase toda a área do DEM.

4.5.6 Distribuição dos Pontos de Verificação para o Controle de Qualidade dos DEMs SRTM

As distribuições dos ICPs selecionados sobre o mosaico dos DEMs SRTM são apresentadas na figura 4.47. Nota-se que a distribuição dos ICPs, para a área dos DEMs SRTM, concentra-se na porção central do mosaico dos DEMs.

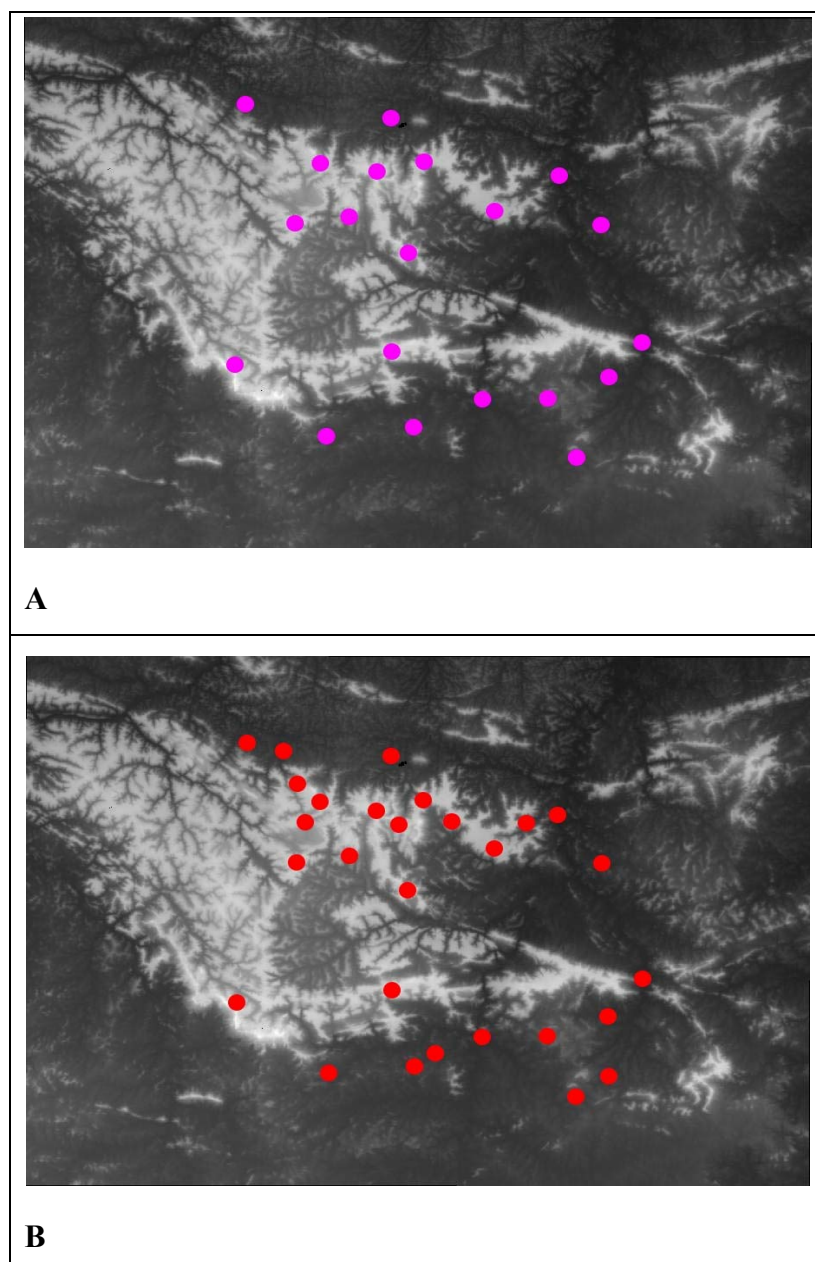


FIGURA 4.47 – Distribuição dos 20 (A) e 28 (B) ICPs sobre mosaico dos DEMs SRTM.

Para o mosaico dos DEMs SRTM os ICPs estão concentrados na região central, em função da grande área coberta pelos DEMs utilizados.

4.5.7 Cálculo do Erro Médio Quadrático dos Modelos Digitais de Elevação

4.5.7.1 Erro Médio Quadrático dos DEMs ASTER

Os valores da média das discrepâncias em altitude ($\overline{\Delta X}$), do desvio padrão ($S_{\Delta X}$) e do Erro Médio Quadrático (RMSE) calculados a partir de 20 e 28 ICPs sobre os DEMs ASTER, gerados a partir das imagens 3N e 3B sem filtragem e com filtragem mediana 3×3 e 5×5, são apresentados na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 – Estatística dos Modelos Digitais de Elevação ASTER

DEM	IMAGENS 3N E 3B	CORRELAÇÃO	20 ICPs			28 ICPs		
			$\overline{\Delta X}$ (m)	$S_{\Delta X}$ (m)	RMSE (m)	$\overline{\Delta X}$ (m)	$S_{\Delta X}$ (m)	RMSE (m)
1	SEM FILTRAGEM	0,997	0,65	11,17	10,89	0,97	13,40	13,16
2	MEDIANA 3×3	0,997	-0,36	12,08	11,78	0,00	14,39	14,13
3	MEDIANA 5×5	0,997	0,49	10,55	10,28	-0,48	13,39	13,15

Na geração dos DEMs ASTER foi obtida a porcentagem de 99,7% no processo de correlação das imagens 3N e 3B, com e sem filtragem.

Já os valores das médias calculadas a partir dos 20 ICPs e 28 ICPS apresentaram resultados inferiores a um metro, indicando que os valores de elevação dos DEMs estão muito próximos dos valores observados em campo.

Nos cálculos do RMSE, o melhor resultado foi alcançado pelo DEM gerado a partir das imagens 3N e 3B com filtragem mediana 5×5, mas com uma diferença inferior a 2 metros para o pior resultado (mediana 3×3).

4.5.7.2 Erro Médio Quadrático dos DEMs RADARSAT Standard

Os valores da média das discrepâncias em altitude ($\overline{\Delta X}$), do desvio padrão ($S_{\Delta X}$) e do Erro Médio Quadrático (RMSE) calculados a partir de 20 e 28 ICPs sobre os DEMs

Standard, gerados sem filtragem e com filtragem *Enhanced Frost 5×5*, são apresentados na Tabela 4.6.

TABELA 4.6 – Estatística dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 Standard.

DEM	IMAGENS S5 E S7	CORRELAÇÃO	20 ICPs			28 ICPs		
			$\overline{\Delta X}$ (m)	$S_{\Delta X}$ (m)	RMSE (m)	$\overline{\Delta X}$ (m)	$S_{\Delta X}$ (m)	RMSE (m)
1	SEM FILTRAGEM	0,822	-20,88	26,02	25,36	-16,14	26,15	25,68
2	ENHANCED FROST 5x5	0,820	-32,52	32,60	31,77	-30,81	30,86	30,31

Na geração do DEM RADARSAT Standard foi obtida a porcentagem de 82,2% de sucesso na correlação das imagens S5 e S7 sem filtragem. Para as imagens com filtragem *Enhanced Frost 5×5* o sucesso na correlação das imagens foi de 82,0%.

Para os resultados das médias, calculadas a partir das diferenças observadas entre os valores de elevação dos ICPs e dos pontos homólogos nos DEMs, pode-se observar que todos os DEMs gerados estão com valores de elevação muito acima dos observados em campo (ICPs).

O RMSE para o DEM RADARSAT Standard gerado a partir das imagens sem filtragem foi de 25,36 m para 20 ICPs e 25,68 m para 28 ICPs, praticamente os mesmos valores. Já o RMSE do DEM RADARSAT Standard gerado a partir das imagens com filtragem *Enhanced Frost 5×5* foi de 31,77 m para 20 ICPs e 30,31 m para 28 ICPs. Estes resultados comprovaram a influência da filtragem na geração e cálculo do RMSE do DEM Standard.

4.5.7.3 Erro Médio Quadrático dos DEMs RADARSAT Fine Gerados a Partir de 13 GCPs

Os valores da média das discrepâncias em altitude ($\overline{\Delta X}$), do desvio padrão ($S_{\Delta X}$) e do Erro Médio Quadrático (RMSE) calculados a partir de 20 e 28 ICPs sobre os DEMs Fine, gerados a partir de 13 GCPs e imagens sem filtragem, são apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8.

TABELA 4.7 – Estatística dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 Fine Gerados a Partir de 13 GCPS e Avaliados com 20 ICPS.

DEM	MODELAGEM	CORRELAÇÃO	20 ICPS		
			$\overline{\Delta X}$ (m)	$S_{\Delta X}$ (m)	RMSE (m)
1	TOUTIN	0,765	-17,23	20,37	19,85
2	RADARSAT SPECIFIC	0,824	-20,39	23,38	22,78

TABELA 4.8 – Estatística dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 Fine Gerados a Partir de 13 GCPS e Avaliados com 28 ICPS

DEM	MODELAGEM	CORRELAÇÃO	28 ICPS		
			$\overline{\Delta X}$ (m)	$S_{\Delta X}$ (m)	RMSE (m)
1	TOUTIN	0,765	-12,38	23,49	23,07
2	RADARSAT SPECIFIC	0,824	-15,21	28,49	27,98

Para o DEM gerado a partir das imagens F5 e F2 sem filtragem, modelagem *Toutin* e 13 GCPS, o sucesso na correlação das imagens foi de 76,5%. Já para o DEM gerado a partir da modelagem *RADARSAT Specific*, o sucesso na correlação das imagens foi de 82,4%.

Assim, como no caso dos DEMs RADARSAT Standard, as médias calculadas a partir das diferenças observadas entre os valores de elevação observados em campo (ICPs) e dos pontos homólogos nos DEMs, apresentam resultados que indicam que os DEMs gerados possuem valores de elevação muito acima dos valores observados em campo (ICPs).

Os resultados do RMSE calculados a partir de 20 ICPS, nas duas modelagens utilizadas na geração dos DEMs RADARSAT Fine gerados partir de 13 GCPS, indicaram um melhor resultado para a modelagem *Toutin* (19,85 m), apesar da baixa correlação entre as imagens Fine no processo de geração do DEM. Para 28 ICPS, a melhor modelagem continua sendo a *Toutin*, mas o valor de RMSE piorou (23,07 m).

4.5.7.4 Erro Médio Quadrático dos 40 DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs

Os valores dos Erros Médios Quadráticos (RMSE) calculados a partir de 20 e 28 ICPs sobre os DEMs Fine, gerados a partir de 20 GCPs e modelagens *Toutin* e *RADARSAT Specific*, são apresentados nas tabela 4.9 e 4.10 respectivamente.

TABELA 4.9 – Estatística dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 Fine Gerados na Modelagem Toutin

DEM	IMAGENS F2 E F5	CORRELAÇÃO	20 ICPs			28 ICPs		
			$\overline{\Delta X}$ (m)	$S_{\Delta X}$ (m)	RMSE (M)	$\overline{\Delta X}$ (m)	$S_{\Delta X}$ (m)	RMSE (m)
1	SEM FILTRAGEM	0,865	-4,24	45,71	44,56	4,12	50,73	49,82
2	ENHANCED FROST 3x3	0,871	3,25	49,75	48,49	9,50	50,58	49,68
3	ENHANCED FROST 5x5	0,872	-6,67	52,49	51,17	3,56	54,18	53,21
4	ENHANCED FROST 7x7	0,871	-12,69	54,65	53,27	-5,37	62,37	61,25
5	ENHANCED FROST 9x9	0,871	-21,44	67,94	66,22	-13,00	73,22	71,90
6	ENHANCED FROST 11x11	0,871	-24,64	65,19	63,54	-15,57	67,97	66,75
7	ENHANCED LEE 3x3	0,871	1,95	50,14	48,87	9,17	51,26	50,34
8	ENHANCED LEE 5x5	0,871	0,68	45,60	44,45	7,66	49,33	48,45
9	ENHANCED LEE 7x7	0,872	-13,79	62,51	60,93	-6,23	66,80	65,60
10	ENHANCED LEE 9x9	0,871	-19,59	65,48	63,83	-12,81	70,55	69,28
11	ENHANCED LEE 11x11	0,871	-23,69	59,48	57,98	-16,73	65,39	64,21
12	FROST 3x3	0,871	-2,44	54,26	52,89	5,63	54,62	53,64
13	FROST 5x5	0,871	-0,52	54,41	53,03	7,10	55,45	54,46
14	FROST 7x7	0,871	-8,56	54,68	53,30	-0,59	60,03	58,96
15	FROST 9x9	0,871	-21,21	60,92	59,38	-13,67	71,52	70,24
16	FROST 11x11	0,871	-24,24	65,45	63,80	-14,54	70,78	69,51
17	GAMMA 3x3	0,871	0,00	51,78	50,47	8,29	51,79	50,86
18	GAMMA 5x5	0,871	0,20	47,40	46,21	5,58	51,48	50,56
19	GAMMA 7x7	0,871	-16,18	67,43	65,73	-9,67	73,64	72,32
20	GAMMA 9x9	0,871	-21,55	65,90	64,24	-15,75	71,24	69,96
21	GAMMA 11x11	0,871	-23,86	68,06	66,34	-15,36	72,41	71,11
22	KUAN 3x3	0,871	0,32	52,74	51,41	6,53	55,66	54,66
23	KUAN 5x5	0,871	-4,80	55,21	53,81	3,44	57,64	56,60
24	KUAN 7x7	0,871	-12,09	56,82	55,38	-4,73	63,93	62,78
25	KUAN 9x9	0,869	-33,94	81,13	79,08	-22,15	83,09	81,60
26	KUAN 11x11	0,868	-35,15	65,57	63,91	-19,86	70,15	68,89
27	LEE 3x3	0,869	-3,26	52,13	50,82	4,85	53,40	52,44

Continua...

TABELA 4.9 – Conclusão.

28	LEE 5x5	0,871	0,62	47,38	46,18	8,84	49,73	48,84
29	LEE 7x7	0,871	-1,99	47,79	46,58	5,98	51,91	50,97
30	LEE 9x9	0,871	-2,59	47,72	46,51	5,85	51,04	50,13
31	LEE 11x11	0,871	-9,13	48,90	47,67	1,00	53,51	52,55
32	AVERAGE 3x3	0,871	0,79	52,81	51,48	6,44	55,12	54,14
33	AVERAGE 5x5	0,871	-5,36	52,24	50,93	3,73	55,99	54,99
34	AVERAGE 7x7	0,871	-20,70	57,15	55,70	-11,51	66,13	64,95
35	AVERAGE 9x9	0,871	-30,62	68,32	66,59	-18,93	74,62	73,28
36	AVERAGE 11x11	0,869	-23,51	60,33	58,80	-13,64	64,96	63,79
37	TOUZI 5x5	0,871	0,03	47,91	46,70	5,17	53,75	52,79
38	TOUZI 7x7	0,871	-6,33	49,27	48,03	1,29	53,09	52,14
39	TOUZI 9x9	0,871	-2,39	46,90	45,72	4,66	50,45	49,55
40	TOUZI 11x11	0,871	-3,77	46,27	45,10	1,35	53,04	52,09

TABELA 4.10 – Estatística dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT-1 Fine Gerados na Modelagem RADARSAT Specific.

DEM	IMAGENS F2 E F5	CORRELAÇÃO	20 ICPs			28 ICPs		
			$\overline{\Delta X}$ (m)	$S_{\Delta X}$ (m)	RMSE (M)	$\overline{\Delta X}$ (m)	$S_{\Delta X}$ (m)	RMSE (m)
1	SEM FILTRAGEM	0,865	-3,70	52,69	51,36	5,05	55,45	54,45
2	ENHANCED FROST 3x3	0,871	4,69	54,22	52,84	12,72	50,87	49,95
3	ENHANCED FROST 5x5	0,872	-3,70	58,92	57,43	3,05	57,51	56,48
4	ENHANCED FROST 7x7	0,871	-17,95	62,23	60,65	-10,54	64,35	63,19
5	ENHANCED FROST 9x9	0,871	-19,88	65,00	63,35	-10,41	65,37	64,19
6	ENHANCED FROST 11x11	0,871	-30,48	72,61	70,77	-18,95	72,65	71,35
7	ENHANCED LEE 3x3	0,871	4,78	46,50	45,32	11,56	47,05	46,20
8	ENHANCED LEE 5x5	0,871	-2,66	59,69	58,18	5,39	57,27	56,24
9	ENHANCED LEE 7x7	0,872	-11,02	63,75	62,13	-3,87	62,82	61,68
10	ENHANCED LEE 9x9	0,871	-21,58	70,64	68,85	-14,06	71,97	70,67
11	ENHANCED LEE 11x11	0,871	-28,46	83,63	81,52	-18,88	81,59	80,12
12	FROST 3x3	0,871	1,65	44,14	43,03	10,29	46,07	45,24
13	FROST 5x5	0,871	-0,64	54,33	52,96	5,75	52,93	51,98
14	FROST 7x7	0,871	-14,03	57,07	55,62	-7,79	59,59	58,51
15	FROST 9x9	0,871	-16,25	70,88	69,08	-10,08	74,23	72,89
16	FROST 11x11	0,871	-22,97	68,29	66,56	-13,77	70,51	69,24
17	GAMMA 3x3	0,871	3,38	47,57	46,37	10,68	47,09	46,24
18	GAMMA 5x5	0,871	-2,70	55,53	54,12	4,66	54,89	53,90
19	GAMMA 7x7	0,871	-24,85	87,21	85,00	-16,66	82,81	81,31
20	GAMMA 9x9	0,871	-25,66	95,45	93,03	-17,66	91,17	89,53
21	GAMMA 11x11	0,871	-30,42	83,13	81,03	-22,35	85,27	83,73

Continua...

TABELA 4.10 – Conclusão

22	KUAN 3x3	0,871	4,40	50,87	49,58	12,03	50,73	49,81
23	KUAN 5x5	0,871	-3,49	57,79	56,33	3,78	56,27	55,26
24	KUAN 7x7	0,871	-16,94	57,69	56,22	-14,63	69,41	68,16
25	KUAN 9x9	0,869	-21,66	75,58	73,67	-16,96	82,35	80,86
26	KUAN 11x11	0,868	-27,20	81,52	79,45	-19,81	85,35	83,81
27	LEE 3x3	0,869	-0,83	57,38	55,93	7,79	54,91	53,92
28	LEE 5x5	0,871	1,69	49,31	48,06	9,71	48,71	47,83
29	LEE 7x7	0,871	-7,78	50,55	49,27	2,27	51,65	50,72
30	LEE 9x9	0,871	-0,88	50,23	48,96	4,49	48,86	47,98
31	LEE 11x11	0,871	-3,31	56,52	55,09	4,04	56,05	55,04
32	AVERAGE 3x3	0,871	0,48	50,98	49,68	5,86	49,52	48,62
33	AVERAGE 5x5	0,871	-11,65	63,29	61,68	-2,51	60,81	59,71
34	AVERAGE 7x7	0,871	-13,40	62,47	60,89	-12,82	72,16	70,86
35	AVERAGE 9x9	0,871	-28,43	71,84	70,02	-21,69	78,36	76,95
36	AVERAGE 11x11	0,869	-27,11	73,18	71,33	-20,02	79,23	77,80
37	TOUZI 5x5	0,871	-3,45	49,45	48,20	4,12	51,22	50,30
38	TOUZI 7x7	0,871	-9,60	54,15	52,78	-0,54	55,92	54,92
39	TOUZI 9x9	0,871	-9,62	54,42	53,04	-1,92	56,05	55,04
40	TOUZI 11x11	0,871	-10,16	50,35	49,08	-0,95	53,62	52,65

Os DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs nas modelagens *Toutin* e *RADARSAT Specific* apresentaram 87% de sucesso no processo de correlação das imagens Fine 2 e 5.

Em mais de 2/3 dos DEMs gerados nas duas modelagens, os valores da média comprovam que os valores de elevação dos DEMs gerados estão acima dos valores observados em campo (ICPs).

O RMSE do DEM gerado a partir do estéreo-par F5/F2 sem filtragem, na modelagem *Toutin*, foi de 44,56 m para 20 ICPs e 48,82 m para 28 ICPs. Estes valores estão muito próximos do melhor resultado de RMSE dos 40 DEMs gerados (44,45 m para 20 ICPs e 48,45 m para 28 ICPs para imagens filtradas com filtro *Enhanced Lee 5x5*). Isto indica que a aplicação da filtragem não melhorou de forma significativa o RMSE do DEM Radarsat Fine.

Já para a modelagem *RADARSAT Specific*, o melhor RMSE para 20 e 28 ICPs foi obtido para o DEM gerado a partir do estéreo-par F5/F2 com filtragem *Frost 3x3* (43,03

m e 45,24 m respectivamente). Nesta modelagem o DEM gerado a partir de imagens sem filtragem apresentou um RMSE de 51,36 m para 20 ICPs e 54,45 m para 28 ICPs, justificando a aplicação da filtragem nas imagens Fine 2 e Fine 5.

As figuras 4.48 e 4.49 apresentam os gráficos dos RMSE calculados a partir de 20 e 28 ICPs para os 40 DEMs RADARSAT Fine gerados nas modelagens *Toutin* e *RADARSAT Specific* a partir de 20 GCPs.

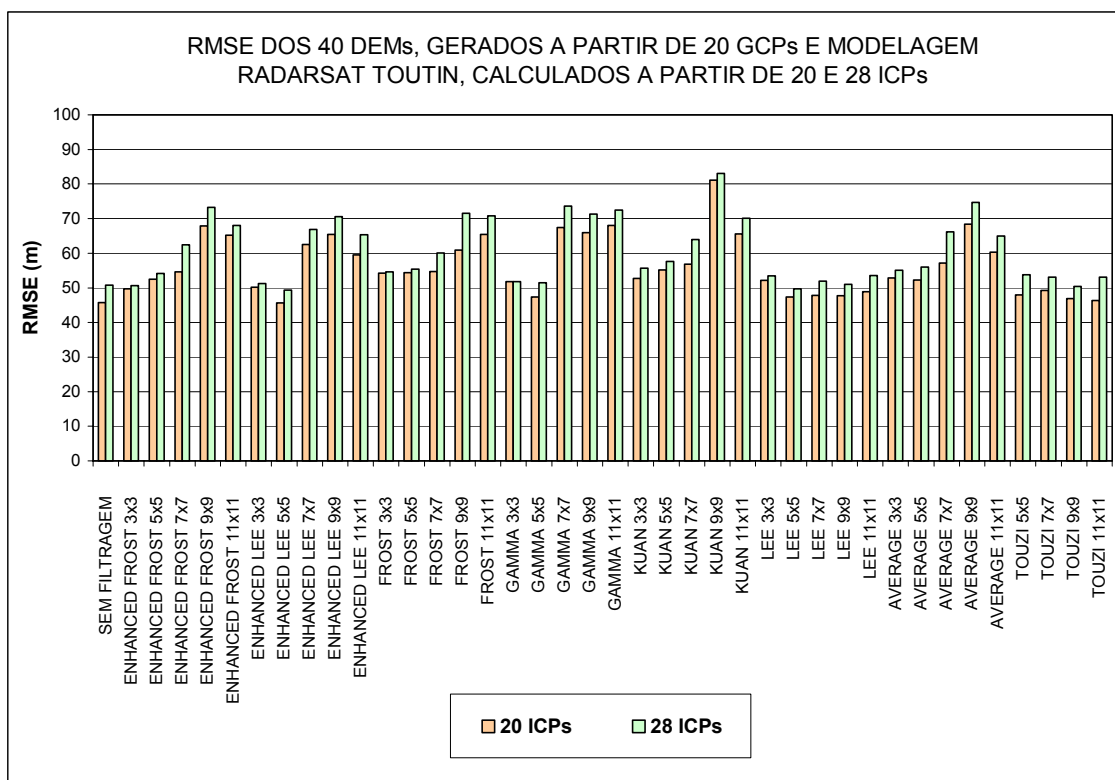


FIGURA. 4.48 – Gráfico dos RMSE dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs e modelagem *Toutin*.

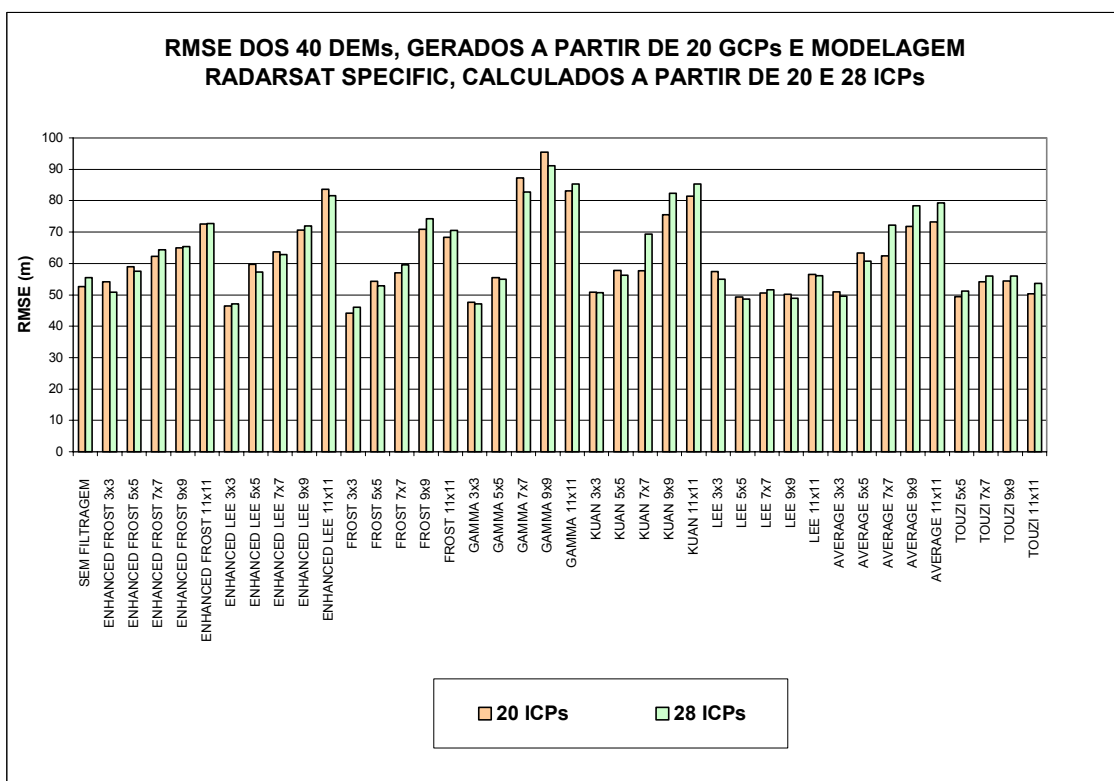


FIGURA. 4.49 – Gráfico dos RMSE dos DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs e modelagem *RADARSAT Specific*.

Analisando os gráficos do RMSE para os DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs nas duas modelagens, observa-se que todas as filtragem com janelas 3×3 e 5×5 apresentaram os melhores resultados.

4.5.7.5 Erro Médio Quadrático dos DEMs das Cartas Topográficas e SRTM

Os valores dos Erros Médios Quadráticos (RMSE) calculados a partir de 20 e 28 ICPs sobre os DEMs das Cartas Topográficas de escala 1:100.000 e da SRTM, são apresentados na tabela 4.11.

TABELA 4.11 – Estatística do Modelo Digital de Elevação das Cartas Topográficas e da SRTM – UTM/SAD69 Zona 22.

DEM	20 ICPs			28 ICPs		
	$\overline{\Delta X}$ (m)	$S_{\Delta X}$ (m)	RMSE (m)	$\overline{\Delta X}$ (m)	$S_{\Delta X}$ (m)	RMSE (m)
Cartas	-2,55	17,41	16,97	-2,50	16,43	16,17
SRTM	-10,06	6,31	6,15	-9,65	6,09	5,98

Comparando-se os resultados da Tabela 4.11, o DEM SRTM apresentou valores de RMSE muito melhores do que os valores alcançados para o DEM das Cartas Topográficas.

4.5.8 Análise de Tendência e Precisão dos Modelos Digitais de Elevação.

Os testes de análise de tendência e precisão, proposto por Galo e Camargo (1994), foram utilizados para os DEMs ASTER, RADARSAT Standard, RADARSAT Fine, das Cartas Topográficas e SRTM. A Tabela 4.12 apresenta os resultados para os DEMs ASTER.

TABELA 4.12 – Análise de Tendência e Precisão dos Modelos Digitais de Elevação ASTER Para Escala 1:100.000.

ICPs	Cálculos	DEM 1 SEM FILTRAGEM	DEM 2 MEDIANA 3x3	DEM 3 MEDIANA 5x5
20	Média	0,65 m	-0,36 m	0,49 m
	Desvio Padrão	11,17 m	12,08 m	10,55 m
	$t_{amostral}$	0,261	0,137	0,209
	$t_{(19;5\%)}$	1,729	1,729	1,729
	$\chi^2_{(19;10\%)}$	27,204	27,204	27,204
	$\chi^2_{Classe A}$	8,549	9,992	7,623
28	Média	0,97 m	0,00 m	-0,48 m
	Desvio Padrão	13,40 m	14,39 m	13,39 m
	$t_{amostral}$	0,385	0,000	0,193
	$t_{(27;5\%)}$	1,703	1,703	1,703
	$\chi^2_{(27;10\%)}$	36,741	36,741	36,741
	$\chi^2_{Classe A}$	17,465	20,142	17,438

Os valores de $t_{amostral}$ comparados com o valor teórico ($t_{(19;5\%)}$), da tabela 4.12, comprovam que não existe tendência nos resultados dos DEMs ASTER gerados, ou seja, a equação 2.7 foi atendida. A comparação do χ^2 amostral com o teórico ($\chi^2_{(19;10\%)}$) indicam que os DEMs ASTER podem ser classificado como classe A altimétrica para a escala 1:100.000 com 20 e 28 ICPs, ou seja, a equação 2.8 foi atendida.

A Tabela 4.13 apresenta os resultados dos testes de análise de tendência e precisão para os DEMs RADARSAT Standard, gerados pela modelagem *Toutin*.

TABELA 4.13 – Análise de Tendência e Precisão dos Modelos Digitais de Elevação RADARSAT Standard.

ICPs	Cálculos	DEM 1 SEM FILTRAGEM	DEM 2 FEFROST 5x5
20	Média	-20,88 m	-32,52 m
	Desvio Padrão	26,02 m	32,59 m
	$t_{amostral}$	3,589	4,462
	$t_{(19;5\%)}$	1,729	1,729
	$\chi^2_{(19;10\%)}$	27,204	27,204
	$\chi^2_{\text{Classe A}}$	46,310	72,690
	$\chi^2_{\text{Classe B}}$	32,159	50,479
	$\chi^2_{\text{Classe C}}$	20,582	32,307
28	Média	-16,14 m	-30,81 m
	Desvio Padrão	26,15 m	30,86 m
	$t_{amostral}$	3,26	5,28
	$t_{(27;5\%)}$	1,703	1,703
	$\chi^2_{(27;10\%)}$	36,741	36,741
	$\chi^2_{\text{Classe A}}$	46,784	65,172
	$\chi^2_{\text{Classe B}}$	46,169	64,315
	$\chi^2_{\text{Classe C}}$	29,548	41,161

Os valores de $t_{amostral}$ comparados com o valor teórico ($t_{(19;5\%)}$), da tabela 4.13, indicam que existe tendência nos resultados dos DEMs RADARSAT Standard, ou seja, a Equação 2.7 não foi atendida. Já a comparação do χ^2 amostral com o teórico ($\chi^2_{(19;10\%)}$) indicam que apenas o DEMs RADARSAT Standard gerado a partir das imagens sem filtragem pode ser classificado como classe C para a altimetria de escala 1:100.000 com 20 e 28 ICPs, ou seja, a equação 2.8 foi atendida apenas para este DEM.

A Tabela 4.14 apresenta os resultados dos testes de análise de tendência e precisão para os DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 13 GCPs, nas modelagens *Toutin* e *RADARSAT Specific*.

TABELA 4.14 – Análise de Tendência e Precisão dos Modelos Digitais de Elevação Radarsat Fine Gerados a Partir de 13 Pontos de Controle.

ICPs	Cálculos	DEM FINE TOUTIN MODEL	DEM FINE RADARSAT SPECIFIC MODEL
20	Média	-17,23 m	-20,39 m
	Desvio Padrão	20,37 m	23,38 m
	$t_{amostral}$	3,783	3,901
	$t_{(19;5\%)}$	1,729	1,729
	$\chi^2_{(19;10\%)}$	27,204	27,204
	$\chi^2_{Classe A}$	28,387	37,389
	$\chi^2_{Classe B}$	19,713	25,964
	$\chi^2_{Classe C}$	12,616	16,617
28	Média	-12,38 m	-15,21 m
	Desvio Padrão	23,49 m	28,49 m
	$t_{amostral}$	2,789	2,825
	$t_{(19;5\%)}$	1,703	1,703
	$\chi^2_{(19;10\%)}$	36,741	36,741
	$\chi^2_{Classe A}$	53,651	78,929
	$\chi^2_{Classe B}$	37,257	54,811
	$\chi^2_{Classe C}$	23,845	35,741

Os valores de $t_{amostral}$ comparados com o valor teórico ($t_{(19;5\%)}$), da tabela 4.14, indicam que existe tendência nos resultados dos DEMs RADARSAT Fine, ou seja, a equação 2.7 não foi atendida. Já a comparação do χ^2 amostral com o teórico ($\chi^2_{(19;10\%)}$) indica que os DEMs RADARSAT Fine gerados pelas duas modelagens e imagens sem filtragem, podem ser classificados como classe B para a altimetria de escala 1:100.000 para 20 ICPs e para 28 ICPs os DEMs podem ser classificados apenas na classe C.

A Tabela 4.15 apresenta os resultados dos testes de análise de tendência e precisão para os DEMs das Cartas Topográficas e SRTM.

TABELA 4.15 – Análise de Tendência e Precisão dos Modelos Digitais de Elevação das Cartas Topográficas e SRTM.

ICPs		DEM DAS CARTAS TOPOGRÁFICAS	DEM SRTM
20	Média	-2,55 m	-10,06 m
	Desvio Padrão	17,41 m	6,31 m
	$t_{amostral}$	0,657	7,130
	$t_{(19;5\%)}$	1,729	1,729
	$\chi^2_{(19;10\%)}$	27,204	27,204
	$\chi^2_{\text{Classe A}}$	20,750	2,726
	$\chi^2_{\text{Classe B}}$	14,409	1,893
	$\chi^2_{\text{Classe C}}$	9,222	1,212
28	Média	-2,50 m	-9,65 m
	Desvio Padrão	16,47 m	6,09 m
	$t_{amostral}$	0,805	8,387
	$t_{(27;5\%)}$	1,703	1,703
	$\chi^2_{(27;10\%)}$	36,741	36,741
	$\chi^2_{\text{Classe A}}$	26,375	3,606
	$\chi^2_{\text{Classe B}}$	18,316	2,504
	$\chi^2_{\text{Classe C}}$	11,722	1,603

Os valores de $t_{amostral}$ comparados com o valor teórico ($t_{(19;5\%)}$), da tabela 4.15, indicam que o DEM das cartas topográficas está livre de tendência e para o DEM SRTM existe uma indicativa de tendência, ou seja, a equação 2.7 foi atendida apenas para o DEM das cartas topográficas. Já a comparação do χ^2 amostral com o teórico ($\chi^2_{(19;10\%)}$) indica que os dois DEMs podem ser classificados como classe A para a altimetria de escala 1:100.000, ou seja, a Equação 2.8 foi atendida.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

As imagens 3N e 3B do ASTER utilizadas na geração dos DEMs, apresentaram alta correlação na geração dos DEMs (99,7%). Além disso, a facilidade na identificação dos GCPs e sua distribuição por toda a área dos estéreo-pares de imagens 3N e 3B, contribuíram para a obtenção de DEMs ASTER por toda a área dos estéreo-pares.

Já a avaliação estatística dos três DEMs ASTER, realizada a partir de 20 ICPs, apontou o DEM gerado a partir das imagens com filtragem mediana 5×5 como o de melhor RMSE (10,28 m). Na avaliação realizada a partir de 28 ICPs o mesmo DEM foi apontado como o de melhor RMSE (13,15 m). Vale ressaltar que as diferenças de RMSE entre os três DEMs não ultrapassaram mais que 2 metros.

Na análise de tendência e precisão dos três DEMs ASTER, todos foram classificados no PEC classe A para a altimetria de escala 1:100.000. Vale destacar que esta avaliação foi realizada a partir do estéreo-par de imagens ASTER sobre uma área com diferença de elevação em torno de 600 metros. Assim, para uma área com relevo mais plano novos testes devem ser realizados.

Já os DEMs RADARSAT Standard gerados a partir de 20 GCPs da modelagem *Toutin*, com imagens sem filtragem e com filtragem *Enhanced Frost* 5×5, não apresentaram resultados compatíveis com os DEMs ASTER. A correlação das imagens S5 e S7 na geração dos DEMs ficou em torno de 82% em função da grande diferença entre as datas de aquisição das imagens. Além disso, a distribuição dos GCPs apenas na porção central do estéreo-par de imagens, contribuiu para a falta de informação na região superior dos DEMs gerados.

O DEM RADARSAT Standard gerado a partir das imagens sem filtragem apresentou melhores resultados de RMSE para 20 e 28 ICPs (25,36 m e 25,68 m), quando

comparados com o DEM gerado a partir de imagens com filtragem *Enhanced Frost 5×5* (RMSE de 31,77 m e 30,31 m).

Na análise de tendência e precisão, os dois DEMS RADARSAT Standard gerados apresentaram tendência nos resultados. Como não foi realizado um teste para calcular o tamanho das amostras para a realização da análise de tendência, recomenda-se a realização do teste utilizado por Itame (2001). Apesar disso, o DEM RADARSAT Standard gerado a partir das imagens S5 e S7 sem filtragem passou no teste de precisão (χ^2) para o PEC classe C para a altimetria de escala 1:100.000.

Já os dois DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 13 GCPs, nas modelagens *Toutin* e *RADARSAT Specific*, apresentaram melhores resultados que os DEMs RADARSAT Standard, apesar da correlação do estéreo-par de imagens Fine na modelagem *Toutin* ter alcançado apenas 76,5% e a correlação do estéreo-par Fine para a modelagem *RADARSAT Specific* ter alcançado 82,4%, comprovando que esta modelagem é menos dependente da distribuição dos GCPs em área e elevação, ou seja, mais vantajosa do que a modelagem *Toutin* em áreas com pouca disponibilidade de GCPs.

Os resultados do cálculo do RMSE para os DEMs Fine gerados a partir da modelagem *Toutin* foram de 19,85 m para 20 ICPs e 23,07 m para 28 ICPs. Já os resultados do cálculo do RMSE para os DEMs Fine gerados na modelagem *RADARSAT Specific* foram de 22,78 m para 20 ICPs e 27,98 m para 28 ICPs. Apesar da correlação das imagens do estéreo-par Fine na modelagem *Toutin* ter sido menor que na modelagem *RADARSAT Specific*, os resultados do RMSE para o DEM gerado na modelagem *Toutin* foram melhores.

Na análise de tendência e precisão, os dois DEMS RADARSAT fine gerados nas modelagens *Toutin* e *RADARSAT Specific* apresentaram tendência. Assim como no caso dos DEMs RADARSAT Standard, não foi realizado um teste para calcular o tamanho das amostras para a realização da análise de tendência. Na análise de precisão, os DEMs RADARSAT Fine avaliados a partir de 20 ICPs passaram no teste de precisão (χ^2) para

o PEC classe B para a altimetria de escala 1:100.000. Já a avaliação realizada para 28 ICPs classificou os DEMs no PEC classe C para a altimetria de escala 1:100.000.

Já os DEMs RADARSAT Fine gerados a partir de 20 GCPs, com pontos selecionados da imagem Landsat ortorretificada (planimetria), das cartas topográficas (altimetria) e dos pontos obtidos em campo com equipamentos GPS, nas modelagens *Toutin* e *RADARSAT Specific*, apresentaram melhora de 10% na correlação das imagens para a modelagem *Toutin* e 5% na correlação das imagens para a modelagem *RADARSAT Specific*, quando comparados com a geração de DEMs a partir de 13 GCPs. Isto comprova que a distribuição dos GCPs é de fundamental importância para a modelagem *Toutin* e que as coordenadas planialtimétricas dos GCPs devem ser da mesma fonte para a obtenção de valores de RMSE satisfatórios.

Já o DEM gerado a partir das cartas topográficas, apresentou valores de RMSE de 16,97 m para 20 ICPs e 16,17 m para 28 ICPs. Na análise de tendência e precisão o DEM das cartas topográficas foi aprovado e pode-se classificá-lo no PEC classe A para a altimetria de escala 1:100.000.

Já o mosaico de DEMs SRTM avaliado, obteve-se valores de RMSE de 6,151 m para 20 ICPs e 5,98 m para 28 ICPs. Apesar dos ICPs serem os mesmos utilizados na avaliação do DEM das cartas topográficas, o mosaico de DEMs SRTM apresentou tendência nos resultados alcançados. Mas, o mosaico de DEMs SRTM foi aprovado no teste de precisão (χ^2) para o PEC classe A para a altimetria de escala 1:100.000.

Vale ressaltar que as avaliações realizadas sobre os DEMs ASTER e SRTM devem ser consideradas para áreas com as mesmas características desta área de estudo, ou seja, áreas de relevo montanhoso. Já os resultados dos DEMs RADARSAT Fine, gerados com 13 GCPs, poderiam atingir o PEC classe A para a escala 1:100.000, se fosse utilizado um melhor conjunto de GCPs, obtidos em campo com equipamentos GPS, distribuídos em maior abrangência de área e elevação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrams, M.; Hook, S. **ASTER user handbook**. Version 2. Pasadena, California, CA: Jet Propulsion Laboratory/EROS Data Center, 2001.

Bamler, R. **The SRTM mission: a world-wide 30m resolution DEM from SAR Interferometry in 11 Days**. Stuttgart: Photogrammetrische Woche, 1999.

Boerner W.; Mott, H.; Lüneburg, E; Livingstone, C.; Brisco, B.; Brown, R. J.; Paterson, J. S. Polarimetry in Radar Remote Sensing: Basic and Applied Concepts1. In: Henderson, F. ; Lewis, A. (eds.). **Principles & applications of imaging radar**, manual of remote sensing. 3. ed. New York:, John Wiley & Son ,Cap. 5,, p. 271-357, 1998.

Canada Centre for Remote Sensing. **GlobeSAR program**. Ottawa, CA, 2001. 1 CD-ROM.

Brasil.CONCAR.IBGE. Decreto n.º 89.817 de 20 de junho de 1984. Normas Cartográficas. Estabelece as instruções reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em: <http://www.concar.ibge.gov.br/cca32.htm>. Acesso em: 11 de jan. 2004.

Dias, R. R. **Avaliação de dados aerogamaespectrométricos e de sua integração com imagens TM/Landsat 5, no mapeamento geológico na Serra dos Carajás (PA)**. 120p. (INPE-6118-TDI/579). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995.

Diretoria de Serviço Geográfico (DSG). Carta Topográfica – 1:100.000. **Caldeirão**. SB-22-X-C-V. Brasília, 1983a.

Diretoria de Serviço Geográfico (DSG). Carta Topográfica – 1:100.000. **Serra Pelada**. SB-22-X-C-VI. Brasília, 1983b.

Duren, R.; Wong, E.; Breckenridge, B.; Shaffer, S.; Duncan, C.; Tubbs, E.; Salomon, P. Metrology, attitude, and orbit determination for spaceborne interferometric synthetic aperture radar. In: SPIE AeroSense Conference on Acquisition, Tracking and Pointing, 12., 1998, Orlando. **Proceedings...** Orlando: SPIE, 1998. Disponível em: http://www2.jpl.nasa.gov.srtm/spie_1998.pdf . Acesso em: 16 sept. 2005.

Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC). **ASTER user's guide part-I**. General (Ver.3.1), Japan: 2001.

Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC). **ASTER user's guide part III**. DEM Product (L4A01) (Ver.1.0). Japan: 2002.

Galo, M.; Camargo, P. O. O uso do GPS no controle de qualidade de cartas. In.: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário (COBRAC-1994), 1., 1994, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 1994.

Gemael, C. **Introdução ao ajustamento de observações**: aplicações geodésicas. Curitiba: Ed. UFPR, 1994. 319p.

Hirano, A.; Welch, R.; Lang, H. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, n. 5-6, p. 356-370, 2003.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Serra dos Carajás**. Carta Topográfica – 1:100.000. SB-22-Z-A-II. Rio de Janeiro, 1981a.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Rio Verde**. Carta Topográfica – 1:100.000. SB-22-Z-A-III. Rio de Janeiro, 1981b.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Rio Parauapebas**. Carta Topográfica – 1:100.000. SB-22-Z-A-V. Rio de Janeiro, 1981c.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Água Fria**. Carta Topográfica – 1:100.000. SB-22-Z-A-VI. Rio de Janeiro, 1981d.

Itame, O.Y. **Controle de qualidade aplicado na modelagem digital de terreno**. 106p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2001.

Koch, A.; Heipke, C.; Lohmann, P. **Analysis of SRTM DTM** – methodology and practical results. In: Joint International Symposium and Exhibition on Geospatial Theory, Processing, and Applications, 2002, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: ISPRS Commission IV, 2002. WG IV/6.

Leberl, F. W. Radargrammetry. In: Henderson, F.; Lewis, A. **Principles & applications of imaging radar**, manual of remote sensing, 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Cap. 4, p. 183-269, 1998.

Lee, H.; Park, W., A new epipolarity model base on the simplified pushbroom sensor model. : Joint International Symposium and Exhibition on Geospatial Theory, Processing, and Applications, 2002, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: ISPRS Commission IV, 2002. WG IV/6.

Lewis, A. J.; Henderson, F. M. Radar Fundamentals: the geoscience perspective In: Henderson, F.; Lewis, A. **Principles & applications of imaging radar**, manual of remote sensing, 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Cap. 3, p. 132-181, 1998.

Merchant, D. C., Spatial accuracy standards for large scale line maps, **Technical Papers of the American Congress on Surveying and Mapping**, v. 1, p. 222-231, 1982.

Paradella, W. R.; Cecarelli, I.C. F.; Luiz, S.; Morais, M.C.; Oliveira, C. G.; Cottini, C., A geração de modelos digitais de elevação pela estereoscopia de radar: conhecimento atual e resultados com imagens RADARSAT-1 na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz do Iguaçu, PR **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2001.

Paradella, W. R.; Cecarelli, I.C. F.; Luiz, S.; Oliveira, C. G.; Cottini, C. P.; Okida, R. Produção de carta topográfica através da estereoscopia de alta resolução do

RADARSAT-1 integrada com dados TM-LANDSAT 5: uma avaliação para terrenos planos na Floresta Nacional de Tapajós (PA). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n.2, p. 99-110, 2003a.

Paradella, W.R.; Cecarelli, I.C. F.; Luiz, S.; Oliveira, C. G.; Okida, R. **Geração de modelos digitais de elevação através da radargrametria com imagens do satélite RADARSAT-1**. Processo FAPESP-PIPE 1999/06271-7, Segundo Relatório Científico da Fase II, 81p, São José dos Campos (SP), 2003b.

Paredes, E. A. **Introdução à aerofotogrametria para engenheiros**. Brasília, DF/Maringá, PR: CNPq/ CONCITEC, 1986. 249p.

PCI Geomatics, **Geomatica orthoEngine** User Guide. Geomática Version 9.0, Ontário, Canada: Richmond Hill, 2003.

Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, A.; Bamler, R. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, p. 241-262, 2003.

RADARSAT International. **RADARSAT Illuminated**: your guide to products and services Richmond, British Columbia CA , 1995. 60 p.

Santos, A. R.; Paradella, W. R.; Veneziani, P; Morais, M. C. A estereoscopia com imagens RADARSAT-1: uma avaliação geológica na Província Mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**. V. 29, n. 4, p. 627-632, 1999.

Toutin, T.; Vester, C. Understanding RADARSAT data in stereo. In: GER'97 International Symposium: geomatics in the Era of RADARSAT, 1997, Ottawa, Canada. **Proceedings...** Ottawa: CCRS, 1997.

Toutin, T. Stereo RADARSAT for mapping applications. 2nd International ADRO Symposium "Bringing Radar Applications Down to Earth", 1998, Montreal, Canada. **Proceedings...** Montreal: Canadian Space Agency and NASA, 1998.

Toutin, T. RADARSAT for stereoscopy. **Geomatics Info Magazine International**. v.13, n 1, p. 6-9, 1999.

Toutin, T.; Gray, A. L. State-of-the-art of extraction of elevation data using satellite SAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 55, n. 1, p. 13-33, 2000a.

Toutin, T.; Evaluation of radargrammetric DEM from RADARSAT images in high relief areas. **IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing**, v. 38, n. 2, p. 782-789, 2000b.

Toutin, T.; Cheng, P. DEM generation with ASTER stereo data. **Earth Observation Magazine (EOM)**, v. 10, n. 6, 2001.

Toutin, T.; 3D Topographic Mapping with ASTER Stereo Data in Rugged Topography., **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.40, n.10, p. 2241-2247, 2002.

U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. National Mapping Division. **Standards on digital elevation models**. Reston, VA, 1998.

Werner, M. **Status of the SRTM data processing**: when will the world-wide 30m DTM data be available? Stuttgart: IPF, Photogrammetrische Woche, Oberpfaffenhofen, 2001.

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

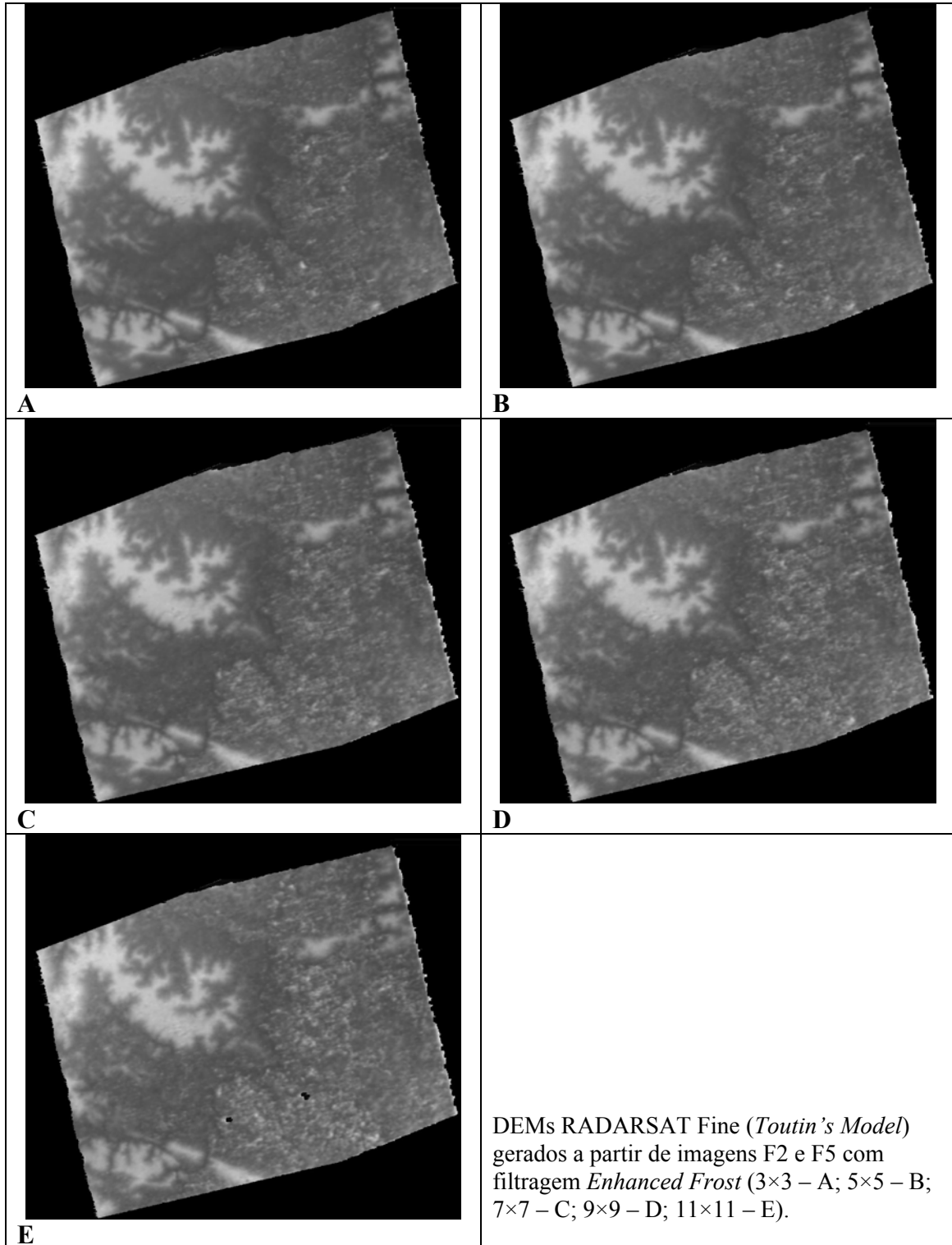
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

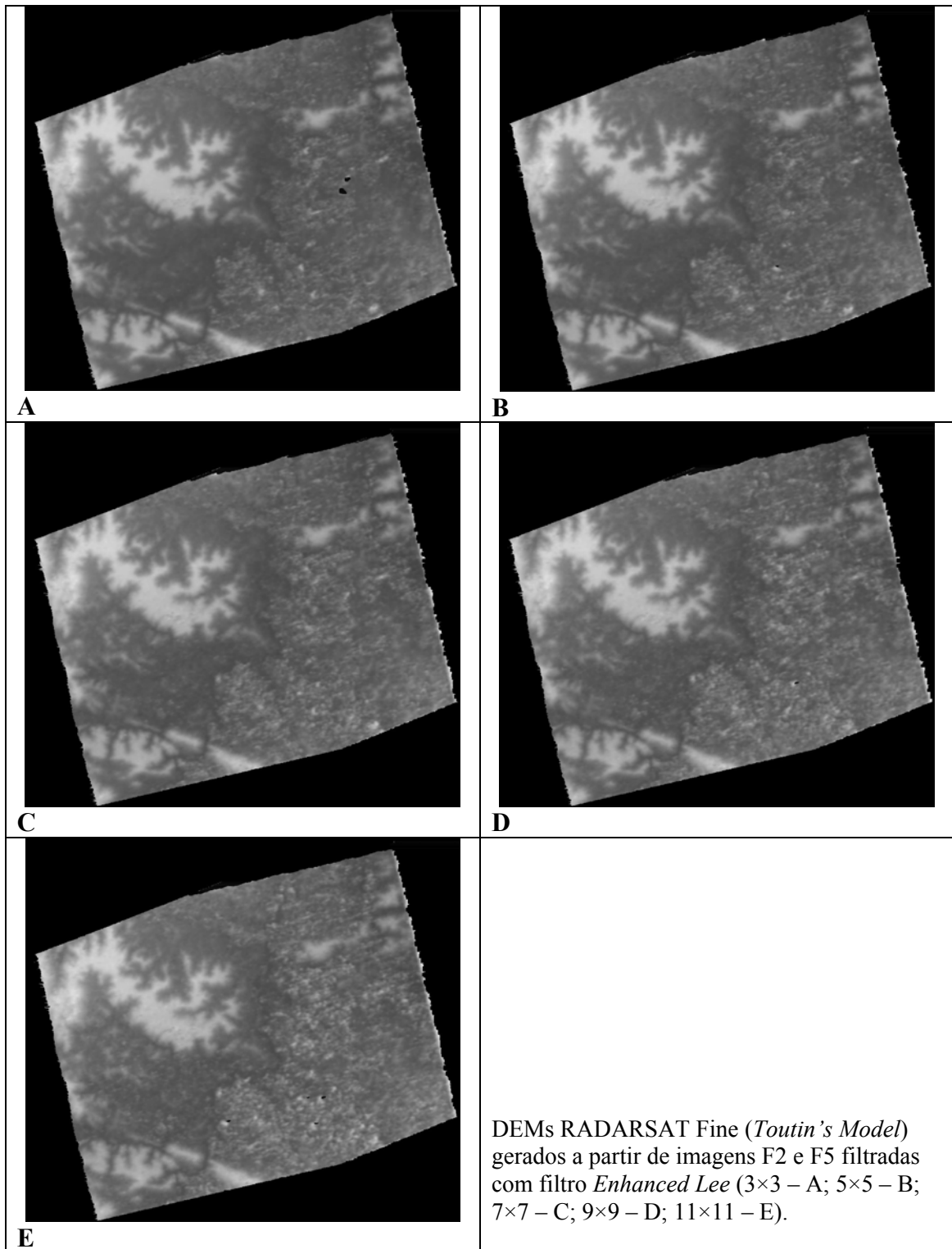
Lang, D. R.; Welch, R., **Algorithm theoretical basis document for ASTER digital elevation models.** (Standard product ast14). Version 3.0. Washington: Nasa EOS Publication ATBD-AST-08, 1999.

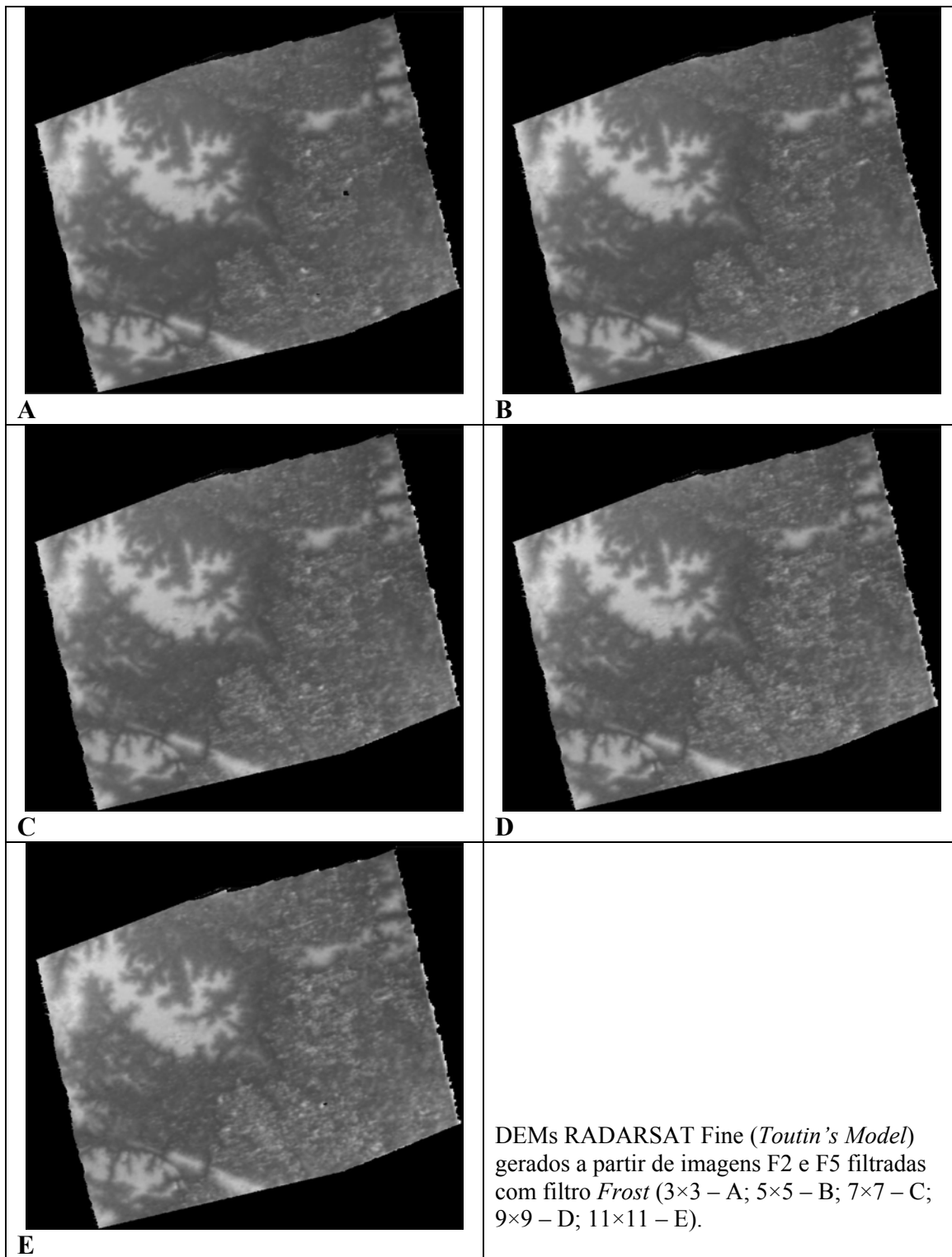
Santos, C. J. B.; Silva, J. F. C.; Mello, M. P. Controle de qualidade da altimetria de modelos digitais do terreno com a utilização de equipamentos GPS ocupando referências de nível. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 21., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Rio de Janeiro: SBC, 2003.

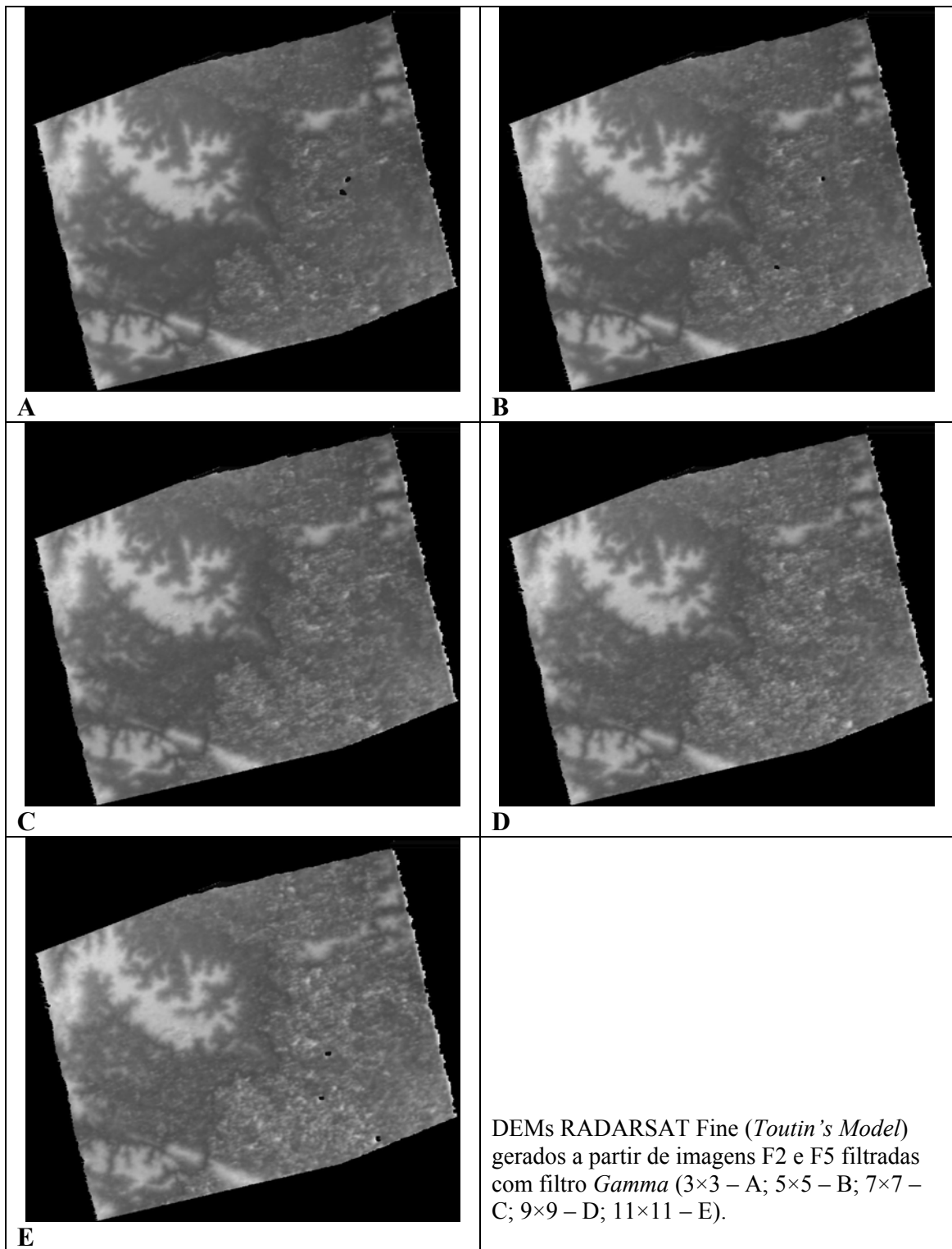
Welch, R.; Jordan, T.; Lang, H.; Murakami, H., ASTER as a source for topographic data in the late 1990's. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1282-1289, 1998.

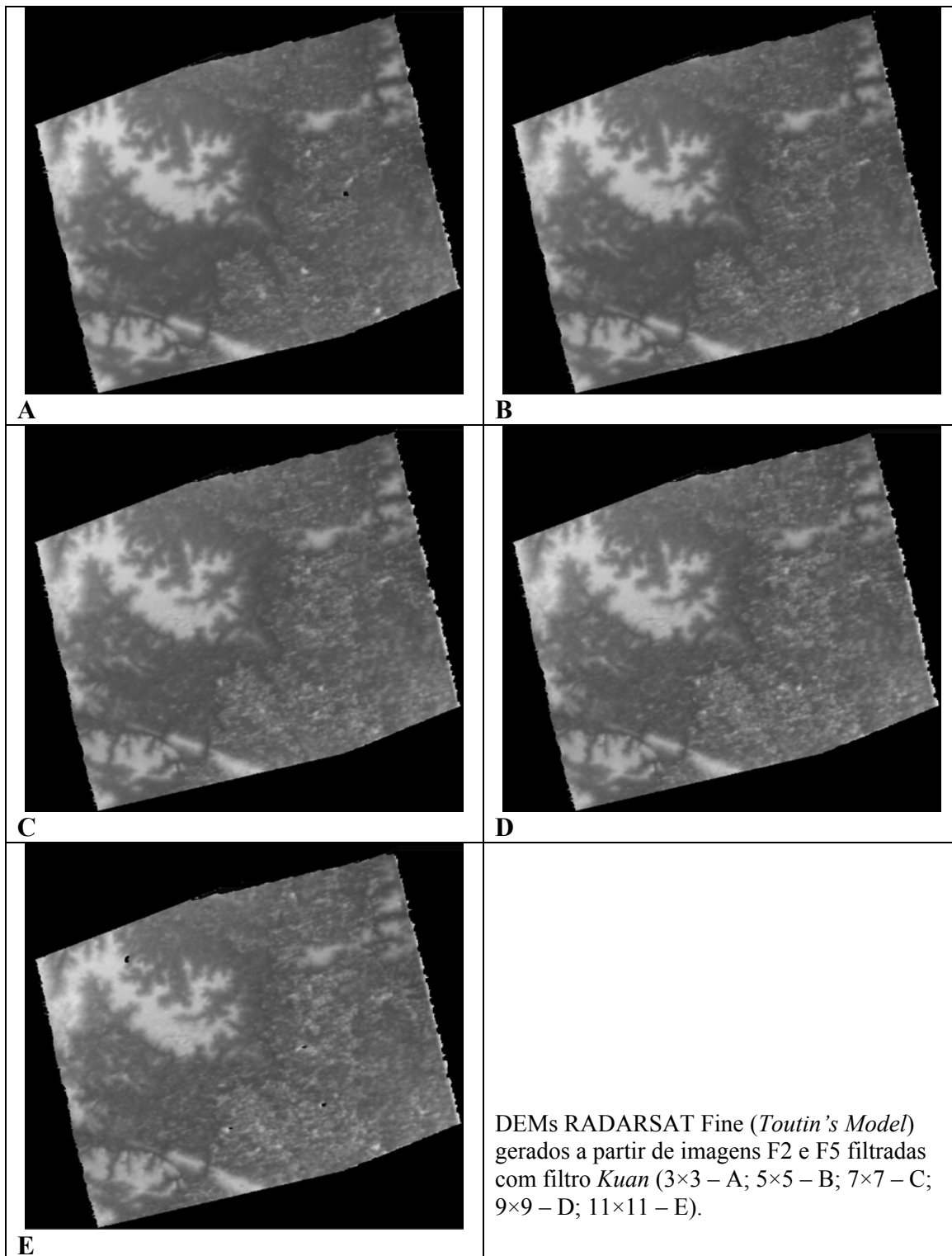
APÊNDICE A

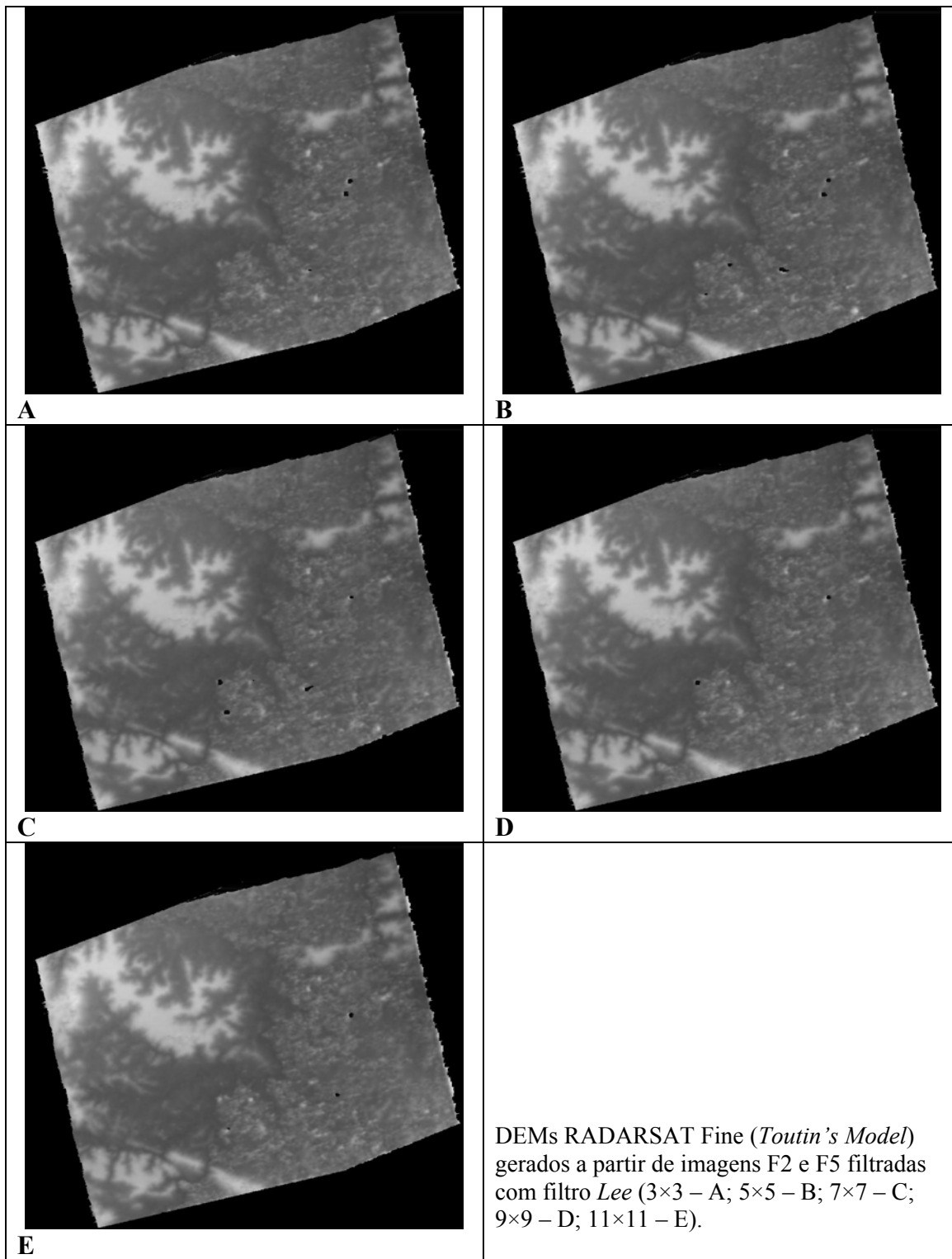


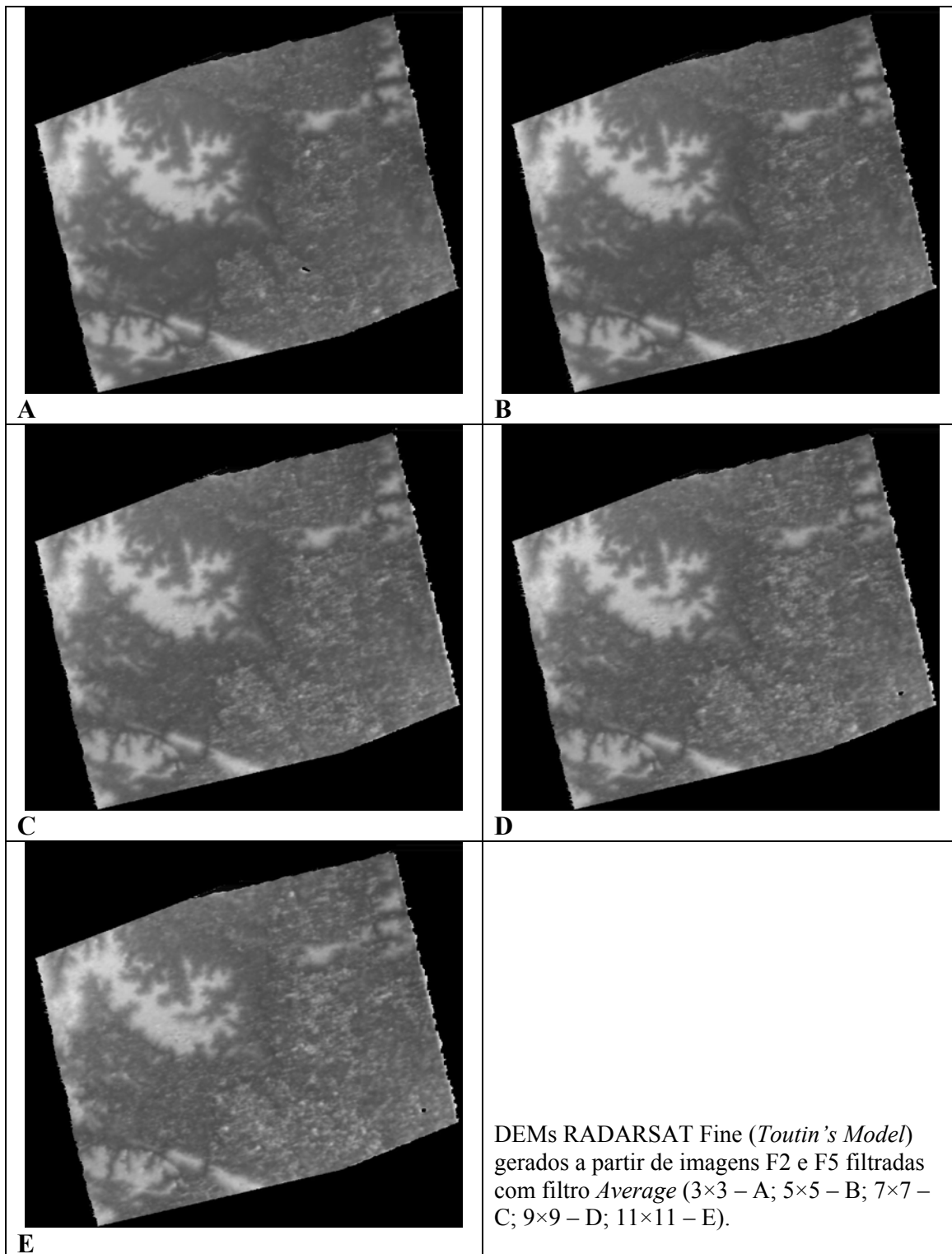


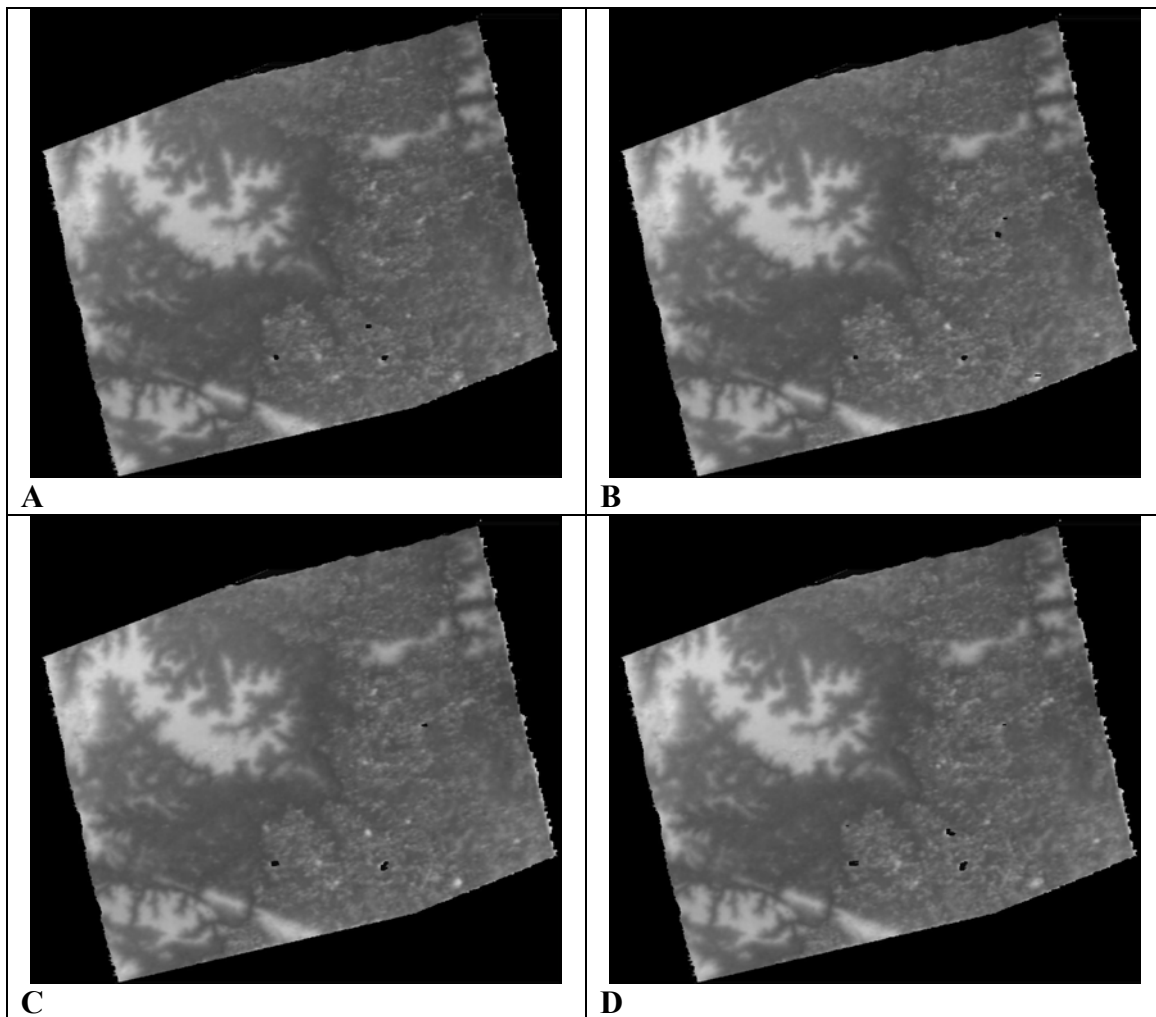






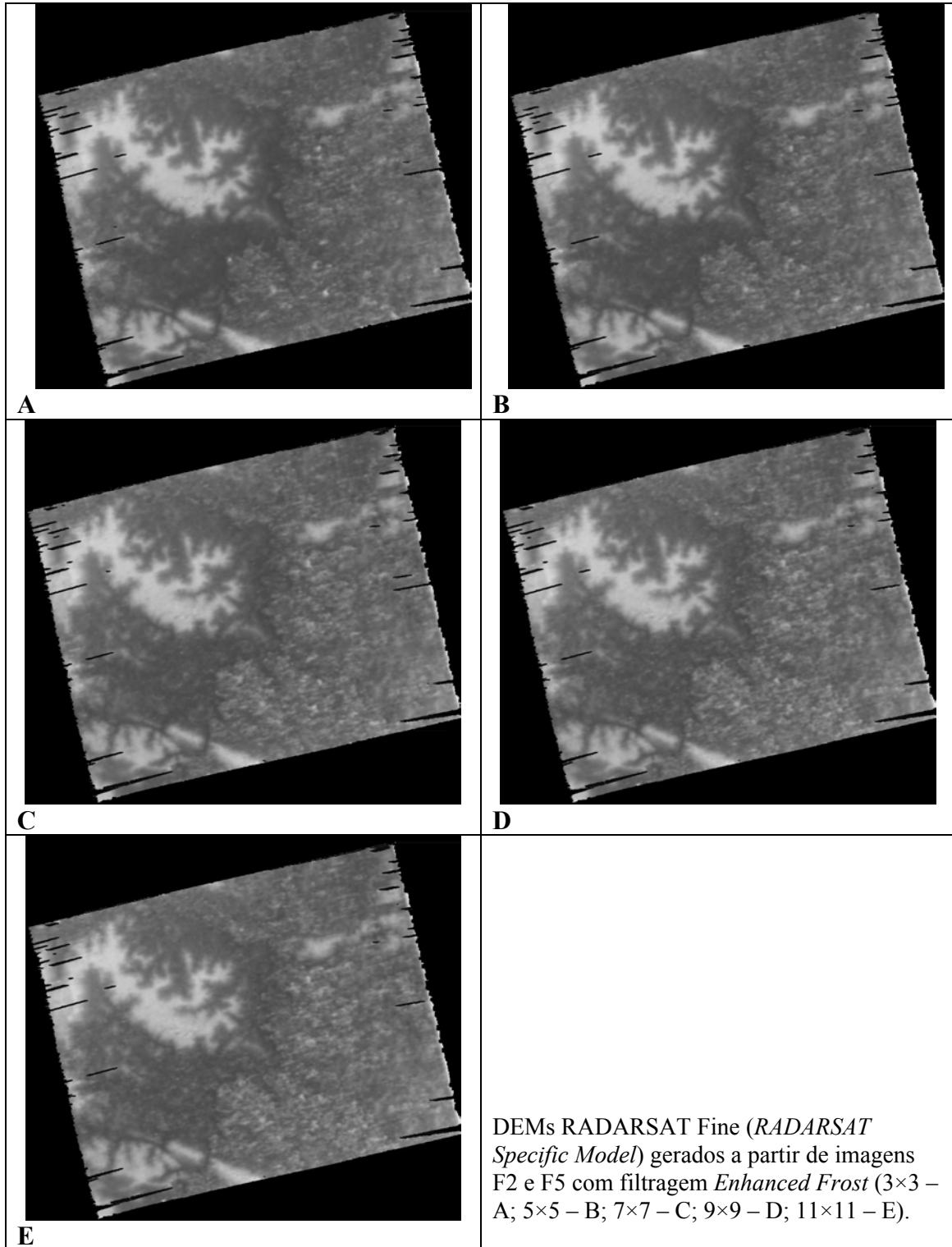


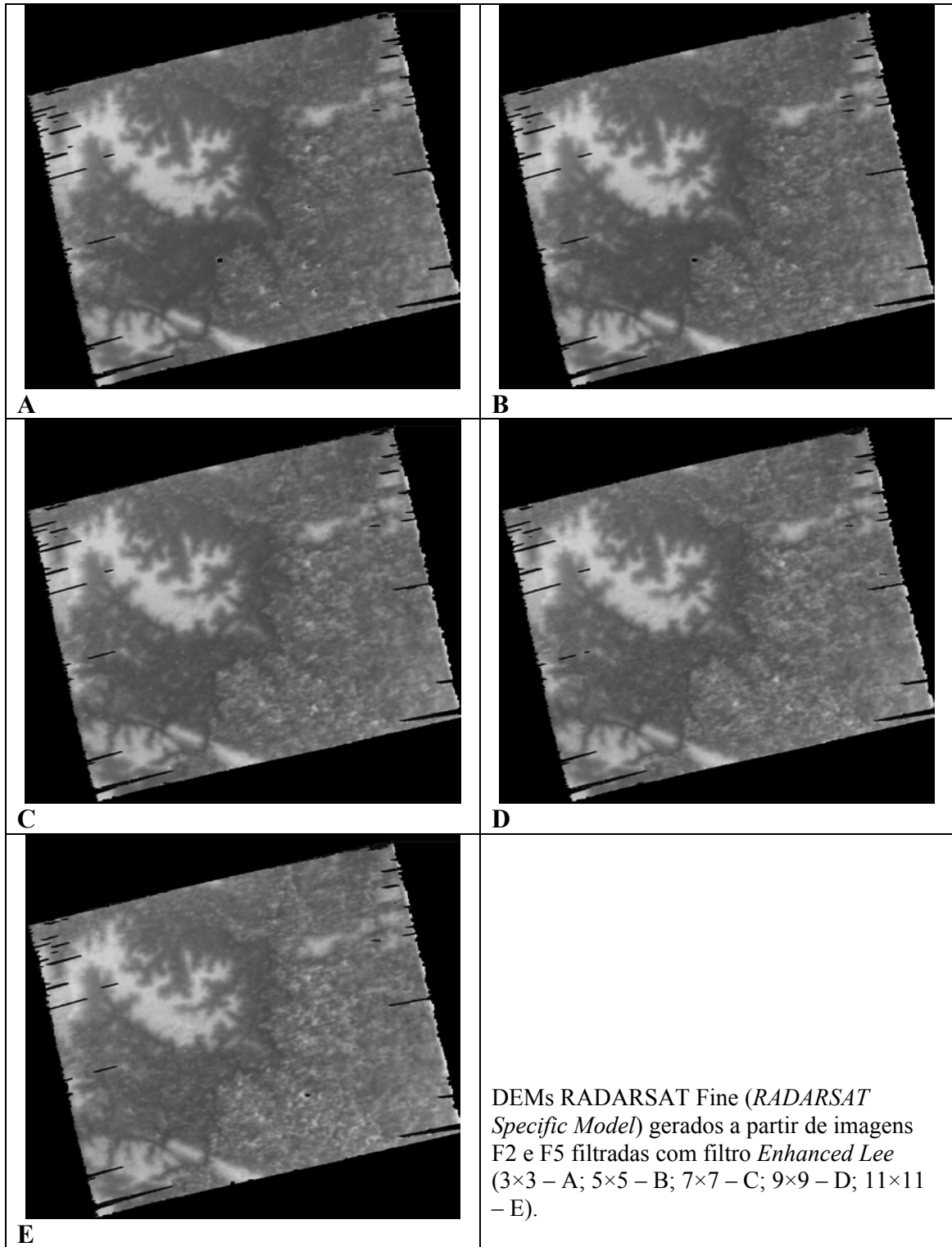


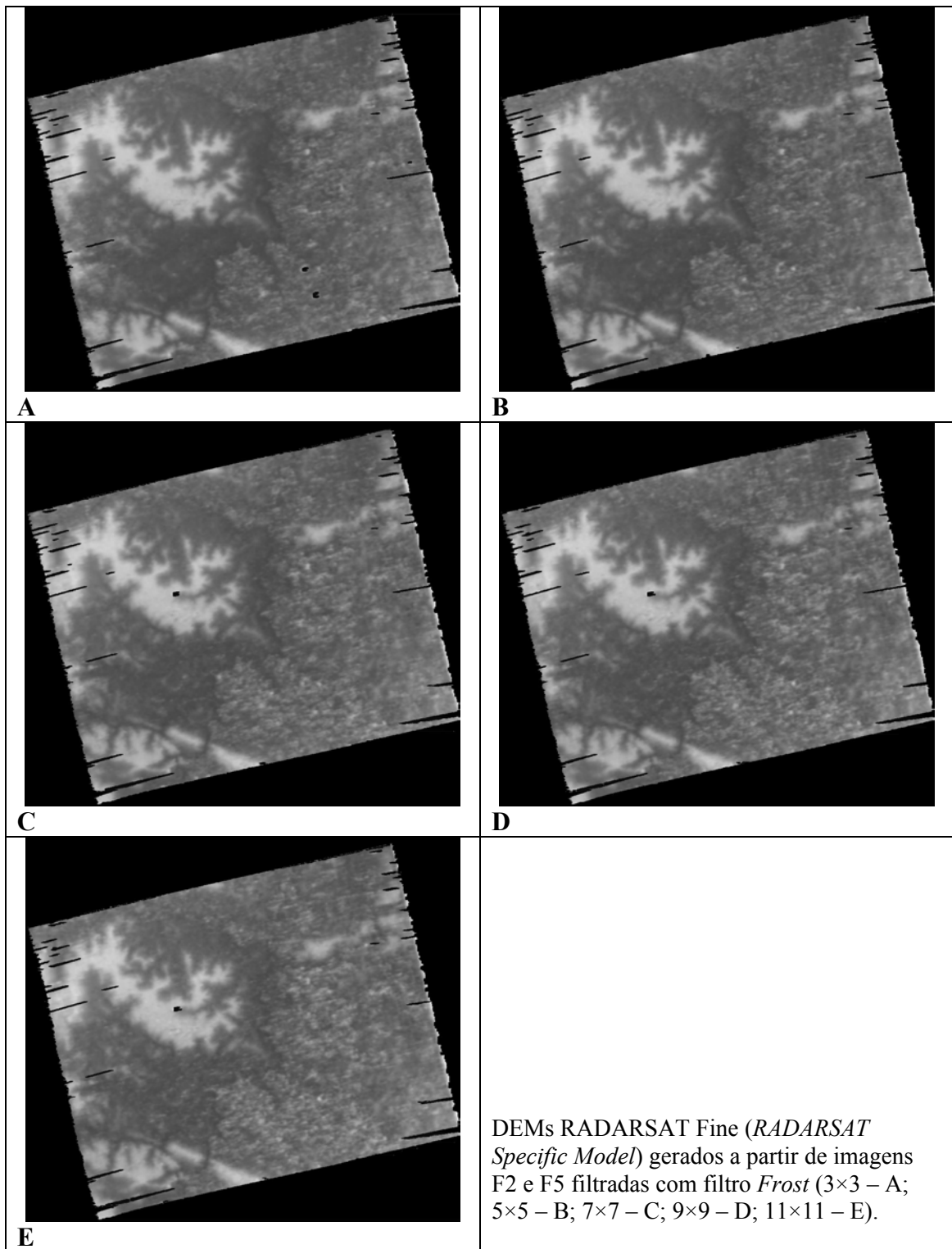


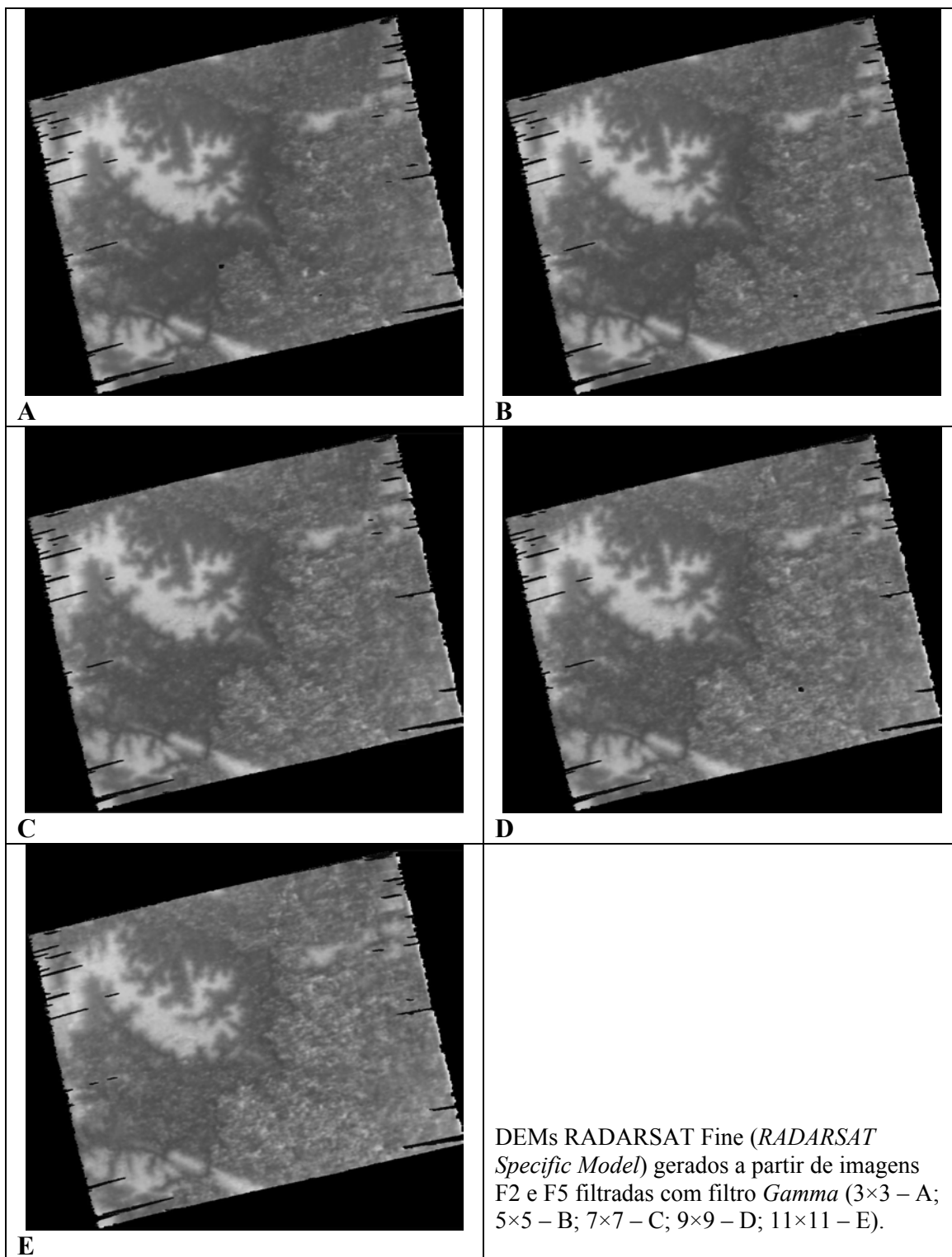
DEMs RADARSAT Fine (*Toutin's Model*) gerados a partir de imagens F2 e F5 filtradas com filtro *Touzi* (5×5 – A; 7×7 – B; 9×9 – C; 11×11 – D).

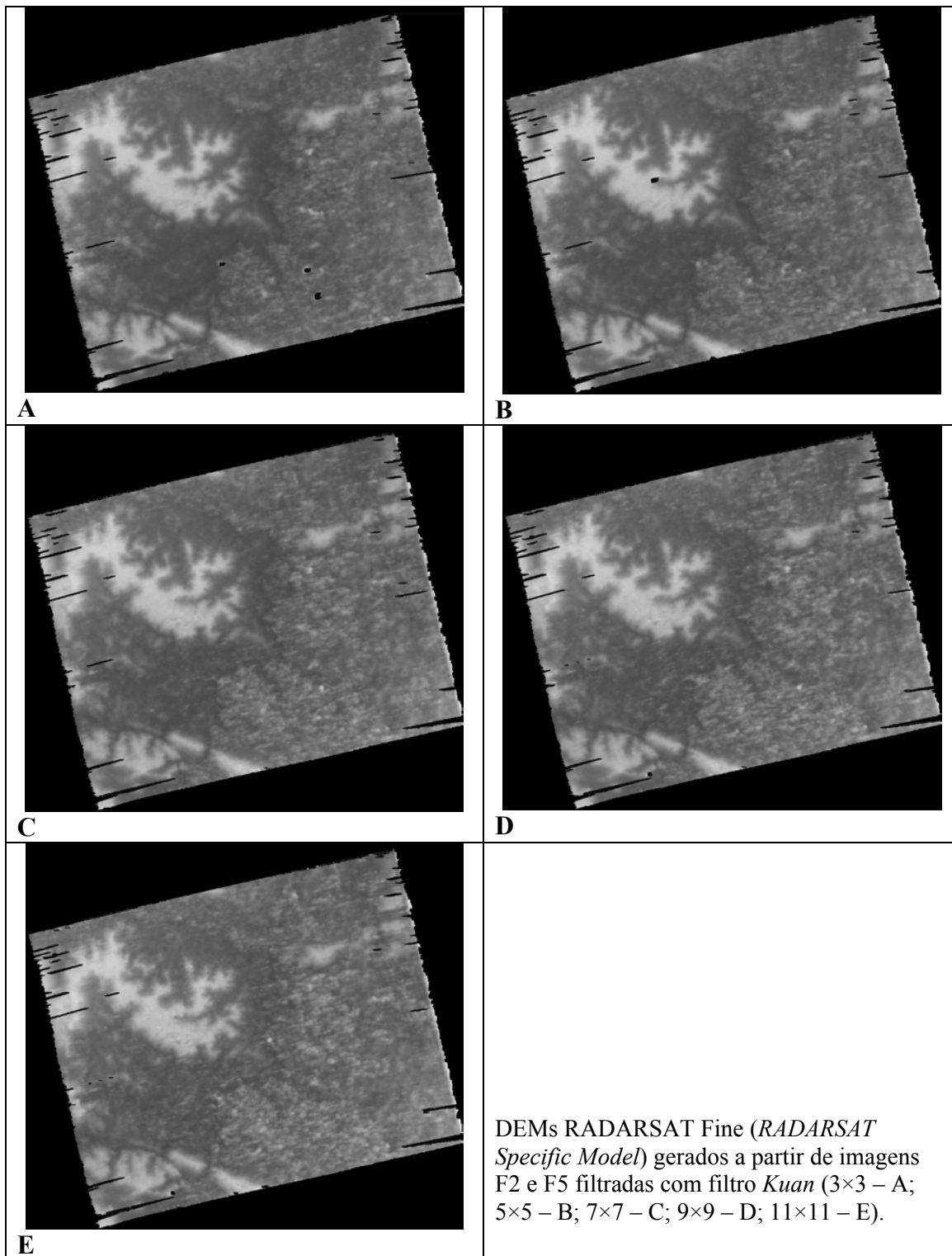
APÊNDICE B

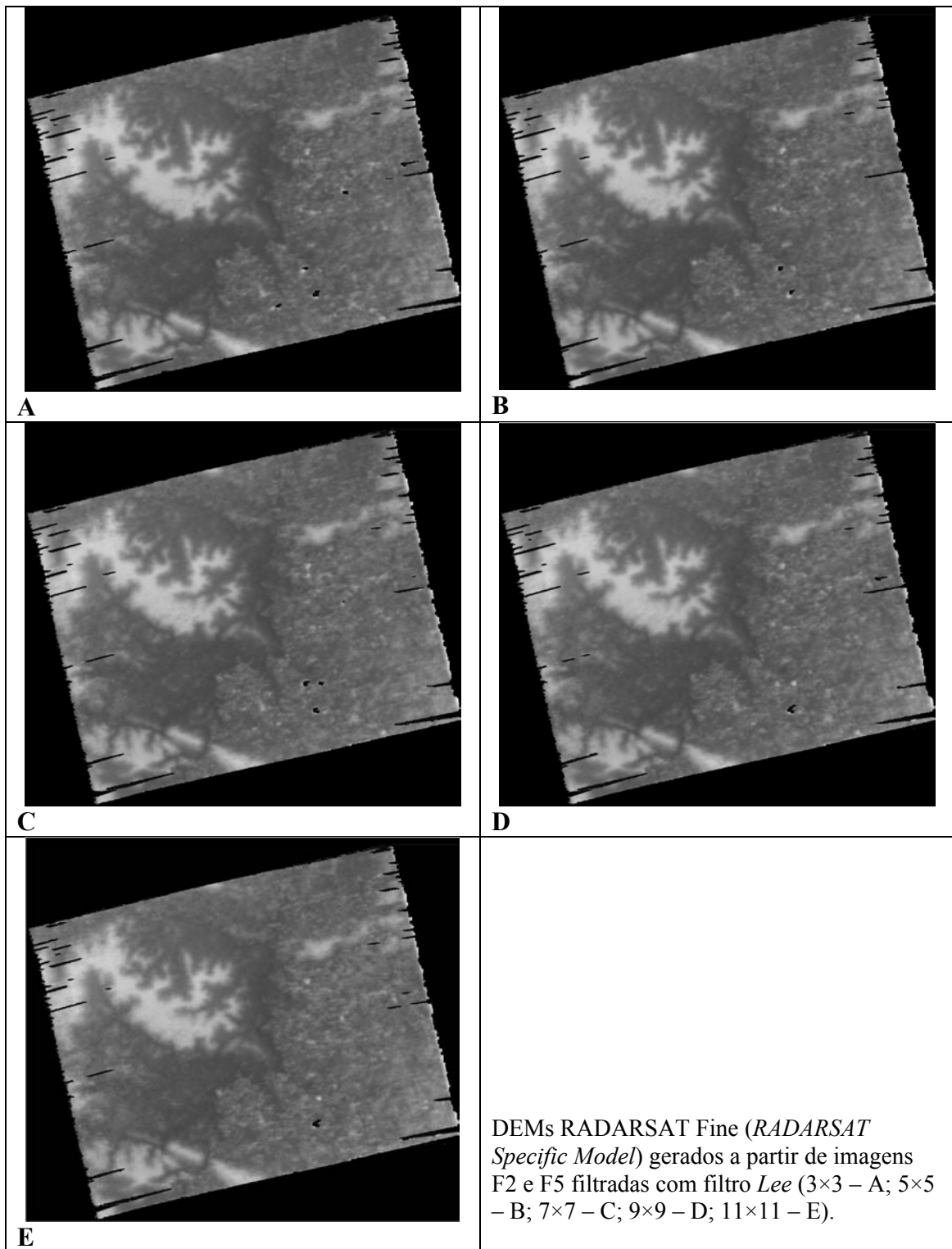


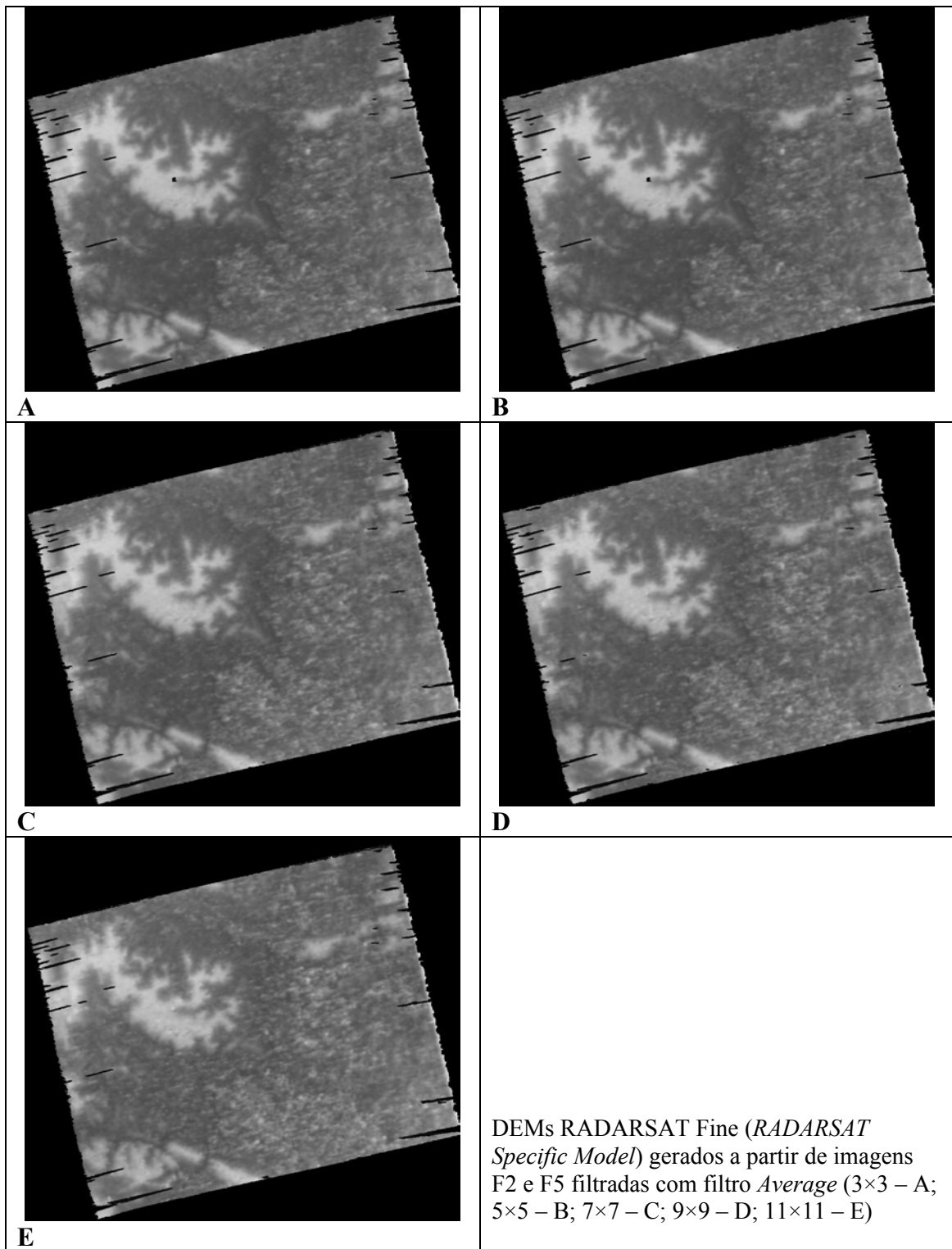


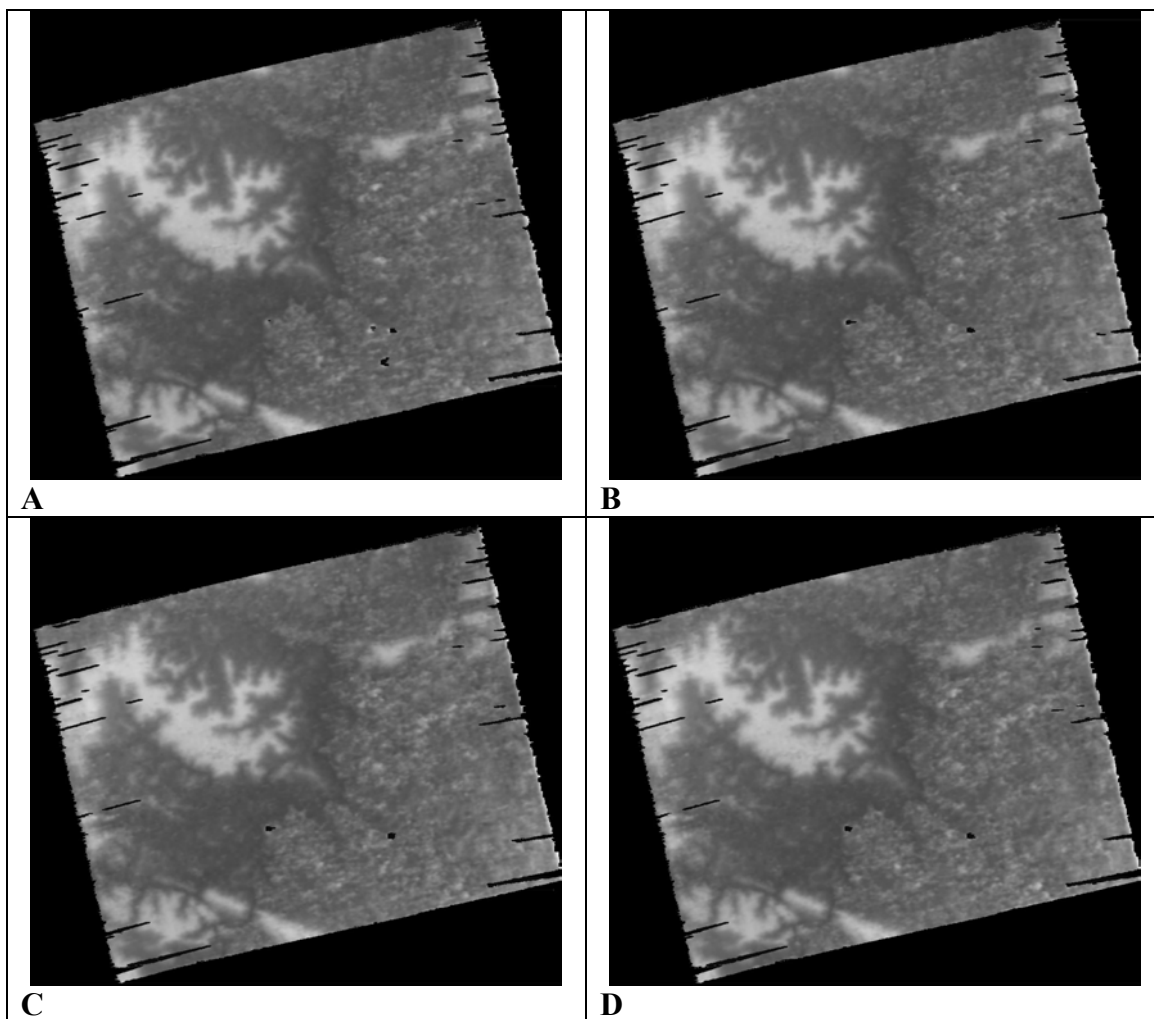












DEMs RADARSAT Fine (*RADARSAT Specific Model*) gerados a partir de imagens F2 e F5 filtradas com filtro *Touzi* (5×5 – A; 7×7 – B; 9×9 – C; 11×11 – D).