

**GIOVANNI CHAGAS EGG**

**GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE COMPOSTOS  
UTILIZANDO IMAGENS DO SENSOR PRISM/ALOS**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2012

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

T

E29g  
2012

Egg, Giovanni Chagas, 1982-

Geração de modelos digitais de superfície compostos  
utilizando imagens do sensor PRISM/ALOS / Giovanni  
Chagas Egg. – Viçosa, MG, 2012.  
xvi, 159f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Joel Gripp Junior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 129-136

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

CDD 22. ed. 526

GIOVANNI CHAGAS EGG

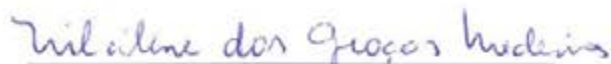
**GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE COMPOSTOS  
UTILIZANDO IMAGENS DO SENSOR PRISM/ALOS**

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

APROVADA: 22 de junho de 2012.

  
Cláudia Constantina S. Saraiva

  
Vicente Paulo Soares

  
Nilcilene das Graças Medeiros  
(Coorientadora)

  
Joel Gripp Junior  
(Orientador)

*A Meus pais Alfredo e Elza*  
*As minhas irmãs Ingredy e Sheila*

*“não sabendo que era impossível, ele foi lá e fez”*  
(Jean Cocteau)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo auxílio financeiro destinado a essa pesquisa com a concessão de bolsa de estudo e ao Departamento de Engenharia Civil por fornecer os equipamentos e *software* ArcGIS 9.3 necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Florestal por disponibilizar a licença de uso do *Software* STATISTICA 7.0.

Ao Instituto de Geociências Aplicadas – IGA pela oportunidade de utilização do *Software* PCI Geomatica 10.3.

Ao professor Joel Gripp Júnior, pela compreensão, paciência e grande apoio fornecido para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao professor José Marinaldo Gleriani, pela amizade, apoio, sugestões empenhadas no desenvolvimento deste trabalho.

A professora Nilcilene das Graças Medeiros pelo apoio, críticas e contribuições que auxiliaram significativamente a conclusão do trabalho.

Aos colegas Eduardo Onilio, José Fernando, Túlio e Robert Silva, pelo grande e valioso auxílio, na etapa de levantamento de campo.

A todos os meus colegas de Pós-Graduação, dentre eles Afonso, Marcos Ramos, Leonardo, Wiener, Jonas, Antônio Prata, Leila Freitas, Inês Nosoline, Wellington Donizete, Marcos Vinícius, Alice Etienne, André Borges pelos curtos e bons momentos de convívio proporcionados ao longo desta jornada.

Aos meus pais Alfredo Resende Egg e Elza Márcia Chagas Egg, pelo apoio, compreensão, carinho, conselhos o que sem sombra de dúvida fizeram com que eu me tornasse a pessoa que sou hoje.

As minhas irmãs Ingredy e Sheila, por toda força que me deste durante esse tempo, pois sem elas eu não teria conseguido vencer essa etapa.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	x
RESUMO .....	xii
ABSTRACT .....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivos gerais.....	3
2.2. Objetivos específicos .....	3
3. JUSTIFICATIVA.....	4
4. REVISÃO DE LITERATURA .....	5
4.1. Avanços tecnológicos e a importância de produtos cartográficos atualizados.....	5
4.2. Sensores capazes de obter pares estereoscópicos.....	6
4.2.1. Sistema SPOT – Sensores HRV, HRVIR e HRG .....	6
4.2.2. Plataforma Terra – sensor ASTER.....	7
4.2.3. Satélite IKONOS – Sensor IKONOS II .....	9
4.2.4. Satélite QUICKBIRD – Sensor QUICKBIRD II.....	10
4.2.5. Satélite CBERS – Sensor CCD .....	10
4.2.6. Satélite ALOS.....	11
4.2.6.1. O Sensor PRISM.....	13
4.2.7. Satélite GeoEye – Sensor GeoEye-1 .....	18
4.3. Distorções Geométricas em imagens orbitais .....	18
4.3.1. Distorções relacionadas a Terra.....	19
4.3.1.1. Distorções relacionadas à rotação.....	19
4.3.1.2. Distorções relacionadas ao relevo.....	19
4.3.1.3. Distorções relacionadas a esfericidade da terra .....	21
4.3.2. Distorções relacionadas ao sistema de aquisição .....	22
4.4. Fotogrametria .....	24
4.5. Construção de pares epipolares .....	27
4.6. Modelagem Digital do Relevo .....	28
4.6.1. Relação entre MDT, MNT, MDE e MDS .....	28

4.6.2.	Construção de um Modelo Digital de Elevação e/ou Superfície.....	30
4.6.3.	Correlação de imagens no processo de geração Automática de Modelos Digitais de Elevação e/ou Superfície .....	30
4.7.	Técnicas alternativas de Geração de MDEs e MDSs.....	34
4.7.1.	Geração de MDEs e/ou MDSs Híbridos .....	35
4.8.	Controle de qualidade de produtos cartográficos.....	37
4.8.1.	Padrão de Exatidão Cartográfica .....	38
4.8.2.	Análises de Tendência e Precisão em produtos cartográficos.....	41
4.8.2.1.	Teste de normalidade dos dados .....	42
4.8.2.2.	Análise de Tendência ou Exatidão.....	43
4.8.2.3.	Análise de Precisão .....	45
4.8.3.	Especificações Técnicas para Aquisição de Dados Espaciais Vetoriais	47
4.8.4.	Fórmula de Koppe .....	49
5.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	53
5.1.	Área de estudo.....	53
5.2.	Materiais utilizados .....	55
5.3.	Métodos empregados .....	55
5.3.1.	Coleta de Dados.....	57
5.3.1.1.	Definição e identificação dos Pontos de Controle e Checagem em campo	57
5.3.1.2.	Levantamento dos Pontos em campo.....	58
5.3.1.3.	Processamento dos pontos levantados .....	61
5.3.2.	Geração do Modelo Digital de Superfície com imagens PRISM.....	61
5.3.3.	Geração das Ortoimagens.....	68
5.3.4.	Avaliação dos Modelos Digitais de Superfície Gerados e Ortoimagens.....	69
5.3.4.1.	Avaliação do MDS empregando Decreto-Lei 89.817/84 .....	69
5.3.4.2.	Avaliação das Ortoimagens ALOS PRISM empregando o Decreto-Lei 89.817/1984 e análises visuais.....	72
5.3.4.3.	Avaliação visual dos MDSs e análise com base na declividade...	73
5.3.5.	Geração e avaliação do MDS Composto.....	75
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	80
6.1.	Avaliação dos MDSs obtidos no Teste 01.....	80
6.2.	Avaliação dos MDSs obtidos no Teste 02.....	83

6.3. Avaliação dos MDSs obtidos no Teste 03.....	88
6.4. Avaliação dos MDSs obtidos no teste 04.....	93
6.5. Geração das Ortoimagens ALOS PRISM empregando o Decreto-Lei 89.817/1984.....	96
6.6. Avaliação das Ortoimagens ALOS PRISM empregando o Decreto-Lei 89.817/1984.....	96
6.6.1. Análise Visual.....	99
6.7. Análise local dos MDSs.....	101
6.7.1. Áreas contendo sombras.....	112
6.7.2. Influência da declividade.....	113
6.8. Geração e avaliação do MDS Composto.....	116
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	126
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
APÊNDICE A.....	137
APÊNDICE B.....	143
APÊNDICE C.....	154

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geometria de aquisição da imagem e o tempo de aquisição de uma cena ASTER para uma visada ao longo da trajetória. ....	8
Figura 2 - Visão geral do Satélite ALOS. ....	12
Figura 3 – Visão geral do esquema de aquisição de dados dos sensores AVNIR-2 (a), PALSAR (b) e PRISM. (c). ....	12
Figura 4 - Visão Geral do Sensor PRISM. ....	13
Figura 5 - Modos de Observação (a) Modo <i>Triplet</i> e (b) Modo <i>Nadir Backward</i> . Fonte: IBGE, 2010. ....	14
Figura 6 - Efeito de rotação da terra no tempo de aquisição da imagem. ....	19
Figura 7 - Efeito do emprego da Ortoretificação Digital em uma imagem. ....	20
Figura 8 - Relação entre o Sistema de coordenadas imagem e o Sistema de coordenadas no terreno. ....	21
Figura 9 - Paralaxe estereoscópica de duas fotos verticais. ....	25
Figura 10 - Sobreposição das fotografias apresentadas na Figura 9. ....	25
Figura 11 - Geometria epipolar de um estereopar. ....	27
Figura 12 - Imagem bruta e imagem epipolar. ....	28
Figura 13 - Determinação do Coeficiente de Correlação. Fonte:.....	33
Figura 14 - Pirâmide de imagens em quatro níveis. ....	34
Figura 15 - Caracterização da Área de Estudo. ....	54
Figura 16 - Etapas para Geração do MDS e Ortoimagem para as cenas PRISM/ALOS. ....	56
Figura 17 - Materialização e levantamento de pontos de controle e checagem em campo. ....	58
Figura 18 - Distribuição dos pontos de Controle e Checagem na imagem. ....	60
Figura 19 - Etapas realizadas para a Geração do Modelo Digital de Superfície. ....	62
Figura 20 - Distribuição dos pontos de Controle e pontos de ligação sobre a cena <i>Nadir</i> . ....	63
Figura 21 - Fluxograma descrevendo os passos Empregados para Avaliação do Modelo empregando Decreto-Lei. ....	71
Figura 22 - Passos para avaliação do Modelo Digital de Superfície empregando o Decreto-Lei e análise de Tendência e Precisão. ....	72
Figura 23 - Análise visual e análise da influência da declividade realizada para os MDSs melhores classificados após emprego de análise global. ....	73
Figura 24 - Obtenção do MDS Composto, tomando como base o indicativo do erro para a componente altimétrica para três MDSs. ....	77
Figura 25 - Distribuição dos pontos de Checagem sobre a imagem PRISM – Análise local utilizando o PEC para a região de Viçosa. ....	79
Figura 26 - Discrepâncias encontradas para o MDS 13. ....	86
Figura 27 - Discrepâncias encontradas para o MDS 14. ....	86
Figura 28 - Discrepâncias encontradas para o MDS 15. ....	87
Figura 29 - Discrepâncias encontradas para os MDSs 16, 17 e 18. ....	87
Figura 30 - Discrepâncias encontradas para os MDSs 27, 30, 33 e 36. ....	91
Figura 31 - Comparativo entre os MDSs com base no RMS. ....	92
Figura 32 - Análise visual da ortoreimagem PRISM para a área 01. ....	99

Figura 33 - Análise visual da Ortoimagem PRISM – ORTO 20 (a) e comparação com: (b) Ortoimagem CBERS-2B HRC com resolução espacial de 2,5m, (c) Ortoimagem IKONOS com resolução espacial de 1 metro e (d) reamostrada para 2,5 metros. ....	100
Figura 34 - Análise visual da Ortoimagem PRISM – ORTO 20 (a) e comparação com: (b) Ortoimagem CBERS-2B HRC com resolução espacial de 2,5m, (c) Ortoimagem IKONOS com resolução espacial de 1 metro e (d) reamostrada para 2,5 metros. ....	101
Figura 35 - Visão geral do MDS 49 ( <i>BN, BF</i> ; 60 pontos de controle, sem preenchimento de vazios). As áreas em branco consistem em regiões onde houve falha na correlação (área coberta por nuvens, ou outras imperfeições). 102	
Figura 36 - Visão geral do MDS 44 ( <i>BN</i> ; 60 pontos de controle sem preenchimento de vazios). As áreas em branco consistem em regiões onde houve falha na correlação (área coberta por nuvens, ou outras imperfeições). ....	103
Figura 37 - Visão geral do MDS 14 ( <i>BN, BF, NF</i> ; 7 pontos de controle com preenchimento de vazios). As áreas em branco em regiões onde houve falha na correlação (área coberta por nuvens, ou outras imperfeições). ....	104
Figura 38 - Visão geral do MDS 20 ( <i>BN</i> ; 7 pontos de controle sem preenchimento de vazios). As áreas em branco consistem em regiões onde houve falha na correlação (área coberta por nuvens, ou outras imperfeições). ....	105
Figura 39 - Coeficiente de Correlação dos MDSs avaliados. ....	106
Figura 40 - Regiões com alta presença de nuvens sobre o MDS 49. ....	107
Figura 41 - Áreas contendo nuvens sobre a cena Nadir. As áreas circuladas em vermelho representam sombra de nuvens (locais com coeficiente de correlação nulo e abaixo de 50%). ....	108
Figura 42 - Áreas contendo falhas na Correlação para área 01 para os MDSs 49 (a), 44 (b), 20 (c) e 14 (d). ....	110
Figura 43 - Visão geral da área 01 e MDS e comparação com MDS 14 para regiões contendo sombras de nuvens. ....	111
Figura 44 - Análise visual de área contendo sombra e os valores da altitude obtidos. ....	113
Figura 45 - MDScomp01 obtido através da combinação entre os Modelos 14, 20, 44 e 49. ....	117
Figura 46 - MDScomp02 obtido através da combinação entre os Modelos 46, 47, 48 e 14, todos com de preenchimento de falhas. ....	118
Figura 47 - MDScomp03 obtido através da combinação entre os Modelos 49, 50, 51 e 20, todos sem a opção de preenchimento de vazios. ....	119
Figura 48 - Comparativo entre os MDSs Compostos avaliados para a região de Viçosa. ....	123
Figura 49 - Comparativo entre o MDScomp03 e o MDS 14 para a região de Viçosa. ....	124
Figura 50 - Modelo de Planilha utilizada para levantamento dos pontos de controle e checagem. ....	138
Figura 51 - Rotina para a determinação da tangente da declividade. ....	154
Figura 52 - Determinação da altura de voo. ....	155
Figura 53 - Determinação da relação de escala. ....	155
Figura 54 - Determinação do fator $0,0055.h/c$ . ....	155
Figura 55 - Obtenção do termo $B \tan \alpha$ da Fórmula de Koppe. ....	156
Figura 56 - Obtenção do erro altimétrico associado ao MDS 51. ....	156

Figura 57 - Localização dos pixels com menor valor de erro altimétrico para os MDSs 50 e 51 .....	157
Figura 58 - Localização dos pixels com menor valor de erro altimétrico para os MDSs 20 e 49 .....	158
Figura 59 - Procedimento para obtenção do MDS Composto e imagem de erro associado aos MDSs 50 e 51 .....	158
Figura 60 - Procedimento para obtenção do MDS Composto e imagem de erro associado aos MDSs 20 e 49 .....	159
Figura 61 - Procedimento para obtenção do MDS Composto - MDEcomp03 .....	159

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características do Sensor ASTER.....	8
Tabela 2 – Modos de Observação do Sensor PRISM.....	14
Tabela 3 - Principais características do Sensor PRISM.....	15
Tabela 4 - Precisão e Acurácia da Planimetria do Produto Cartográfico.....	47
Tabela 5 - Precisão e Acurácia do Modelo Digital do Terreno para a produção de Produtos Cartográficos Digitais.....	48
Tabela 6 - Precisão e acurácia da altimetria do Produto Cartográfico.....	48
Tabela 7 - Características da Imagem PRISM utilizada neste trabalho.....	56
Tabela 8 - Parâmetros utilizados para realização do teste 01.....	64
Tabela 9 - Parâmetros utilizados para realização do teste 02.....	65
Tabela 10 - Parâmetros utilizados para realização do teste 03.....	67
Tabela 11 - Parâmetros utilizados para realização do teste 04.....	68
Tabela 12 - Parâmetros utilizados para Ortoretificação da Cena PRISM.....	69
Tabela 13 - Resumo das Estatísticas para os MDSs avaliados no Teste 01.....	81
Tabela 14 - Resumo das Estatísticas para os MDSs avaliados no Teste 02.....	84
Tabela 15 - Resumo das estatísticas para os MDSs avaliados no Teste 03.....	89
Tabela 16 - Resumo das estatísticas para os modelos avaliados no Teste 04.....	94
Tabela 17 - Comparativo entre os Modelos 13, 14, 15 (Teste 02) e 51, 48 e 47 (Teste 04).....	95
Tabela 18 - Resumo das estatísticas para as ortoimagens geradas.....	97
Tabela 19 - Indicativo da correlação em função da declividade para o MDS 49. ...	114
Tabela 20 - Indicativo da correlação em função da declividade para o MDS 44. ...	114
Tabela 21 - Indicativo da correlação em função da declividade para o MDS 20. ...	115
Tabela 22 - Indicativo da correlação em função da declividade para o MDS 14. ...	115
Tabela 23 - Coeficientes de Correlação levando em consideração maior ocorrência de pixels correlacionados para cada Classe de declividade.....	115
Tabela 24 - Avaliação dos MDSs compostos para toda a área de estudo.....	121
Tabela 25 - Avaliação dos MDSs para a região de Viçosa.....	121
Tabela 26 - Pontos de Controle levantados em Campo.....	139
Tabela 27 - Pontos de Checagem levantados em campo.....	141
Tabela 28 - Pontos de Checagem utilizados na análise local das Cenas PRISM.....	142
Tabela 29 - Resultado do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk para os Modelos Digitais de Superfície gerados no Teste 01.....	143
Tabela 30 - Resultados do Teste t de Student para a componente altimétrica.....	143
Tabela 31 - Resultados da avaliação dos Modelos para a componente altimétrica empregando o PEC.....	144
Tabela 32 - Resultados do Teste de Precisão para os MDSs avaliados no teste 01.....	144
Tabela 33 - Resultados da avaliação dos Modelos para a componente altimétrica empregando o PEC para o Teste 02.....	145
Tabela 34 - Resultados do Teste t de Student para a componente altimétrica.....	145
Tabela 35 - Resultados da avaliação dos Modelos para a componente altimétrica empregando o PEC.....	145
Tabela 36 - Resultados do Teste de Precisão para os MDSs avaliados no Teste 02. .....	145
Tabela 37 - Resultado do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk para os Modelos Digitais de Superfície gerados no Teste 03.....	146

Tabela 38 - Resultados do Teste <i>t</i> de <i>Student</i> para a componente altimétrica. ....	147
Tabela 39 - Resultados da avaliação dos Modelos para a componente altimétrica empregando o PEC.....	148
Tabela 40 - Resultados do Teste de Precisão para os MDSs avaliados no Teste 03. ....	149
Tabela 41 - Resultado do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk para os Modelos Digitais de Superfície gerados no Teste 04.....	150
Tabela 42 - Resultados da Análise de Tendência para o Teste 04.....	150
Tabela 43 - Classificação dos Modelos após emprego do Padrão de Exatidão Cartográfica.....	150
Tabela 44 - Classificação dos Modelos após Análise de Precisão.....	150
Tabela 45 - Resultado do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk para as Ortoimagens geradas.....	151
Tabela 46 - Resultados do teste <i>t</i> para as Ortoimagens avaliadas.....	151
Tabela 47 - Classificação das Ortoimagens avaliadas.....	151
Tabela 48 - Resultados da avaliação das Ortoimagens após emprego do teste de precisão.....	151
Tabela 49 - Principais estatísticas utilizadas na avaliação das ortoimagens.....	151
Tabela 50 - Resultado dos MDSs após emprego do Teste de Normalidade.....	152
Tabela 51 - Classificação dos Modelos após emprego do Teste <i>t</i> de <i>Student</i> .....	152
Tabela 52 - Avaliação dos MDSs após Análise empregando o PEC.....	152
Tabela 53 - Avaliação dos MDSs após Análise de Precisão.....	153

## RESUMO

EGG, Giovanni Chagas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2012. **Geração de modelos digitais de superfície compostos utilizando imagens do sensor PRISM/ALOS.** Orientador: Joel Gripp Junior. Coorientadores: José Marinaldo Gleriani e Nilcilene das Graças Medeiros.

O presente trabalho tem como objetivo a avaliação da acurácia altimétrica de Modelos Digitais de Superfície (MDSs) e geração de MDSs compostos, utilizando a cena tomada pelo Sensor PRISM - *Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping* no modo *triplet* (visadas *Backward*, *Nadir* e *Forward*) que se encontra a bordo do Satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*). Para realização da Correção Geométrica das imagens foi empregado o Modelo de Toutin. Foram gerados 54 MDSs divididos em quatro testes, que procuraram verificar o número mínimo de pontos de ligação a serem utilizados para geração de cada MDS, a adequação da Metodologia proposta por IBGE (2009) a uma região, cujo relevo possui características diferentes da estudada por este órgão, a influência do aumento do número de pontos de controle na qualidade altimétrica dos MDSs e a combinação das três visadas associadas ao uso de diferentes estratégias de correlação entre imagens e resolução espacial dos modelos. Os MDSs resultantes de cada teste foram avaliados através do emprego do Decreto-Lei 89.817/1984 que institui o Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC e aqueles que obtiveram melhor classificação foram submetidos a uma análise local, onde se verificou o comportamento dos valores de altitude empregando o PEC para uma área situada no município de Viçosa, bem como realizada uma análise empírica, com a finalidade de verificar o comportamento dos pixels situados em regiões que apresentavam sombras da vegetação e sombras de nuvens, utilizando para isso, o coeficiente de correlação dos pares epipolares gerados para cada MDS, além da realização de análise dos efeitos da inclinação do terreno sobre a qualidade altimétrica tomando como base o coeficiente de correlação. Os MDSs que apresentaram melhores resultados após emprego dos quatro testes foram utilizados para a ortorretificação da cena *Nadir* e as Ortoimagens resultantes foram avaliadas de maneira global empregando o PEC e de maneira local, onde verificou-se a influência da resolução radiométrica na vetorização da Ortoimagem. A última análise consistiu na realização de um refinamento nos valores de altitude dos MDSs

que apresentaram melhor classificação, através do emprego da Fórmula de Koppe modificada por Kraus (2004), que leva em consideração a influência da declividade e do fator de Escala sobre as cenas quando tomadas de imagens aéreas. Esta Fórmula foi adaptada para uso em uma imagem orbital e utilizada no intuito de se obter um indicativo da localização do erro altimétrico sobre cada MDS, onde se gerou um novo modelo, denominado MDS Composto. Os resultados obtidos permitiram constatar que o sensor PRISM permite a obtenção de MDSs compatíveis as normas da Cartografia Nacional para a Escala de 1:25.000, havendo a necessidade de utilização de um número mínimo de sete pontos de controle associados a doze pontos de ligação e o uso das visadas *Backward x Nadir* (que apresentaram os melhores resultados) para a geração dos Modelos. O aumento do número de pontos controle para realização da correção geométrica empregando o Modelo de Toutin não trouxe melhorias significativas aos MDSs avaliados, embora os que apresentaram melhores resultados foram aqueles que utilizaram 60 pontos de controle em sua geração. A Metodologia proposta por IBGE (2009) se mostrou aplicável a regiões com características semelhantes à estudada neste trabalho, embora exista a necessidade de realização de testes em áreas com características semelhantes à estudada. O uso da Fórmula de Koppe modificada se mostrou satisfatório, permitindo associar em um único MDS os valores de altitude que apresentam o menor indicativo de erro encontrado para a componente altimétrica, sendo que os resultados obtidos através do emprego desta Equação foram superiores aos demais Modelos avaliados. As ortoimagens obtidas se enquadraram na Classe A do PEC para a escala de 1:25.000, contudo devido à baixa resolução radiométrica das cenas PRISM (8 bits) o processo de extração de elementos físicos, principalmente em áreas urbanas tornaram-se de difícil interpretação.

## ABSTRACT

EGG, Giovanni Chagas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2012. **Generation of a digital surface model composed derived from the sensor PRISM/ALOS.** Adviser: Joel Gripp Junior. Co-Advisers: José Marinaldo Gleriani and Nilcilene das Graças Medeiros.

This study aims to evaluate the altimetric accuracy of Digital Surface Models - DSM and generation of a DSM composed using scene taken by PRISM Sensor - *Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping* (viewing directions Backward, Forward and Nadir) which is located aboard the ALOS satellite (Advanced Land Observing Satellite). The Toutin Model is used to perform on the realization of geometric correction of images, were that took into account the influence of the number of control points and tie points for generation of DSMs. There were generated 54 models divided into four tests which look forward to determinate the minimum number of tie points to be used for the generation of DSM (test 01), the adequacy of the methodology proposed by IBGE (2009) for the region studied, whose relief has different characteristics employed by this agency (test 02), the influence of increasing the number of control points on the altimetric quality DSMs (test 03) and the effect of the combination of the three viewing directions behavior and the use of different strategies of correlation between images and spatial resolution of the models in the final products accuracy (test 04). The DSM derived from each test were evaluated by use of the Decree-Law 89.817/1984 and those which received better ratings were submitted to a local analysis, where it was investigated the behavior of the altitude values using the PEC for an area located in Viçosa and a empirical analysis was employed, in order to verify the behavior of pixels located regions that had shades of vegetation and cloud shadows using for that the correlation coefficient of epipolar pairs generated for each DSM besides conducting analysis of the effects of slope on the quality altimetric using as base the correlation coefficient. The DSMs that showed better results after the use of all these tests were used for the orthorectification of the Nadir scene and orthoimages, were evaluated globally using the PEC and the local way, in order to verify the influence of radiometric resolution on the vectorization of orthoimage. The DSM used for orthorectification also underwent a final examination, which took place a refinement

in their altitude values by employing the Koppe's Formula modified by Kraus (2004) that takes into account the influence of slope and the scale factor when taken on the scenes of aerial images which led to a Composed DSM consisted of all pixels that presented a lower standard deviation. The results revealed that the PRISM sensor allows to obtain DSMs of consistent standards for the National Mapping Scale 1:25.000, with the need to use a minimum number of seven control points associated with twelve tie points and use of viewing directions Backward x Nadir for the generation of models. The increase in the number of control points to perform the correction using the geometric Toutin model did not bring significant improvements to the quality of altimetric DSMs evaluated, although they showed the best results were those that used 60 control points in their generation. The methodology proposed by IBGE (2009) proved to be applicable to regions with similar characteristics to those studied in this work, although there is a need for testing in areas with similar characteristics studied. Using the Koppe's Formula modified was satisfactory, allowing to associate in a single DSM the lowest indicative altimetric errors found for the altimetric component, and the results were superior to the other models evaluated. The orthoimages obtained are classified in Class A of the Decree-Law for the scale of 1:25.000, however due to the low radiometric resolution of the scenes PRISM (8 bits) the extraction process of physical elements, especially in urban areas, become difficult to interpret.

## 1. INTRODUÇÃO

Tendo em vista a utilização de informações cartográficas para diversas áreas do conhecimento, principalmente quanto às atividades de planejamento e mapeamento da superfície terrestre, dispor de um conjunto de informações atualizadas, é de grande importância, o que reforça a necessidade de produtos cartográficos disponíveis aos mais diversos nichos de usuários.

Com relação ao mapeamento sistemático no Brasil, pode-se dizer que grande parte de seu território apresenta mapeamento desatualizado a mais de três décadas, considerando escalas médias e pequenas. O caso é mais agravante com relação às escalas maiores, que além de desatualizadas, possuem poucas áreas mapeadas, e segundo dados da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR, 2010) apenas um por cento do território nacional encontra-se mapeado na escala de 1:25.000.

Com o avanço tecnológico e o aprimoramento dos sistemas orbitais, ampla atenção passou a ser dada ao mapeamento planialtimétrico em nível mundial. Na década de 90, foram lançados sensores como o HRV (*High Resolution Visible*) da plataforma SPOT-1 (lançado em 1986) com resolução espacial de 10 metros, e o Sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) a bordo da plataforma Terra lançado em 1999, com resolução espacial de 15 metros, que através da sobreposição das imagens de uma determinada área, tomada sobre pontos de vista diferentes, permitiam a reconstrução da informação tridimensional da cena. Tais informações podem ser aplicadas aos diversos campos de atuação, como projetos de estradas, determinação de áreas de inundação, monitoramento de áreas de risco, dentre outras.

Em 2006 a JAXA (Agência Espacial Japonesa) lançou o Satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), composto de três sensores a bordo: AVNIR- *Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer*, PRISM - *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*; PALSAR - *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*.

Dos três sensores a bordo, o sensor PRISM permite a obtenção de pares estereoscópicos, uma vez que ele é dotado de três detectores posicionados em visadas distintas, uma a nadir (*Nadir*), uma a vante (*Forward*) e outra a ré (*Backward*). O ângulo de abertura com relação as visadas *Backward* e *Forward* permite uma relação da base pela altitude da plataforma (relação B/H) igual a 1,0.

Como o sensor PRISM foi concebido visando a realização de mapeamento planialtimétrico na escala de 1:25.000 ou menores, estas imagens podem ser utilizadas para a obtenção de Cartas Topográficas e extração de Modelos Digitais de Elevação e Superfície, tornando-se uma alternativa viável para a atualização da cartografia nacional, uma vez que as imagens obtidas por este sensor apresentam um custo acessível, quando comparadas as obtidas de outros sensores de alta resolução espacial, tais como IKONOS e GEOEYE, por exemplo.

Testes realizados pelo IBGE (2009) com imagens PRISM/ALOS na região de Itaguaí/RJ mostraram a possibilidade de geração de Mapeamento altimétrico na escala de 1:25.000 compatível com normas brasileiras quanto a sua exatidão cartográfica para aquela área de estudo.

Contudo, torna-se necessário a avaliação de estereopares obtidos em outras regiões do país bem como a verificação de métodos alternativos para avaliação destes MDEs/MDSs, através do emprego de técnicas que permitam a obtenção de dados de checagem de campo com um elevado grau de acurácia e que sejam adequadas para a avaliação de imagens com diferentes níveis de resolução. A realização de estudos no sentido de se obter Modelos Digitais com um nível de acurácia superior, também é foco de realização de estudos, principalmente no sentido de que possa ser explorado todo o potencial de mapeamento, através do uso das três visadas do Sensor PRISM/ALOS.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos gerais**

Os objetivos gerais deste trabalho visam à geração de produtos cartográficos utilizando imagens obtidas pelo sensor PRISM/ALOS, para região de Viçosa – MG, bem como a avaliação dos produtos gerados, empregando o decreto-lei 89.817/1984 através do Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC.

### **2.2. Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- . Geração de MDSs por correlação automática usando o modo *triplet* para o estabelecimento do par estereoscópico do sensor PRISM, considerando características relacionadas ao número de pontos de controle, uso da abordagem utilizada por IBGE em 2009 e combinação de visadas;

- . Avaliação dos MDSs empregando o padrão de Exatidão cartográfica – PEC, tomando como parâmetros de checagem, pontos obtidos através de levantamentos Geodésicos empregando receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*);

- . Verificação dos efeitos da inclinação do relevo e de regiões contendo sombras, áreas de vegetação e nuvens, sobre a qualidade altimétrica dos MDSs.

- . Geração de Ortoimagens utilizando a cena do sensor PRISM tomada em visada Nadir e MDSs obtidos neste trabalho que apresentaram melhores resultados e realização de sua avaliação empregando o PEC.

- . Geração de um Modelo Digital de Superfície Composto utilizando os melhores MDSs avaliados através do PEC, empregando para isso a Fórmula de Koppe, modificada por Kraus (2004) e adaptada como estimador do indicativo da localização do erro altimétrico para regiões onde não se possui dados de checagem.

### **3. JUSTIFICATIVA**

Haja vista a grande deficiência de produtos Cartográficos atualizados em escalas médias (1:25.000) hoje no Brasil, a busca por alternativas quanto à geração ou até mesmo a atualização desses produtos são de grande importância a fim de suprir parte desta necessidade.

Dentre os produtos cartográficos automatizados, o MDS apresenta-se como uma importante fonte de informação, visto que propicia análises tridimensionais, geração de ortoimagens, geração de curvas de nível, mapas de declividade, bem como o cálculo de volumes, áreas, desenho de perfis e seções transversais, etc.

A utilização de estereogramas do sensor PRISM/ALOS na geração de MDS surge como uma alternativa economicamente viável quando comparada a aerolevantamentos tradicionais e imagens orbitais de alta resolução obtidas através de satélites comerciais.

Com isso, surge também a necessidade de se efetuar um controle de qualidade rigoroso nos produtos gerados, levando-se em consideração as normas brasileiras quanto à exatidão cartográfica. Devido à necessidade crescente de obtenção de dados cartográficos atualizados e com um elevado nível de qualidade, aliadas ao surgimento de ferramentas computacionais que permitem a geração de dados espaciais com poucas operações, uma gama de usuários não especializados passam a ter acesso ao processo de confecção de uma base dados cartográficos, sendo que tais bases muitas vezes não passam por nenhum processo de validação.

Outro aspecto importante está relacionado à possibilidade de uso de indicadores de incerteza com relação à altimetria, levando-se em consideração a influência da inclinação do terreno ao se trabalhar com dados derivados de sensores ópticos, bem como a possibilidade de integração destes dados no intuito de se obter Modelos Digitais de Elevação com um elevado grau de acurácia, através da exploração do potencial de mapeamento de cada cena do sensor PRISM, sem a necessidade de um elevado número de dados de controle checagem coletados em campo.

## **4. REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1. Avanços tecnológicos e a importância de produtos cartográficos atualizados**

Informações altimétricas são necessárias ao desenvolvimento das mais diversas atividades, sejam elas a construção de uma rodovia, ferrovia, linhas de transmissão, gasoduto, oleoduto, barragem, ou o monitoramento de uma determinada característica ou fenômeno natural, como por exemplo, a ocorrência de deslizamento de uma encosta ao longo dos anos, o impacto ambiental que será causado pela inundação de uma determinada área, dentre outras aplicações.

Logo, verifica-se a existência de uma gama de usuários que necessitam de dados espaciais para o desenvolvimento de suas tarefas, dados estes que sendo acessíveis e compatíveis as necessidades relacionadas a escala e qualidade dos produtos gerados contribuem de maneira significativa para o andamento destas atividades, reforçando, então, a necessidade dos órgãos responsáveis pelo mapeamento do país em manter sua base cartográfica atualizada.

Os avanços tecnológicos que culminaram no surgimento de técnicas avançadas de aquisição de dados para o mapeamento, tais como os sensores óticos a bordo de plataformas orbitais, interferometria e perfilamento a laser trouxeram a possibilidade de se realizar mapeamento em escalas maiores a um custo bem mais acessível, quando comparadas as técnicas tradicionais como aerolevantamentos e topografia convencional.

Missões espaciais como a SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) realizada em 2000 permitiram a representação altimétrica de 80% da superfície do planeta (PINHEIRO, 2006). Os Modelos Digitais de Elevação gerados através de estereopares do satélite ASTER (ASTER GDEM) trouxeram uma contribuição significativa para a Cartografia. Embora estes dados sejam disponibilizados

gratuitamente, os mesmos não se encontram em escalas adequadas a atividades que requeiram um maior nível de detalhamento.

Com relação ao mapeamento sistemático no Brasil, ao analisar os dados da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR, 2010) quanto ao seu acervo cartográfico, verifica-se que o país possui 81% de seu território mapeado na escala de 1:250.000, 75% na escala de 1:100.000, 14% na escala de 1:50.000 e apenas 1% mapeado na escala 1:25.000, o que para um país de dimensões continentais é um valor muito baixo.

Neste contexto, o uso de sensores óticos de alta resolução como o PRISM do satélite ALOS, aliados a técnicas de coleta de campo, empregando o sistema de posicionamento global e *softwares* de processamento de imagens, surgem como alternativa a atualização do mapeamento em nível nacional.

## **4.2. Sensores capazes de obter pares estereoscópicos**

Este tópico apresenta os principais sensores capazes de gerar mapeamento através da obtenção de pares estereoscópicos, com enfoque especial ao sensor PRISM /ALOS, devido ao fato deste ser utilizado no desenvolvimento do projeto.

### **4.2.1. Sistema SPOT – Sensores HRV, HRVIR e HRG**

O Sistema SPOT (*Système Pour l' Observation de la Terrè*) teve o lançamento de seu primeiro satélite, o SPOT 1 no ano de 1986. De acordo com a CNES (2008) (*Centre National D'Etudes Spatiales*) esta plataforma possui, dentre outros sensores, o HRV (*High Resolution Visible*) com resolução espacial de 10 metros no modo pancromático apresentando a possibilidade de realização de visadas inclinadas em até 27 graus, permitindo, então, a obtenção de pares estereoscópicos. Na década de 90 foram lançados mais três satélites da série, o SPOT 2 e o SPOT 3. Em 1998 foi lançado o sensor HRVIR a bordo o SPOT 4, com resolução espacial de 10 metros no modo pancromático e 20 metros no multiespectral e no ano de 2002 foi lançado o ultimo satélite da série, do SPOT 5 apresentando o sensor HRG (*High Resolution Geometric*) com resolução espacial de 2,5 metros (pancromática) e possibilidade de obtenção de pares estereoscópicos. Dos cinco satélites lançados encontram-se em operação três, sendo eles o SPOT 2, SPOT 4 e SPOT 5.

#### 4.2.2. Plataforma Terra – sensor ASTER

Em 1999, foi lançado o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) a bordo da plataforma TERRA EOS-AM1, sendo este o primeiro satélite lançado com vistas a formar o Sistema de Observação da Terra (EOS - *Earth Observing System*) da Agencia Espacial dos Estados Unidos – NASA (WELCH *et al.*, 1998). Este sensor possui 14 bandas, variando da região do visível até o infravermelho termal, obtidas através de três subsistemas de imageamento, sendo eles o VNIR (*Visible Near InfraRed*) operando em três bandas espectrais com comprimentos de onda posicionados na região do visível e infravermelho próximo, SWIR (*Short Wave InfraRed*) operando em seis bandas espectrais e TIR (*Thermal InfraRed*) dotado de cinco bandas operando na região do infravermelho termal.

De acordo com Jensen (2009) o instrumento VNIR é composto de dois sistemas detectores, um com visada no Nadir para as três bandas espectrais (1, 2 e 3) e o outro oferecendo visada para trás (canal 3). A combinação das imagens do canal 3 para o Nadir (banda 3N) com a imagem do canal 3 com visada para trás (banda 3B) com inclinação de  $27,7^\circ$  *off-nadir*, oferecem a possibilidade de observações estereoscópicas, com uma relação base/altura de 0,6 (WELCH *et al.*, 1998). A rotação do conjunto do telescópico do instrumento VNIR é possível em um ângulo de até  $24^\circ$  em relação ao nadir.

A Figura 01 apresenta a geometria de aquisição da imagem e o tempo de aquisição de uma cena ASTER para uma visada ao longo da trajetória e a Tabela 01, adaptada de Jensen (2009), apresenta as principais características do Sensor ASTER.

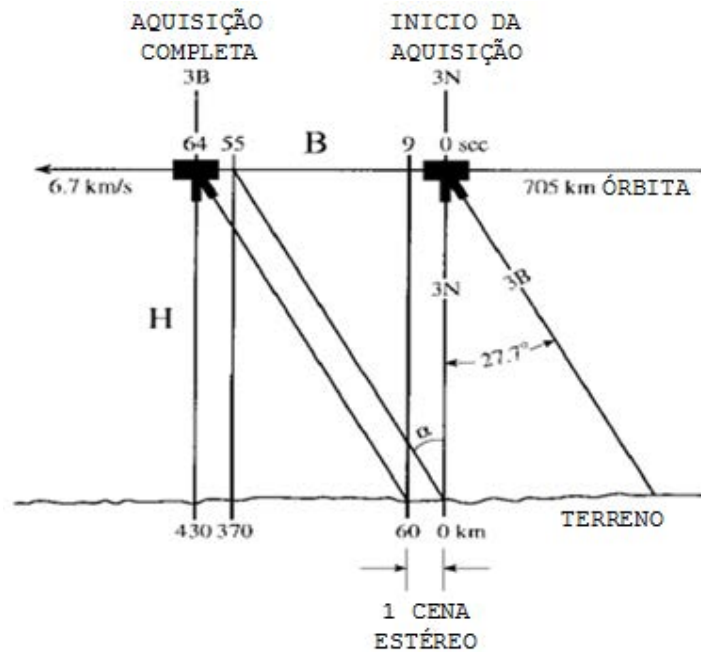


Figura 1 - Geometria de aquisição da imagem e o tempo de aquisição de uma cena ASTER para uma visada ao longo da trajetória  
 Fonte: Adaptado de Welch *et al.* (1998).

Tabela 1 - Principais características do Sensor ASTER

CARACTERÍSTICAS DO SENSOR ASTER					
Instrumento VNIR		Instrumento SWIR		Instrumento TIR	
Banda	Resolução Espectral	Banda	Resolução Espectral	Banda	Resolução Espectral
1 (nadir)	0.52 - 0.60	4	1,600- 1,700	10	8,125 - 8,475
2 (nadir)	0.63 - 0.69	5	2,145 - 2,185	11	8,475 - 8,825
3 (nadir)	0.76 - 0.86	6	2,185 - 2,225	12	8,925 - 8,275
3 (para trás)	0.76 - 0.86	7	2,235 - 2,285	13	10,25 - 10,95
		8	2,295 - 2,365	14	10,95 - 11,65
		9	2,360 - 2,430		
<b>Resolução Espacial</b>	15 metros		30 metros		90 metros
<b>Largura da faixa</b>	60 Km		60 Km		60 Km
<b>Resolução Radiométrica</b>	8 bits		8 bits		12 bits
<b>Resolução Base/ Altura de voo</b>	0,6 (entre as visadas para frente e para trás)				

Fonte: Adaptado de JENSEN, 2009.

Welch *et al.* (1998) apresentam o ASTER como capaz de mapear a superfície terrestre, permitindo a obtenção de imagens em uma faixa de 82° de latitude N a 82° de latitude S. O EOS *Data Products Handbook* Volume 1, publicado em 2000 e revisado em 2004 apresenta uma breve descrição dos produtos gerados ao longo das Missões do *Earth Observation System*, dentre eles o Modelo Digital de Elevação ASTER AST14, derivado das cenas ASTER.

Com relação à avaliação da acurácia espacial de MDEs e MDSs derivados da plataforma ASTER, Cuartero *et al.* (2004) realizaram testes em uma área na Espanha (província de Granada) com altitude variando de 300 a 2800m metros. A avaliação foi realizada utilizando 315 pontos de checagem coletados em campo através de levantamento geodésico empregando receptores GPS e correção diferencial (DGPS). A geração dos Modelos foi realizada utilizando dois *softwares* comerciais disponíveis naquela data, onde cada MDE foi avaliado separadamente e realizada uma comparação entre os resultados oriundos de cada Programa Computacional. Os melhores resultados apresentaram valores de Erro Médio Quadrático igual a 12,6m com possibilidade de uso em escalas de 1:100.000.

Toutin (2008) apresenta um trabalho mostrando diversas aplicações dos MDEs oriundos do sensor ASTER, bem como apresenta trabalhos realizados com vistas a demonstrar aplicações deste sensor nas mais diversas áreas, dentre elas a Geomorfologia (STEVENS *et al.* 2004, KAMP *et al.* 2005), Hidrologia (CHRYSOULAKIS *et al.* 2004a), geleiras (KAAB *et al.* 2003, RACOVITEANU *et al.* 2006), uso e ocupação do solo (CHRYSOULAKIS *et al.* 2004b, POLI *et al.* 2004), dentre outros.

No Brasil, vários trabalhos foram realizados apresentando aplicações de uso de MDEs oriundos de imagens ASTER, bem como avaliação da qualidade posicional, dentre eles, Camargo (2008) trabalhou no município de São José dos Campos, Estado de São Paulo com o objetivo de desenvolver uma metodologia semi-automatizada para realização de mapeamento geomorfológico. Este autor avaliou a acurácia planialtimétrica empregando normas que regem a cartografia nacional (Decreto-Lei 89.817/1984). O autor recomendou o uso de Modelos Digitais de Elevação para aplicações relacionadas a mapeamento Topográfico em escalas de 1:100.000 e menores, levando em consideração o Padrão de Exatidão Cartográfica. Outros trabalhos, também são encontrados na literatura.

#### **4.2.3. Satélite IKONOS – Sensor IKONOS II**

Também no ano de 1999 foi lançado o primeiro Satélite comercial de alta resolução, o IKONOS II. Este satélite possui sensores capazes de fornecer imagens com resolução espacial de 1 metro no modo pancromático. Segundo Luiz *et al.* (2007) os pares estereoscópicos obtidos pelo satélite IKONOS II são capazes de

gerar MDEs com resolução compatível a escala 1:10.000 atendendo as normas cartográficas brasileiras, uma vez que existe a possibilidade de obtenção de produtos com Padrão de Exatidão Cartográfica Classe A.

#### **4.2.4. Satélite QUICKBIRD – Sensor QUICKBIRD II**

Seguindo a tendência de desenvolvimento de sensores de alta resolução, foi lançado no ano de 2001 pela empresa Digital Globe o satélite comercial Quickbird, dotado do sensor Quickbird II. Este sensor opera no modo multiespectral, com resolução espacial variando entre 2,4 a 2,8 metros e no modo pancromático de 61 a 72 centímetros. De acordo com Ouverney *et al.* (2007) este sensor é capaz de imagear uma faixa de 16,5 Km, além de possuir um campo de visada lateral de 30° *offnadir*, característica esta que permite a obtenção de pares estereoscópicos.

#### **4.2.5. Satélite CBERS – Sensor CCD**

No ano de 2003, o programa CBERS (*China-Brasilian Earth Resources Satellite*), lançou o Satélite CBERS 2 oferecendo a possibilidade de visada *offnadir*, com inclinação lateral de 32° de seu espelho, permitindo a obtenção de pares estereoscópicos através do sensor CCD (*Charge-Coupled Device*). Segundo Zanardi (2006) este sensor é capaz de gerar Modelos Digitais de Elevação compatíveis a escala de 1:250.000 com Padrão de Exatidão Cartográfica Classe A. Um dos problemas apresentados pelos estereopares gerados pelo satélite CBERS é o fato de que o CBERS-2 adquire pares estereoscópicos em um período de 15 dias, bem como propicia um desgaste do equipamento e dificuldades técnicas para movimentar o espelho. Outro problema é o fato de que escalas de 1:250.000 são pequenas para se efetuar o mapeamento sistemático do território Brasileiro (Zanardi, 2006).

Tanto o satélite CBERS 2, quanto o seu sucessor (o satélite CBERS-2B lançado em 2005) não se encontram em operação. Contudo, as imagens por eles geradas até a data em que eles deixaram de operar encontram-se disponíveis gratuitamente aos usuários que podem acessá-las através do catálogo de imagens constante na página eletrônica do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), bastando para isso realizar um cadastro na referida página.

#### 4.2.6. Satélite ALOS

Em 2006, foi lançado o Satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), “DAICHI”, como é conhecido no Japão, pela Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa (JAXA, 2007a), com o objetivo inicial de ser utilizado em aplicações voltadas para a cartografia, observações regionais para promoção do “desenvolvimento sustentável”, monitoramento de desastres e exploração de recursos não renováveis (JAXA, 2007a). Seu lançamento foi realizado no dia 24 de Janeiro a bordo da plataforma espacial H-IIA #8 e se deu no Complexo de Lançamento de Yoshinobu, localizado no Centro Espacial de Tanegashima, no Japão.

O ALOS está localizado a uma altitude de 691,65 Km e possui três sensores, sendo eles o AVNIR-2, o PALSAR e o PRISM.

O Sensor AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer – Type 2*) apresenta resolução espacial de 10 metros operando no modo multiespectral com quatro bandas, sendo três na região visível do espectro eletromagnético e uma no infravermelho próximo. Sua resolução radiométrica é de 8 bits sendo este, capaz de imagear uma área de 70 km (no nadir).

O PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) é um sensor ativo e opera na região micro-ondas do espectro eletromagnético, banda L, com resolução espacial variando de 10 a 100 metros (IBGE, 2010). Este sensor é capaz de imagear faixas que podem variar de 20 a 250km de largura conforme apresentado por JAXA (2007a).

O sensor PRISM (*Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping*) apresenta resolução espacial de 2,5 metros dotado de uma banda no modo pancromático, cujo comprimento de onda varia de 0,52 a 0,77 além de apresentar uma resolução radiométrica de 8 bits.

A Figura 2 apresenta o satélite ALOS e a Figura 3 ilustra o esquema simplificado de aquisição de imagens dos três sensores a bordo deste instrumento.

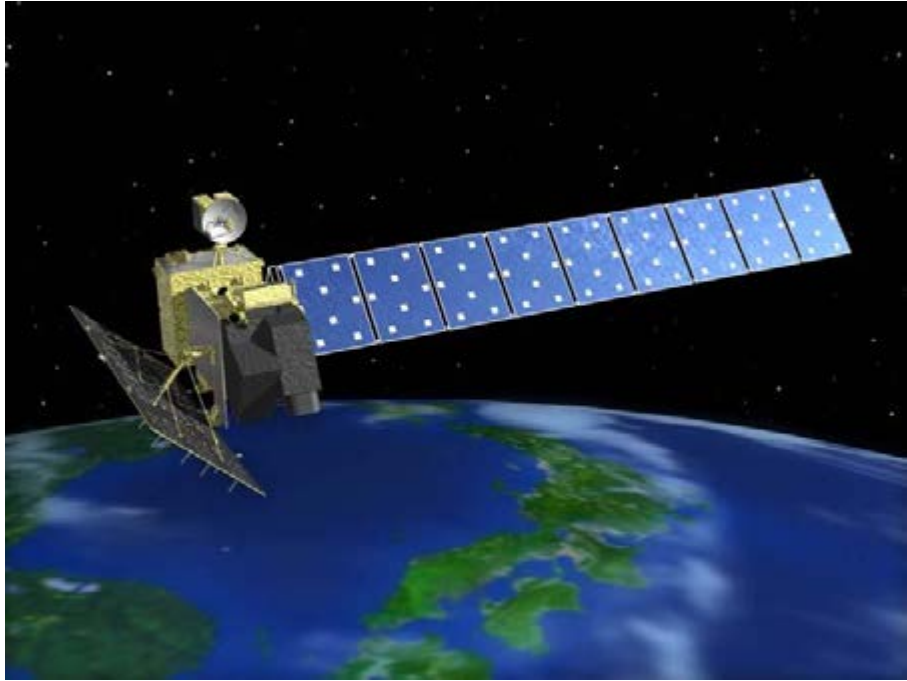
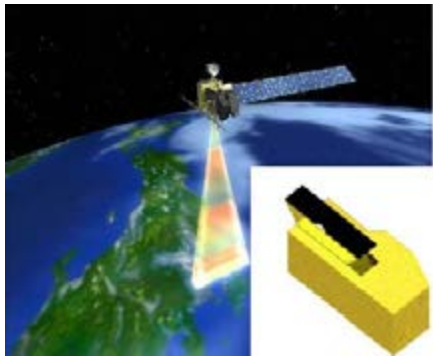
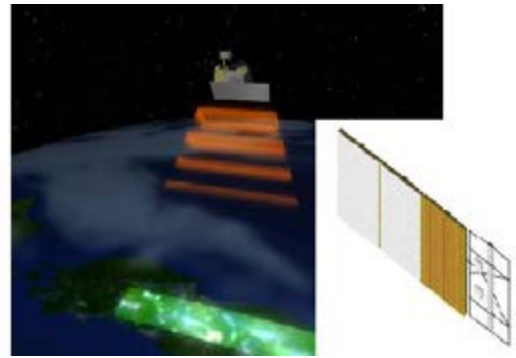


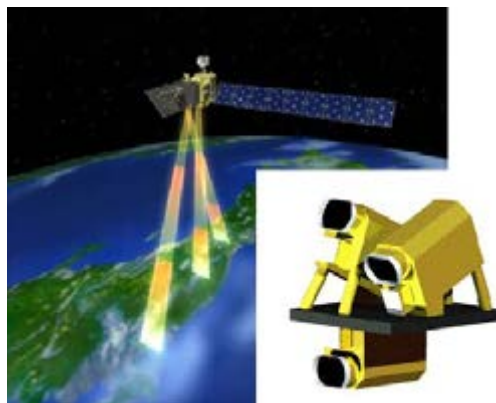
Figura 2 - Visão geral do Satélite ALOS  
 Fonte: Adaptado de JAXA (2004).



(b)



(c)



(d)

Figura 3 – Visão geral do esquema de aquisição de dados dos sensores AVNIR-2 (a), PALSAR (b) e PRISM. (c)  
 Fonte: Adaptado de JAXA (2004).

#### 4.2.6.1. O Sensor PRISM

O sensor PRISM é um sensor óptico de varredura linear (*Pushbroom*), que possibilita a obtenção de pares estereoscópicos devido ao fato deste ser dotado de três sistemas imageadores, capazes de realizar visadas frontais (*Forward*), a nadir (*Nadir*) e para trás (*Backward*). Estes imageadores permitem a obtenção de cenas de maneira simultânea, dado o fato de que os mesmos foram projetados para trabalhar de maneira independente entre si. De acordo com JAXA (2007), os detectores que oferecem visadas *Backward* e *Forward* são inclinados de 23,8 graus em relação ao nadir, proporcionando uma relação base/altura igual a 1,0. Além da inclinação da visada, este sensor também pode ser inclinado lateralmente em até 1,5 graus ( $\pm 1,5^\circ$ ).

A Figura 4 apresenta a visão geral do sensor PRISM.

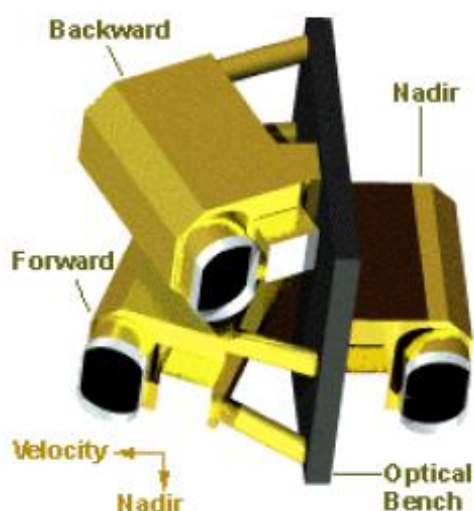


Figura 4 - Visão Geral do Sensor PRISM

Fonte: JAXA, 2010.

Segundo JAXA (2007), o sensor PRISM dispõe de nove modos de observação, através da combinação entre as três visadas. O modo 01 (modo *Triplet*) permite utilizar as visadas *Backward*, *Nadir* e *Forward* sendo capaz de imagear uma faixa de 35Km. O modo 03 (modo *Nadir*) utiliza apenas a visada *nadir*, e o sensor imageia uma faixa de 70Km.

Os modos de observação são apresentados na Tabela 02.

Tabela 2 – Modos de Observação do Sensor PRISM

SENSOR PRISM - MODOS DE OBSERVAÇÃO	
Modo 1	Modo de observação Triplet usando as visadas <i>Forward</i> , Nadir e <i>Backward</i> (Largura da faixa imageada de 35 Km)
Modo 2	<i>Nadir</i> (70Km) + <i>Backward</i> (35Km)
Modo 3	<i>Nadir</i> (70Km)
Modo 4	<i>Nadir</i> (35Km) + <i>Forward</i> (35Km)
Modo 5	<i>Nadir</i> (35Km) + <i>Backward</i> (35Km)
Modo 6	<i>Forward</i> (35Km) + <i>Backward</i> (35Km)
Modo 7	<i>Nadir</i> (35Km)
Modo 8	<i>Forward</i> (35Km)
Modo 9	<i>Backward</i> (35Km)

Fonte: Adaptado de JAXA, 2010b.

A Figura 5 (a) retirada de IBGE (2010) e 5 (b) adaptada de JAXA (2007a) apresentam os modos de observação Triplet (Modo 01) e Nadir *Backward* (Modo 02) e a Tabela 3 as principais características do Sensor PRISM.

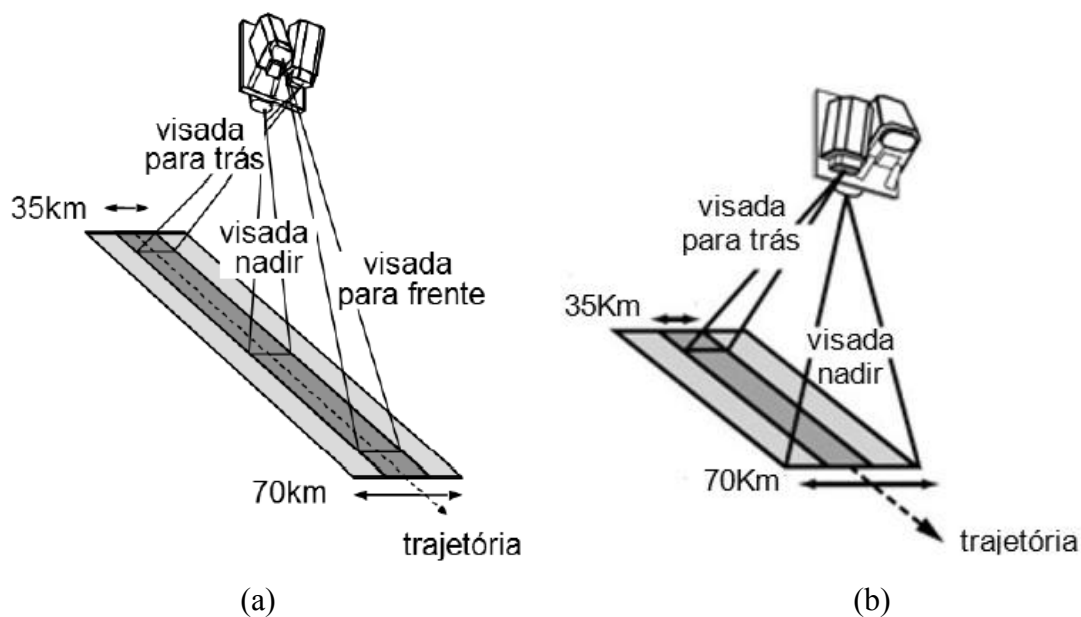


Figura 5 - Modos de Observação (a) Modo *Triplet* e (b) Modo *Nadir Backward*  
 Fonte: IBGE, 2010.

Tabela 3 - Principais características do Sensor PRISM

CARACTERÍSTICAS DO SENSOR PRISM	
Nº de Bandas	1 (Pancromática)
Comprimento de onda	0,52 ~ 0,77 microns
Nº de sensores	3 (nadir/para frente/para trás)
Distância Focal	1.939mm
Tamanho do pixel dos detectores CCD	5,5 microns (visada ao longo da trajetória) 7,0 microns (visada cruzada à trajetória)
Relação Base/Altura de voo (B/H)	1,0 (entre as visadas para frente e para trás)
Resolução espacial	2,5 m
Largura da faixa	35 km (modo triplet) 70 km (apenas nadir)
Relação Sinal/Ruído	>70
Função de Transferência de Modulação (MTF)	>0.2
Nº de detectores	28.000/banda (faixa de 70 km) 14.000/banda (faixa de 35 km)
Inclinação da visada	de -1,5 a +1,5 graus (transversal à trajetória no modo Triplet)
Resolução Radiométrica	8 bits

Fonte: Adaptado de IBGE (2010); Osawa e Hamazaki (2000).

De acordo com JAXA (2007b), cada um dos três sistemas imageadores do Sensor PRISM é dotado de um conjunto de CCDs. O Imageador responsável pela cena *nadir* apresenta 6 unidades CCDs, onde cada unidade é formada por um conjunto de 4.992 pixels distribuídos em 16.000 linhas. Para as cenas *Backward* e *Forward*, as imagens do sistema possuem 8 unidades CCD formados por um conjunto de 4928 pixels distribuídos em 16000 linhas.

Para o modo 3 *Nadir* é utilizado as 6 unidades CCD recobrando a área de 70 km. No Modo 1 *Triplet* são utilizados 4 unidades CCD para abranger uma área de 35 km e obter estereoscopia para as três visadas a serem utilizadas (SOUZA, 2011; JAXA, 2007a).

Com relação aos níveis de processamento das imagens do sensor PRISM, de acordo com a JAXA (2007a), encontram-se disponíveis aos usuários os seguintes níveis de processamento: 1A, 1B1 e 1B2.

O nível de processamento 1A consiste em imagens “brutas”, sem nenhuma calibração, onde é disponibilizado ao usuário um arquivo de imagem para cada CCD, existindo então a necessidade de processamento destes dados para os demais níveis

uma vez que estas imagens não sofreram correções geométricas e radiométricas (JAXA, 2007a).

Imagens adquiridas no nível 1B1 são imagens do nível 1A depois de realizada a correção radiométrica e adicionados os coeficientes de calibração. Neste nível de processamento é disponibilizado aos usuários um arquivo de imagem para cada CCD.

O nível de processamento 1B2 consiste em imagens do nível 1B1 depois de realizadas as calibrações radiométricas e geométricas. As imagens obtidas pelos CCDs são mosaicadas sendo disponibilizado ao usuário um arquivo da cena para cada visada realizada pelo sensor (IBGE, 2010).

As imagens 1B2 são disponibilizadas com dois níveis de correções diferentes, sendo eles o nível R (*Geo-reference data*) e o nível G (*Geo-corded data*). O nível 1B2G consiste em uma imagem pré-georreferenciada com coordenadas no sistema de Projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) empregando parâmetros de correção de sistema. Segundo IBGE (2010), as correções realizadas neste nível não levam em consideração o efeito do relevo na região. O nível de processamento 1B2R consiste em imagens com calibração geométrica e radiométrica e apresenta os *CCDs* mosaicados com coordenadas na projeção UTM armazenadas em arquivos auxiliares da imagem, sendo que seus pixels encontram-se alinhados em relação a trajetória do satélite. Neste projeto foram utilizadas imagens processadas no nível 1B2R.

Com relação ao desenvolvimento de trabalhos relacionados a avaliação de produtos altimétricos derivados de imagens PRISM no Brasil, pode se citar o desenvolvido por IBGE (2009), que consistiu na avaliação Planialtimétrica de dados PRISM para a região de Itaguaí no estado do Rio de Janeiro, que apresenta relevo montanhoso e altitude variando de 0 a 1.300 metros. Nesta análise foi realizada geração de MDEs derivados do produto 1B2R, empregando o Modelo de Toutin para realização da modelagem de sensores de alta resolução. Foi realizada também a avaliação de Ortoimagem derivada da cena *Nadir* ortorretificada com o MDS derivado da Missão SRTM com grade apresentando espaçamento igual a 90 metros, com MDE derivado de levantamento aerofotogramétrico realizado na escala 1:30.000, com grade igual a 20 metros e com MDE PRISM que apresentou melhor avaliação nos testes. Os melhores resultados obtidos, levando em consideração o PEC permitiram enquadrar os MDEs na Classe A, para a escala 1:25.000 ao se utilizar o número mínimo de sete pontos de controle associados a onze pontos de

ligação. As Ortoimagens que apresentaram melhores classificações enquadraram-se também na escala 1:25.000 classe A. Mesmo com os resultados promissores alcançados, o IBGE recomenda a realização de testes em regiões que apresentem relevo com características topográficas e tipos de cobertura vegetal e uso da terra diferentes da estudada.

Santos (2010) avaliou a acurácia planimétrica de Ortoimagens geradas da cena *Nadir* para a região de Alvinópolis no Estado de Minas Gerais empregando técnicas de estatística espacial e o PEC. As Ortoimagens foram obtidas através do uso de MDSs da Missão SRTM e ASTER GDEM (*Global Digital Elevation System*) e levaram em consideração o número e localização dos pontos de controle sobre a cena para a ortorretificação das imagens. O Modelo de correção geométrica empregado foi o de Toutin. As Ortoimagens que receberam melhores classificações se enquadraram na escala de 1:25.000. Nenhum teste relacionado a qualidade altimétrica foi realizado.

Lima *et al.* (2011) geraram MDEs para uma área urbana de Manaus no estado de Amazonas, utilizando uma cena 1B2R. Estes autores trabalharam no sentido de estimar os coeficientes polinomiais racionais (RPCs), empregando o *Software* comercial ENVI 4.5 e pontos de controle derivados do Sensor ASTER. Segundo os autores os resultados não se mostraram satisfatórios, devido aos métodos empregados para geração.

Oliveira (2011) estudou o emprego de três abordagens de correção geométrica para a obtenção de MDSs do Sensor PRISM, bem como a influência do uso de diferentes estratégias de correlação de imagens, número de pontos de controle e espaçamento da grade dos MDSs sobre a acurácia posicional. Este estudo foi realizado na região de Resende, no estado do Rio de Janeiro, abrangendo em torno de seis municípios, cujas altitudes variam de 340 a 1.900 metros no sentido de avaliar a qualidade geométrica e a possibilidade de mapeamento planialtimétrico das mesmas. Para geração dos MDSs, empregou-se a abordagem MOA (Modelo Rigoroso baseado em parâmetros de órbita e altitude – Modelo de Toutin), a abordagem MRPC que faz uso dos RPCs da cena PRISM e a abordagem MPR (Modelo Rigoroso baseado em posição-Rotação). Os resultados obtidos permitiram verificar a qualidade planimétrica das cenas PRISM visto que as melhores Ortoimagens geradas se enquadraram na Classe A do PEC para a escala 1:25.000, associadas ao uso de dez pontos de controle para a abordagem MOA, 15 para a MPR e 2 para a MRPC. Os

MDSs que apresentaram melhores resultados de acordo com o PEC para a escala 1:25.000 foram gerados com 17 pontos de controle ao se utilizar a abordagem MOA (PEC Classe C) e dois pontos de controle ao se utilizar a abordagem MRPC (PEC Classe A).

Dos trabalhos apresentados, estudos relacionados a influência do aumento de pontos de controle utilizando uma grande amostragem de pontos, seus efeitos na geração de MDSs ao se empregar o Modelo de Toutin, bem como a integração entre os melhores MDSs obtidos em cada abordagem não foram estudados. Além disso, a avaliação de MDSs para região da Zona da Mata de Minas Gerais não foram realizados, assim como o desenvolvimento de estudos em regiões que apresentem variações de altitude da ordem de trezentos metros, sendo estes os elementos motivadores da realização deste trabalho.

#### **4.2.7. Satélite GeoEye – Sensor GeoEye-1**

O satélite mais recente lançado com capacidade de obtenção de imagens adequadas ao mapeamento altimétrico foi o GeoEye-1 fabricado pela empresa GeoEye, no ano de 2008. O sensor PAN operando no modo pancromático gera imagens com resolução espacial de 41 centímetros (de uso exclusivo do governo dos Estados Unidos) e 50 centímetros para os demais usuários. A faixa imageada por este sensor é de 15,2 Km. Sua capacidade de visada lateral é de até 60 graus, segundo dados do fabricante.

#### **4.3. Distorções Geométricas em imagens orbitais**

Segundo Toutin (2004), a fonte das principais distorções geométricas obtidas em imagens orbitais variam de acordo com fatores relacionados à plataforma, o sensor e o campo de visada. Outros elementos como efeitos atmosféricos, relevo, movimentos de rotação da terra, acurácia dos sistemas de medição também acrescentam distorções em imagens. Ainda de acordo com Toutin (2004), as fontes de distorção podem ser agrupadas em duas categorias: o sistema de aquisição (plataforma, sensor e instrumentos auxiliares) e o objeto que é observado (atmosfera ou terra).

### 4.3.1. Distorções relacionadas a Terra

Com relação as distorções geométricas referentes a um objeto visado (Terra), de acordo com Marotta (2008), estas podem estar associadas à rotação, relevo e a esfericidade.

#### 4.3.1.1. Distorções relacionadas à rotação

As distorções relacionadas a rotação estão associadas ao movimento de rotação simultâneo entre o satélite e a Terra. Este efeito provoca deslocamento entre varreduras consecutivas, devido ao movimento terrestre de oeste para leste, no momento de aquisição da área de imageamento, sendo efeito comum a sensores de varredura (DEBIASI, 2008). De acordo com Marotta (2008) este deslocamento depende da velocidade relativa do satélite, da velocidade de rotação da terra e do comprimento da janela de imageamento. O efeito é apresentado na Figura 6.

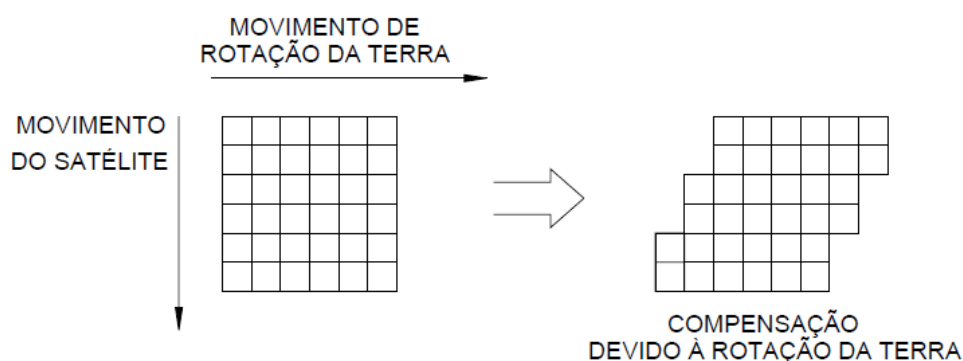


Figura 6 - Efeito de rotação da terra no tempo de aquisição da imagem

Fonte: Marotta (2008).

#### 4.3.1.2. Distorções relacionadas ao relevo

A distorção relacionada ao relevo, tem por influência fatores relacionados a resolução espacial, largura do campo de visada e inclinação da visada (MACHADO e SILVA, 2007). Ainda segundo este autor, quanto maior a resolução, maior a degradação causada pelo relevo, sendo o mesmo válido para a largura do campo de visada do sensor. Em imagens tomadas no Nadir, este efeito pode ser desprezado, dependendo da qualidade geométrica das imagens. Em sensores que tomam imagens quadro a quadro, esta distorção tende a diminuir para grandes altitudes de voo, sendo que objetos tomados sobre o centro da imagem apresentam deslocamento próximo de

zero, sendo este aumentando, à medida que se afasta de seu centro (MAROTTA, 2008). A distorção relacionada ao relevo é de difícil modelagem, dado o fato da impossibilidade de geração de modelos matemáticos que possam representar de maneira mais fidedigna possível o relevo terrestre, havendo a necessidade de uso de Modelos Digitais de Elevação ou Modelos Digitais de Superfície para sua correção. Devido a isso, recorre-se ao processo de Ortorectificação (MATSUOKA, 2006).

A Figura 07 apresenta os efeitos do emprego da Ortorectificação Digital em uma imagem.

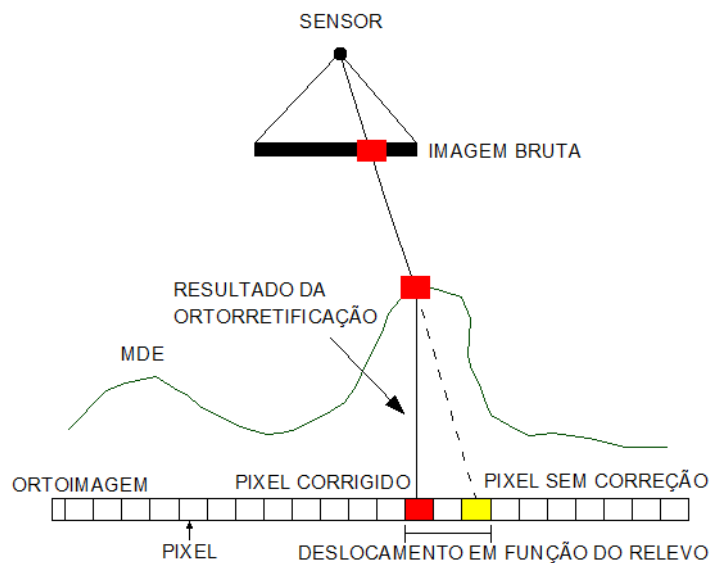


Figura 7 - Efeito do emprego da Ortorectificação Digital em uma imagem

Fonte: Adaptado de PCI (2007).

Com relação ao processo de ortorectificação de imagens, segundo Gripp Jr (2009), uma imagem se encontrará ortorectificada, se forem realizadas as correções relacionadas ao relevo, e os elementos que são visualizados sobre esta imagem encontrarem segundo linhas de visadas perpendiculares ao plano da mesma,. Ainda segundo este autor, o processo de ortorectificação digital, consiste na correção de uma imagem devido, principalmente as distorções causadas pela posição do satélite, pela superfície física da Terra (o que é realizado através da correção das distorções relacionadas ao relevo), a curvatura da terra e pela projeção cartográfica.

De acordo com Debiasi (2008) o processo de obtenção de uma Ortoimagem Digital é realizado após a escolha do método de ortorectificação a ser utilizado (mapeamento direto), onde será associado a uma matriz, os valores referentes à altitude de cada pixel constante no MDE que se está utilizando, no intuito de efetuar a correção dos erros relacionados a elevação do terreno. Terminada esta etapa, o

passo seguinte, consiste na associação dos valores dos níveis de cinza de cada pixel da ortoimagem, a partir da imagem original, onde será empregado um método de reamostragem dos pixels para preenchimento da matriz que dará origem a ortoimagem resultante.

A Figura 8 apresenta os efeitos da transformação realizada através da relação entre o Sistema de Coordenadas da imagem (linha e coluna) e o Sistema de Coordenadas do Terreno (X, Y).

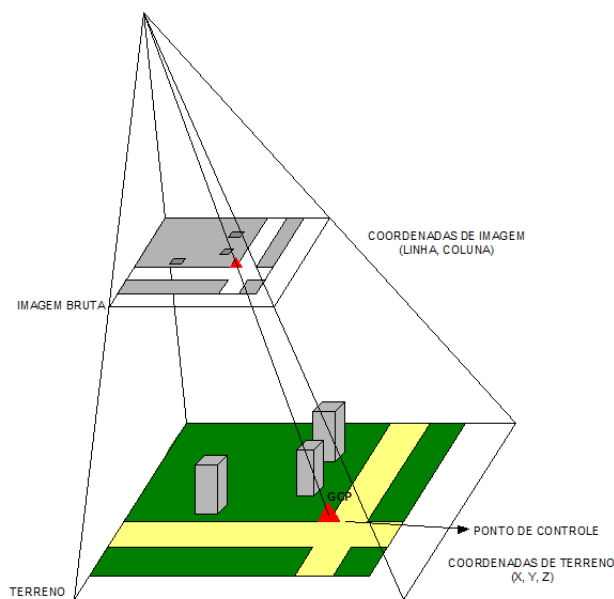


Figura 8 - Relação entre o Sistema de coordenadas imagem e o Sistema de coordenadas no terreno

Fonte: Adaptado de PCI (2007).

#### 4.3.1.3. Distorções relacionadas a esfericidade da terra

As distorções relacionadas a esfericidade da terra, ocorrem devido ao fato de que a terra não é uma superfície plana, sendo que, segundo Marotta (2008), devido ao sensor imagear a superfície terrestre em uma perspectiva cilíndrico-cônica, este imageamento irá causar a associação de cada pixel a uma área da terra com tamanho diferente. Esta distorção se acentua ao se utilizar visadas laterais, ou seja, a medida que o pixel se afasta do nadir, sendo também conhecida como distorção panorâmica e afeta principalmente imagens tomadas de sensores com amplo campo de visada, apresentando pequenos valores no centro da imagem e grandes valores nas bordas

(MACHADO E SILVA, 2007). Ainda segundo este autor, para sensores de média resolução em visada oblíqua a influência desta distorção se apresenta de forma mais homogênea. De acordo com Gripp Jr (2009), para imagens que abrangem uma pequena porção da superfície terrestre, não há necessidade de levar este efeito em consideração, sendo que uma das formas de realizar a correção deste efeito consiste em adotar um elipsoide como modelo representativo para a terra (MACHADO E SILVA, 2007).

#### 4.3.2. Distorções relacionadas ao sistema de aquisição

Com relação as distorções referentes ao sistema de aquisição, as principais causas ocorrem durante o imageamento, e estão relacionadas à variação de altitude, velocidade e atitude (movimento rotacional do sensor em torno de seu centro de massa, expressa através dos ângulos de rolagem (*roll*), arfagem (*pitch*) e guinada (*yall*). Estas distorções podem ser modeladas empregando modelos físicos ou modelos generalizados (DEBIASI, 2008).

Modelos físicos, de acordo com Toutin (2004), são aqueles que levam em consideração a geometria de aquisição da cena, usando os dados de efemérides (velocidade e posição), atitude e a altimetria, através da correção do deslocamento devido ao relevo. Estes modelos se baseiam em princípios fotogramétricos, tomando como ponto de partida as Equações de Colinearidade. Contudo, o emprego deste modelo torna-se muitas vezes inviável, uma vez que os parâmetros necessários não são disponibilizados pelas empresas que desenvolvem os sistemas sensores.

As Equações de Colinearidade segundo (LI *et al.*, 2005) são definidas através do relacionamento entre o ponto de controle situado sobre a imagem (espaço imagem), o ponto situado sobre o terreno (espaço objeto) e o centro de projeção (câmera). Estes pontos estarão situados sobre uma linha reta (sendo então admitida a condição de colinearidade).

$$x = (-f) \cdot \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

$$y = (-f) \cdot \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

onde:

$x$  e  $y$  são as coordenadas de um ponto no espaço imagem;

$(X, Y, Z)$  são as coordenadas de um ponto no espaço objeto;

$(X_0, Y_0, Z_0)$  é a projeção central das coordenadas (centro de perspectiva) no sistema de coordenadas do terreno;

$f$  é a distância focal;

$m_{ij}$  são os elementos da matriz de rotação.

Os elementos da matriz de rotação descritos por Souza (2011) são apresentados a seguir.

$$R_x(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \text{sen}(\omega) \\ 0 & -\text{sen}(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & -\text{sen}(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_z(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & \text{sen}(\kappa) & 0 \\ -\text{sen}(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para uma rotação realizada em  $\omega, \varphi, \kappa$ :

$$R = R_z(\kappa) \cdot R_y(\varphi) \cdot R_x(\omega) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde:

$$m_{11} = \cos(\varphi) \cdot \cos(\kappa);$$

$$m_{12} = \cos(\omega) \cdot \text{sen}(\kappa) + \text{sen}(\omega) \cdot \text{sen}(\varphi) \cos(\kappa);$$

$$m_{13} = \text{sen}(\omega) \cdot \text{sen}(\kappa) - \cos(\omega) \cdot \text{sen}(\varphi) \cos(\kappa);$$

$$m_{21} = -\cos(\omega) \cdot \text{sen}(\kappa);$$

$$m_{22} = \cos(\omega) \cdot \cos(\kappa) - \text{sen}(\omega) \cdot \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\kappa);$$

$$m_{23} = \text{sen}(\omega) \cdot \text{sen}(\varphi) - \cos(\omega) \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\kappa);$$

$$m_{31} = \text{sen}(\varphi);$$

$$m_{32} = -\text{sen}(\omega) \cdot \cos(\varphi);$$

$$m_{33} = -\cos(\omega) \cdot \cos(\varphi).$$

Os modelos generalizados, também conhecidos como modelos empíricos, não consideram parâmetros físicos relacionados ao sistema de aquisição das imagens. Debiasi (2008) destaca o fato destes modelos poderem ser implementados em *softwares* comerciais. Toutin (2004) classifica os modelos generalizados como modelos bidimensionais, tridimensionais e racionais tridimensionais. Os modelos racionais polinomiais (generalizados) podem requerer ou não pontos de controle no terreno, para a orientação das imagens. Esta não-dependência de pontos de controle está condicionada ao uso de coeficientes polinomiais racionais (RPCs) que são comercializados pelos fornecedores das imagens.

#### **4.4. Fotogrametria**

Segundo Wolf e Dewitt (2004), a Associação Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* – ASPRS) define o termo Fotogrametria como a arte, a ciência e tecnologia de se obter informações confiáveis sobre objetos e o ambiente, através dos processos de gravação, medição e interpretação de fotografias, imagens, padrões de radiação eletromagnética e outros elementos.

Embora o termo Fotogrametria tenha sido estendido à análise de outras fontes de dados, tais como imagens, digitais e medição empregando *Scanners* à Laser, as fotografias ainda são as principais fontes de dados a essa área.

IBGE (2011) define Fotogrametria como a ciência que trata da obtenção de medições através de fotografias, de uma forma mais próxima possível da realidade. O termo mapeamento consiste no uso da ciência, com a finalidade de elaboração de cartas topográficas, através do emprego de processos e métodos matemáticos e físicos, tomando como base fotografias e imagens orbitais, utilizando-se para isso instrumentos com alto grau de sofisticação.

A extração de informações altimétricas de fotografias aéreas ou imagens orbitais é realizada através do uso de duas cenas obtidas sobre um objeto, tomadas de dois pontos de vista diferentes, sendo este o princípio da paralaxe estereoscópica. Segundo Wolf e Dewitt (2004) a paralaxe estereoscópica ou paralaxe em x, pode ser definida como o deslocamento aparente na posição de um objeto em relação a um sistema de referencia, causado pelo deslocamento na posição de observação. Logo, ao se trabalhar com imagens aéreas, existe a necessidade de uma área de

sobreposição entre as cenas para a obtenção de elementos derivados da altimetria terrestre.

A Figura 9 apresenta o efeito da paralaxe estereoscópica para duas fotos verticais, ao se tomar os pontos A e B sobre o terreno.

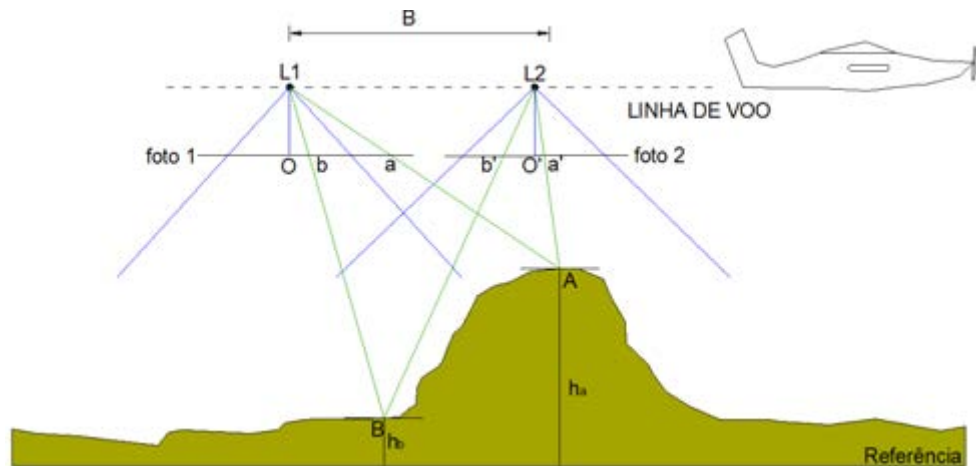


Figura 9 - Paralaxe estereoscópica de duas fotos verticais

Fonte: Adaptado de Wolf e Dewitt (2004).

Da Figura 9 é possível verificar que os pontos A e B encontram-se sobre as fotos tomadas nos pontos L1 e L2. Estes pontos foram tomados sobre a e b na foto da esquerda e sobre a' e b' na foto da direita. Logo, os pontos a (foto 1) e a' (foto 2) são homólogos, assim como os pontos b (foto 1) e b' (foto 2). Como o ponto A se encontra mais alto que o ponto B, a paralaxe do ponto A é maior que a paralaxe do ponto B. A Figura 10 apresenta as fotos em sobreposição.

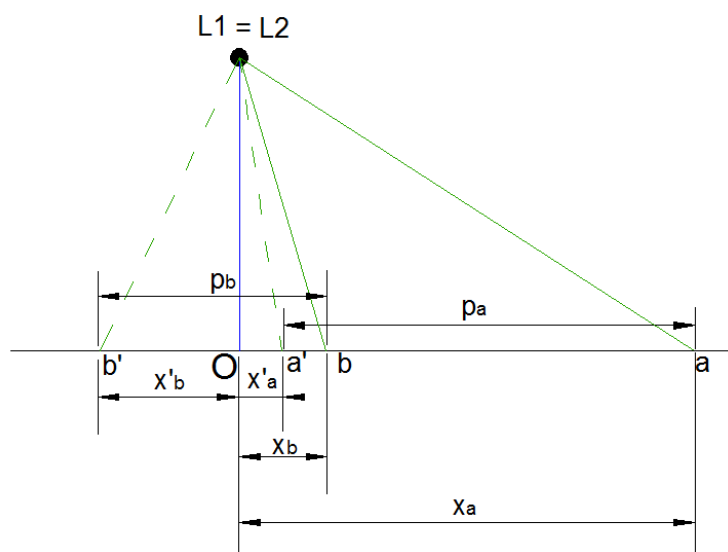


Figura 10 - Sobreposição das fotografias apresentadas na Figura 9

Fonte: Adaptado de Wolf e Dewitt (2004).

Os termos  $p_a$  e  $p_b$  da Figura 10 representam os valores obtidos para a paralaxe nos pontos a e b, que são obtidos através da diferença entre as coordenadas  $x_a$  e  $x_a'$  ( $p_a$ ) e  $x_b$  e  $x_b'$  ( $p_b$ ). Logo, através da diferença de paralaxe entre os pontos a e b é possível obter a diferença de nível entre os pontos A e B empregando Equações específicas a este fim.

A paralaxe para o ponto  $a$  pode ser calculada através da Equação 7 que leva em consideração as coordenadas obtidas no espaço objeto. (WOLF e DEWITT, 2004).

$$p_a = (x_a - x_a') = \frac{B \cdot f}{(H - h_a)} \quad (7)$$

onde:

$p_a$  é a paralaxe do ponto fotogramétrico (neste caso o ponto a);

$f$  é a distância focal;

$B$  é a aerobase;

$H$  é a altitude de voo (ou a altitude do satélite);

$h_a$  é a altitude do ponto a.

A paralaxe para o ponto  $b$  seria dada por:

$$p_b = (x_b - x_b') = \frac{B \cdot f}{(H - h_b)} \quad (8)$$

onde:

$h_b$  é a altitude do ponto b.

Realizando a diferença entre as Equações (7) e (8), obtém-se a Equação 9.

$$h_a = h_b + \frac{(p_a - p_b)}{p_a} \cdot (H - h_b) \quad (9)$$

Conhecendo-se a altitude de um ponto de referência (ponto  $b$ ), a Equação 9 permite o cálculo da altitude de um ponto desconhecido (ponto  $a$ ), através da diferença de paralaxe entre os dois pontos.

#### 4.5. Construção de pares epipolares

Um par epipolar consiste em um par estéreo reprojeto, de maneira que as imagens da esquerda e direita estejam orientadas entre si e os objetos correspondentes entre as imagens, encontram-se ao longo de um eixo em comum. (PCI, 2007). O uso de imagens epipolares permite o aumento na velocidade do processo de correlação entre as imagens, além de reduzir a possibilidade de erros na etapa de estéreo correlação (WOLF E DEWITT, 2004).

Um plano epipolar, segundo Costa (2006), consiste em um plano definido pelos centros perspectivos e um ponto. Uma linha epipolar conjugada é obtida através da interseção do plano epipolar com o plano das imagens. Logo, um ponto situado em uma das imagens do par epipolar terá o seu homólogo situado sobre a linha epipolar conjugada (COSTA, 2006).

A Figura 11 apresenta a geometria epipolar de um par de imagens, onde o plano epipolar pode ser visto através dos pontos L1 e L2 (centros perspectivos) e o ponto A situado sobre o terreno. Os pontos  $a_1$  e  $a_2$  encontram-se sobre o espaço imagem e a linha que passa sobre eles, consiste na linha epipolar esquerda (para  $a_1$ ) e a linha epipolar direita (ponto  $a_2$  homólogo ao  $a_1$ ). A linha epipolar conjugada liga os pontos  $a_1$  e  $a_2$ .

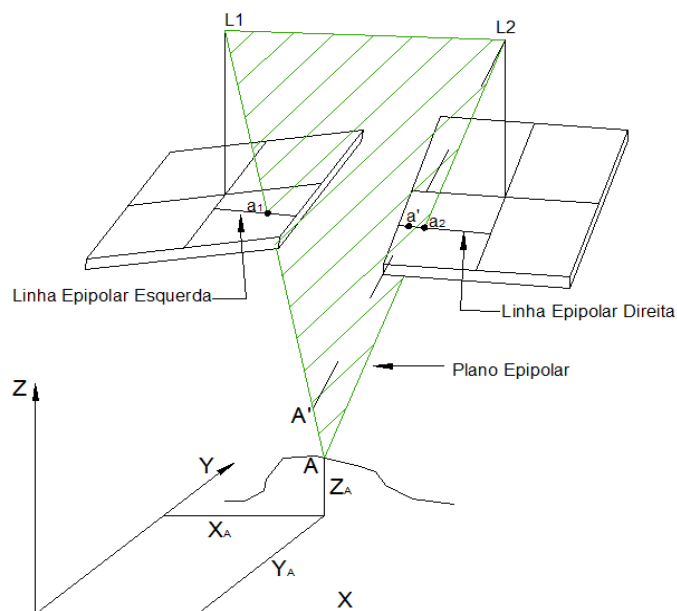


Figura 11 - Geometria epipolar de um estereopar

Fonte: Adaptado de Wolf e Dewitt (2004).

Conhecendo-se os parâmetros de orientação relativa e realizada a orientação, dado um ponto pertencente as duas imagens, identificado um ponto em uma imagem, a linha epipolar que passa pelo ponto homólogo é determinada (COSTA, 2006). A Geração de imagens epipolares segue o principio das Equações de Colinearidade.

Após a geração das linhas epipolares, realiza-se o processo de Normalização das imagens, visto que as linhas epipolares não são paralelas ao eixo x e cujo objetivo é remover a paralaxe em sobre o eixo y para permitir a visualização adequada do estéreo modelo (COSTA, 2006). As imagens são vistas na Figura 12.

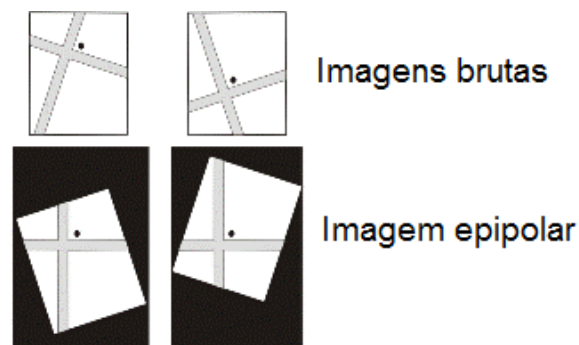


Figura 12 - Imagem bruta e imagem epipolar

Fonte: Retirado de PCI (2007).

#### **4.6. Modelagem Digital do Relevo**

Dentre as definições da representação tridimensional digital de uma área da superfície terrestre, existem algumas nomenclaturas mais usuais, que são utilizadas com o intuito de distinguir as informações contidas nesta superfície. Dentre elas podem ser citadas o Modelo Digital do Terreno (MDT), Modelo Numérico do Terreno (MNT), Modelo Digital de Elevação (MDE) e o Modelo Digital de Superfície (MDS).

##### **4.6.1. Relação entre MDT, MNT, MDE e MDS**

Um Modelo Digital de Terreno é uma representação matemática da distribuição espacial de uma determinada característica vinculada a uma superfície real (Zanardi 2006). Um MDT é utilizado para armazenar informações relacionadas a uma determinada superfície. Estas características podem ser dados topográficos, batimétricos, de temperatura, geofísicos, dentre outros. Nos dias atuais, com a

evolução da informática, a representação da terra usando MDT trouxe uma gama de possibilidades de aplicações, dentre elas, pode-se citar aplicações nas áreas de Hidrografia, Topografia, geração de mapas de declividades, ortorretificação de imagens, dentre outros.

Com relação ao conceito de Modelo Digital de Terreno existe a confusão do termo MDT com outros termos, dentre eles os mais comuns MNT, MDE e MDS. Embora não haja uma definição exata na literatura sobre cada um destes termos, as definições apresentadas a seguir serão usadas neste trabalho visando a padronização destes termos.

Um MNT leva em consideração não só informações relacionadas a topografia, mas também informações relacionadas a outras áreas. De acordo com Felgueiras e Câmara (2001), um MNT pode conter dados geológicos, meteorológicos, de relevo, dentre outras informações relacionadas a distribuição de um determinado fenômeno espacial na superfície terrestre. Este modelo não leva em consideração áreas contendo edificações ou florestas, tomando como base apenas as áreas onde o ponto amostrado toca a superfície do terreno. Esta definição de MNT é semelhante a definição de MDT apresentada por Zanardi (2006), sendo que neste trabalho as terminologias MDT e MNT serão usadas como sinônimos.

Um MDE de acordo com Li *et al.* (2005) tem uma definição análoga ao conceito de MNT sob o ponto de vista da modelagem, onde encontram-se representadas apenas as informações relacionadas a superfície do terreno (desconsiderando áreas edificadas e florestas). Contudo, o MDE trabalha somente com dados de altitude, enquanto o MDT tem uma abrangência mais ampla. Com isso, o MDE é uma particularização do MDT.

Com relação ao MDS, este leva em consideração não só a superfície do terreno propriamente dita, mas também as copas das árvores (áreas vegetadas) e as edificações presentes em uma imagem. Com o advento de tecnologias como a interferometria e levantamentos com perfilamento a Laser, estes modelos passaram a ser bastante empregados (GALINDO, 2008). Neste trabalho, utilizou-se o termo Modelo Digital de Superfície devido ao fato de que nenhuma técnica de remoção de construções e áreas arborizadas foi empregada.

#### **4.6.2. Construção de um Modelo Digital de Elevação e/ou Superfície**

Para a construção de um modelo digital que represente a altimetria terrestre, é necessário pontos de controle, que podem ser obtidos no terreno, através de Topografia Clássica, posicionamento por satélites ou Fotogrametria. Estes pontos servirão de base, para amostragem do terreno através da geração de grades que podem ser regulares (retangulares) ou irregulares (triangulares). O INPE (2010) define grade retangular como um modelo digital que mais aproxima superfícies através de um poliedro com faces regulares e grade triangular aquela em que cada polígono que forma uma face do poliedro é um triângulo, permitindo que as feições morfológicas importantes, como cristas e vales, sejam preservadas.

Com relação a extração automática de Modelos Digitais de Elevação e ou Superfície, a coleta de pontos de controle necessários a realização da orientação das imagens consiste em uma etapa fundamental. A acurácia dos pontos a serem levantados em campo deve ser compatível à necessidade de realização do projeto. O uso de pontos de ligação (*tie points*) tem um papel importante no processo de extração e pode ser definido, segundo Uchiyama *et al.* (2008), como um ponto identificado claramente em duas ou mais imagens e que não possui coordenadas conhecidas sobre o terreno. Estes pontos podem ser utilizados como extensão de pontos de controle sobre áreas onde não se possui pontos de controle (PCI, 2007).

Uma vez definidos, coletados e processados os pontos de controle, o passo seguinte na geração de um modelo digital consiste na interpolação destes valores estimando-os para as regiões onde não se conhece o verdadeiro valor da altitude. Logo, métodos de interpolação são necessários para que se possa estimar o valor desconhecido. Dentre os principais métodos pode se citar o método da triangulação, inverso da distância ponderado, vizinho mais próximo e krigagem.

#### **4.6.3. Correlação de imagens no processo de geração Automática de Modelos Digitais de Elevação e/ou Superfície**

Através do princípio da Paralaxe Estereoscópica, pode-se calcular os valores relacionados a elevação de um determinado ponto disposto sobre o terreno. O cálculo manual desta elevação, realizado para cada ponto, demanda tempo, dada a necessidade de identificação de pontos homólogos em cada uma das imagens do par

estereoscópico. A localização automática destes pontos torna-se conveniente, dada a agilidade e economia de tempo no processo.

De acordo com Wolf e Dewitt (2004), os *softwares* computacionais trabalham na localização de pontos sobre um par estéreo através do processo de correspondência entre imagens digitais. Ainda segundo estes autores, as técnicas de correspondência de imagens podem ser divididas em três métodos, sendo eles os métodos baseado em áreas, métodos baseado em feições e métodos híbridos.

Métodos baseados em áreas realizam a correspondência na imagem através da realização de uma comparação numérica dos números digitais dos pixels (níveis de cinza) de cada cena, onde a mesma é dividida em pequenas sub-matrizes e de acordo com a similaridade entre os valores de nível de cinza, os valores de altitude são obtidos. Segundo ERDAS Field Guide (2008), os critérios e uso de técnicas de correlação cruzada e correção empregando o método dos mínimos quadrados são os mais utilizados ao se utilizar a abordagem baseada em área. De acordo com Costa (2006), métodos baseados em áreas são os mais utilizados em fotogrametria.

Os Métodos de Correspondência baseados em feições são, de acordo com Wolf e Dewitt (2004), mais difíceis de serem aplicados e envolve a extração de feições sobre as cenas. Estas feições podem ser bordas, linhas, polígonos, ou regiões. É realizada uma comparação baseada nas características das feições, encontradas em cada imagem.

Os Métodos Híbridos envolvem a combinação entre as duas abordagens envolvendo o pré-processamento das cenas para realçar feições (bordas). Uma vez identificadas as feições é empregado o Método de correspondência baseado em área.

Por ser o método baseado em área mais utilizado e por ser este empregado pelo *Software* PCI Geomatica e utilizado para desenvolvimento deste trabalho, é descrita a seguir a técnica de correlação de imagens para extração automática de MDE/MDS.

De acordo com Costa (2006), o processo de correlação de imagens compara a distribuição dos valores de nível de cinza de uma janela de referência (sub-matriz) sobre a imagem da esquerda que é denominada *template* com todas as janelas de pesquisa possíveis dentro de uma janela de busca que é delimitada na imagem da direita em que se deseja encontrar um padrão similar ao recorte da imagem de referência. Wolf e Dewitt (2004) citam que o método mais simples de se empregar o Método de Correspondência baseado em área, consiste na Técnica conhecida como

Correlação Cruzada Normalizada. Esta técnica consiste no emprego das mesmas operações de regressão linear utilizada em estatística. Um conjunto de par ordenado (abscissas e ordenadas) é analisado estatisticamente para determinar o ajuste do conjunto de pontos em relação a uma reta. Neste processo os valores mais prováveis são determinados para os parâmetros (declividade e interseção) de uma melhor linha de ajustamento através dos pontos.

O Coeficiente de Correlação pode ser calculado através da Equação 10 (WOLF e DEWITT, 2004) apresentada a seguir.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(A_{ij} - \bar{A})(B_{ij} - \bar{B})]}{\sqrt{[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A_{ij} - \bar{A})^2] [\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (B_{ij} - \bar{B})^2]}} \quad (10)$$

onde:

$\rho$  é o Coeficiente de Correlação;

m e n são os números de linhas e colunas respectivamente;

$A_{ij}$  é o nível de cinza do pixel linha i, coluna j da sub-matriz A;

$\bar{A}$  é a média do valor de nível de cinza de todos os pixels da sub-matriz A;

$B_{ij}$  é o nível de cinza do pixel linha i, coluna j da sub-matriz B;

$\bar{B}$  é a média do valor de nível de cinza de todos os pixels da sub-matriz B.

O Valor do Coeficiente de Correlação pode variar de -1 até +1, sendo o valor +1 indicando correlação perfeita (correspondência exata) e o valor -1 indicando correlação negativa. O Coeficiente de Correlação igual a zero indica ausência de correlação.

A Figura 13 apresenta o processo de cálculo do coeficiente de correlação de imagens, tomando uma janela de busca.

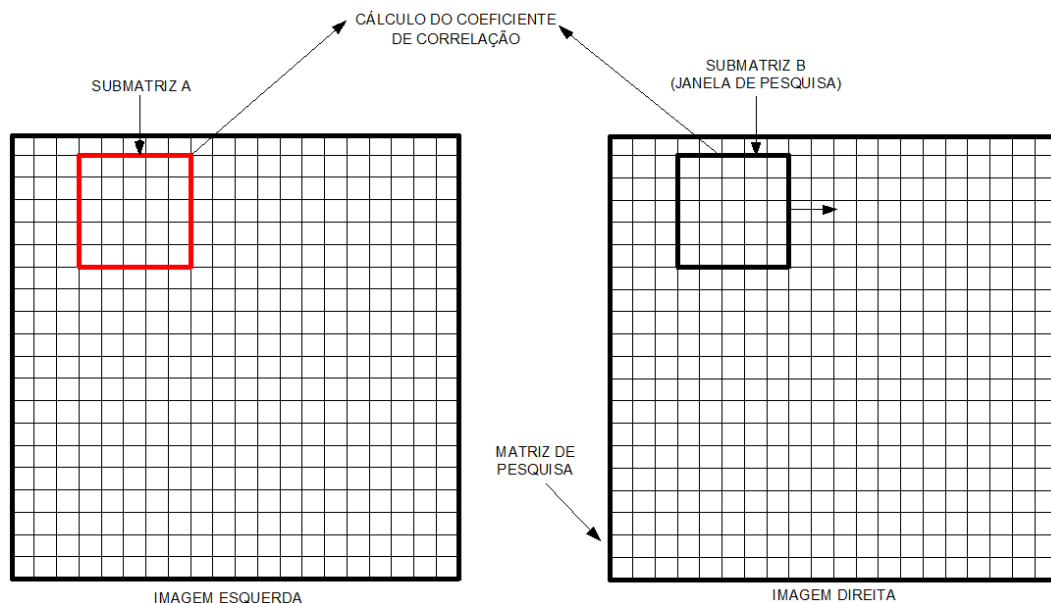


Figura 13 - Determinação do Coeficiente de Correlação

Fonte: Adaptado de Wolf e Dewitt (2004).

A correspondência digital de imagens por correlação pode ser realizada da seguinte forma.

Uma candidata a submatriz da imagem da esquerda é escolhida (submatriz A) e a pesquisa de correspondência é realizada na imagem da direita. Uma vez que a localização exata na imagem da direita não é inicialmente conhecida, uma matriz de pesquisa é selecionada com dimensões maiores que a submatriz da imagem esquerda. Uma abordagem empregando janelas móveis é usada comparando a submatriz candidata da imagem da esquerda com a localização possível a da direita (submatriz B). A cada localização da matriz da imagem da esquerda, o coeficiente de correlação é computado de maneira similar através do processo de convolução resultando na matriz de correlação. Todos os coeficientes são calculados, o maior valor de correlação é testado para verificar se ele encontra acima da vizinhança. Se este valor excede o valor da vizinhança, a localização dentro da matriz de pesquisa é considerada para a correspondência.

Segundo PCI (2007) o uso de um par epipolar exerce grande influência na velocidade de cálculo da correlação, visto que permite a redução do espaço da janela de busca. O emprego de um par epipolar após realização do processo de normalização reduz o esforço computacional gasto para a geração além de minimizar erros no processo de correspondência entre os pixels.

Outro fator levado em consideração por *softwares* comerciais como o PCI *Geomatica* e *Leica Photogrammetry Suite* ao realizar o processo de correspondência de imagens, consiste na construção de pirâmides com a finalidade de reduzir o esforço computacional. Segundo Heipke (1996) este processo consiste na obtenção de um conjunto de imagens com diferentes níveis de resolução obtidos a partir da imagem original, onde o nível mais alto corresponde a aquele de menor resolução e o nível mais baixo o de maior resolução. Logo as pirâmides em imagens são basicamente arquivos *raster* com o objetivo de reduzir a resolução do arquivo e consequentemente aumentar a performance do algoritmo de busca.

A Figura 14 apresenta um arquivo *raster* de 512x512 pixels e a transformação em uma pirâmide com quatro níveis.

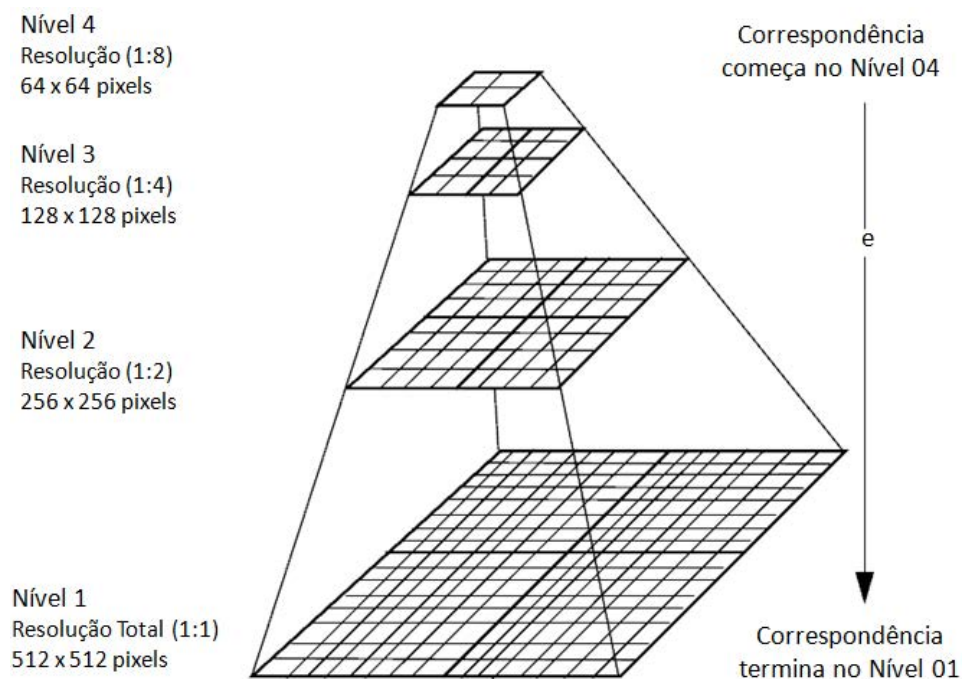


Figura 14 - Pirâmide de imagens em quatro níveis

Fonte: Adaptado de ERDAS (2008).

#### 4.7. Técnicas alternativas de Geração de MDEs e MDSs

Um dos problemas frequentemente encontrados quando se trabalha com geração de Modelos Digitais, é obter pontos de controle bem definidos no terreno e oriundos de fontes de dados que possam fornecer ao trabalho, um grau de acurácia suficientemente capaz de modelar a superfície terrestre de uma maneira próxima da realidade. A etapa de coleta de dados, considerando o método topográfico para

construção do MDE/MDS é na maioria das vezes muito onerosa, dado o fato da necessidade de se ir ao campo para coletar pontos de controle, demandando gastos com mão de obra humana, equipamentos, transporte e com deslocamentos a locais que muitas vezes são de difícil acesso.

Gonçalves (2006) ressalta o fato de nem sempre se ter facilidade em coletar pontos de controle em áreas remotas. Esta dificuldade é também exposta por Andrade (2008) principalmente ao se trabalhar com áreas extensas. Áreas pouco desenvolvidas também sofrem com a dificuldade de obtenção de Pontos de Controle.

Neste contexto, Gonçalves (2008), desenvolveu uma metodologia com objetivo de extrair MDEs de imagens ALOS PRISM sem utilizar pontos de controle em campo. Esta metodologia faz uso de pontos de controle derivados do MDE-SRTM, baseando-se inicialmente na Geração de um MDE Relativo e posteriormente fazendo a correspondência com o MDE-SRTM permitindo a determinação da correção posicional para a orientação da imagem.

#### **4.7.1. Geração de MDEs e/ou MDSs Híbridos**

Um MDE ou MDS híbrido consiste em um único Modelo obtido por meio do emprego de diferentes técnicas de levantamento e com diferentes graus de incerteza associado a cada um deles.

Neste sentido, Druzina (2007) desenvolveu uma metodologia com o objetivo de gerar um MDE através da integração entre dados altimétricos obtidos através do emprego de diferentes técnicas de levantamento, sendo elas aerofotogrametria, estereoscopia por imagens orbitais (utilizando o sensor ASTER) e interferometria por radar de abertura sintética (empregando dados da Missão SRTM), no intuito de obter um novo MDE adequado a escala de 1:50.000. Os dados foram integrados utilizando o Método de Colocação por Mínimos Quadrados, que permite a integração de dados diferentes em tipo e qualidade cartográfica (mais detalhes em Druzina, 2007) e posteriormente avaliados levando-se em consideração os parâmetros estatísticos Média, Mediana Valores máximo, mínimo, Desvio-Padrão e Erro Médio Quadrático (RMS), tomando como referência um MDE derivado de curvas de nível com equidistância vertical de 1 metro. Os resultados se mostraram satisfatórios, mostrando ser possível a integração entre dados espaciais provenientes de diferentes técnicas de levantamento, desde que se conheça a acurácia posicional destes dados.

Uma vantagem deste modelo então é que um MDE resultante tende a seguir valores altimétricos com menor erro em cada região distinta (DRUZINA, 2007).

Xu *et al.* (2010), trabalharam na geração de um Modelo Digital de Superfície Híbrido utilizando dados derivados de interferometria (missão TerraSAR-X) e estereoscopia por imagens orbitais, utilizando dados altimétricos derivados de imagens PRISM/ALOS com o objetivo de obter um novo Modelo com tamanho do pixel igual a 10 metros. O Modelo foi gerado levando em consideração a influência da declividade do Modelo TopoSAR em relação ao MDS PRISM e avaliado empregando estatística clássica (Média, Desvio-Padrão e Erro Médio Quadrático), análise local utilizando perfis transversais e avaliação espectral utilizando a função de auto-correlação para correlacionar as observações no domínio espacial e a transformada de Fourier (mais detalhes em Xu *et al.* 2010). O Método proposto apresentou bons resultados, permitindo-se a integração entre os dados.

Trabalhos relacionados a combinação de modelos oriundos de Interferometria por Radar de abertura Sintética (IFSAR), *Scanners à Laser* Aerotransportados (*Light Airborne Laser Sanning – ALS*) com sensores óticos vem sendo desenvolvidos nos dias atuais, dada a importância de integração destes no aumento qualidade altimétrica. Dentre estes trabalhos, pode-se citar Reinartz *et al.* (2005) que integraram modelos derivados de imagens SPOT-5 sensor HRS e dados altimétricos obtidos através da missão SRTM; Papasaika e Baltasavias (2009) que integraram MDSs derivados de imagens IKONOS com dados ALS e Schindler *et al.* (2011) que apresentaram pontos positivos e negativos em integrar dados espaciais ao se utilizar diferentes técnicas de levantamentos.

Os trabalhos apresentados enfocam a relevância do tema e a possibilidade de uso de Modelos com diferentes precisões para composição de um novo Modelo Digital com uma maior acurácia posicional e também ressaltam a dificuldade em se conseguir associar valores adequados de precisão característicos a cada modelo, uma vez que existe a necessidade de conhecimento a priori da qualidade dos dados de entrada para geração de um novo modelo e estes dados muitas vezes não estão disponíveis, havendo a necessidade de se realizar uma estimativa destes valores para a geração destes Modelos. Esta estimativa tem sido feita da seguinte maneira:

. Geração de MDEs ou MDSs a serem fusionados utilizando diferentes técnicas de levantamento e comparação com dados altimétricos oriundos de uma fonte de

maior acurácia cartográfica. Estes dados podem ser um Modelo com qualidade altimétrica melhor do que aqueles que estão sendo avaliados (conforme apresentado por Druzina, 2007), uma vez que existe a necessidade de se conhecer a incerteza posicional de cada pixel a ser interpolado, para o emprego de uma técnica capaz de integrar estes modelos.

. Análise de resíduos empregando características geomorfológicas e cobertura do solo: Características relacionadas a geomorfologia consiste em fatores relacionados a declividade, aspecto e rugosidade. Conforme apresentado por Papasaika e Baltasavias (2009) um Modelo Digital derivado de um levantamento empregando ALS tende a apresentar uma baixa acurácia planimétrica e uma elevada acurácia altimétrica, porém, os erros relacionados a planimetria podem ocasionar erros na altimetria principalmente em áreas com elevada declividade. Áreas arborizadas serão influenciadas de maneira diferentes quando levantadas empregando Sensores óticos, ou *Laser Scanning*. Estes valores são ponderados e os resíduos associados aos Modelos a serem fusionados.

. Co-Registro entre os Modelos a serem fusionados: Os Modelos são registrados com vistas a eliminação de erros relacionados a translação, rotação e diferença de escala (PAPASAIKA e BALTASAVIAS, 2009) e os resíduos são analisados, sendo que estes dados podem ser comparados posteriormente com uma fonte de melhor qualidade e acrescidos a incerteza do modelo.

Embora estas técnicas de estimativa venham sendo utilizadas, todas necessitam de uma fonte que englobe toda a área de estudo para a estimativa da incerteza relacionada a altimetria.

#### **4.8. Controle de qualidade de produtos cartográficos**

Nos últimos anos o avanço da informática contribuiu de maneira positiva para a geração de produtos cartográficos. Dados que anteriormente só poderiam ser obtidos no meio analógico, hoje podem ser produzidos de uma maneira mais facilitada através do uso de *softwares* específicos. Com isso, dados espaciais que antes, devido a complexidade de etapas necessárias para a elaboração não eram trabalhados, hoje podem ser desenvolvidos com um grau bem maior de facilidade.

Contudo, esta “facilidade” faz com que usuários não especializados passem a gerar produtos que muitas vezes não são analisados quanto ao seu rigor cartográfico.

Neste contexto, maior atenção passou a ser dada com relação ao controle de qualidade em dados espaciais, reforçando a questão de que não adianta gerar dados, sem que seja informada a incerteza associada a este dado e para qual finalidade o mesmo pode ser utilizado.

Baseado nestes aspectos, Santos (2010) faz um apanhado sobre as principais normas de controle de qualidade em dados espaciais bem como propõe uma metodologia para avaliação de dados espaciais empregando estatística espacial.

Como o enfoque do trabalho é avaliar a qualidade posicional de dados espaciais e não discutir metodologias de avaliação destes será dado enfoque especial a Legislação Brasileira com relação a avaliação de dados cartográficos, englobando então o Padrão de Exatidão Cartográfica e as Especificações Técnicas para aquisição de dados Vetoriais - INDE.

#### **4.8.1. Padrão de Exatidão Cartográfica**

O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) é uma das formas de avaliação no controle de qualidade de produtos cartográficos no Brasil, sendo este definido pela Comissão Nacional de Cartografia – CONCAR, através do Decreto N°. 89.817 de 20 de Junho de 1984.

O Capítulo II deste Decreto em sua seção 01 Classificação de uma Carta Quanto a Exatidão artigo 8º, define que:

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 as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

A Seção 2 Classes de Cartas versa sobre as cartas, quanto a sua exatidão altimétrica conforme abaixo:

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.

Com relação a aplicação do Decreto-Lei Nº 89.817/1984, de acordo com Santos (2008) inúmeros métodos vem sendo utilizados para avaliar a qualidade posicional em produtos cartográficos, não existindo então um consenso com relação a qual seria a melhor metodologia de aplicação para o mesmo.

Levando em consideração o Decreto-Lei 89.817/1984 para a avaliação de um produto cartográfico o PEC é calculado pela Equação 11:

$$PEC = 1,6449.EP \quad (11)$$

onde EP é o erro padrão.

Com relação ao termo Erro-Padrão, o Decreto considera este termo como sinônimo aos termos Desvio-Padrão e Erro Médio Quadrático, embora exista uma diferença de significado entre cada um destes.

Santos (2010) apresenta o termo desvio-padrão como sendo a variabilidade dos dados amostrais em torno da média amostral, logo, este estimador permite obter a variabilidade da média, segundo apresentado na Equação 12.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta d_i - \Delta \bar{d})^2}{n-1}} \quad (12)$$

onde:

$\Delta d_i = d_i - d_i^r$  é a discrepância entre a coordenada observada no produto cartográfico e a coordenada de referência para a componente planimétrica ou a discrepância entre a altitude observada no produto a ser avaliado e a altitude de referência ao se analisar a componente altimétrica;

$\Delta \bar{d} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta d_i$  é a média das discrepâncias para a coordenada d;

n é o número de amostras.

Com relação ao termo Erro-Padrão, Santos (2010) o define como sendo uma medida que descreve a variabilidade dos dados amostrais em relação a média, podendo ser calculada pela razão entre o desvio-padrão e a raiz do número de elementos da amostra. Esta definição vai de encontro a aquela apresentada por Andriotti (2009), em que o Erro-Padrão remete a uma ideia de precisão da estimativa da média. A Equação 13 é apresentada a seguir:

$$EP = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta d_i - \Delta \bar{d})^2}{n(n-1)}} \quad (13)$$

onde:

EP é o Erro-Padrão;

S é o Desvio-Padrão;  
n é o número de amostras.

O termo Erro Médio Quadrático (RMS) de acordo com Rodrigues (2008) é dado como a raiz quadrada da discrepância entre as amostras, dividido pelo número de amostras subtraído de uma unidade, cuja Equação 14 é apresentada a seguir.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta d_i)^2}{n-1}} \quad (14)$$

onde:

$\Delta d_i$  é a discrepância entre a coordenada observada no produto cartográfico e a coordenada de referência para a componente planimétrica ou a discrepância entre a altitude observada no produto a ser avaliado e a altitude de referência ao se analisar a componente altimétrica;

n é o número de amostras.

Como o Decreto-Lei considera os três termos descritos como equivalentes, neste trabalho para aplicação do Decreto será utilizado o RMS como estimador estatístico, seguindo o proposto por Santos (2010), onde o autor apresenta um estudo comparativo com vistas a ilustrar a diferença ao se utilizar o desvio-padrão (que analisa a dispersão dos dados em relação a média) ou RMS em um conjunto de amostras.

#### **4.8.2. Análises de Tendência e Precisão em produtos cartográficos**

Uma metodologia de aplicação do PEC comumente utilizada consiste no emprego dos métodos apresentados por Merchant (1982) e descritos por Galo e Camargo (1994). Estes métodos empregam estatística clássica para realização de testes de hipóteses, através de análises de precisão e tendência em dados espaciais.

O Teste de Tendência consiste na verificação da presença de erros sistemáticos no produto cartográfico analisado (GALO e CAMARGO, 1994).

O teste de precisão é empregado através do uso do teste do Qui-Quadrado, com o objetivo de verificar o enquadramento da carta avaliada a uma das classes descritas

no Decreto-Lei 89.817/1984 (classes A, B ou C). Estes testes são descritos nos itens 4.8.2.1 e 4.8.2.2.

#### **4.8.2.1. Teste de normalidade dos dados**

Para aplicação do teste  $t$  de *Student*, torna-se necessária a verificação da amostra, para determinar se a mesma segue distribuição normal. Esta verificação nem sempre é realizada por aqueles que lidam diretamente com avaliação de dados espaciais.

Para testar a normalidade de uma amostra, vários testes são encontrados na literatura, dentre eles, Dalmolin e Leal (1999), cita o teste de normalidade apresentado por Filliben (1975) que é baseado no gráfico de probabilidades ( $Q-Q$  Plot) e no coeficiente de correlação  $r$ , onde se compara o valor calculado do coeficiente de correlação e realiza a comparação entre os valores tabelados em função do número de pontos amostrais e o intervalo de confiança a ser utilizado na realização do teste.

Outros testes também podem ser utilizados para verificação da normalidade de dados, como os de Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk, Anderson-Darling, Cramer-Von Misses, e Shapiro-Wilk. Segundo Leotti *et al.* (2005) dos testes citados, o de Shapiro-Wilk se apresenta como melhor teste de aderência à normalidade dos dados, sendo superior aos outros, enquanto que o teste de Kolmogorov-Smirnov embora seja um dos mais utilizados para verificação da normalidade de uma amostra, o mesmo não se apresenta como um bom teste de aderência a normalidade.

Segundo Carelli Netto (2008), o uso do teste de Kolmogorov-Smirnov é recomendado para amostras maiores que 50, uma vez que o mesmo tem a finalidade de comparar se as frequências observadas na amostra estão próximas as frequências esperadas para a distribuição normal. Para amostras maiores ou iguais a 30, Martins (2007) recomenda o uso do teste de Kolmogorov-Smirnov, acrescido da correção de Lillefors.

Silva e Ferreira (2008) recomendam o uso do Teste de Shapiro-Wilk para amostras maiores ou iguais a 30. O procedimento para emprego deste teste é descrito a seguir:

. Formulação da Hipótese:

$H_0$ : A amostra provém de uma população normal

$H_1$ : A amostra não provém de uma população normal

- . Estabelecer o nível de significância a ser utilizado no teste:
- . Calcular a estatística do teste ( $W_{\text{calculado}}$ ) seguindo os seguintes critérios:
  - Ordenar as observações da amostra  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ;
  - Calcular o valor da constante  $b$  através da Equação 15:

$$b = \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1} \cdot (x_{(n-i+1)} - x_i), \text{ se } n \text{ é ímpar}$$
$$b = \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{n-i+1} \cdot (x_{(n-i+1)} - x_i), \text{ se } n \text{ é par} \quad (15)$$

- Calcular  $W$  através da Equação 16:

$$W_{\text{calculado}} = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

- Verificar se a hipótese nula ( $H_0$ ) é rejeitada ou não:

Se  $W_{\text{calculado}} < W_{\text{tabelado}}$ : Rejeita-se  $H_0$ .

Caso contrário não se rejeita a hipótese nula.

Neste trabalho será utilizado o teste de Shapiro-Wilk para verificação da normalidade da amostra para as componentes planimétrica e altimétrica. Este teste é feito tomando como base as discrepâncias para cada componente (a resultante das coordenadas E e N para a planimetria e a discrepância para os valores de altitude) Sua escolha foi feita levando em consideração a utilização do teste por Sanhueza (2007) e Bias *et al.* (2011), bons resultados ao se utilizar um conjunto de dados maior ou igual a trinta.

#### 4.8.2.2. Análise de Tendência ou Exatidão

De acordo com Gripp Jr. (2009) o termo Exatidão pode ser definido como o afastamento que um produto cartográfico teria da verdade topográfica.

Rodrigues (2008) define exatidão como o grau de aderência entre o valor mais provável de uma grandeza em relação ao valor verdadeiro.

Santos (2010) ressalta que o termo exatidão não seria adequado para ser utilizado em Cartografia e Geodésia, uma vez que como estas ciências trabalham no sentido de representar a forma e dimensão da terra, esta representação está condicionada a realização de levantamentos de campo, sendo estes sujeitos a qualidade dos instrumentos e técnicas utilizados para este fim, e desta forma qualquer observação feita sobre a superfície terrestre tem em si uma incerteza associada. Neste contexto, de acordo com Santos (2010), não seria correto utilizar o termo exatidão, quando se trabalha com dados espaciais, sendo acurácia o termo mais correto a ser utilizado. Embora o termo acurácia seja o mais recomendado, neste trabalho o termo exatidão será utilizado ao se referir ao Decreto-Lei 89.817/1984.

A análise de Tendência ou Exatidão, segundo Galo e Camargo (1994), consiste na aplicação de um teste estatístico com vistas a determinar a presença de erros sistemáticos no produto avaliado. Esta análise é baseada na verificação estatística das discrepâncias entre as coordenadas observadas na carta e as coordenadas de referência. Um erro sistemático é definido, segundo Monico (2007), como aquele que pode apresentar a possibilidade de ser reduzido ou eliminado, uma vez que as causas sejam identificadas.

De acordo com Andriotti (2009) para análise de tendência, com número de amostras menores que 30 é recomendado o emprego do teste  $t$  de Student. Para amostras maiores que 30, Montgomery e Runger (2008), *apud* Santos (2010) recomendam o emprego do teste  $Z$ .

Para emprego do teste  $t$ , a amostra em análise deve seguir distribuição normal sendo aplicado a um nível de confiança de 90% ( $1-\alpha$ ) com  $\alpha = 0,1$ . Com isso, a exatidão será calculada baseada na análise estatística das diferenças entre as coordenadas observadas no modelo gerado e as coordenadas  $\bar{x}$  de referência.

No emprego do teste  $t$  são formuladas as seguintes hipóteses:

Para a coordenada  $E$ :

$$\begin{aligned} H_0: \Delta \bar{E} &= 0 \\ H_1: \Delta \bar{E} &\neq 0 \end{aligned} \tag{17}$$

onde:

$\Delta\bar{E}$  é a média das discrepâncias para a coordenada E que é calculada através da Equação 18:

$$\Delta\bar{E} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta E_i \quad (18)$$

$\Delta E_i = E_i - E_i^r$  é a discrepância entre a coordenada observada no produto cartográfico e a coordenada de referência.

O valor de  $t$  calculado será obtido por:

$$t_{calc} = \frac{\Delta\bar{E} \cdot \sqrt{n}}{S_{\Delta E}} \quad (19)$$

Onde:

$n$  é o número de pontos amostrais e  $S_{\Delta E}$  é o desvio-padrão das discrepâncias para a coordenada E que pode ser calculado através da Equação 20.

$$S_{\Delta E} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta E_i - \Delta\bar{E})^2} \quad (20)$$

A hipótese não é rejeitada se o valor do módulo de  $t$  calculado  $t_{calc}$  for menor do que o módulo do valor de  $t$  tabelado  $|t_{n-1}, \alpha/2|$ , sendo a hipótese não rejeitada se:

$$|t_{calc}| < |t_{n-1}, \alpha/2|$$

Caso o valor de  $|t_{calc}|$  seja maior que  $|t_{n-1}, \alpha/2|$  a hipótese é rejeitada e existe a presença de erros sistemáticos na imagem.

Analogamente o teste pode ser aplicado para a coordenada N e para altitude  $h$ .

#### 4.8.2.3. Análise de Precisão

Segundo Gemael (1994), o termo precisão está vinculado a dispersão das observações, considerando apenas efeitos aleatórios. Dalmolin e Leal (1999) define precisão como a dispersão dos valores observados em um produto cartográfico. Com

isso, a precisão expressa o grau de consistência da grandeza medida em relação a sua média (MONICO, 2007).

Apoiado nos conceitos anteriores, a análise de Precisão pode ser realizada segundo Galo e Camargo (1994) através da comparação entre o desvio-padrão das discrepâncias e o Erro-Padrão esperado para a classe em que o teste será realizado (A, B ou C estipulados pelo Decreto-Lei 89.817/1984). O teste estatístico a ser utilizado é o Teste do Qui-Quadrado com grau de confiança de 90% para o desvio padrão populacional  $\sigma$  (sigma) a partir do desvio amostral S que irá levar em consideração o Erro-Padrão (EP) que também é definido pelo Decreto.

O Erro-Padrão para as coordenadas planimétricas é obtido para a resultante das coordenadas E e N, sendo obtida pela Equação 21:

$$\sigma_E = \sigma_N = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (21)$$

Para a componente altimétrica (h) o Erro-Padrão será:

$$\sigma_h = EP \quad (22)$$

Tem-se então o seguinte teste de hipóteses a ser realizado:

Para a coordenada E:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_E^2 &= \sigma_0^2 \\ H_1: \sigma_E^2 &> \sigma_0^2 \end{aligned} \quad (23)$$

onde:

$\sigma_E^2$  é a variância das discrepâncias;

$\sigma_0^2$  é a Tolerância definida pelo decreto.

O valor calculado para o Qui-Quadrado ( $\chi_{E\text{ calc}}^2$ ) é obtido através da Equação 24:

$$\chi_{E\text{ calc}}^2 = \frac{(n-1) \cdot S_{\Delta E}^2}{\sigma_E^2} \quad (24)$$

Então, para o produto cartográfico atender a uma determinada classe, o valor do Qui-Quadrado tabelado ( $\chi_{E\text{ calc}}^2$ ) deverá ser menor do que o valor obtido por meio de tabelas ( $\chi_{n-1, \alpha}^2$ ) *Tab*:

$$\chi_{E\text{ Calc}}^2 < \chi_{(n-1, \alpha)}^2 Tab \quad (25)$$

Analogamente o valor do Qui-Quadrado é calculado para a coordenada N, para a componente vertical h e seus resultados comparados com o valor tabelado.

Caso a hipótese seja rejeitada para a classe em análise (classe A por exemplo), a hipótese é testada para as demais classes (B e C), com vistas a verificar se o produto é enquadrado para uma das três classes.

#### 4.8.3. Especificações Técnicas para Aquisição de Dados Espaciais Vetoriais

As Especificações Técnicas para Aquisição de Dados Espaciais ET-ADGV/INDE foi publicada em 2010 pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército – DSG. Este documento versa em seu capítulo V sobre as orientações para a aquisição dos atributos das classes de Objetos Geoespaciais. É apresentado um padrão preliminar para a avaliação de acurácia em dados Espaciais, o PAP-PCD (Padrão de Acurácia e Precisão de Produtos Cartográficos Digitais). O documento descreve quatro classes de Avaliação, sendo elas A, B, C e D, uma classe a mais do que o Decreto-Lei 89.817/1984. Estas classes são apresentadas nas Tabelas 4, 5 e 6 (os termos EM e DP, referem-se respectivamente ao Erro Máximo e desvio-padrão).

Tabela 4 - Precisão e Acurácia da Planimetria do Produto Cartográfico

PEC	PAP-PCD	1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		EM	DP	EM	DP	EM	DP	EM	DP
-	A	6,25 m	3,75 m	12,5 m	7,5 m	25 m	15 m	62,5 m	37,5 m
A	B	12,5 m	7,5 m	25 m	15 m	50 m	30 m	125 m	75 m
B	C	20 m	12,5 m	40 m	25 m	80 m	50 m	200 m	125 m
C	D	25 m	20 m	50 m	40 m	100 m	80 m	250 m	200 m

Fonte DSG, 2010.

Tabela 5 - Precisão e Acurácia do Modelo Digital do Terreno para a produção de Produtos Cartográficos Digitais

PAP-PCD	1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	EM	DP	EM	DP	EM	DP	EM	DP
A (3)	1,58 m	0,96 m	3,13 m	1,9 m	6,25 m	3,79 m	15,63 m	9,48 m
B (2)	2,5 m	1,52 m	5 m	3,03 m	12,5 m	7,58 m	25 m	15,16 m
C (2)	3 m	1,82 m	6 m	3,64 m	15 m	9,1 m	30 m	18,19 m
D (3)	3,8 m	2,3 m	7,6 m	4,61 m	19 m	11,52 m	38 m	23,04 m

Fonte: DSG, 2010.

Tabela 6 - Precisão e acurácia da altimetria do Produto Cartográfico

PEC	PAP-PCD	1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		EM	DP	EM	DP	EM	DP	EM	DP
-	A	2,5 m	1,67 m	5 m	3,33 m	12,5 m	8,33 m	25 m	16,67 m
A (1)	B	5 m	3,33 m	10 m	6,67 m	25 m	16,67 m	50 m	33,33 m
B (1)	C	6 m	4 m	12 m	8 m	30 m	20 m	60 m	40 m
C (1)	D	7,5 m	5 m	15 m	10 m	37,5 m	25 m	75 m	50 m

Fonte: DSG, 2010.

(1) baseado no Decreto nº 89817/1984.

(2) baseado no Manual T34.201 - Normas Gerais para Operações Geodésicas, Astronômicas, Topográficas, Fotogramétricas e Cartográficas. Edição 1982.

(3) calculado levando-se em consideração o erro do processo de aerotriangulação e o erro de campo.

(4) para o caso de produtos convertidos do meio analógico para o digital é desejável que esse processo mantenha o original do PEC correspondente ao PAP-PCD. Assim por exemplo, se PEC=A, então após a conversão será PAP-PCD = B. No entanto, considerando que no processo de conversão podem ser agregados erros aos produtos, é tolerada a redução em um nível na classificação, com exceção do PEC-C, como segue:

Se PEC = A, então PAP-PCD = “B” ou “C”;

Se PEC = B, então PAP-PCD = “C” ou “D”;

Se PEC = C, então PAP-PCD = “D”.

#### 4.8.4. Fórmula de Koppe

De acordo com Ariza (2002) a Fórmula de Koppe tem como objetivo avaliar a componente posicional e altimétrica, comparando os valores a serem avaliados com dados oriundos de uma fonte de maior qualidade. É estudado os efeitos da inclinação do terreno sobre o erro médio na componente vertical. A sua aplicação pode ser realizada através do emprego de técnicas baseadas na estatística clássica, como a utilização de regressão linear para obtenção dos elementos a serem estimados pela Equação 26, apresentada a seguir.

Os seguintes procedimentos são adotados para emprego da Fórmula de Koppe (ARIZA, 2002):

- . Selecionar uma amostra de pontos no produto a ser analisado e os seus respectivos de uma fonte de maior qualidade;
- . Calcular o erro vertical em cada ponto selecionado;
- . Calcular o valor da inclinação do terreno em cada ponto;
- . Aplicar a regressão Linear empregando a tangente do valor da inclinação como variável dependente e o erro vertical calculado como variável independente (para determinação dos coeficientes A e B);
- . Analisar empregando regressão linear com vistas a obter o erro vertical pela Fórmula de Koppe empregando a Equação 26:

$$\bar{e}_v = \pm(A + B \cdot \tan\alpha) \quad (26)$$

Onde:

A é o termo independente da Equação;

B é o coeficiente da regressão;

$\alpha$  é o ângulo de inclinação do terreno.

O erro Horizontal Médio ( $\bar{e}_H$ ) obtido em função da inclinação do terreno é calculado através da Equação 27:

$$\bar{e}_H = \pm(B + \cot\alpha) \quad (27)$$

A Fórmula de Koppe tem como aspectos positivos o fato de poder ser utilizada para analisar os erros horizontal e vertical em conjunto entre curvas de nível em dois produtos cartográficos diferentes (UREÑA et al. 2011, GUSTAFSON e LOON, 1982; IMHOF, 2007).

Considerando esta dependência linear e conhecendo-se o erro médio quadrático dos dados oriundos da fonte de melhor qualidade cartográfica, é possível empregar a Fórmula de Koppe para obtenção do Erro Médio Quadrático de uma fonte de menor qualidade.

Segundo Valenzuela (2007) o termo independente A, da Equação 26, consistiria em um Erro Médio Quadrático vertical para os pontos individuais e que dependem do tipo de levantamento. O termo B corresponderia a acurácia horizontal das operações de levantamento e impressão (considerando cartas em meio analógico).

Ainda de acordo Valenzuela (2007) os valores para os coeficientes A e B são calculados de forma empírica para um mapa ou uma série de pontos e dependem dos métodos de levantamento. Este autor sugere um valor aproximado para o coeficiente A igual 0,3 vezes o intervalo de curvas-de-nível e para o termo B equivalente a 0,2mm. Segundo apresentado por Gustafson e Loon (1982), existe uma tendência de que com o passar dos anos exista uma diminuição nos valores dos coeficientes da Equação 26 dado ao fato de que os métodos atuais de levantamento estão se tornando independentes do da inclinação do terreno. Esta afirmação contudo, está relacionada ao método de levantamento empregado (topografia, fotogrametria, interferometria) e suas características, erro instrumental, influência do relevo, plataforma orbital dentre outros.

Segundo Karel e Kraus (2006), a fórmula de Koppe descreve a acurácia de medições topográficas e nos dias atuais ela vem sendo utilizada também para avaliação de Modelos Digitais.

Com relação ao emprego da Fórmula de Koppe para avaliação de dados espaciais oriundos de levantamentos aerofotogramétricos, Kraus (2004) recomenda o emprego da Equação 26 levando-se em consideração a influência dos parâmetros apresentados na Equação 28:

$$\sigma_z = \pm(0,15^0 /_{00} de h + \frac{0,15}{c} . h . \tan\alpha) \quad (28)$$

onde:

$\sigma_z$  é o desvio-padrão para a componente altimétrica;

h é a altura de voo;

c é a distância focal da câmera em mm;

$\alpha$  é o ângulo de inclinação do terreno.

Segundo Kraus (2004), o termo  $0,15^0/00$  da altura de voo (primeiro termo da Equação 28), está relacionado a acurácia vertical associado ao método de medição da altura sobre a grade do Modelo Digital. O termo 0,15 (segundo termo da Equação 28) está relacionado à acurácia horizontal ao desenho das curvas de nível derivadas da grade. Este termo é multiplicado ao fator de escala ( $h/c$ ).

A Equação 28, de acordo com Kraus (2004), deve ser utilizada em áreas abertas, ou seja, sem a presença de árvores. Para áreas cobertas, o autor recomenda o acréscimo do fator de 2m, devido a incerteza da Equação 28 em determinar o erro para regiões cobertas por vegetação.

Para avaliação de dados oriundos de levantamentos empregando *Laser Scanning* Aerotransportados (*Airbone Laser Scanning – ALS*), Karel e Kraus (2006) recomendam a Equação 29.

$$\sigma_z = \pm \left( \frac{6}{\sqrt{n}} + 50. \tan\alpha \right) \quad (29)$$

Onde:

$\sigma_z$  é o desvio-padrão para a componente altimétrica;

$n$  é o número de pontos coletados por metro quadrado;

$\alpha$  é o ângulo de inclinação do terreno.

Ainda segundo Karel e Kraus (2006), a altitude de voo não influencia a acurácia altimétrica dos dados derivados do emprego de levantamentos empregando *ALS*. Um fator de grande influência na determinação dos erros é a densidade dos pontos coletados, sendo esta variável relacionada a altitude de voo que é dependente da inclinação do *Scanner* (KAREL *et al.*, 2006).

Com relação a avaliação de Modelos Digitais e curvas de nível levando-se em consideração a declividade, através do emprego da Fórmula de Koppe, pode-se citar trabalhos relacionados ao seu uso como o apresentado por Sefercik e Jacobsen (2006) que avaliaram a qualidade do Modelo Digital de Superfície derivado através da missão SRTM para a região de Zonguldak na Turquia onde, dentre outros métodos, utilizou-se a Fórmula de Koppe para determinação do RMS dos pixels para áreas abertas e áreas com cobertura vegetal bem como a verificação da influência da interpolação dos dados para a região considerando a mudança de declividade do terreno.

Gokgoz (2005) empregou a Fórmula de Koppe em seu trabalho com o objetivo de desenvolver uma abordagem com vistas a obter a generalização de curvas de nível, através de um processo de simplificação e suavização destes contornos levando em consideração a fidelidade dos parâmetros relacionados a topografia e geomorfologia. Nesta abordagem, dentre outros métodos, a Fórmula de Koppe foi utilizada no intuito de estimar o valor do RMS de pontos sobre curvas de nível para a componente planimétrica.

Outros autores como Johansen (1988), Raber (2003), Hodgson *et al.* (2003), Karel e Kraus (2006), utilizaram a Fórmula de Koppe para avaliar dados espaciais ou utilizá-la como ferramenta para realização de outros trabalhos, o que ressalta sua importância como método de avaliação, mesmo sendo utilizando coeficientes empíricos.

No Brasil, Nero (2005) sugere a utilização da Fórmula de Koppe para correlacionar o erro vertical com o erro horizontal, bem como ressalta a inclusão da análise de declividade utilizando a Fórmula de Koppe na legislação brasileira a fim de controle de qualidade em produtos cartográficos, além de apresentar Normas internacionais, como a Norma Alemã NDATAVLBD de 1983 que utiliza esta Equação para avaliar a qualidade posicional de dados gerados neste país. Esta norma também é citada por Santos (2010). Contudo trabalhos que empregaram a Fórmula de Koppe como um indicador de erros em função da inclinação do terreno não são encontrados.

## **5. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **5.1. Área de estudo**

A área de estudo deste trabalho abrange parte da região da Zona da Mata de Minas Gerais, compreendendo os municípios de Cajuri, Coimbra, São Geraldo e parte dos municípios Araponga, Canaã, Divinésia, Ervália, Guiricema, Paula Cândido, São Miguel do Anta, Viçosa e Visconde do Rio Branco, totalizando doze cidades, compondo uma área de 35km x 35km, a qual está situada entre as coordenadas Geodésicas longitude: 42° 36' 0,27" a 43° 01' 34,42" (Oeste), e latitude: 20° 40' 51,50" a 21° 04' 13,04" (Sul), Datum SIRGAS 2000, conforme pode ser visto na Figura 15. Esta região apresenta uma variação de altitude da ordem de 600 metros.

A escolha desta área ocorreu por questões práticas, uma vez que a área abrange municípios situados no entorno da cidade de Viçosa e como o desenvolvimento da pesquisa foi realizado no Campus da Universidade Federal de Viçosa, a etapa de coleta de dados torna-se menos onerosa, reduzindo o tempo de deslocamento para a realização de levantamentos em campo e conseqüentemente os custos operacionais relacionados a execução de levantamentos, além de existirem dados adicionais disponíveis, tais como uma ortoimagem do IKONOS II, e CBERS 2B e pontos de checagem já coletados ao longo da Bacia do Ribeirão São Bartolomeu no município de Viçosa.

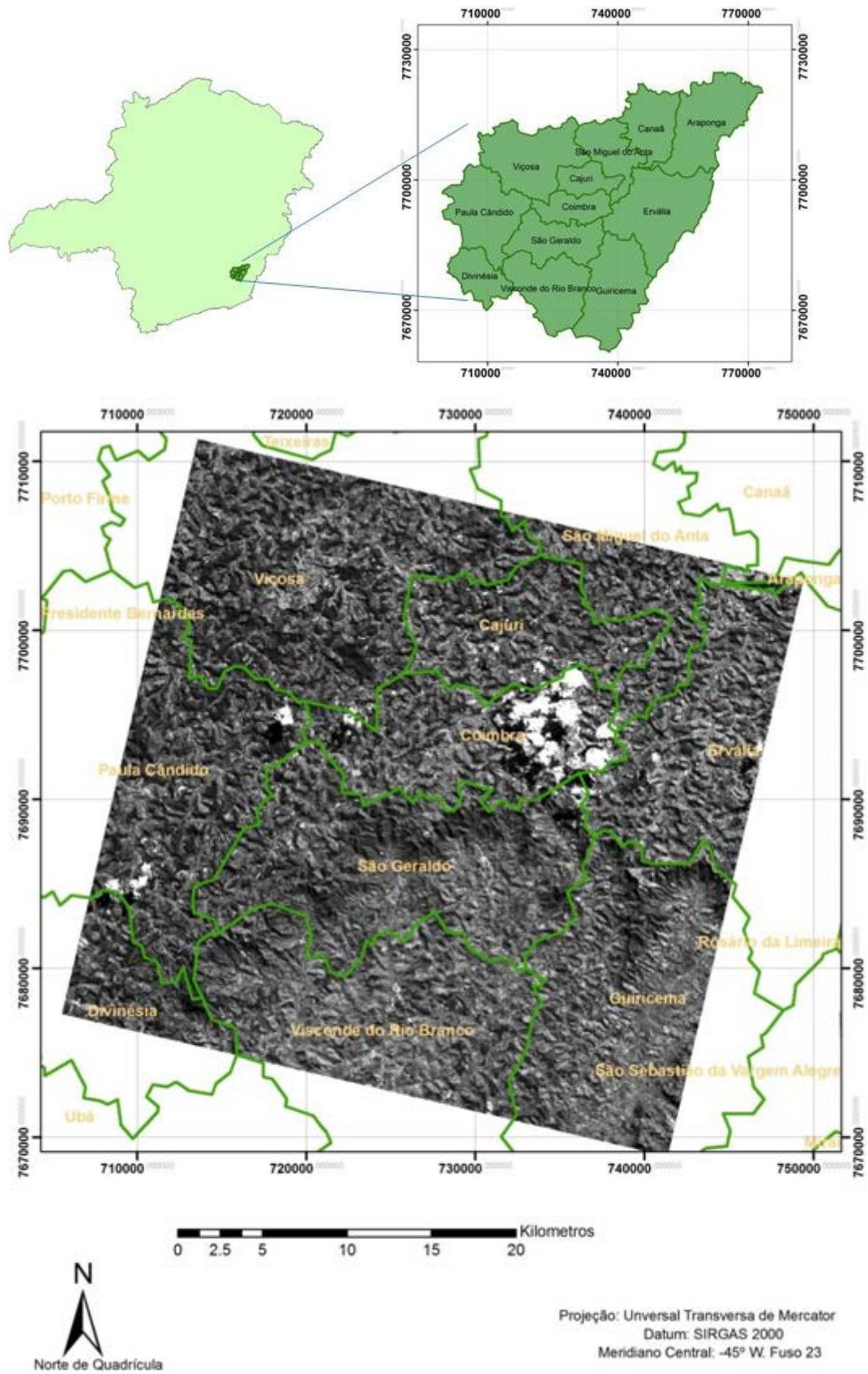


Figura 15 - Caracterização da Área de Estudo

## 5.2. Materiais utilizados

Para a realização deste trabalho os seguintes materiais foram utilizados:

.Imagem do Sensor PRISM/satélite ALOS, cena ALPSMB130914075, produto 1B2R modo *Triplet* (visadas *Backward*, *Forward* e *Nadir*) com data de aquisição de 09/07/2008;

.Ortoimagem do Sensor IKONOS/satélite IKONOS II, datada de 29/10/2007;

.Ortoimagem do Sensor HRC/satélite CBERS-2B datada de 28/05/2008;

.Receptor GPS de Navegação Modelo Garmin GPSMAP® 60CSx para auxílio na localização dos pontos de controle e checagem em campo;

.Receptor GNSS dupla Frequência Leica GPS 900CS para coleta dos dados de controle e dados de checagem em campo;

.*Software* STATISTICA versão 7.0 para realização dos cálculos estatísticos;

.*Software* Microsoft Excel 2007 para o desenvolvimento de gráficos e tabelas;

.*Software* Ashtech Solutions versão 2.7 para processamento dos dados coletados;

.*Software* PCI Geomatica versão 10.3 para geração automática dos MDSs;

.*Software* ArcGIS versão 9.3 para obtenção dos valores de altitude sobre os pontos de checagem, geração dos mapas de isodeclividade emprego na Fórmula de Koppe e composição dos mapas finais.

## 5.3. Métodos empregados

A realização deste trabalho se deu através das etapas apresentadas na Figura 16, que vão desde a coleta de dados em campo, até a geração, avaliação dos Modelos e Ortoimagens e obtenção do MDS composto.

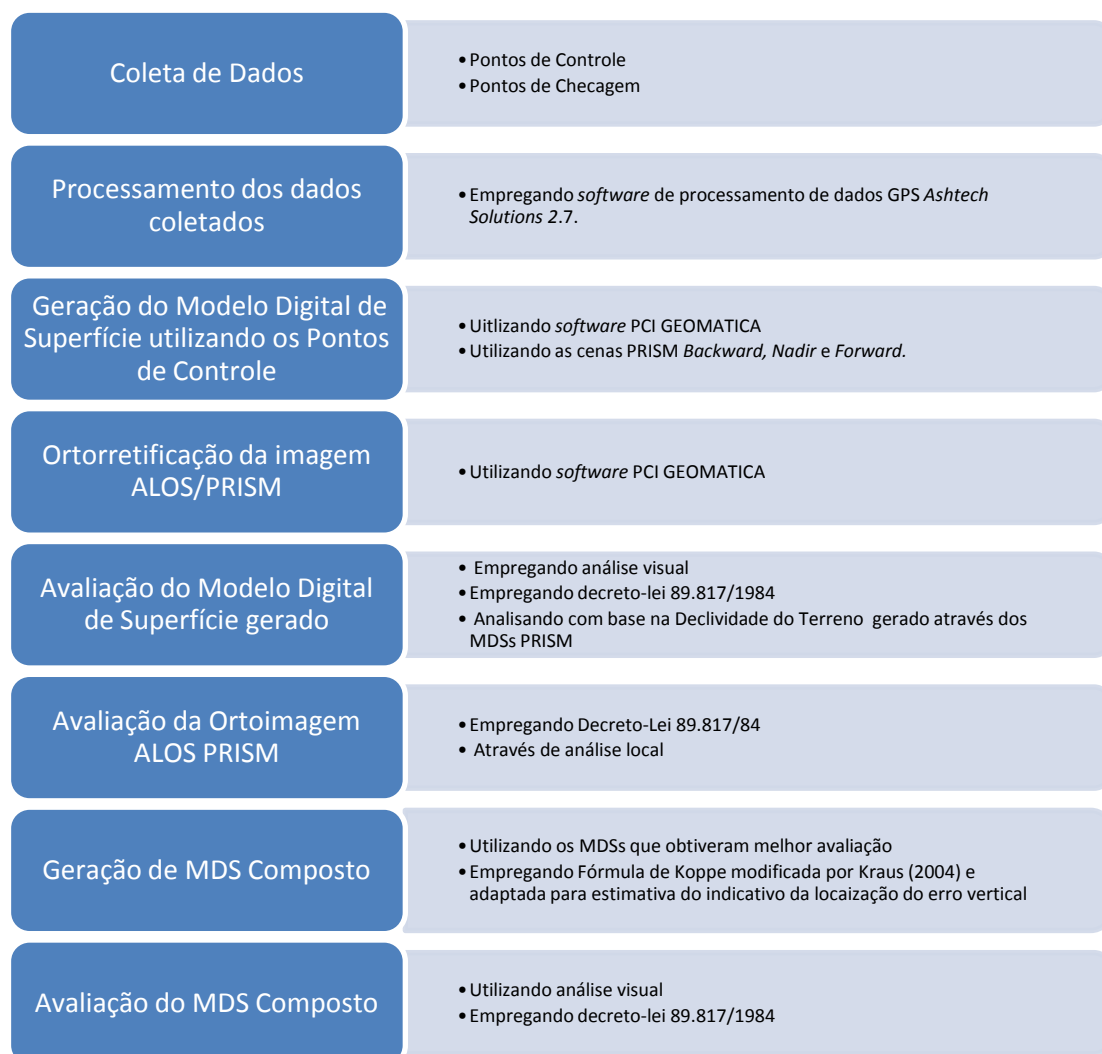


Figura 16 - Etapas para Geração do MDS e Ortoimagem para as cenas PRISM/ALOS

Conforme descrito anteriormente, a imagem PRISM utilizada neste trabalho foi coletada no dia 09/07/2008 e apresenta as seguintes características:

Tabela 7 - Características da Imagem PRISM utilizada neste trabalho

<b>CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DA IMAGEM PRISM UTILIZADA NESTE TRABALHO</b>			
<b>Tipo de visada</b>	<b>Backward</b>	<b>Nadir</b>	<b>Forward</b>
Modo de Processamento	1B2R	1B2R	1B2R
Formato	CEOS	CEOS	CEOS
Resolução Espacial	2,5 metros	2,5 metros	2,5 metros
Resolução Radiométrica	8 bits	8 bits	8 bits
Tamanho da cena	35 x 35 Km	35 x 35 Km	35 x 35 Km
Latitude aproximada do centro da imagem	-20,8924 graus	-20,8757 graus	-20,8607 graus
Longitude aproximada do centro da imagem	-42,8226 graus	-20,8757 graus	-42,8014 graus
Ângulo Azimutal do Sol	34,0000 graus	34,0000 graus	34,0000 graus
Ângulo de Elevação do Sol	39,0000 graus	39,0000 graus	39,0000 graus

Vale ressaltar que a imagem ALOS utilizada foi adquirida no modo 1B2R e embora seja recomendado pela JAXA o uso de imagens 1B1 para geração de MDSs, a escolha do produto 1B2R é devido ao fato de que o Departamento de Engenharia Civil da UFV dispunha da cena PRISM nível 1B2R.

### **5.3.1. Coleta de Dados**

A Coleta de dados foi realizada durante os meses de novembro e dezembro de 2010 e consistiu no levantamento dos pontos de controle e checagem ao longo da área de estudo. Para tanto, utilizou-se o receptor GNSS Dupla Frequência Leica GPS 900CS para rastreamento dos pontos, definidos previamente em escritório.

#### **5.3.1.1. Definição e identificação dos Pontos de Controle e Checagem em campo**

A definição dos pontos foi feita visando uma distribuição uniforme destes. Para tanto, seguiu-se a metodologia apresentada por Gripp Jr. (2009) e também utilizada por Santos (2010), onde se gerou uma grade ao longo de toda a extensão da imagem (35 x 35 Km) com cada quadrado da grade apresentando lados iguais a 5 Km. Quadrantes cuja área era menor que 3 Km<sup>2</sup> não tiveram pontos planejados. Foram utilizados então 61 quadrantes para o planejamento, onde se definiu um ponto de controle e um ponto de checagem para cada quadrante, totalizando então 122 pontos.

Para auxiliar a etapa de coleta de dados, realizou-se um georreferenciamento expedito da cena *Nadir* da imagem ALOS PRISM utilizando o Software ArcGIS 9.3, tomando como pontos de controle, seis pontos obtidos através de cartas do IBGE e projetados para o Sistema SIRGAS 2000 usando o *Software* PROGRID disponibilizado gratuitamente pelo IBGE. De posse da imagem georreferenciada, efetuou-se a vetorização de todas as vias a serem utilizadas. Feito isso, o arquivo foi exportado para o GPS Garmin GPSMAP® 60CSx juntamente com o arquivo digital contendo os pontos de controle e checagem definidos sobre a imagem. Este trabalho facilitou o processo de localização dos pontos em campo.

Com relação à escolha dos pontos na imagem, escolheu-se pontos em locais de fácil acesso, localização em campo e bem definidos sobre a cena PRISM. Esta escolha levou em consideração áreas sem a presença de vegetação densa (abertas) com vistas a evitar o efeito do multicaminhamento e perda de sinal ao se realizar o

levantamento usando receptor GNSS, além de escolher pontos com diferença de altitudes (pontos escolhidos em baixas e elevadas altitudes) no intuito de verificar a influência da variação de altitude na acurácia altimétrica dos MDSs. Os pontos foram levantados em sua maioria em cruzamento de estradas rurais, principalmente devido a facilidade de identificação e acesso. A materialização destes pontos em campo foi feita utilizando metodologia empregada por IBGE (2009), onde a posição de cada ponto foi definida através da interseção entre eixos que definem o cruzamento das vias. A Figura 17 ilustra o levantamento de um ponto de controle e um de checagem.

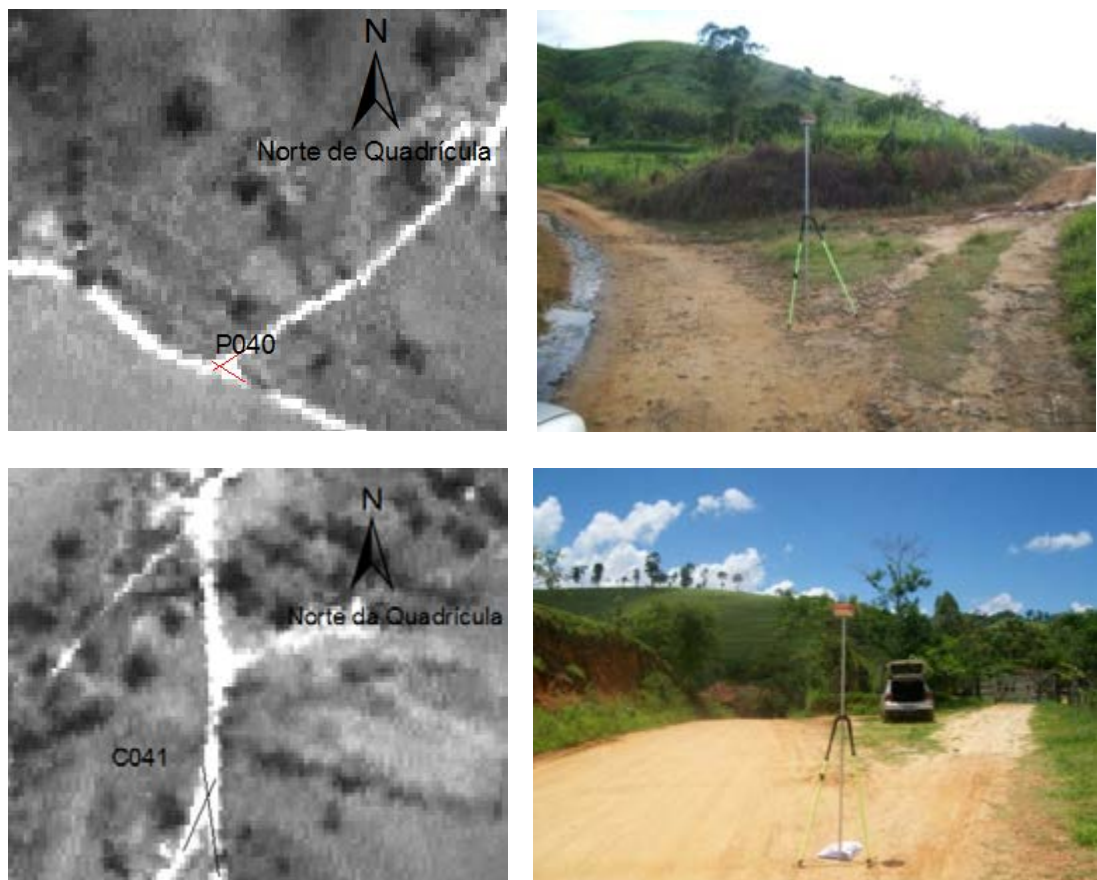


Figura 17 - Materialização e levantamento de pontos de controle e checagem em campo

### 5.3.1.2. Levantamento dos Pontos em campo

Uma vez definido os pontos sobre a imagem e escolhida a técnica de materialização dos pontos em campo, partiu-se para a etapa de levantamento Geodésico. Para tanto, definiu-se os seguintes parâmetros para o levantamento:

- . Intervalo de Gravação de dados: 5 segundos;
- . Máscara de Elevação: 10 graus;

- . Número mínimo de satélites: 5 e PDOP máximo: 4;
- . Tempo de rastreamento de cada ponto: 30 minutos.

Com relação ao tempo de rastreamento escolhido, constatou-se após teste realizado e apresentado a seguir, que 30 minutos seriam suficientes para realizar o levantamento, visando conseguir uma qualidade geométrica com relação à planimetria e altimetria de até 1/3 do erro padrão esperado para a escala em que se deseja avaliar, sendo este critério utilizado tanto para o levantamento dos pontos de controle, quanto para os pontos de checagem, conforme recomendado por Merchant (1982). Então, visando à possibilidade de uso dos dados a serem coletados, não só para geração e avaliação de Modelos em escalas de até 1:25.000 (cujo 1/3 do erro padrão corresponderia a uma incerteza de 2,5 metros para a planimetria e 1,1 metros para a altimetria), mas a possibilidade de uso destes pontos em trabalhos posteriores, como a geração e avaliação de dados derivados de outros sensores, tais como o IKONOS e GEOEYE, ou outros produtos em escalas menores ou iguais a 1:5.000, a qualidade dos pontos levantados para a planimetria deveria ser de 50cm e para a altimetria, com curvas de nível com equidistância vertical de até 2m, igual a 22cm.

A realização do teste foi realizada seguindo metodologia descrita por Santos (2010) e consistiu no levantamento do marco geodésico nº 471 situado na cidade de Ervália em Minas Gerais, implantado pela gerência de Geoprocessamento do Departamento de Estradas de Rodagem (DER) que apresenta as seguintes coordenadas geodésicas referenciadas ao Sistema SIRGAS 2000:

- . Latitude: 20°50'30,30724" Sul - Longitude: 42°48'14,74981" Oeste;
- . Altitude Elipsoidal: 700,659m.

O rastreamento do Marco foi realizado por um período de uma hora por dia em três dias com horários intercalados (um dia na parte da manhã, outro no começo da tarde e outro ao final da tarde). Feito isso, processou-se o arquivo de cada dia separadamente, dividindo-o em arquivos de rastreamento de 15, 30, 45 e 60 minutos. Este ponto foi processado com relação as bases da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) VICO (localizada em Viçosa a uma distância de 12 Quilômetros do ponto levantado) e MGBH (localizada em Belo Horizonte a uma distância de 160 Quilômetros do ponto). Após a realização da etapa de pós-processamento, constatou-se que o período mínimo de 30 minutos seria adequado a realização do levantamento.

Devido à dificuldade de acesso a estradas vicinais no mês de Dezembro (período de fortes chuvas), a dificuldade de identificação de alguns pontos no campo e a alteração de algumas características físicas ao longo dos anos (uma vez que a imagem utilizada neste trabalho foi tomada no ano de 2008), não foi possível a coleta de todos os pontos planejados, sendo levantados então, ao final de todo trabalho 60 pontos de controle e 30 pontos de checagem, totalizando 90 pontos distribuídos ao longo de 51 Quadrantes. A disposição destes pontos sobre a imagem é apresentada na Figura 18.

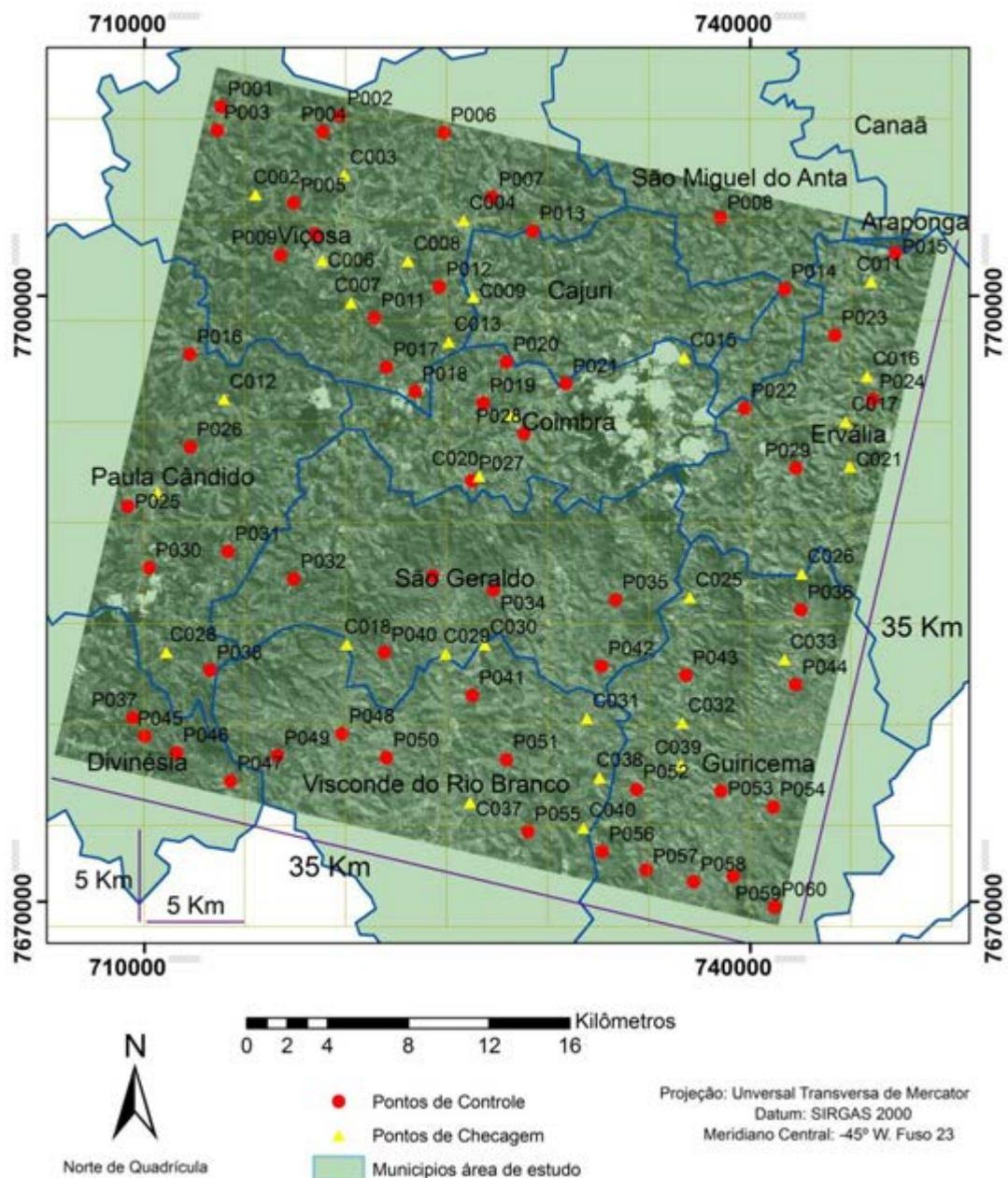


Figura 18 - Distribuição dos pontos de Controle e Checagem na imagem

### 5.3.1.3. Processamento dos pontos levantados

O processamento dos dados de campo foi realizado empregando o *Software* Ashtech Solutions 2.7. Para tanto, os dados brutos coletados foram carregados para o programa, bem como os arquivos contendo as bases da RBMC VICO e MGBH. Os pontos foram processados seguindo os seguintes parâmetros iniciais de projeto:

- . Sistema Geodésico: WGS84;
- . Máscara de Elevação : 10°;
- . Sistema de Projeção: UTM, fuso 23 e Meridiano Central -45° (Oeste).

Todos os pontos levantados atenderam aos critérios pré-estabelecidos com relação à qualidade das componentes planimétrica e altimétrica, não havendo a necessidade de descarte de nenhum dos pontos.

De posse dos pontos processados e ajustados, partiu-se para a geração dos MDSs.

### 5.3.2. Geração do Modelo Digital de Superfície com imagens PRISM

Para a geração dos MDSs, utilizou-se o *Software* PCI Geomatica 10.3, cuja licença foi disponibilizada gentilmente pelo IGA, onde foram realizados diversos testes nas cenas PRISM, com vistas a verificar a possibilidade de uso dos MDSs na escala de 1:25.000.

Foram gerados ao todo 54 Modelos seguindo as etapas apresentadas na Figura 19 que levaram em consideração os seguintes parâmetros:

- a) Influência do número de pontos de controle e do número de pontos de ligação (TPs) ao se gerar os MDSs:

Os MDSs foram gerados utilizando 6, 7, 9, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 e 60 pontos de controle e 3, 6, 9, 11 e 12 TPs.

- b) Disposição entre as visadas *Backward*, *Nadir* e *Forward* para geração das imagens epipolares:

Os MDSs foram obtidos através da combinação entre cada uma das três visadas (*Backward x Nadir* - BN, *Backward x Forward* - BF e *Nadir x Forward* - NF);

c) Combinação entre imagens epipolares.

Geração de MDSs através da combinação entre as imagens epipolares *BF*, *BN* e *NF*, utilizando para isto, o valor do pixel de altitude associado ao que apresentasse a maior correlação entre cada par epipolar quando comparados entre si. (Combinações *BF + BN*; *BF + NF*; *BN + NF*; *BF + BN + NF*).

A Figura 19 apresenta o Fluxograma contendo as etapas realizadas para obtenção dos Modelos.

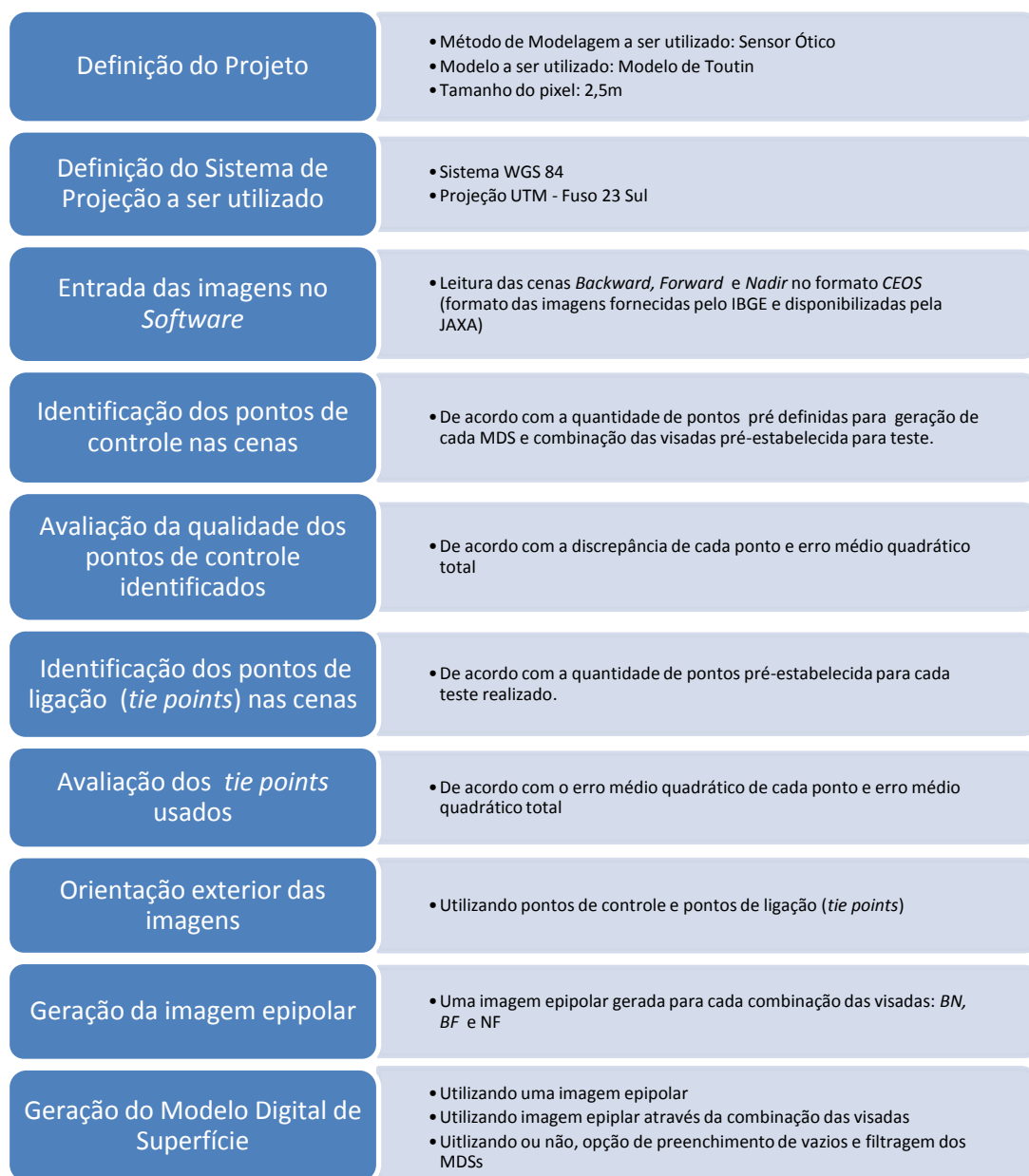


Figura 19 - Etapas realizadas para a Geração do Modelo Digital de Superfície

Os três parâmetros apresentados foram divididos em 04 testes, sendo eles descritos a seguir:

. *Teste 01*: Verificação da influência do número de pontos de ligação na geração de MDSs

Este teste teve como objetivo verificar o número mínimo de pontos de ligação (TPs) necessários para modelar a cena PRISM. Para tanto, foram gerados MDSs utilizando sete pontos de controle e combinação de TPs múltiplas de três, realizando testes com 3, 6, 9 e 12 pontos identificados manualmente sobre cada visada. Utilizou-se as combinações entre as visadas *BF*, *BN* e *NF* para geração dos pares. A Figura 20 apresenta a disposição dos pontos de controle e TPs sobre a cena *Nadir*.

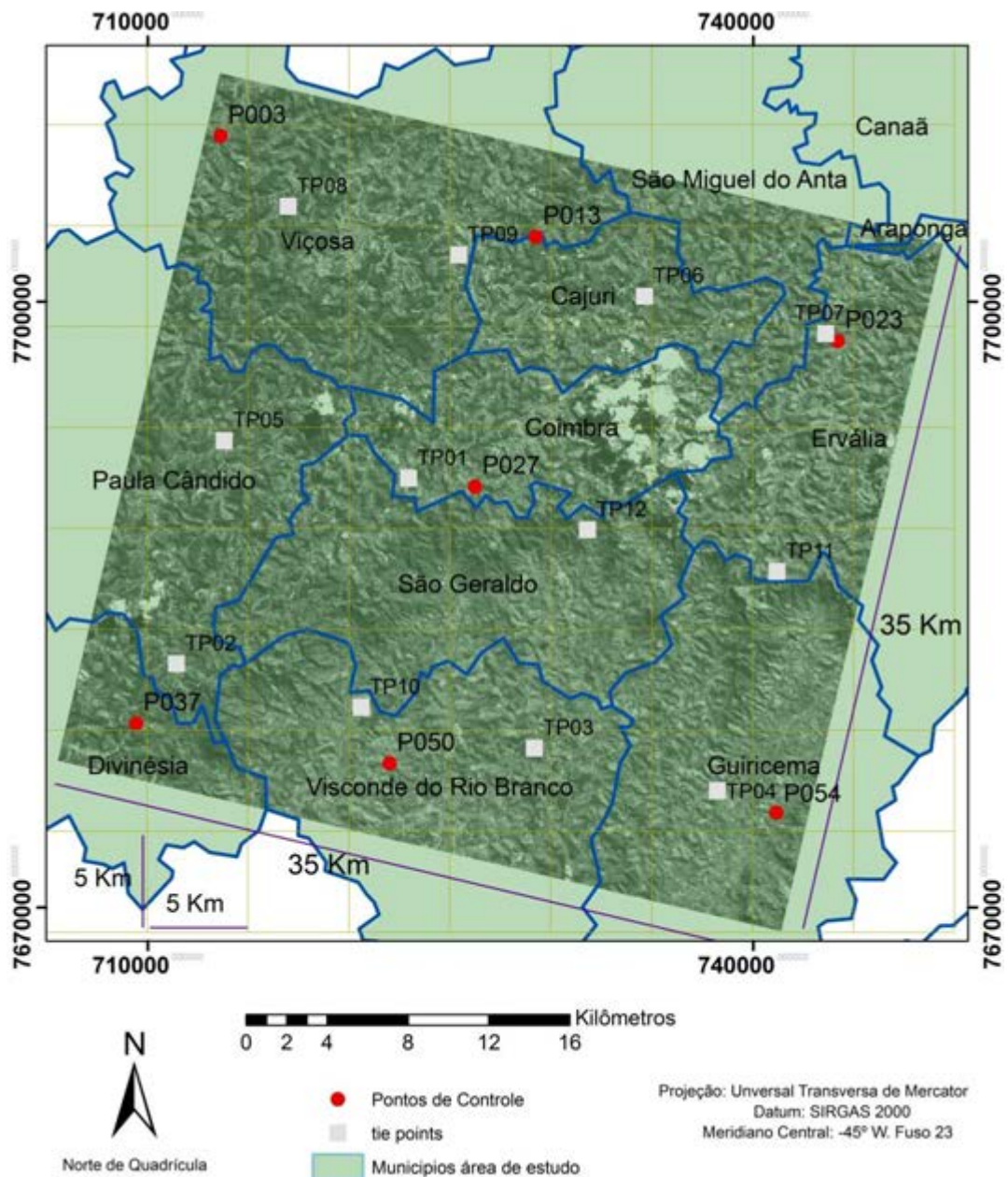


Figura 20 - Distribuição dos pontos de Controle e pontos de ligação sobre a cena *Nadir*

Para cada conjunto de visada foram utilizados os seguintes pontos de ligação:

MDSs 01, 02 e 03: Três pontos: TP02, TP04 e TP09.

MDSs 04, 05 e 06: Seis pontos: TP08, TP02, TP01, TP12, TP07 e TP04.

MDSs 07, 08 e 09: Nove pontos: TP08, TP05, TP02, TP09, TP01, TP10, TP07, TP11 e TP04.

MDSs 10, 11 e 12: Doze pontos: TP08, TP05, TP02, TP09, TP01, TP10, TP06, TP12, TP03, TP07, TP11 e TP04.

Os parâmetros utilizados relacionados as visadas, imagem epipolar e tamanho da grade, encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados para realização do teste 01

<b>Modelos gerados</b>	<b>Nº de PC utilizados</b>	<b>Nº de TPs utilizados</b>	<b>Visadas utilizadas</b>	<b>Imagem epipolar utilizada</b>	<b>Tamanho da grade (m)</b>
MDS 1	7	3	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 2	7	3	<i>B;F</i>	<i>BF</i>	10
MDS 3	7	3	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
MDS 4	7	6	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 5	7	6	<i>B;F</i>	<i>BF</i>	10
MDS 6	7	6	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
MDS 7	7	9	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 8	7	9	<i>B;F</i>	<i>BF</i>	10
MDS 9	7	9	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
MDS 10	7	12	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 11	7	12	<i>B;F</i>	<i>BF</i>	10
MDS 12	7	12	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
Total de Modelos: 12					

O espaçamento da grade de 10 metros foi adotado tanto para este teste, quanto para os testes 03 e 04, seguindo o conceito inicial proposto pela missão ALOS apresentado por JAXA (2007), de se gerar modelos digitais em nível global com espaçamento da grade iguais a 10 metros e erros menores que 5 metros.

De posse destes Modelos, verificou-se qual seria o número mínimo de pontos mais adequado para geração dos MDSs. Vale ressaltar que foi realizado também um teste a priori empregando seis pontos de controle (numero mínimo recomendado pela fabricante do *Software* PCI Geomatica), 12 pontos de ligação e a combinação entre as visadas *BF*, *BN* e *NF*, porém os resultados obtidos para cada modelo não foram satisfatórios, visto que os mesmos apresentaram RMS da ordem de 20 metros para a

componente planimétrica e 25 metros para a componente altimétrica, sendo os resultados destes Modelos não apresentados neste trabalho.

. *Teste 02*: Utilizando Metodologia apresentada por IBGE (2009) para a região de Itaguaí:

Neste teste procurou-se empregar a metodologia utilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com vistas a verificar sua adequação a uma região com características diferentes da avaliada, uma vez que como se utilizou o mesmo *software* de processamento de imagens usado pelo IBGE este teste foi possível de ser realizado. Para tanto, reamostrou-se os pixels das cenas PRISM originais para 5 metros e gerou-se seis pares epipolares através das combinações entre as imagens epipolares *BN*, *BF* e *NF*, usando para isso, a opção disponibilizada pelo programa de se obter um MDS resultante, através da utilização dos valores de altitude do Modelo que apresentou maior correlação entre cada uma das imagens epipolares geradas. Obteve-se então 6 MDSs gerados com as mesmas características utilizadas nos testes onde o IBGE conseguiu os melhores resultados. Os parâmetros selecionados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados para realização do teste 02

<b>Parâmetros</b>	<b>MDS 13</b>	<b>MDS 14</b>	<b>MDS 15</b>	<b>MDS 16</b>	<b>MDS 17</b>	<b>MDS 18</b>
Pares estereoscópicos utilizados	<i>BN+</i>	<i>BN+</i>	<i>BN +</i>	<i>BN+</i>	<i>BN+</i>	<i>BN+</i>
	<i>BF+</i>	<i>BF+</i>	<i>+NF</i>	<i>+NF</i>	<i>BF+</i>	<i>BF+</i>
	<i>+NF</i>	<i>+NF</i>	-	-	<i>+NF</i>	<i>+NF</i>
Espaçamento da grade (m)	10	10	10	20	20	20
Preenchimento de vazios e filtragem	não	sim	sim	sim	não	sim
Número de PCs utilizados	7	7	7	7	7	7
Número de TPs utilizados	11	11	11	11	11	11

A opção de preenchimento de vazios e filtragem dos MDSs gerados utilizada e disponível no PCI consiste na interpolação de valores de altitude para regiões onde a correlação mínima desejada não foi alcançada, no caso deste trabalho, 50%, seguindo o utilizado por IBGE (2009). Esta opção emprega o método da Diferença Finita que segundo PCI (2007), consiste em um processo de interpolação que é realizado em três passos. O primeiro deles é a codificação dos valores de elevação (gerados pelo programa a priori) com os pixels correspondentes no MDS inicialmente gerado. No

segundo passo, os valores de elevação para os pixels onde ocorreram falhas no processo de correção são interpolados utilizando o algoritmo da Transformada de Distância que irá calcular a distância dos pixels a serem interpolados, com os pixels já interpolados e apresentados no primeiro passo. No terceiro passo, o algoritmo da Diferença Finita irá suavizar através de um processo iterativo a área onde foi realizada a varredura, sendo que os pixels que foram codificados no primeiro passo não terão os seus valores de altitude alterados, enquanto que os valores dos pixels interpolados por este método serão atualizados com base no valor de sua vizinhança. Com relação ao processo de suavização das áreas interpoladas, o *Software* PCI oferece as opções de restringir o número de vezes em que o algoritmo irá suavizar as áreas interpoladas (número de iterações) e a tolerância que irá restringir a máxima alteração no valor de altitude do pixel a ser alterada pelo processo de suavização. Ou seja, caso a tolerância selecionada seja de 1 metro e o número de iterações igual a 10, a alteração máxima a ser realizada pelo algoritmo sobre a elevação será de um metro, sendo que serão realizadas 10 iterações para suavizar os valores de altitude. Caso a restrição de 1 metro seja atingida na quinta iteração, o processo será finalizado. Neste trabalho utilizou-se 10 iterações e tolerância de 1 metro por não se conhecer o número adotado pelo IBGE e por ser este o valor recomendado pela PCI.

. *Teste 03*: Verificação da influência do número de pontos de controle na geração de MDS.

Neste teste procurou-se verificar os efeitos do acréscimo de pontos de controle na qualidade altimétrica dos MDSs. Estes testes basearam-se na inserção de pontos de controle múltiplos de sete, gerando pares epipolares com 07, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 e 60 pontos de controle, variando-se as combinações entre as visadas, conforme apresentado na Tabela 10. Todos os MDSs foram gerados com tamanho do pixel igual 10 metros, 12 pontos de ligação e não se utilizou a opção de preenchimento de vazios disponibilizada pelo *software* PCI Geomatica, nem a combinação entre as visadas, uma vez que, conforme dito anteriormente, nem todos os programas comerciais que processam imagens ALOS tem esta opção implementada. Contudo, visando verificar se o emprego destas opções iriam alterar a qualidade do produto final, principalmente com relação ao número de pontos de controle utilizados, realizou-se o teste 04.

A Tabela 10 é apresentada a seguir.

Tabela 10 - Parâmetros utilizados para realização do teste 03

<b>Modelos gerados</b>	<b>Nº de PC utilizados</b>	<b>Nº de TPs utilizados</b>	<b>Visadas utilizadas</b>	<b>Imagem epipolar utilizada</b>	<b>Tamanho da grade (m)</b>
MDS 19	7	12	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 20	7	12	<i>B;F</i>	<i>BF</i>	10
MDS 21	7	12	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
MDS 22	14	12	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 23	14	12	<i>B;F</i>	<i>BF</i>	10
MDS 24	14	12	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
MDS 25	21	12	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 26	21	12	<i>B;F</i>	<i>BF</i>	10
MDS 27	21	12	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
MDS 28	28	12	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 29	28	12	<i>B;F</i>	<i>BF</i>	10
MDS 30	28	12	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
MDS 31	35	12	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 32	35	12	<i>B;F</i>	<i>BF</i>	10
MDS 33	35	12	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
MDS 34	42	12	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 35	42	12	<i>B;F</i>	<i>BF</i>	10
MDS 36	42	12	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
MDS 37	49	12	<i>B;N</i>	<i>BF</i>	10
MDS 38	49	12	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 39	49	12	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
MDS 40	56	12	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 41	56	12	<i>B;F</i>	<i>BF</i>	10
MDS 42	56	12	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
MDS 43	60	12	<i>B;N</i>	<i>BN</i>	10
MDS 44	60	12	<i>B;F</i>	<i>BF</i>	10
MDS 45	60	12	<i>N;F</i>	<i>NF</i>	10
Total de Modelos Gerados 27					

*Teste 04:* Verificação da combinação de imagens epipolares na qualidade altimétrica do MDS

O teste 04 foi realizado com vistas a verificar se a combinação entre os pares epipolares (*BF*, *BN* e *NF*) iria melhorar a qualidade altimétrica dos MDSs. Para realizá-lo utilizou-se os pares obtidos no teste 03 que apresentaram os melhores resultados, após avaliação empregando o Decreto-Lei 89.817/84.

Foram gerados seis MDSs utilizando as combinações *BN+BF*, *BN+NF* e *BN+BF+NF* e opção de preenchimento de valores de altitude com base nas imagens epipolares que apresentassem as melhores correlações. Os MDSs gerados com 7

pontos de controle não foram utilizados na escolha dos pares epipolares, visto que os mesmos foram avaliados no teste 02.

Os parâmetros utilizados na geração são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros utilizados para realização do teste 04

<b>Modelos gerados</b>	<b>Nº de PC utilizados</b>	<b>Nº de TPs utilizados</b>	<b>Visadas utilizadas</b>	<b>Imagem epipolar utilizada</b>	<b>Tamanho da grade (m)</b>	<b>Preenchimento de vazios (sim/não)</b>
MDS 46		12	$B;N;F$	$BN + BF$	10	sim
MDS 47		12	$B;N;F$	$BN + NF$	10	sim
MDS 48	O que gerou melhor MDS no teste 03	12	$B;N;F$	$BN+BF+ NF$	10	sim
MDS 49		12	$B;N;F$	$BN+BF$	10	não
MDS 50		12	$B;N;F$	$BN+ NF$	10	não
MDS 51		12	$B;N;F$	$BN+BF+ NF$	10	não
Total de Modelos Gerados			6			

Por não se dispor neste trabalho do arquivo contendo os Coeficientes Polinomiais Racionais – RPCs, comercializados pelo Centro de Tecnologia em Sensoriamento Remoto do Japão - RESTEC nenhum teste pode ser realizado neste sentido.

### 5.3.3. Geração das Ortoimagens

As ortoimagens foram geradas para a cena *Nadir* utilizando os Modelos obtidos nos testes 01, 02, 03 e 04 que apresentassem as seguintes características:

- 1- Modelo que apresentasse melhor classificação no Teste 02 segundo o PEC, menor valor de Erro Médio Quadrático e menor desvio-Padrão;
- 2- Modelo que apresentasse melhor classificação no Teste 03 segundo o PEC, o menor Erro Médio Quadrático e menor desvio-padrão;
- 3- Modelo gerado com 7 pontos de controle e melhor avaliado no Teste 03 (considerando os mesmos parâmetros de avaliação do item 01);
- 4- Modelo melhor avaliado no teste 04 (Considerando os mesmos parâmetros de avaliação do item 01).

De posse dos modelos, utilizou-se o *Software* PCI Geomatica 10.3. para geração das ortoimagens cujos parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros utilizados para Ortorretificação da Cena PRISM

Visada utilizada	<i>Nadir</i>
Método de reamostragem utilizado	Vizinho mais próximo
Tamanho do pixel	2,5 metros

O método de reamostragem pelo vizinho mais próximo foi escolhido devido ao fato de que segundo Schowengerdt (1997) este método não modifica a informação radiométrica da imagem, mantendo então o valor original do pixel.

#### **5.3.4. Avaliação dos Modelos Digitais de Superfície Gerados e Ortoimagens**

A avaliação dos MDSs gerados para cada combinação de visadas entre as cenas PRISM foi realizada empregando o Decreto-Lei 89.817/84, aliado a verificação da acurácia e precisão da componente altimétrica. Empregou-se as análises de Tendência e Precisão realizadas de maneira global considerando para tanto, todo o MDS através da sobreposição entre as cenas PRISM. A avaliação foi realizada para todos os MDSs gerados nos testes 01, 02, 03 e 04. As ortoimagens também foram avaliadas levando-se em consideração o Decreto-Lei e análises visuais.

Os procedimentos utilizados para avaliação são descritos nos tópicos a seguir.

##### **5.3.4.1. Avaliação do MDS empregando Decreto-Lei 89.817/84**

A avaliação dos Modelos empregando o Decreto-Lei 89.817/84 foi realizada para cada modelo gerado e utilizando os pontos de checagem levantados em campo. Foram utilizados 30 pontos de checagem para avaliação dos modelos. Este número de pontos foi escolhido devido ao fato do Decreto-Lei não especificar uma quantidade mínima de pontos de checagem a serem utilizados bem como não existe um consenso por parte da comunidade acadêmica com relação a um número mínimo a ser utilizado para avaliação de MDSs. Autores como Barros (2006) sugere um número de 30 pontos de checagem e de acordo com Cuartero *et al.* (2004) a *United States Geological Survey* – USGS recomenda um número mínimo de 28 pontos. Optou-se então por utilizar 30 pontos de checagem, sendo estes obtidos na etapa de coleta de dados em campo e apresentados na Figura 18.

Para realizar a avaliação, primeiramente obteve-se os valores das discrepâncias com relação a componente altimétrica. Estas discrepâncias foram obtidas através da identificação dos valores de altitudes sobre o MDS e comparação com os pontos de

checagem levantados em campo. A coleta dos valores de altitudes sobre os Modelos foi realizada utilizando o *Software* ArcGIS 9.3. Os valores coletados foram digitados no *Software* Microsoft Excel 2007, onde foram calculadas as discrepâncias para a componente altimétrica, além de serem realizadas as análises de Tendência, Precisão, e classificação dos Modelos empregando o PEC.

De posse dos valores de altitudes e suas discrepâncias realizou-se o Teste de *Shapiro-Wilk* descrito no item 4.8.2.1, com o objetivo de verificar se as discrepâncias para a componente altimétrica seguiam distribuição Normal, condição esta necessária a realização do Teste t de *Student*. O Teste de Normalidade foi realizado utilizando o *Software* STATISTICA 7.0 ao nível de significância de 90%.

Feito isso, realizou-se a análise de Tendência, com vistas a verificar se os Modelos avaliados apresentavam erros sistemáticos para a componente altimétrica. Esta análise foi realizada através do emprego do Teste *t de Student* descrito no item 4.8.2.1 que foi implementado no *Software* Excel 2007.

O passo seguinte foi a análise dos Modelos empregando o Padrão de Exatidão Cartográfica que foi realizada tomando como base os valores do PEC constantes no Decreto-Lei para o tamanho do pixel em que o MDS de cada teste foi gerado, ou seja, tomando como exemplo um MDS com tamanho do pixel igual a 10 metros (fazendo analogia a equidistância entre curvas de nível), este produto deveria ter 90% dos pontos com valor PEC menor ou igual 5 metros, o que corresponde a metade da equidistância das curvas de nível, ou no caso deste trabalho, metade do valor do pixel do MDS obtido (10metros) para a classe A.

Posteriormente, realizou-se a análise de Precisão através do emprego do Teste do Qui-Quadrado, com o objetivo de verificar se os Modelos se enquadravam na escala de 1:25.000, escala esta recomendada pela JAXA (2007) ao se trabalhar com MDEs oriundos de imagens ALOS PRISM.

Um MDS se enquadrava na classe A para a escala avaliada se o mesmo fosse classificado como Classe A para análise empregando Decreto-Lei e Análise de Precisão, respectivamente, caso contrário, o mesmo era avaliado para uma classe imediatamente inferior.

Os modelos reprovados no teste de tendência eram enquadrados na mesma classe em que os mesmos foram avaliados e rotulados com o indicativo informando a presença de erros sistemáticos. As etapas empregadas para a realização da avaliação empregando o PEC encontram-se nas Figuras 21 e 22.

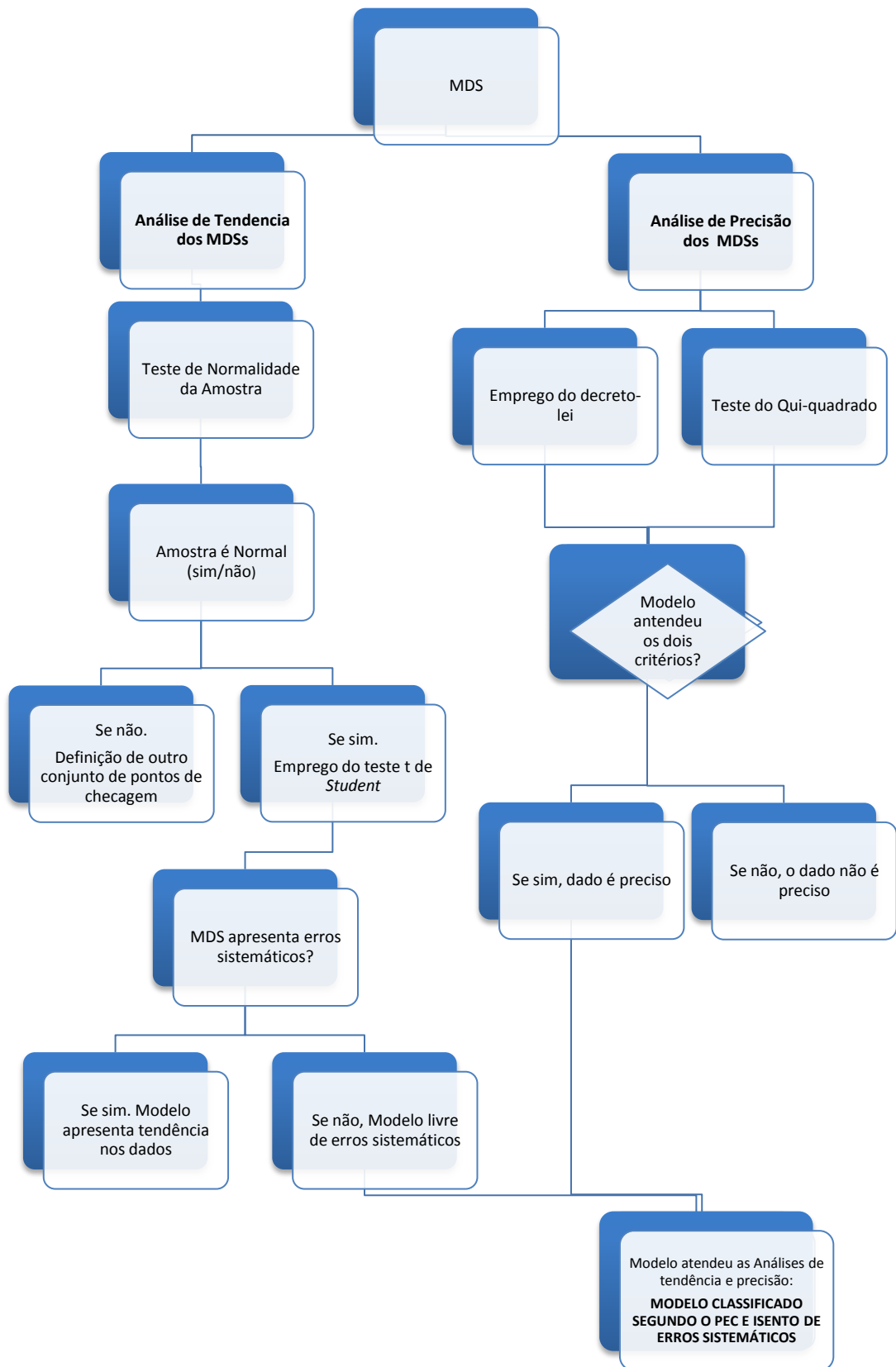


Figura 21 - Fluxograma descrevendo os passos Empregados para Avaliação do Modelo empregando Decreto-Lei

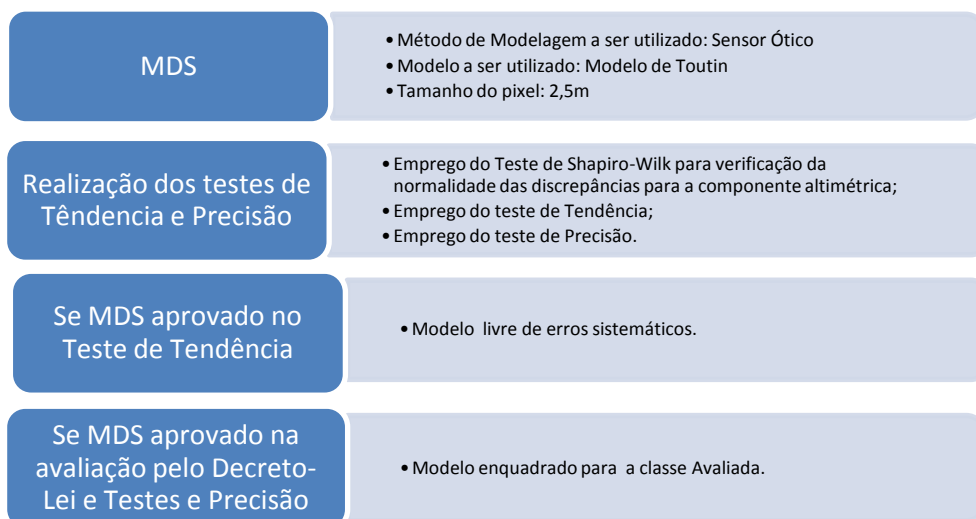


Figura 22 - Passos para avaliação do Modelo Digital de Superfície empregando o Decreto-Lei e análise de Tendência e Precisão

#### 5.3.4.2. Avaliação das Ortoimagens ALOS PRISM empregando o Decreto-Lei 89.817/1984 e análises visuais

A avaliação das ortoimagens foi realizada utilizando os 30 pontos de checagem usados para avaliar os MDSs. Para proceder a avaliação, importou-se as ortoimagens para o ArcGIS 9.3 e coletou-se sobre cada uma, as coordenadas dos 30 pontos de checagem obtidos em campo, identificando-os sobre a imagem através do croqui e fotos contendo a localização dos mesmos sobre a cena PRISM. Feito isso, calculou-se as discrepâncias e realizou-se o Teste de Normalidade utilizando o *Software* STATISTICA 7.0. Posteriormente empregou-se a análise de Tendência, avaliou-se utilizando o Decreto-Lei e efetuou-se a análise de Precisão com vistas a verificar enquadramento da ortoimagem para a escala de 1:25.000 seguindo procedimento apresentado no tópico 5.3.4.1 Figuras 21 e 22.

As análises visuais foram realizadas de forma empírica com o objetivo de verificar a qualidade radiométrica das ortoimagens geradas e se o processo de ortorretificação causou mudanças significativas em determinadas feições visíveis sobre a mesma. Primeiramente, comparou-se as quatro ortoimagens com a finalidade de verificar diferenças relacionadas ao acréscimo do número de pontos de controle sobre cada ortoimagem e o comportamento de cada feição, contudo não se encontrou diferenças significativas entre as ortoimagens. O segundo teste foi realizado para a ortoimagem que apresentou melhor avaliação após análise empregando Decreto-Lei

89.817/84. Escolheu-se regiões sobre a ortoimagem e comparou-as com os seguintes produtos:

- a) Ortoimagem derivada do Sensor HRC do Satélite CBERS 2B, gerada com resolução espacial de 2,5m, resolução radiométrica de 8 bits e avaliada como Classe A segundo o PEC para a escala de 1:25.000.
- b) Ortoimagem IKONOS II do satélite IKONOS avaliada como Classe A para a Escala de 1:10.000 e com tamanho de seu pixel igual a 1 metro e com tamanho do pixel reamostrado para 2,5m.

#### 5.3.4.3. Avaliação visual dos MDSs e análise com base na declividade

A avaliação visual foi realizada utilizando os MDSs que obtiveram melhor classificação após emprego do Decreto-Lei 89.817/84 para os testes 02, 03 e 04. A escolha dos MDSs foi feita da mesma forma que a apresentada no item 5.3.3. Foram realizados três testes que levaram em consideração os parâmetros apresentados na Figura 23.

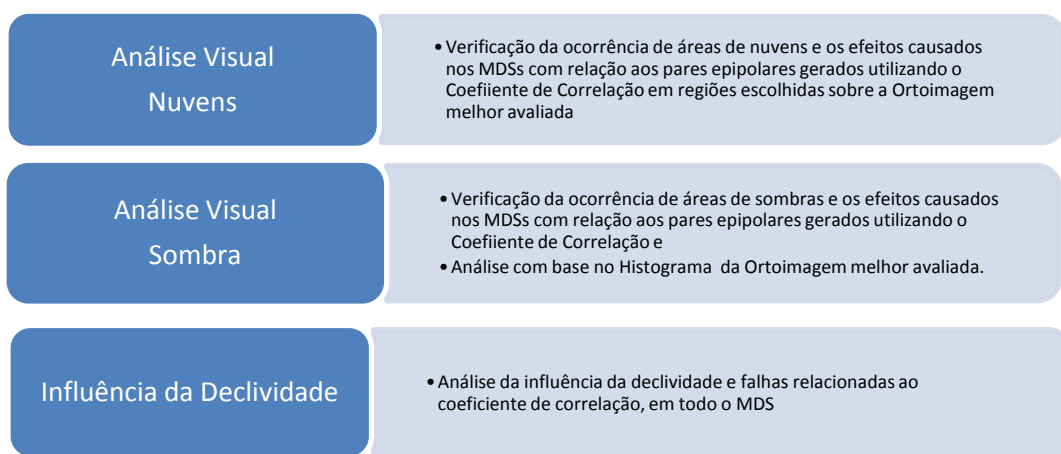


Figura 23 - Análise visual e análise da influência da declividade realizada para os MDSs melhores classificados após emprego de análise global

A análise visual foi realizada através da seleção na ortoimagem que obteve melhor avaliação de regiões com altitudes elevadas, médias e baixas. Verificou-se neste teste o comportamento da altimetria com relação ao contraste de cada uma das áreas escolhidas e se os MDSs apresentavam valores espúrios. Posteriormente, realizou-se a análise visual de regiões contendo nuvens e sombra de nuvens, através da seleção sobre a ortoimagem de uma região coberta de nuvens, outra região

apresentando sombra de nuvens e uma última região contendo apenas sombra do relevo, onde se verificou o comportamento do interpolador utilizado no local próximo a área coberta, tomando como referencia o coeficiente de correlação para cada MDS avaliado localmente, sendo realizada então uma análise qualitativa, uma vez que não se dispunha de dados acurados para se realizar uma análise quantitativa a nível local.

A análise de declividade consistiu na verificação da influência do relevo sobre o processo de estéreo-correlação. Para realização deste teste, gerou-se os mapas de isodeclividade para os quatro MDSs utilizando o comando *Slope* disponível no *Software ArcGIS 9.3*. De posse dos mapas, foi verificado se as áreas com declividade mais elevadas apresentavam coeficiente de correlação baixo. Esta análise foi feita no intuito de se ter um indicativo do comportamento do aumento da declividade com relação ao coeficiente de correlação entre os pixels, em um nível global, dado o fato de que foram utilizados os próprios MDSs gerados. Logo esta análise não pode ser considerada como uma avaliação global dos MDSs, mas apenas um indicativo da influência da declividade sobre os Modelos.

O indicativo foi obtido através de uma tabulação cruzada, onde comparou-se os efeitos do aumento da inclinação do terreno em relação ao coeficiente de correlação, conforme dito anteriormente. O Mapa de isodeclividade foi dividido em faixas e associados às classes de coeficiente de correlação definidas previamente.

As faixas de declividade foram divididas seguindo classificação apresentada por Pereira e Lombardi Neto (2004) sendo elas:

Classe A: Declividade de 0 a 3% - Relevo Plano.

Classe B: Declividade de 3 a 8% - Relevo Suavemente Ondulado.

Classe C: Declividade de 8 a 13% - Relevo Moderadamente Ondulado.

Classe D: Declividade de 13 a 20% - Relevo Ondulado.

Classe E: Declividade de 20 a 45% - Relevo Forte Ondulado.

Classe F: Declividade de >45% - Relevo Montanhoso e escarpado.

Definidas as faixas de declividade, organizou-se em uma tabela as faixas de declividade para cada MDS em relação as classes pré definidas para o coeficiente de correlação (0 a 40%, 40 a 50%, 50 a 65%, 65 a 75%, 75 a 85% e 85 a 100%) e se verificou o número de pixels contabilizados para cada uma destas faixas.

### 5.3.5. Geração e avaliação do MDS Composto

A última etapa deste trabalho consistiu na realização de um Modelo Digital resultante, utilizando para isso, quatro dos seis MDSs gerados no Teste 04 que apresentaram acurácia em relação a componente altimétrica superior a cada um dos MDSs obtidos isoladamente. Optou-se por nomeá-lo de MDS Composto, ao invés de MDS Híbrido devido ao fato de que nenhuma estratégia de ajustamento ou interpolação dos dados foi utilizada, além de não se realizar integração com dados altimétricos provenientes de outras fontes, tais como dados LIDAR, ou Sensores com maior resolução espacial. O procedimento realizado consistiu-se na geração de um MDS que apresentasse maior acurácia, através da estimativa da localização do indicativo do erro altimétrico de cada pixel por meio do preenchimento em um novo arquivo *raster*, dos valores de altitude dando origem ao novo MDS resultante.

Para a integração entre os MDSs, utilizou-se a Fórmula de Koppe modificada por Kraus (2004) (Equação 28 apresentada no Tópico 4.8.4) que é aplicada a dados provenientes de levantamentos aerofotogramétricos. A escolha da Equação foi feita devido ao fato da inclinação do terreno exercer influência sobre a qualidade altimétrica dos MDSs, conforme o indicativo apresentado no item 6.7.2 após emprego do procedimento apresentado no item 5.3.4.3. Logo, procurou verificar se o emprego da Equação 28 traria bons resultados, no sentido de estimar a localização do indicativo do erro altimétrico sobre cada MDS. Neste sentido, visando uma adequação da Fórmula de Koppe ao uso em dados derivados do Sensor PRISM, realizou-se uma alteração nos coeficientes da Equação 28.

Esta alteração se baseou na substituição do parâmetro  $0,15^0/_{00}$  da altura de voo pelo fator  $0,0055^0/_{00}$  para o primeiro termo e a substituição do parâmetro  $0,15$  pelo fator  $0,0055$  no segundo termo da Equação 28, obtendo a Equação 30:

$$\sigma_H = 0,0055^0/_{00} de h + \frac{0,0055}{c} . h . \tan\alpha \quad (30)$$

onde:

$h$  é a altura do satélite, obtida através da subtração entre a altitude de voo; aproximada do satélite ALOS (691.650m) e a altitude de cada ponto;

$0,0055^0/_{00} de h$  é o valor de  $h$  em partes de mil (termo  $^0/_{00}$ );

$c$  é a distância focal do sensor PRISM (1.939mm);

$\alpha$  é a declividade do terreno.

O fator 0,0055 foi escolhido para o segundo termo da Equação 30, por estar relacionado ao tamanho do pixel dos detectores CCDs do Sensor PRISM, ao se realizar uma visada ao longo da trajetória, cujo valor apresentado por Osawa e Hamazaki (2000) é igual a 0,0055mm (5,5 microns). Logo, este fator está associado ao menor elemento a ser identificado no terreno pelo sensor. Fazendo um comparativo com levantamento proveniente de fotogrametria analógica, ao se analisar curvas-de-nível, Kraus (2004) trabalha com o valor 0,2mm, que consiste no erro associado ao se traçar as curvas (0,2mm).

O termo  $0,0055^0/_{00} \text{ de } h$  (1º termo da Equação 30) está relacionado ao erro vertical para os pontos individuais.

Vale ressaltar que a geração do MDS composto foi realizada levando em consideração a influência do fator de escala e declividade sobre os MDSs analisados de forma individual, portanto, o que se procurou obter com o emprego da Equação 30 foi o indicativo para o erro altimétrico e não o valor do erro em si, visto que o erro obtido pela Fórmula de Koppe, foi obtido de forma aproximada, levando-se em consideração os fatores A e B determinados de forma empírica.

O MDS composto foi obtido através da associação dos valores de altitude tomando os pixels que apresentassem menor indicativo de erro, obtido em relação à inclinação do terreno, conforme pode ser visto na Figura 24.



e 11 na imagem 3). Como o menor indicativo (valor igual a 10) está associado ao MDS 1, o valor de altitude a ser preenchido na linha 1 coluna 1 da matriz vazia será 650. Feito isso, o algoritmo irá realizar o teste para a linha 1 coluna 2, procedendo-se desta forma até chegar ao último pixel das imagens.

A aplicação deste procedimento foi realizada utilizando-se o *Software* ArcGIS 9.3, através do emprego da ferramenta *ModelBuilder*, que permite a criação de um modelo em forma de fluxograma englobando todas as ferramentas necessárias a implementação desta rotina. Esta *Macro* encontra-se no Apêndice B e os passos utilizados para a geração do MDS são descritos a seguir:

1- Geração dos Mapas de Isodeclividade para cada um dos seis MDSs PRISM

. Estes Mapas foram gerados no formato matricial, utilizando a ferramenta *Slope* do *Software* ArcGIS

2- Obtenção do erro associado a componente altimétrica:

. Utilizando a Equação 30 dada por:

$$\sigma_H = 0,0055^0 /_{00} de h + \frac{0,0055}{c} . h . tan\alpha \quad (30)$$

3- Geração do MDS Composto:

. Verificação dos pixels que apresentavam menor indicativo do erro altimétrico, através da realização de um comparativo entre cada um dos seis MDSs;

. Associação dos valores de altitude em um único arquivo matricial, após comparação de cada MDS em função do indicativo do menor erro altimétrico (conforme apresentado na Figura 24).

4- Avaliação do MDS Composto:

. Através de análise visual;

. Empregando o Decreto-Lei 89.817/84 para toda imagem (utilizando os 30 pontos de checagem utilizados na realização dos testes 01 a 04);

. Empregando o Decreto-Lei 89.817/84 para a região de Viçosa, onde utilizou-se um novo conjunto de pontos de controle, que foram obtidos através de levantamento empregando receptores GNSS e com qualidade altimétrica da ordem

de 5cm. Estes pontos disponibilizados por Ferraz (2012)\* e Gripp Jr (2009), encontram-se distribuídos ao longo da bacia do Ribeirão São Bartolomeu, suas coordenadas são apresentadas no Apêndice A e sua distribuição espacial é apresentada na Figura 25.

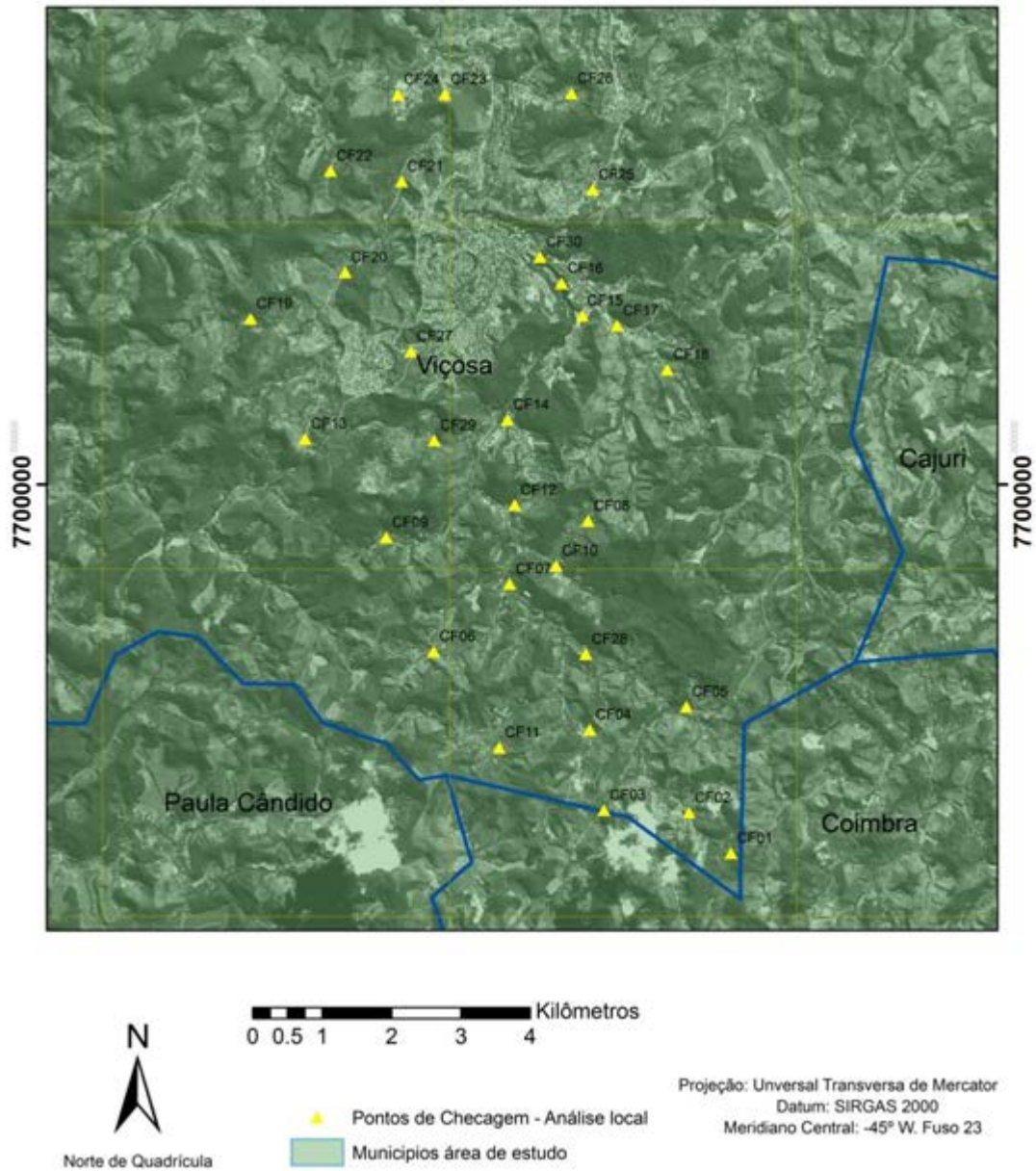


Figura 25 - Distribuição dos pontos de Checagem sobre a imagem PRISM – Análise local utilizando o PEC para a região de Viçosa

Uma vez realizados todos os testes, partiu-se para a análise dos produtos, conforme apresentado no Tópico 6 deste trabalho.

\*Pontos de Controle levantados pelo Professor Antônio Santana Ferraz no desenvolvimento de sua Tese que até a presente data se encontrava em andamento.

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A seguir encontram-se os resultados obtidos para as etapas de geração e avaliação dos MDSs. As Tabelas completas apresentando todos os resultados obtidos, encontram-se no Apêndice B.

### **6.1. Avaliação dos MDSs obtidos no Teste 01**

Após realizadas as análises de tendência, precisão e avaliação utilizando os parâmetros definidores do PEC, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 13, que ilustra um resumo das principais estatísticas relacionadas a análise de Normalidade, Tendência, Precisão, classificação empregando o PEC e classificação final dos produtos avaliados.

Tabela 13 - Resumo das Estatísticas para os MDSs avaliados no Teste 01

MDS	Média	Desvio	Erro	RMS	Distribuição	Apresenta	$\Delta h < PEC$	Classificação	Classificação	Classificação
	Padrão		Máximo	Calculado	normal?	tendência?	(%)	(PEC)	$\chi^2$	Final
MDS 01 teste01_7_pontos_BN_10m_3tp	-0,37	2,69	8,14	2,712	sim	sim	93,3	A**	A**	A*
MDS 02 teste01_7_pontos_BF_10m_3tp	0,70	3,12	6,98	3,196	sim	não	93,3	B	A	B
MDS 03 teste01_7_pontos_NF_10m_3tp	-1,90	4,20	12,50	4,627	não	sim*	83,3	Reprovado***	B***	<b>REPROVADO</b>
MDS 04 teste01_7_pontos_BN_10m_6tp	-1,00	2,00	-6,03	2,242	sim	sim	93,3	A**	A**	A
MDS 05 teste01_7_pontos_BF_10m_6tp	-0,40	3,20	-7,57	3,223	sim	não	90,0	A	A	A
MDS 06 teste01_7_pontos_NF_10m_6tp	-0,80	3,52	10,14	6,387	não	não*	96,7	C*	Reprovado*	<b>REPROVADO</b>
MDS 07 teste01_7_pontos_BN_10m_9tp	-1,13	1,93	-5,87	2,251	sim	sim	93,3	A**	A**	A
MDS 08 teste01_7_pontos_BF_10m_9tp	0,07	3,19	-8,57	3,195	sim	não	93,3	B	A	B
MDS 09 teste01_7_pontos_NF_10m_9tp	-0,47	6,59	-6,02	6,605	não	não*	93,3	C*	Reprovado*	<b>REPROVADO</b>
MDS 10 teste01_7_pontos_BN_10m_12tp	-0,90	1,97	-5,09	2,156	sim	não	93,3	A	A	A
MDS 11 teste01_7_pontos_BF_10m_12tp	-1,03	2,20	-5,87	2,431	sim	não	93,3	A	A	A
MDS 12 teste01_7_pontos_NF_10m_12tp	-1,13	3,81	-6,02	4,025	sim	não	90,0	C	B	C

\*MDS reprovado no Teste de Normalidade

\*\*MDS reprovado no Teste de Tendência

\*\*\*MDS Reprovado no Teste de Normalidade e Tendência

Analisando os resultados apresentados na Tabela 13 verifica-se que os MDSs 3, 6 e 9 gerados pela combinação *Nadir X Forward (NF)* não apresentaram distribuição normal. O acréscimo de TPs não influenciou os valores de  $W_{\text{calculado}}$  que se mantiveram próximos para todos os testes realizados, exceto para o estereopar *NF* em que esse acréscimo teve efeito na distribuição das discrepâncias para a altimetria, fazendo com que as mesmas passassem a apresentar distribuição normal, como pode ser visto para o MDS 12.

Com relação a análise de Tendência os MDSs 01, 03, 04 e 07 apresentaram erros sistemáticos. Estes modelos foram gerados através da combinação entre as visadas *Backward X Nadir* (MDSs 01, 04 e 07) e *Nadir X Forward* (MDS 03). O acréscimo de TPs para geração de modelos teve efeito positivo, eliminando a presença de erros sistemáticos nos MDSs analisados. Vale ressaltar que os TPs foram identificados manualmente tomando o cuidado de se trabalhar com valor de Erro Médio Quadrático (RMS) menor que 1 pixel conforme recomendado por Crosta (1993). Ressalta-se ainda que foi realizada a identificação automática dos TP sobre o estereopar *BN* em caráter experimental, contudo, esta não trouxe resultados positivos a imagem, sendo estes resultados não apresentados.

Dos doze modelos avaliados seis foram classificados como A segundo o PEC, sendo que quatro derivados do estereopar *BN* e dois do *BF*. Verifica-se também que o emprego de TPs acarretou em uma redução do RMS, principalmente para o estereopar *NF*, que utilizando apenas 3 TPs foi reprovado para as três classes avaliadas na escala de 1:25.000 e ao se utilizar 6, 9 e 12 TPs o mesmo foi enquadrado na Classe C.

Ao realizar a análise de precisão, verificou-se que apenas os MDSs 6 e 9 que utilizaram o estereopar *NF* para sua geração foram reprovados no teste de precisão. O uso de 12 pontos de ligação permitiu o enquadramento do MDS que utilizou o estereopar *NF* (MDS 12) na classe B, sendo este aprovado também nos testes de Normalidade, e Tendência.

Após realização de todas as análises estatísticas, verificou-se que os MDSs gerados através da combinação entre as visadas *Backward* e *Nadir* foram avaliados como Classe A para todos os testes realizados, conforme pode ser visto na Tabela 13 coluna *Classificação Final*. O acréscimo de pontos de ligação para esta combinação de visadas não influenciou a classificação final do produto, embora tenha se verificado que o uso de doze TPs ocasionou um menor RMS (2,712 m ao se utilizar 3

pontos de ligação e 2,156 m quando se utilizou 12 pontos). Com relação ao MDS obtido pelo estéreo par *Backward X Forward*, o acréscimo de TPs permitiu que o Modelo fosse avaliado como Classe A para a escala de 1:25.000. Os piores resultados foram obtidos para o estereopar oriundo das visadas *Nadir X Forward* que foi enquadrado na Classe C ao empregar 12 TPs e não obteve classificação para os demais pontos. Com relação a este modelo, lançou-se a hipótese de que uma possível identificação errônea dos pontos de controle na cena *Forward* poderia ter ocasionado resultados ruins para o modelo. Para verificar esta hipótese, realizou-se novamente a geração do MDS 12, sendo que para isso, efetuou-se uma nova identificação dos 7 pontos de controle sobre a cena *Forward* e sobre a cena *Nadir*, tomando-se o cuidado de trabalhar com valor do RMS dos pontos menor que 1 pixel. Feito isso, identificou-se os doze pontos de ligação sobre as cenas e gerou-se novamente o par epipolar *NF*. Um novo MDS foi gerado e avaliado posteriormente, contudo obteve-se resultados semelhantes aos obtidos para o MDS 12, descartando-se a hipótese de erro na identificação dos pontos na imagem.

Os resultados obtidos no Teste 01 permitiram verificar que o uso de 12 pontos de ligação associados aos 7 pontos de controle levantados em campo apresentaram os melhores resultados, levando em consideração o PEC como critério de avaliação. Logo, para realização do Teste 03, foram utilizados 12 pontos de ligação para obtenção dos MDSs.

## **6.2. Avaliação dos MDSs obtidos no Teste 02**

Para a realização da avaliação dos MDSs, após geração utilizando a metodologia proposta por IBGE (2009), obteve-se os resultados apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Resumo das Estatísticas para os MDSs avaliados no Teste 02

MDS	Média	Desvio	Erro	RMS	Distribuição	Apresenta	$\Delta h < PEC$	Classificação	Classificação	Classificação
	Padrão	Máximo	Calculado	normal?	tendência?	(%)	(PEC)	$\chi^2$	Final	
MDS13teste02_7pontos_BF_BN_NF_10m_spv	-0,468	2,332	5,135	2,381	sim	sim	96,7	A**	A**	<b>A</b>
MDS14teste02_7pontos_BF_BN_NF_10m_cpv	-1,002	2,169	-5,451	2,396	sim	não	96,7	A	A	<b>A</b>
MDS15teste02_7pontos_BN_NF_10m_cpv	-0,235	2,339	-5,451	2,351	sim	não	93,3	A	A	<b>A</b>
MDS16teste02_7pontos_BN_NF_20m_cpv	-2,735	3,288	-9,370	4,307	sim	sim	93,3	C**	A**	<b>C</b>
MDS17teste02_7pontos_BF_BN_NF_20m_spv	-3,035	3,380	-10,370	4,578	sim	sim	90,0	C**	A**	<b>C</b>
MDS18teste02_7pontos_BF_BN_NF_20m_cpv	-1,502	2,867	-9,620	3,248	sim	sim	93,3	B**	A**	<b>B</b>

\*MDS reprovado no Teste de Normalidade

\*\*MDS reprovado no Teste de Tendência

\*\*\*MDS Reprovado no Teste de Normalidade e Tendência

Da Tabela 14, verifica-se que os resíduos da amostra utilizada para avaliação seguem distribuição Normal.

Todos os MDSs obtidos com tamanho da grade igual a 20 metros (MDS 16, 17 e 18) foram reprovados no Teste *t de Student*. Dos modelos gerados com pixel igual a 10 metros apenas o MDS 13 foi reprovado. Este modelo utilizou a combinação entre as visadas *Backward*, *Nadir* e *Forward* e nenhuma opção de preenchimento de vazios. Os MDSs 14 e 15 não apresentaram erros sistemáticos.

Com relação a classificação dos MDSs de acordo com o PEC, verifica-se que os modelos que utilizaram tamanho da grade igual a 10 metros se enquadraram na Classe A. A opção de preenchimento de vazios disponibilizada pelo *Software* PCI Geomatica, permitiu o enquadramento do MDS 18 na Classe B, para a Escala 1:25.000, contudo o mesmo foi reprovado no teste de tendência.

Com relação a Análise de Precisão, de acordo com emprego do Teste do Qui-Quadrado todos os Modelos avaliados foram enquadrados na Classe A.

Após análises de Tendência e Precisão, verifica-se que os modelos que foram gerados com tamanho da grade igual a 10 metros obtiveram melhores resultados, sendo enquadrados como Classe A para a Escala de 1:25.000. O MDS 13 gerado com a opção de preenchimento de vazios desativada foi reprovado no teste de Tendência. O MDS 14 foi o que obteve melhor classificação dentre os modelos avaliados, sendo este escolhido para realização da análise local apresentada no item 6.7. Este MDS pode ser visto na Figura 37.

As Figuras 26, 27, 28 e 29 apresentam os gráficos contendo as discrepâncias dos pontos avaliados no Teste 02.

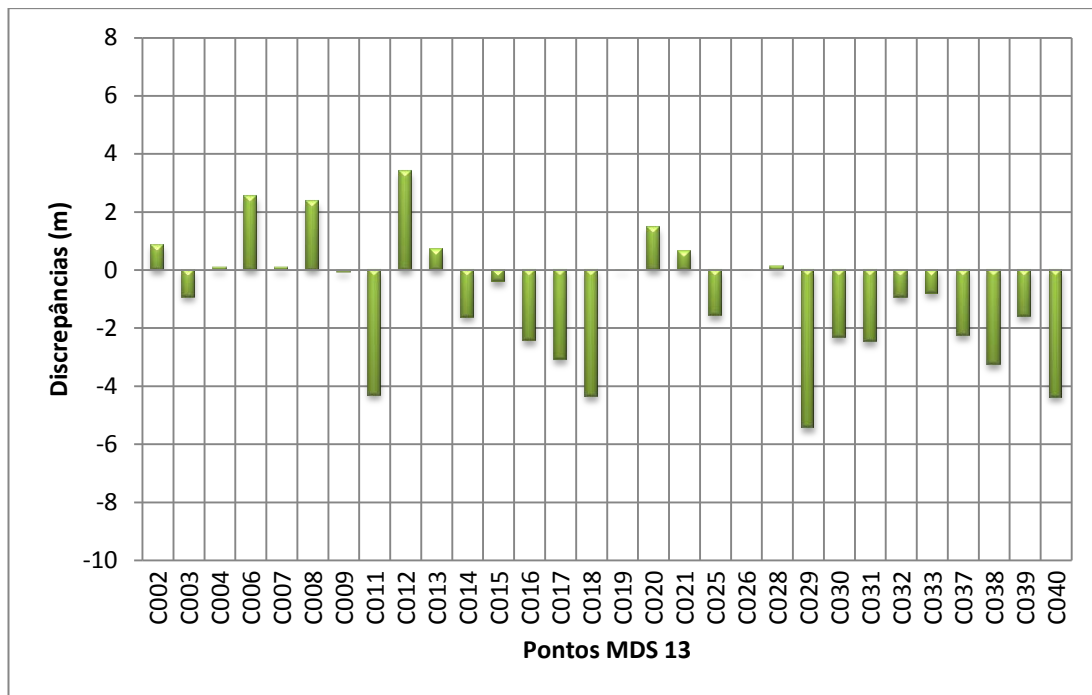


Figura 26 - Discrepâncias encontradas para o MDS 13

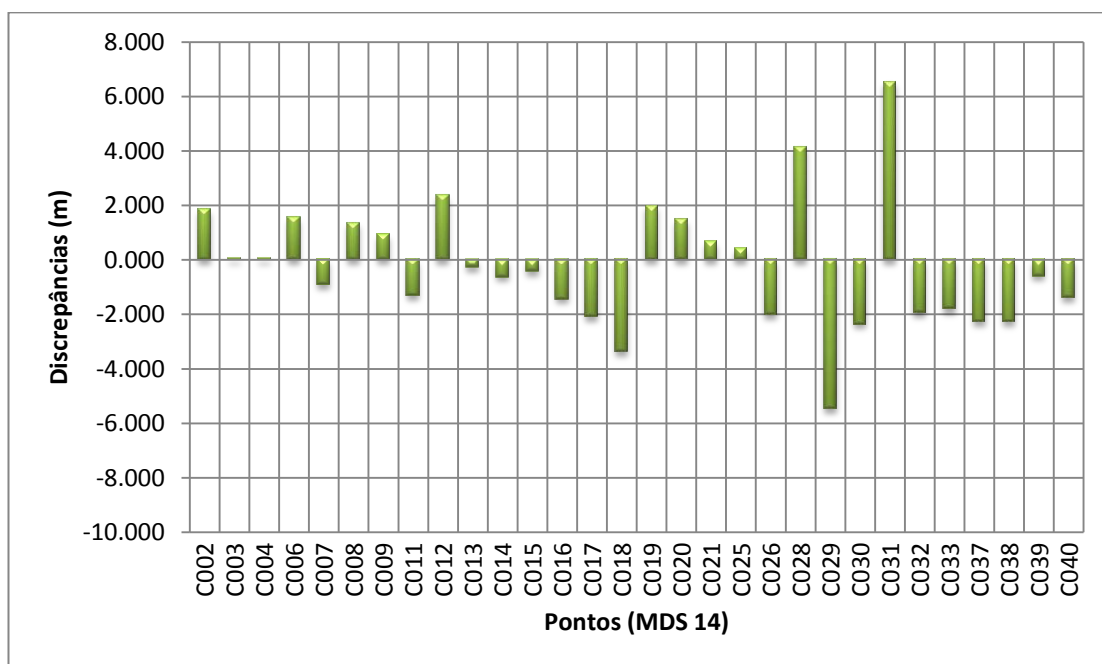


Figura 27 - Discrepâncias encontradas para o MDS 14

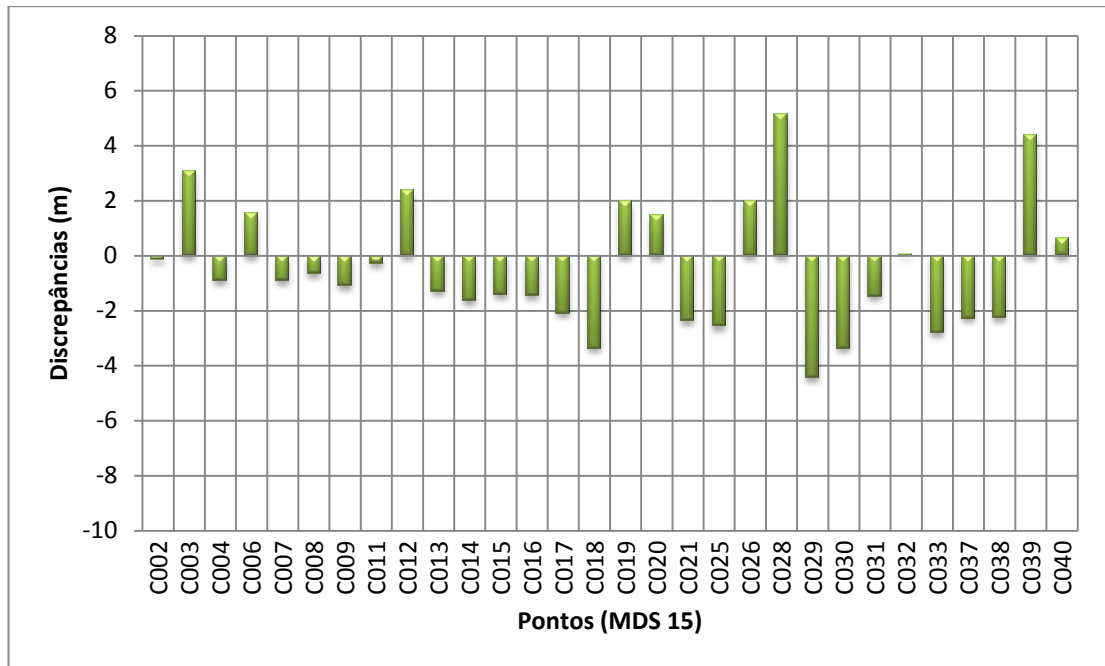


Figura 28 - Discrepâncias encontradas para o MDS 15

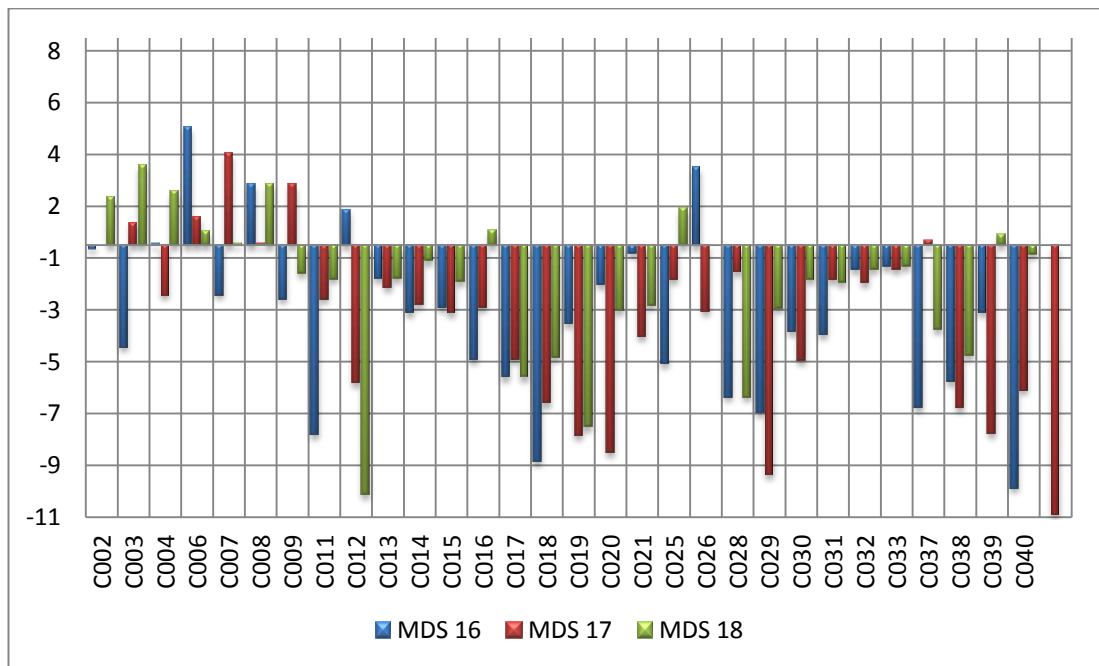


Figura 29 - Discrepâncias encontradas para os MDSs 16, 17 e 18

Com base nas Figuras 26, 27, 28 e 29, verifica-se, que o MDS 14 (Classe A) que utilizou a combinação entre os pares estereoscópicos *BN*, *BF* e *NF* apresentou menores valores de discrepância. Dos Modelos avaliados como classes B e C (MDSs 16, 17 e 18 da Figura 29) observa-se maiores valores de discrepâncias, bem como a ocorrência de erros sistemáticos, uma vez que grande parte das discrepâncias

encontra-se no sentido negativo do eixo y, o que também foi evidenciado no teste *t de Student*.

Em resumo, após emprego dos testes estatísticos, verifica-se que os resultados obtidos se mostraram satisfatórios e também condizentes com aqueles alcançados por IBGE (2009) para a região de Itaguaí, comprovando que as cenas PRISM permitem a extração de MDSs compatíveis a escala 1:25.000. Contudo, vale ressaltar que foram utilizados para avaliação 30 pontos de checagem, um valor 65% menor do que o utilizado pelo IBGE para realização de suas análises (88 pontos).

Em linhas gerais, os resultados se mostraram adequados ao uso à Escala recomendada por JAXA (2007) para uso de MDSs derivados de imagens PRISM (1:25.000).

### **6.3. Avaliação dos MDSs obtidos no Teste 03**

Os resultados da avaliação dos MDSs são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resumo das estatísticas para os MDSs avaliados no Teste 03

MDS	Média	Desvio Padrão	Erro Máximo	RMS Calculado	Distribuição normal?	Apresenta tendência?	$\Delta h < PEC$ (%)	Classe Enquadrada (PEC)	Classe Enquadrada $\chi^2$	Classificação Final
MDS 19 teste03_07_pontos_BF_10m	-0,902	1,729	2,54	2,156	sim	não	93,3	A	A	A
MDS 20 teste03_07_pontos_BN_10m	-0,168	3,300	-8,571	2,431	sim	não	93,3	A	A	A
MDS 21 teste03_07_pontos_NF_10m	0,232	7,344	11,135	4,025	sim	não	90,0	C	B	C
MDS 22 teste03_14_pontos_BF_10m	-0,535	2,356	-6,924	2,418	sim	não	90,0	A	A	A
MDS 23 teste03_14_pontos_BN_10m	-0,768	2,005	-6,924	2,152	sim	sim	93,3	A**	A**	A
MDS 24 teste03_14_pontos_NF_10m	-2,168	4,009	-6,297	4,011	sim	sim	93,3	C**	A**	C
MDS 25 teste03_21_pontos_BF_10m	-1,302	1,653	-4,924	2,117	sim	sim	100,0	A**	A**	A
MDS 26 teste03_21_pontos_BN_10m	-0,502	2,439	-6,924	2,491	sim	não	93,3	A	A	C
MDS 27 teste03_21_pontos_NF_10m	-2,535	2,191	-8,093	3,383	sim	sim	96,7	B**	A**	B
MDS 28 teste03_28_pontos_BF_10m	1,902	1,694	-5,093	2,571	sim	sim	96,7	A**	A**	A
MDS 29 teste03_28_pontos_BN_10m	-1,202	1,721	-4,924	2,111	sim	sim	93,3	A**	A**	A
MDS 30 teste03_28_pontos_NF_10m	-3,168	3,185	-9,297	4,531	sim	sim	90,0	C**	A**	C
MDS 31 teste03_35_pontos_BF_10m	-1,802	1,457	1,356	2,341	sim	sim	96,7	A**	A**	A
MDS 32 teste03_35_pontos_BN_10m	-0,868	1,872	-5,924	2,069	sim	sim	96,7	A**	A**	A
MDS 33 teste03_35_pontos_NF_10m	-3,535	2,651	-9,297	4,467	sim	sim	93,3	C**	A**	C
MDS 34 teste03_42_pontos_BF_10m	-1,768	1,43	-5,093	2,298	sim	sim	96,7	A**	A**	A
MDS 35 teste03_42_pontos_BN_10m	-1,035	1,712	2,135	2,010	sim	sim	96,7	A**	A**	A
MDS 36 teste03_42_pontos_NF_10m	-3,735	2,895	-11,460	4,776	sim	sim	90,0	C**	A**	C
MDS 37 teste03_49_pontos_BF_10m	0,298	2,521	10,135	2,602	não	não*	93,3	A*	A*	A
MDS 38 teste03_49_pontos_BN_10m	-0,368	2,575	-6,571	2,539	sim	não	96,7	A	A	A
MDS 39 teste03_49_pontos_NF_10m	1,665	4,631	16,533	4,931	não	sim*	90,0	B***	B***	B
MDS 40 teste03_56_pontos_BF_10m	1,198	4,287	16,533	4,457	não	não*	93,3	A*	B*	B
MDS 41 teste03_56_pontos_BN_10m	-0,368	2,575	-6,570	2,602	sim	não	96,7	A	A	A
MDS 42 teste03_56_pontos_NF_10m	1,665	4,631	16,533	4,931	não	sim*	90,0	B**	B***	B
MDS 43 teste03_60_pontos_BF_10m	0,832	3,427	14,135	3,530	não	não*	96,7	A*	A*	A
MDS 44 teste03_60_pontos_BN_10m	-0,035	1,916	4,134	1,916	sim	não	100,0	A	A	A
MDS 45 teste03_60_pontos_NF_10m	1,298	3,406	13,135	3,965	não	sim*	93,3	A***	A***	A

\*MDS reprovado no Teste de Normalidade

\*\*MDS reprovado no Teste de Tendência

\*\*\*MDS Reprovado no Teste de Normalidade e Tendência

Assim como realizado nos Testes 01 e 02, a normalidade dos dados foi avaliada através do emprego do teste de normalidade Shapiro-Wilk ao nível de significância de 90%.

Com base na Tabela 15, verifica-se que as discrepâncias para a componente altimétrica dos MDSs 37, 40 e 43 (esteropar *BF*) e dos MDSs 39, 42 e 45 (estereopar *NF*), não apresentam distribuição normal. Estes modelos não poderiam ser avaliados pelo do Teste *t de Student*, contudo para fins de verificação e como muitos autores não realizam análises de normalidade, o teste foi realizado para os modelos reprovados.

Verifica-se também que 59,3% dos MDSs foram reprovados no teste de tendência. Todos os Modelos obtidos através do par epipolar *NF*, com exceção do MDS 21 foram reprovados. O acréscimo de pontos de controle não acarretou em resultados melhores com relação a tendência dos dados para o estereopar *NF*, ocorrendo o contrário, visto que o aumento de pontos introduziu erros sistemáticos aos modelos, apresentando um indicio de que uma possível identificação incorreta dos pontos acarretou na introdução de erros sistemáticos. Assim como discutido no teste 01, realizou-se uma nova identificação dos pontos sobre a cena *Forward*, e gerou-se novamente o MDS 39 e o MDS 45. Contudo, obteve-se resultados semelhantes aos obtidos nesta análise.

Com relação a classificação empregando o PEC, verifica-se que 19 dos 27 MDSs foram enquadrados na Classe A. Os MDSs 27, 39 e 42 (classe B), 21, 24, 30, 33 e 36 (classe C) que foram obtidos através da combinação entre as visadas *NF* apresentaram também a presença de erros sistemáticos.

Acredita-se que os MDSs que foram enquadrados nas classes B e C tiveram esta classificação devido a problemas de identificação relacionados com a resolução radiométrica da imagem, uma vez que a resolução das cenas (8 bits) pode dificultar a correta identificação dos pontos de controle sobre a mesma, sendo este um fator limitante nas cenas PRISM. Outro fator pode estar relacionado ao acréscimo de pontos de controle ao modelo, uma vez que o acréscimo de um elevado número de pontos pode introduzir erros à modelagem devido ao processo de identificação dos pontos e conseqüentemente piorar a qualidade geométrica do produto gerado.

A Figura 30 apresenta um gráfico contendo as discrepâncias com relação a componente altimétrica para os MDSs 27, 30, 33 e 36 que apresentaram os piores resultados, levando-se em consideração o RMS.

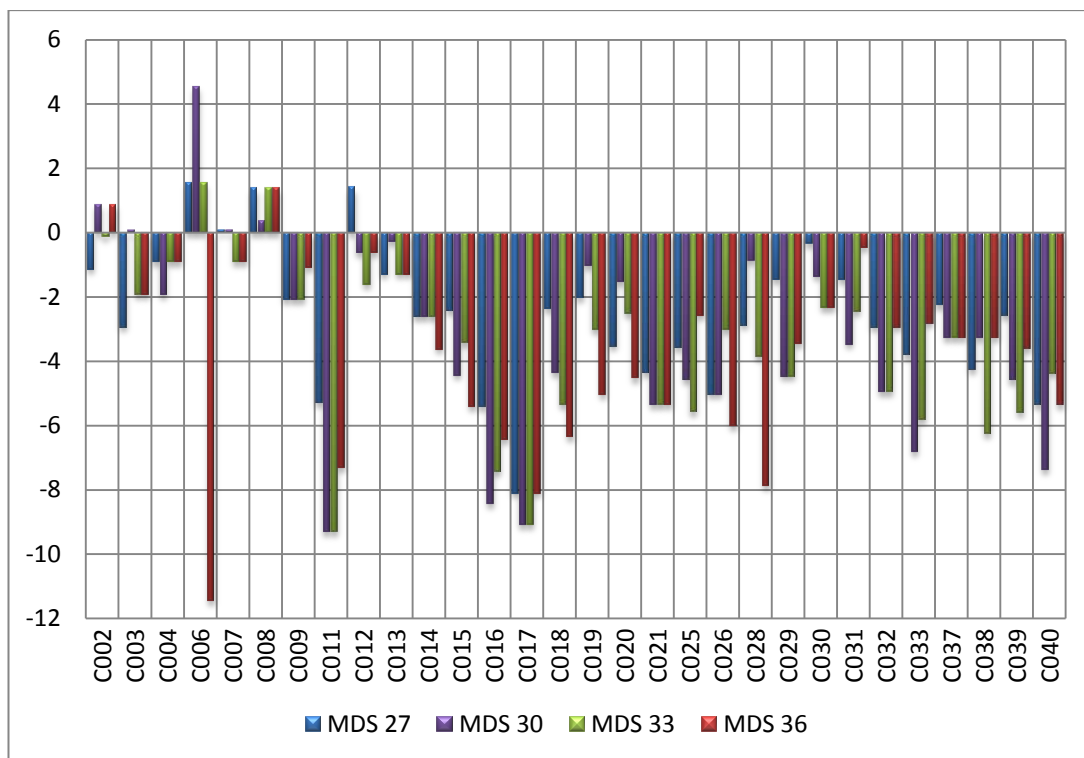


Figura 30 - Discrepâncias encontradas para os MDSs 27, 30, 33 e 36

Analisando a Figura 30 verifica-se que a maior parte das discrepâncias para a componente altimétrica ocorreu no sentido negativo, o que ilustra a presença de erros sistemáticos para estes modelos, conforme comprovado após o emprego do teste de Tendência. O ponto C006 apresentou a pior discrepância quando utilizado na geração do MDS 36 (-11,46 metros), valor superior ao máximo admitido pelo PEC para que o MDS se enquadre na classe C (PEC Decreto-Lei  $\leq 7,5$  metros). Este ponto possui altitude igual a 734,5 metros, valor próximo ao do ponto de checagem que apresenta maior altitude utilizado para a avaliação (ponto C015 com altitude igual a 783,0 metros). Outros pontos também superaram o valor máximo admitido para o PEC, sendo eles C011 (MDSs 30 e 33 com altitude igual a 682,7 metros), C016 (MDS 30 com altitude igual a 743,2), C017 (MDSs 27, 30, 33 e 36 com altitude igual a 739,9 metros). A exceção do ponto C011, pontos com grandes valores de altitude apresentaram maiores erros com relação à altimetria. Estes efeitos foram avaliados no item 6.7 onde se realizou uma análise dos MDSs melhores classificados avaliando a influencia da inclinação do terreno na geração de MDSs.

Tomando como base o Teste do Qui-Quadrado para avaliação, o acréscimo de pontos de controle não trouxe melhorias aos produtos gerados. As cenas com visadas

*Backward X Forward* e *Backward X Nadir* apresentaram menores valores de  $\chi^2_h$  tabelado quando comparados à visada *Nadir X Forward*.

Apenas seis MDSs foram aprovados nas análises de Normalidade, Tendência e Precisão, sendo que destes, o MDS 44 foi o que obteve melhor classificação. Este modelo foi obtido através da combinação entre as visadas *Backward* e *Nadir* e utilizou 60 pontos de controle.

Os MDSs gerados através da combinação *BN* apresentaram melhores resultados. Para esta combinação de visadas o aumento de pontos de controle não trouxe resultados negativos na geração de MDSs.

Para a combinação de visadas *BF* e *NF* o aumento de pontos de controle não trouxe melhorias significativas aos MDSs. Os Modelos que apresentaram os piores resultados foram aqueles gerados através das visadas *NF*.

Dos nove MDSs gerados usando o estereopar *NF*, cinco foram enquadrados na Classe C (MDSs 21, 24, 30, 33 e 36), três se enquadraram na Classe B (27, 39 e 42) e apenas um modelo foi enquadrado na Classe A (MDS 45), contudo, o mesmo apresentou erro sistemático, além da distribuição de suas discrepâncias não apresentar distribuição Normal.

A Figura 31 apresenta um comparativo entre os MDSs, tomando como base os valores de RMS.

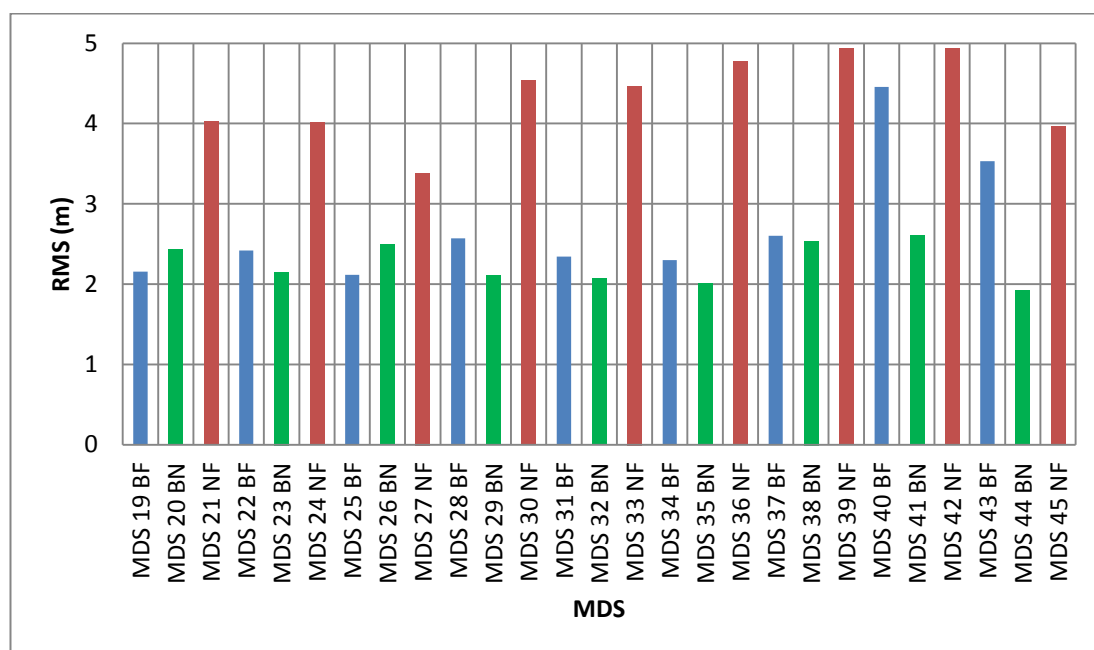


Figura 31 - Comparativo entre os MDSs com base no RMS

Da Figura 31 pode-se verificar que os MDSs que apresentaram menor RMS foram aqueles gerados pela combinação *BN* (em verde). Os piores foram aqueles obtidos através da combinação entre as visadas *NF* (em vermelho).

Oliveira (2011) ao se utilizar a abordagem MOA, dezessete pontos de controle, a combinação entre as visadas *BN*, *BF* e *NF* e tamanho da grade igual a 10 metros, obteve classificação C para a escala de 1:25.000, além dos dados apresentarem tendência. O acréscimo de número de pontos de controle trouxe melhorias em seus resultados, visto que ao se utilizar sete pontos, o MDS foi enquadrado na escala de 1:50.000, classe B. Os resultados obtidos neste trabalho, foram ligeiramente superiores aos obtidos por esta autora, contudo, vale ressaltar que a área de estudo avaliada, apresentava uma variação de altitude inferior a estudada por Oliveira (2011), além do fato de que dentre outras configurações, a identificação dos TPs sobre as cenas foi realizada de maneira manual. Ao se utilizar a abordagem MRPC (uso dos coeficientes polinomiais racionais, teste não realizado neste trabalho), dois pontos de controle, a combinação entre as visadas *BN*, *BF* e *NF* e grade igual a 10 metros o MDS se enquadrou na Classe A.

Com base nos resultados das avaliações realizadas no teste 03, realizou-se a escolha dos pares epipolares para a determinação do teste 04, que foi feita utilizando o MDS que apresentasse os seguintes critérios:

- . Modelo enquadrado na Classe A;
- . Apresentasse menor Erro Médio Quadrático;
- . Apresentasse menor Desvio- Padrão;
- . Não apresentasse tendência.

Seguindo estes critérios, escolheu-se os pares epipolares gerados utilizando 60 pontos de controle, visto que os mesmos enquadraram-se nos critérios definidos. O par epipolar que originou o MDS 45 (combinação entre as visadas *Nadir* e *Forward*) também foi escolhido para a realização do teste. Esta escolha foi feita, devido ao fato de que de todos os Modelos gerados com os estereopares *NF*, o MDS 45 foi o único enquadrado na Classe A.

#### **6.4. Avaliação dos MDSs obtidos no teste 04**

Os resultados do teste 04 são apresentados a seguir.

Tabela 16 - Resumo das estatísticas para os modelos avaliados no Teste 04

MDS	Média	Desvio	Erro	RMS	Distribuição	Apresenta	$\Delta h < PEC$	Classificação	Classificação	Classificação
	Padrão	Máximo	Calculado	normal?	tendência?	(%)	(PEC)	$\chi^2$	Final	
MDS46tst04DEM_60PTS_BN_BF10m_cpv	0,165	2,195	6,135	2,201	sim	não	96,7	A	A	<b>A</b>
MDS47tst04DEM_60PTS_BN_NF10m_cpv	0,795	4,356	10,135	4,638	sim	não	90,0	B	A	<b>B</b>
MDS48tst04DEM_60PTS_BN_BF_NF10m_cpv	0,465	2,586	10,135	2,629	sim	não	93,3	A	A	<b>A</b>
MDS49tst04DEM_60PTS_BN_BF_10m_n	0,265	1,971	5,975	1,989	sim	não	96,7	A	A	<b>A</b>
MDS50tst04DEM_60PTS_BN_NF_10m_n	1,565	3,732	17,533	3,819	sim	sim	90,0	A**	A**	<b>A</b>
MDS51tst04DEM_60PTS_BN_BF_NF_10m_n	0,498	2,912	10,135	2,955	sim	não	96,7	A	A	<b>A</b>

\*MDS reprovado no Teste de Normalidade

\*\*MDS reprovado no Teste de Tendência

\*\*\*MDS Reprovado no Teste de Normalidade e Tendência

Para o teste 04, a discrepâncias para a altimetria em todos os MDSs gerados seguem distribuição Normal.

Da Tabela 16 verifica-se que apenas o MDS 47 não foi enquadrado na Classe A segundo o PEC. Esse Modelo foi gerado através da combinação entre as visadas *BN* e *NF* além de se utilizar a opção de preenchimento de vazios disponibilizada pelo *Software* PCI Geomatica. O MDS 50, se enquadrou na Classe A, porém este apresenta erros sistemáticos.

Levando em consideração as análises de tendência e Precisão para classificação final dos Modelos, e todos os modelos avaliados se enquadraram na escala 1:25.000. O MDS 47 foi o que obteve a pior resultado, enquadrando-se na Classe B.

Ao se comparar os resultados obtidos neste teste com os do Teste 02, verifica-se que em termos de Classificação empregando o PEC o excesso de pontos de controle (60 pontos no Teste 04) não causou melhorias no produto final, conforme pode ser verificado ao se comparar os MDSs 13, 14 e 15 do Teste 02 (que usaram 7 pontos de controle) com os MDSs 51, 48 e 47 na Tabela 36.

Tabela 17 - Comparativo entre os Modelos 13, 14, 15 (Teste 02) e 51, 48 e 47 (Teste 04)

MDS	Visadas	Prench. Vazios?	Média	Desvio-Padrão (S)	Erro Máximo	RMS	Tendência?	Classificação PEC
MDS 13	BF; BN; NF	não	-0,468	2,332	5,135	2,381	sim	<b>A</b>
MDS 14	BF; BN; NF	sim	-1,002	2,169	-5,451	2,396	não	<b>A</b>
MDS 15	BN; NF	sim	-0,235	2,339	6,533	2,351	não	<b>A</b>
MDS 51	BF; BN; NF	não	0,498	2,912	10,135	2,955	não	<b>A</b>
MDS 48	BF; BN; NF	sim	0,465	2,586	10,135	2,629	não	<b>A</b>
MDS 47	BN; NF	sim	0,795	3,732	10,135	3,819	não	<b>B</b>

Da Tabela 17 verifica-se que os valores de Desvio-Padrão e RMS foram próximos para ambos os testes (da ordem de 2,5 a 3 metros), com exceção do MDS 47 cujos valores variaram em torno de 3,8 metros. Os valores de erro máximo (maiores erros em módulo) ocorreram devido ao aumento de pontos de controle sobre o modelo, que podem estar associados as incertezas quanto a sua correta identificação na imagem.

De posse de todos os MDSs e resultados das avaliações empregando o Decreto-Lei 89.817/1984, partiu-se para a etapa de geração e avaliação das Ortoimagens e análise local, conforme apresentado nos próximos tópicos.

## **6.5. Geração das Ortoimagens ALOS PRISM empregando o Decreto-Lei 89.817/1984**

De posse dos MDSs obtidos a partir dos critérios definidos no item 5.3.3 gerou-se as Ortoimagens, para a cena Nadir, utilizando os seguintes MDSs;

a) MDS que apresentou melhor classificação para o teste 02: **MDS 14:**

Obtido com a combinação entre os pares epipolares *Backward x Nadir*, *Backward X Forward*, e *Nadir X Forward*, 7 pontos de controle, resolução espacial de 10 metros e com a opção de preenchimento de vazios habilitada.

b) MDS com 60 pontos de controle com melhor classificação para o teste 03: **MDS 44:**

Obtido com a combinação entre as visadas (*Backward X Nadir*), 60 pontos de controle, pixel com resolução espacial de 10 metros e sem preenchimento de vazios.

c) MDS com 7 pontos de controle com melhor classificação para o teste 03: **MDS 20:**

Obtido com a combinação entre as visadas (*Backward X Nadir*), 7 pontos de controle e sem preenchimento de vazios.

d) MDS com melhor avaliação para o teste 04: **MDS 49:**

Obtido com a combinação entre os pares epipolares *Backward X Nadir* e *Backward X Forward*, 60 pontos de controle e pixel com resolução espacial de 10 metros e sem preenchimento de vazios.

De posse das Ortoimagens, partiu-se para a avaliação individual utilizando o PEC. Os resultados são apresentados no tópico 6.6.

## **6.6. Avaliação das Ortoimagens ALOS PRISM empregando o Decreto-Lei 89.817/1984**

A seguir são apresentados os resultados após empregados os testes de normalidade, tendência, análise de precisão e avaliação empregando o PEC.

Tabela 18 - Resumo das estatísticas para as ortoimagens geradas

ORTOIMAGEM	Média	Desvio	Erro	RMS	Distribuição	Apresenta	$\Delta h < PEC$	Classificação	Classificação	
	Padrão	Máximo	Calculado	normal?	tendência?	Final			Ortoimagem	
	$\Delta_{\text{resultante}}$				$\Delta E/\Delta N/\Delta_{\text{resultante}}$	$\Delta E/\Delta N$	(%)	(PEC)	$\chi^2$	
ORTO14tst02_07PTS_BN_BF_NF_10m_cpv	4,785	2,979	11,859	5,706	sim/sim/não	não/não	100,0	A	A	A
ORTO20tst03_07PTS_BN_10m_n	3,723	2,678	12,113	4,638	sim/sim/não	não/não	100,0	A	A	A
ORTO49tst04_60PTS_BN_BF_10m_n	3,818	2,689	11,117	4,722	não	não/não*	100,0	A*	A	A
ORTO44tst03_60PTS_BN_10m_n	3,507	3,378	12,004	4,912	não	não/não*	100,0	A*	A	A

\*Ortoimagem reprovada no Teste de Normalidade e Tendência

Da Tabela 18, verifica-se que as discrepâncias para a componente horizontal ( $\Delta E$  e  $\Delta N$ ) quando analisadas separadamente, seguem distribuição normal para as ortoimagens ORTO 14 e ORTO 20. As discrepâncias das Ortoimagens ORTO44 e ORTO49 que foram obtidas através de MDSs gerados com 60 pontos de controle não seguem distribuição normal, tanto para as componentes  $\Delta E$  e  $\Delta N$  analisadas separadamente, quanto para a resultante posicional.

Todas as ortoimagens avaliadas foram enquadradas na classe A de acordo com o PEC. O aumento de pontos de controle não trouxe melhorias significativas para a qualidade das ortoimagens. Os valores de RMS foram muito próximos variando da ordem de 3 metros para  $\Delta E$ , 2 a 4 metros para  $\Delta N$  e 4 a 5 metros para a resultante posicional ( $\Delta res$ ).

Verificando a Tabela 18 constata-se que todas as ortoimagens avaliadas foram enquadradas na Classe A para a escala 1:25.000, atestando a ótima qualidade geométrica das imagens PRISM e indo ao encontro ao apresentado por JAXA (2007) quanto ao potencial de mapeamento planimétrico nesta escala.

Conforme descrito anteriormente, as imagens PRISM apresentam boa qualidade geométrica, o que foi comprovado pela avaliação global realizada neste trabalho. Verificou-se também que todas as ortoimagens foram enquadradas também na Classe B, ao se avaliar o produto na Escala 1:20.000, contudo, devido a resolução espacial da imagem (2,5 metros) e a baixa resolução radiométrica (8 bits), muitas feições não se apresentaram visíveis, o que inviabilizaria a extração de feições caso a ortoimagem fosse utilizada para este fim na escala de 1:20.000. Para seu uso na escala de 1:25.000, o trabalho de vetorização de objetos também é dificultado devido a qualidade radiométrica da cena conforme pode ser visto na análise visual realizada e apresentada no item 6.6.1.

### 6.6.1. Análise Visual

Foi utilizada a ortoimagem ORTO 20 gerada com o MDS 20 que utilizou sete pontos de controle e as visadas *Backward X Nadir* para a avaliação. As áreas escolhidas são apresentadas a seguir:

. Área 01: Englobando a região central da Cidade de Viçosa, próximo a Avenida Santa Rita, Figura 32.



Figura 32 - Análise visual da ortoimagem PRISM para a área 01

A área escolhida foi ampliada para fins de comparação.



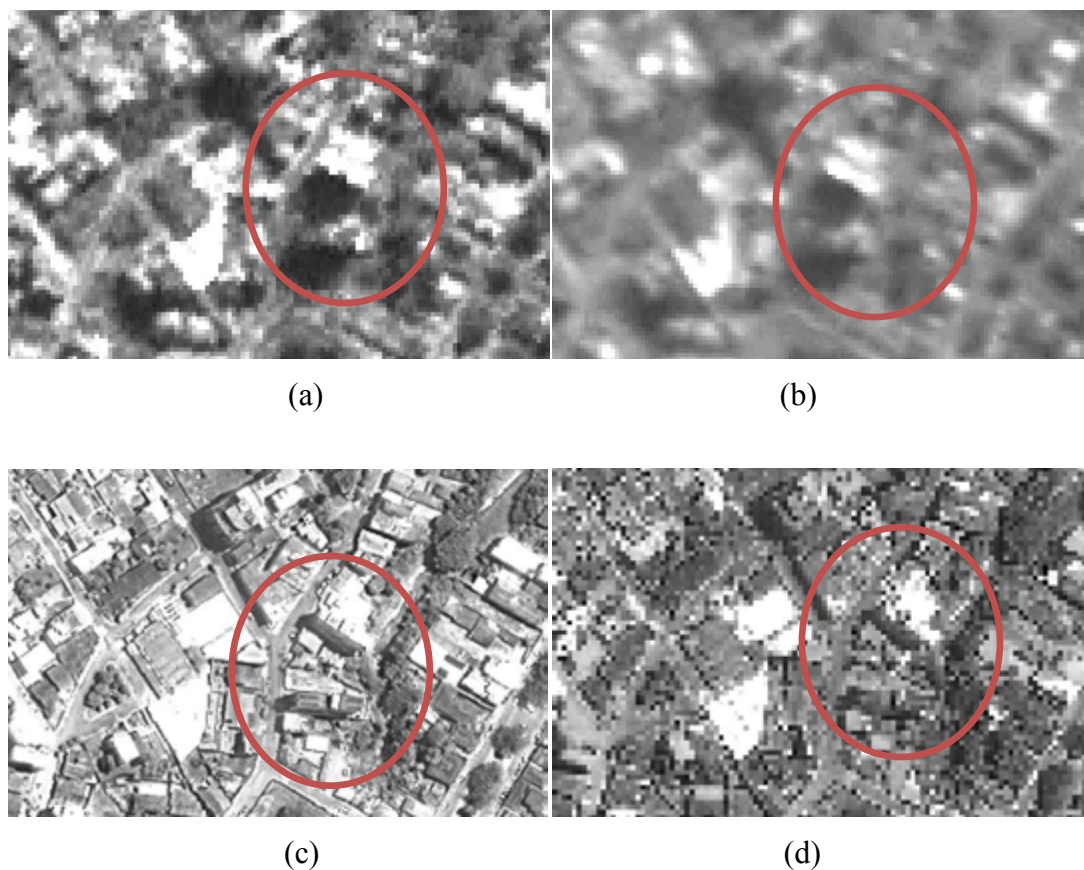
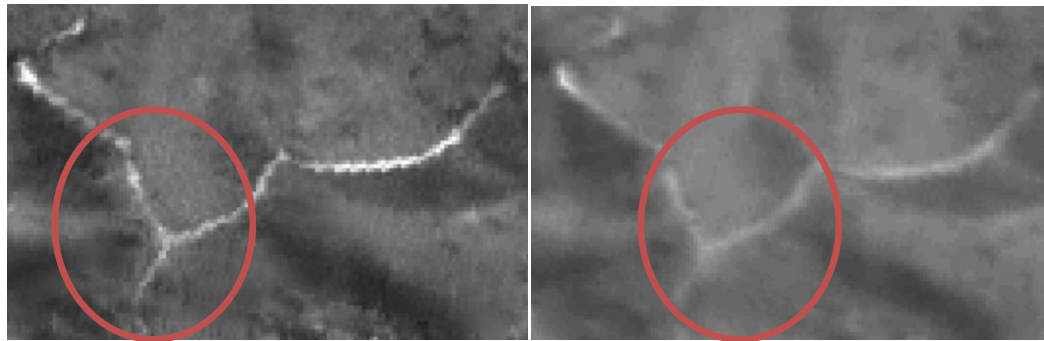


Figura 33 - Análise visual da Ortoimagem PRISM – ORTO 20 (a) e comparação com: (b) Ortoimagem CBERS-2B HRC com resolução espacial de 2,5m, (c) Ortoimagem IKONOS com resolução espacial de 1 metro e (d) reamostrada para 2,5 metros

Comparada visualmente com a ortoreimagem CBERS-2B (b), a ORTO 20 apresenta qualidade radiométrica superior, embora ambas as imagens apresentem resolução radiométrica de 8 bits. Contudo, em ambos os casos torna-se difícil a identificação de objetos, tais como as vias que podem ser identificadas ao se verificar a Ortoimagem IKONOS (c) com resolução espacial de 1 metro e radiométrica de 11 bits e na cena reamostrada para 2,5 metros e 8 bits, Figura 33 (c) e (d).

Outras feições como cruzamento de vias são de difícil visualização, o que acaba incorporando erros ao modelo, conforme pode ser visto na análise empregando o PEC. A Figura 34 apresenta uma área de cruzamento de vias nas três ortoreimagens.



**(a) ALOS PRISM**

**(b) CBERS -HRC**



**(c) IKONOS II**

**(d) IKONOS II reamostrada**

Figura 34 - Análise visual da Ortoimagem PRISM – ORTO 20 (a) e comparação com: (b) Ortoimagem CBERS-2B HRC com resolução espacial de 2,5m, (c) Ortoimagem IKONOS com resolução espacial de 1 metro e (d) reamostrada para 2,5 metros

Em termos de qualidade radiométrica a Ortoimagem ORTO 20 apresenta-se superior a CBERS-2B, embora os cruzamentos de estradas não se apresentem com uma qualidade necessária a sua vetorização, ao se trabalhar na escala de 1:25.000, conforme pode-se comparar com a ortoreimagem IKONOS. Logo, a razoável qualidade geométrica das imagens PRISM acaba sendo limitada pela sua qualidade radiométrica.

### **6.7. Análise local dos MDSs**

A análise local foi realizada utilizando-se os mesmos MDSs escolhidos para a geração das ortoreimagens, sendo eles os MDSs: 14, 20, 44 e 49, que são apresentados nas Figuras 35, 36, 37 e 38 .

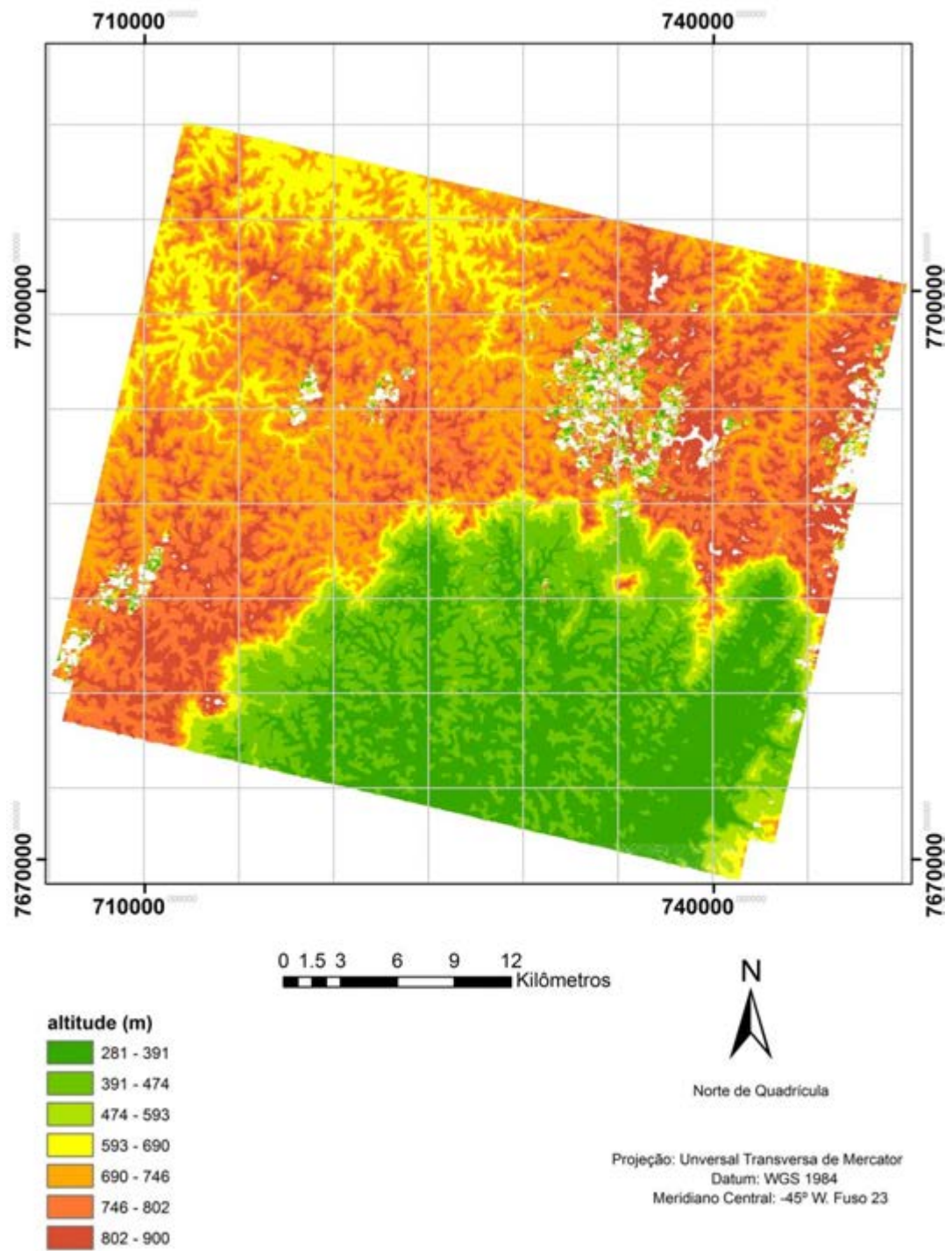


Figura 35 - Visão geral do MDS 49 (*BN, BF*; 60 pontos de controle, sem preenchimento de vazios). As áreas em branco consistem em regiões onde houve falha na correlação (área coberta por nuvens, ou outras imperfeições)

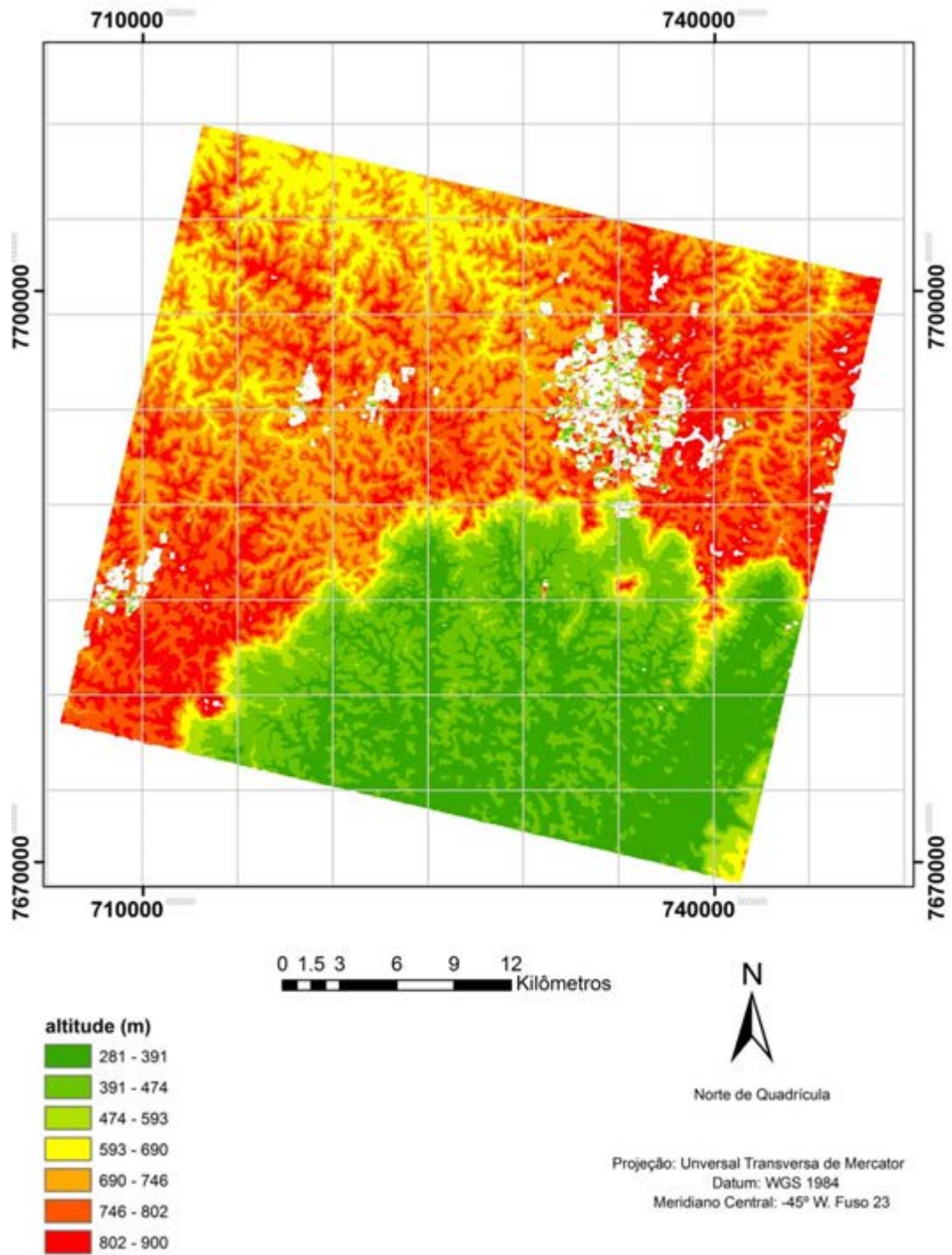


Figura 36 - Visão geral do MDS 44 (BN; 60 pontos de controle sem preenchimento de vazios). As áreas em branco consistem em regiões onde houve falha na correlação (área coberta por nuvens, ou outras imperfeições)

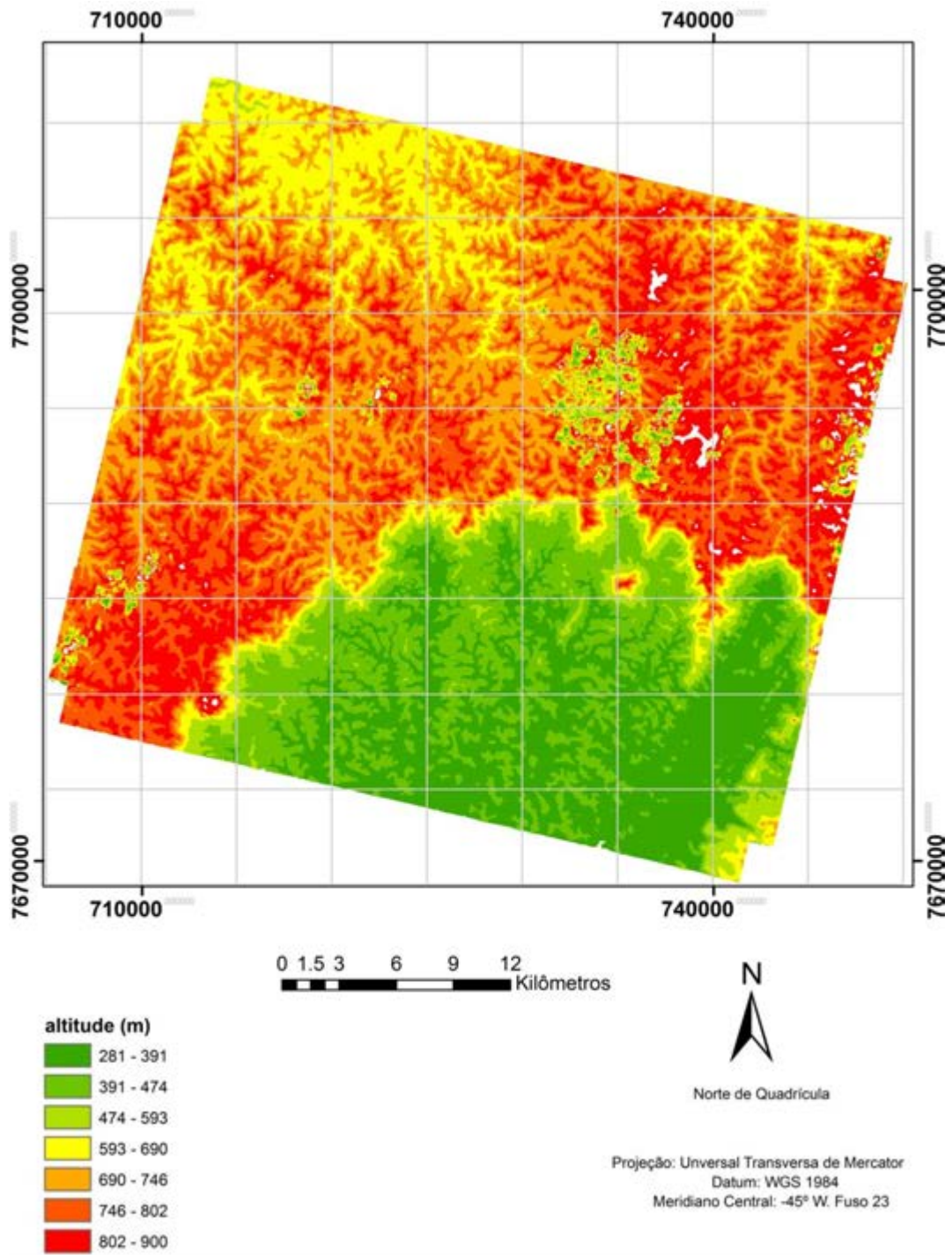


Figura 37 - Visão geral do MDS 14 (*BN, BF, NF*; 7 pontos de controle com preenchimento de vazios). As áreas em branco em regiões onde houve falha na correlação (área coberta por nuvens, ou outras imperfeições)

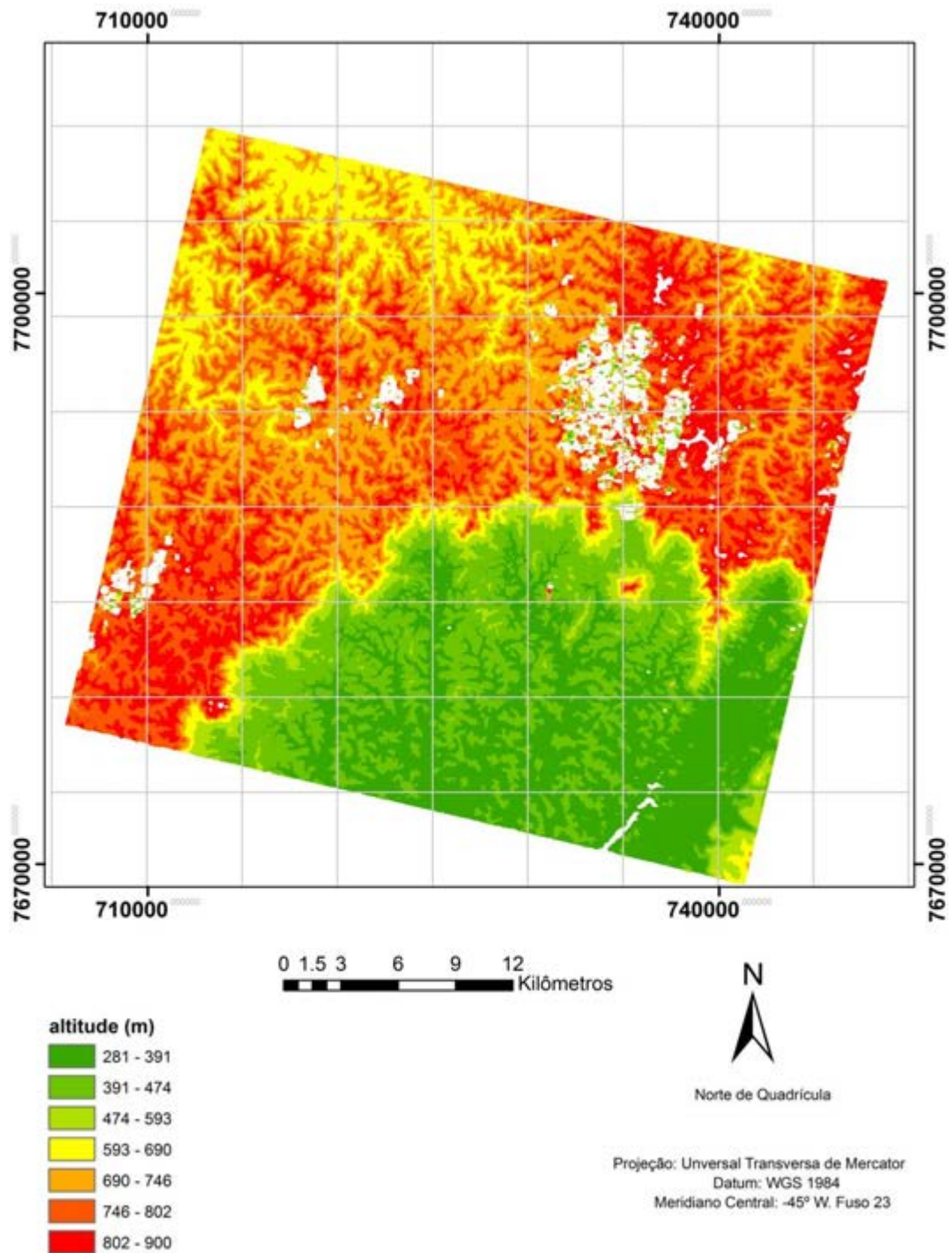


Figura 38 - Visão geral do MDS 20 (BN; 7 pontos de controle sem preenchimento de vazios). As áreas em branco consistem em regiões onde houve falha na correlação (área coberta por nuvens, ou outras imperfeições)

Pode-se verificar das Figuras que todos os MDSs gerados apresentam áreas em branco, sendo estas, regiões onde ocorreram falhas no processo de correlação (áreas cobertas por nuvem e regiões onde devido a baixa diferença de contraste, o *Software* não conseguiu associar valores de altitude para o pixel). Conforme

apresentado anteriormente, as cenas possuem uma cobertura de nuvens que representa aproximadamente 4% da área total da imagem. Contudo, a área de sombra gerada pela presença das nuvens sobre a cena, influenciam de forma negativa no processo de correlação e consequentemente ocasionam presença de valores espúrios nestas áreas, Conforme pode ser visto na Figura 39.

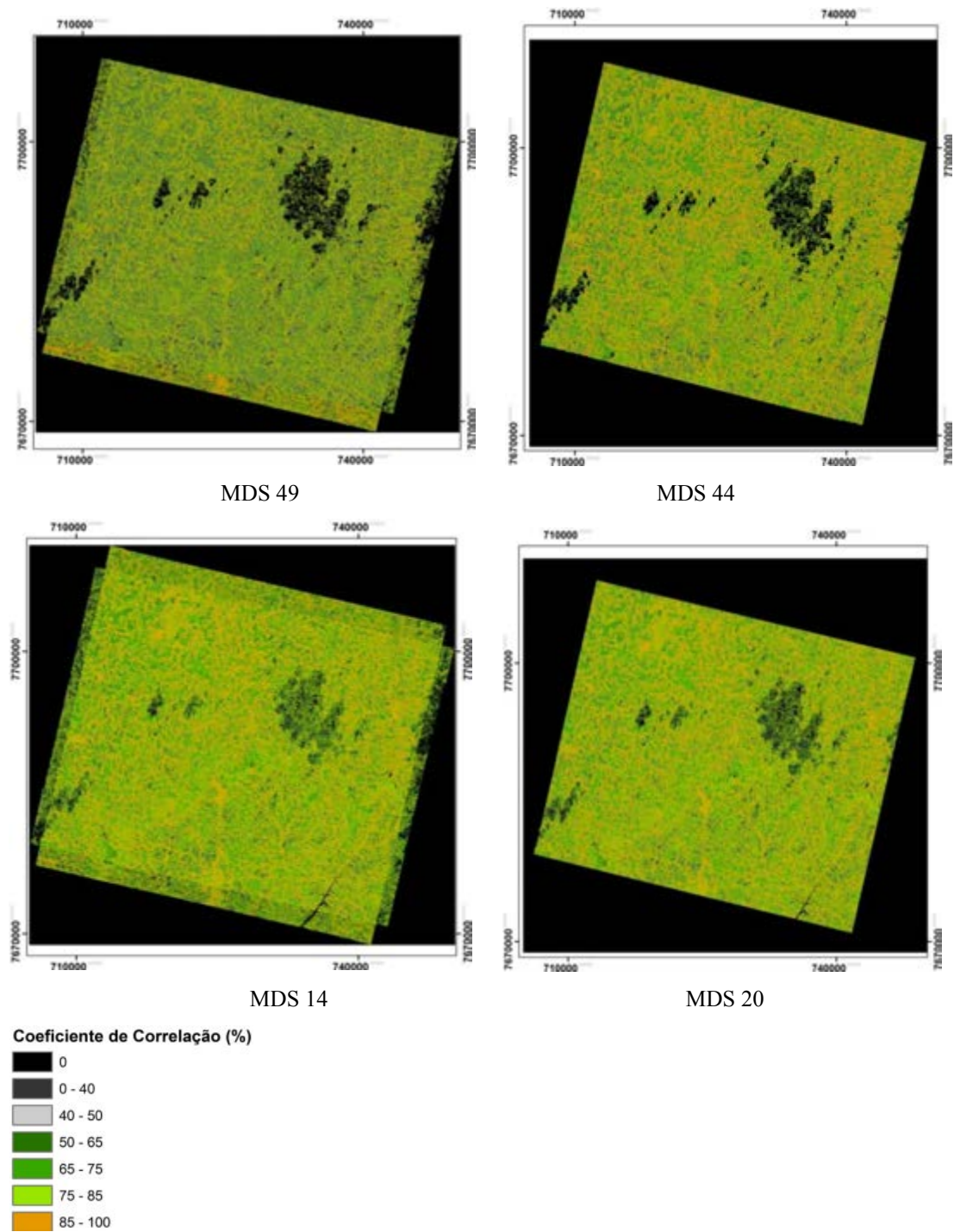


Figura 39 - Coeficiente de Correlação dos MDSs avaliados

A Figura 40 apresenta cinco áreas onde é grande a presença de nuvens sobre o MDS49 e a Figura 41 enfatiza a localização destas áreas sobre a cena *Nadir*.

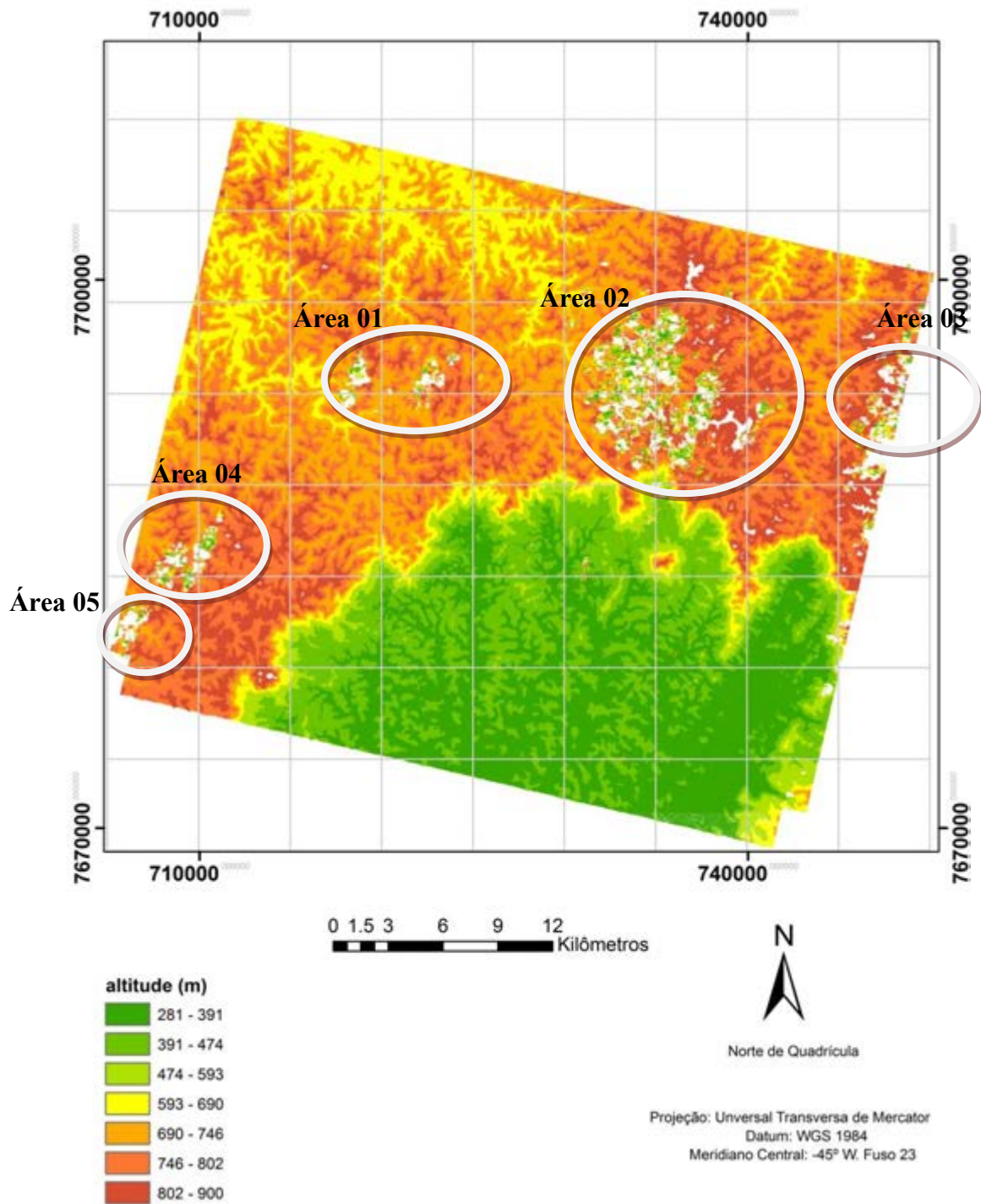


Figura 40 - Regiões com alta presença de nuvens sobre o MDS 49

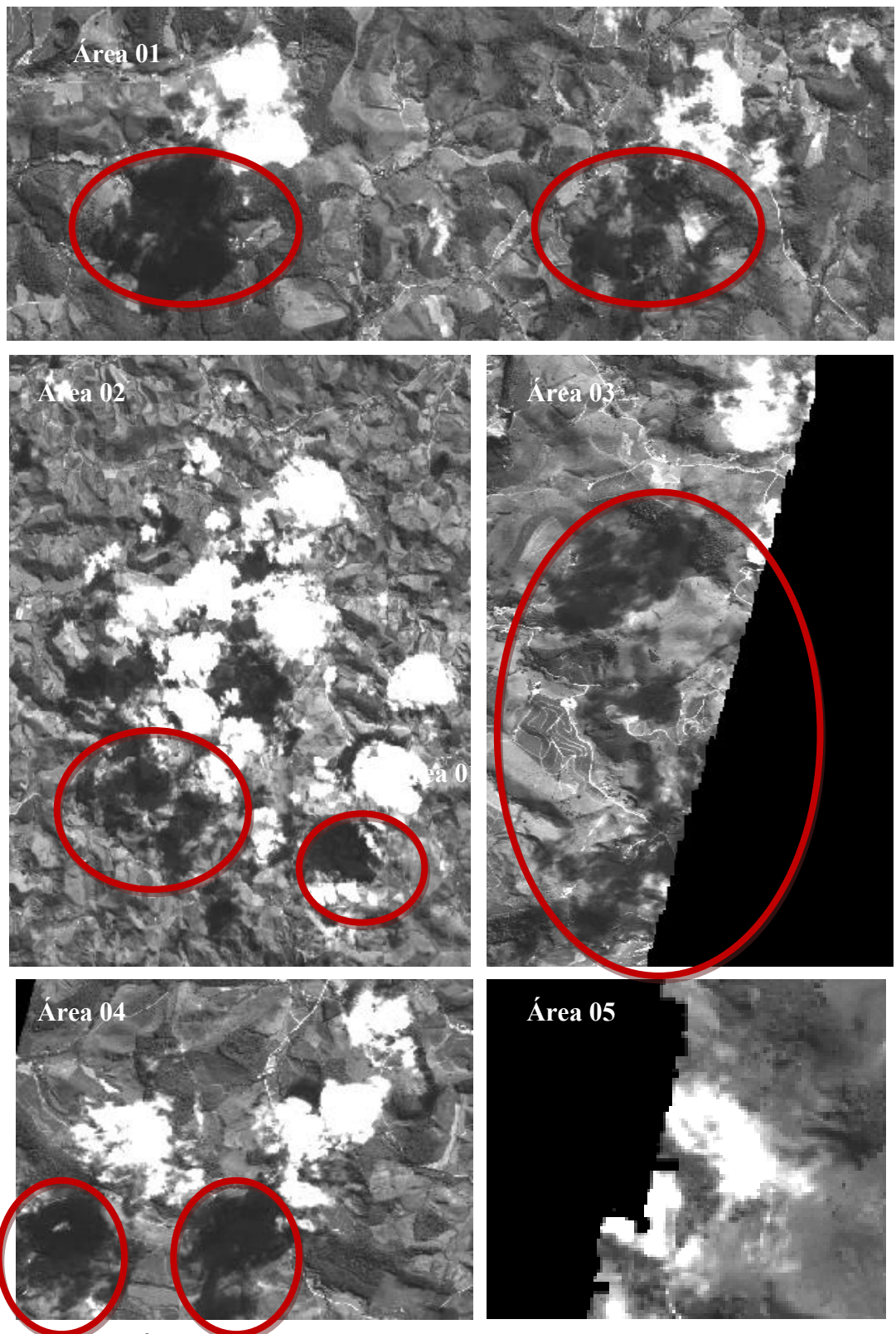
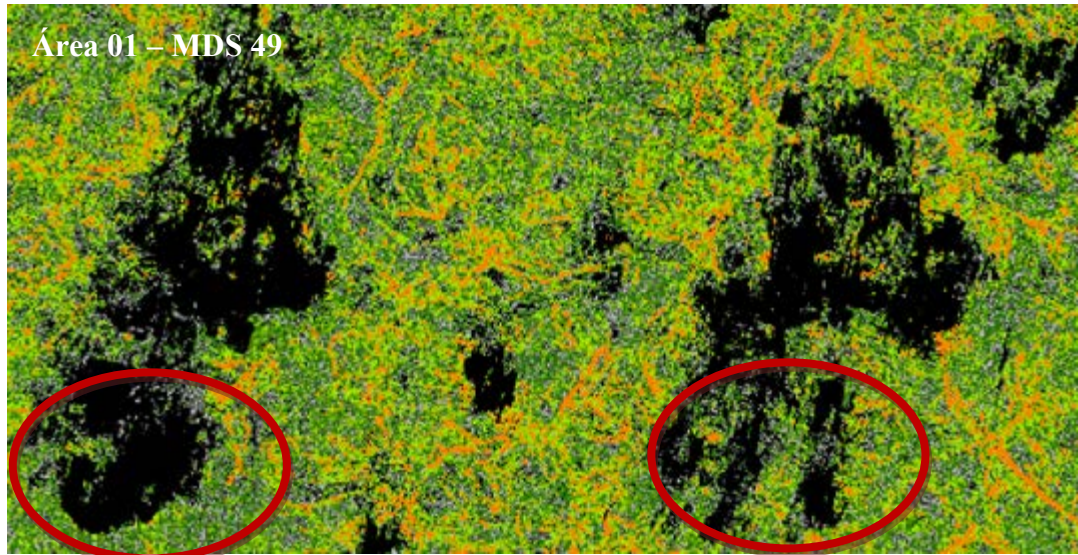
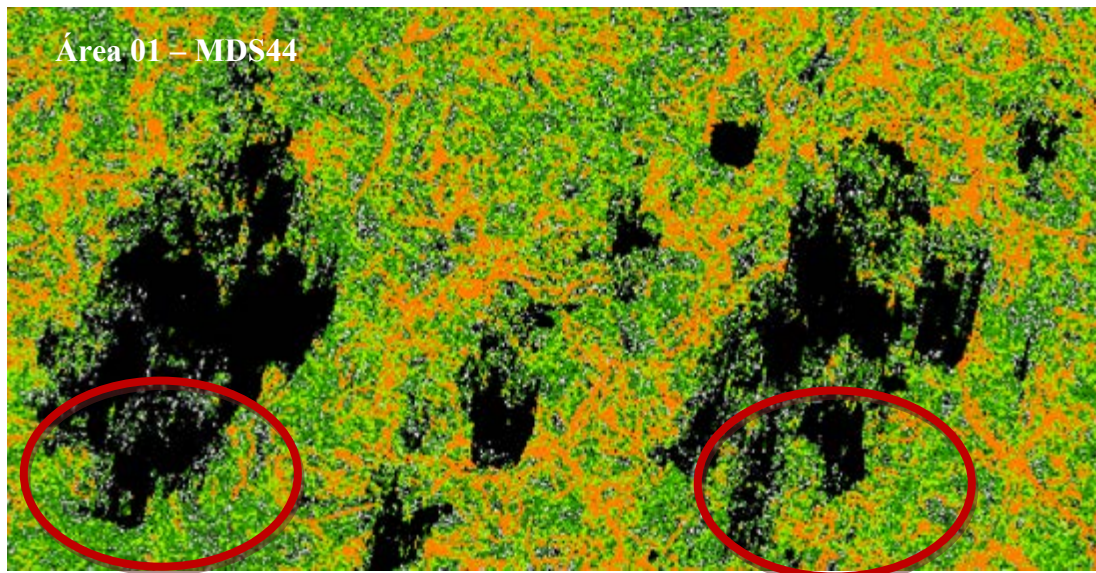


Figura 41 - Áreas contendo nuvens sobre a cena Nadir. As áreas circuladas em vermelho representam sombra de nuvens (locais com coeficiente de correlação nulo e abaixo de 50%)

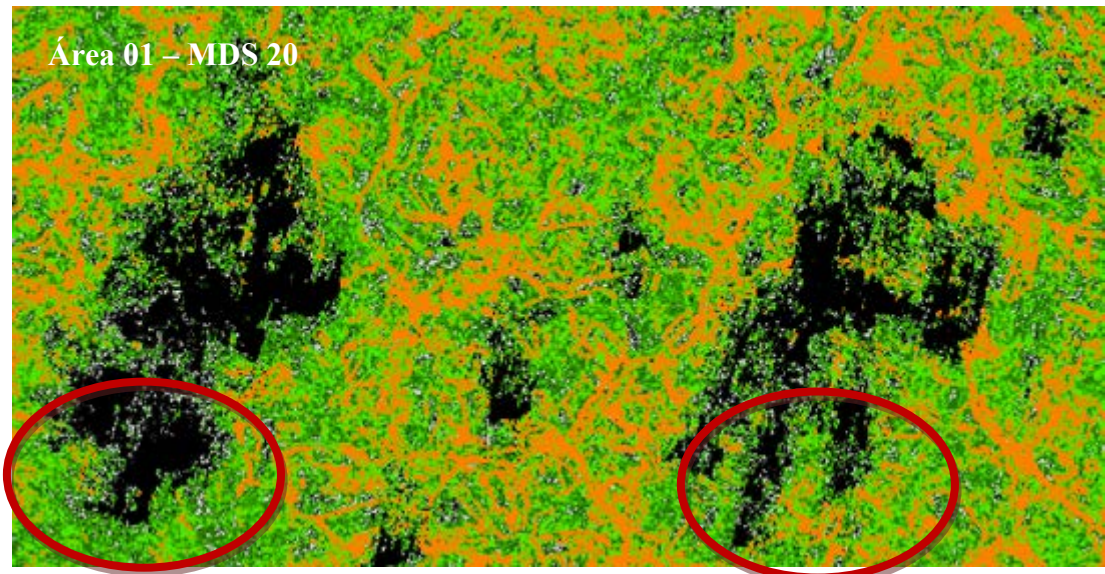
Da Figura 41, para as cinco áreas avaliadas, verifica-se que apenas a área 05 não sofreu influência da presença de nuvens, dado o fato de que a mesma estar sobre a borda da cena *Nadir*. Tomando a área 01 pode-se verificar falhas na correlação para as regiões de sombra em todos os 04 MDSs utilizados nesta avaliação. Estas falhas são apresentadas em vermelho na Figura 42.



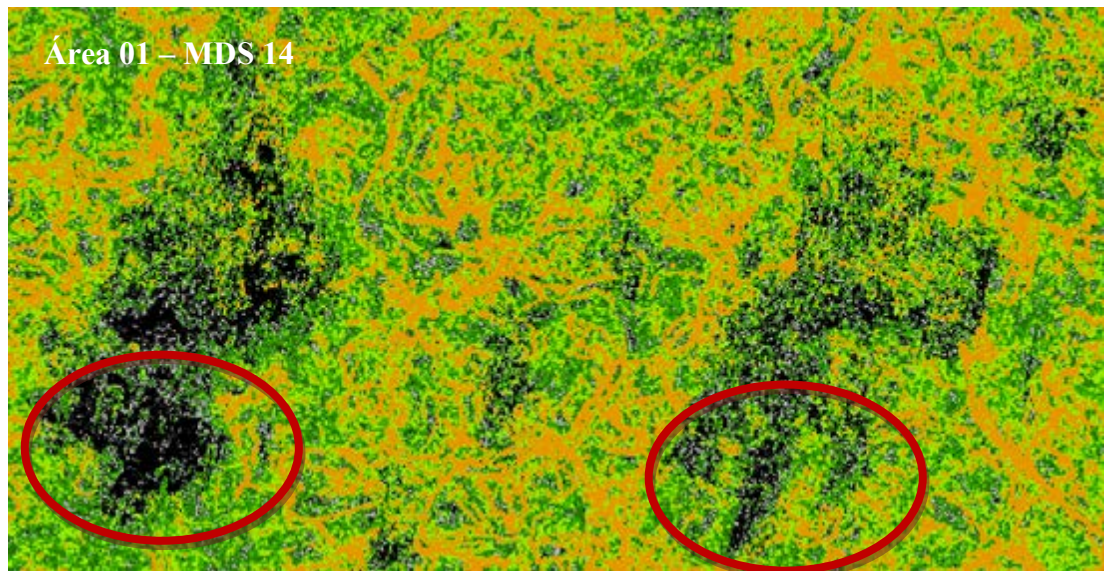
(a) MDS 49 (*BN, BF*; 60 pontos de controle sem preenchimento de vazios)



(b) MDS 44 (*BN*; 60 pontos de controle sem preenchimento de vazios)



(c) MDS 20 (*BN*; 7 pontos de controle sem preenchimento de vazios)



(d) MDS 14 (*BN, BF, NF*; 7 pontos de controle com preenchimento de vazios)



Figura 42 - Áreas contendo falhas na Correlação para área 01 para os MDSs 49 (a), 44 (b), 20 (c) e 14 (d)

Da Figura 42 verifica-se que a presença do sombreamento atrapalha a correlação entre as imagens, sendo que em todos os casos, estas regiões tiveram coeficiente de correlação menor que 0,5. Para o MDS 14 que foi gerado com a opção de preenchimento de falhas, estas regiões apresentaram valores de coeficiente próximos a 0,4, contudo, torna-se claro ao observar a Figura 43 (Figura que ilustra o MDS 14 apresentado na Figura 37) que os valores de altitude interpolados não condizem com os valores de altitudes reais, que deveriam estar associados ao terreno.

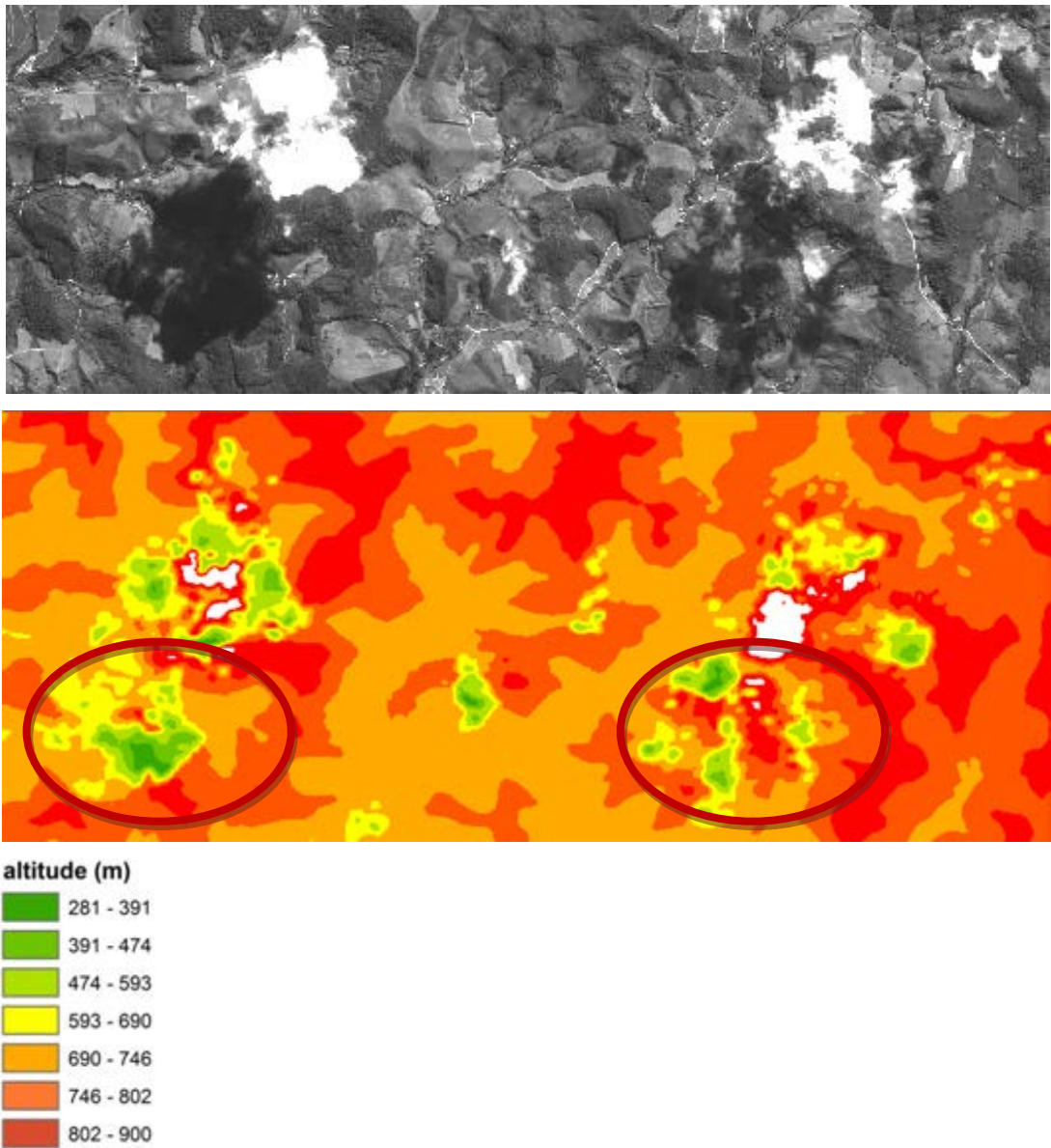


Figura 43 - Visão geral da área 01 e MDS e comparação com MDS 14 para regiões contendo sombras de nuvens

### 6.7.1. Áreas contendo sombras

Regiões apresentando sombras tiveram resultados prejudicados com relação ao processo de estéreo-correlação. Analisando o histograma da ortoimagem ORTO 14, verificou-se que pixels contendo valores na faixa de 0 a 33 representavam em sua grande parte, regiões contendo sombra sobre a imagem. Vale ressaltar que para a cena utilizada, a única região que apresentava uma maior quantidade de água, consistia nas lagoas localizadas sobre o campus da Universidade Federal de Viçosa.

Uma análise empírica permitiu verificar falhas na correlação para áreas de sombra. Esta análise foi feita levando-se em consideração o histograma da imagem e a concentração de pixels com resposta espectral para a componente sombra (valores de nível de cinza da ordem de 0 a 33). A avaliação permitiu verificar que em áreas de sombra que continham um conjunto aproximado de no mínimo 60x60 pixels (sobre a ortoimagem), apresentavam coeficiente de correlação igual a zero e conseqüentemente, os MDSs possuíam pixels com valores nulos (para os Modelos gerados sem a opção de preenchimento de vazios do *Software PCI*), ou com valores espúrios (para os MDSs gerados com a opção de preenchimento de vazios habilitada).

A Figura 44 apresenta uma análise visual para regiões contendo sombras sobre a Ortoimagem ORTO 14, a imagem contendo os indicadores de sucesso da correlação e os MDSs utilizados nesta avaliação.

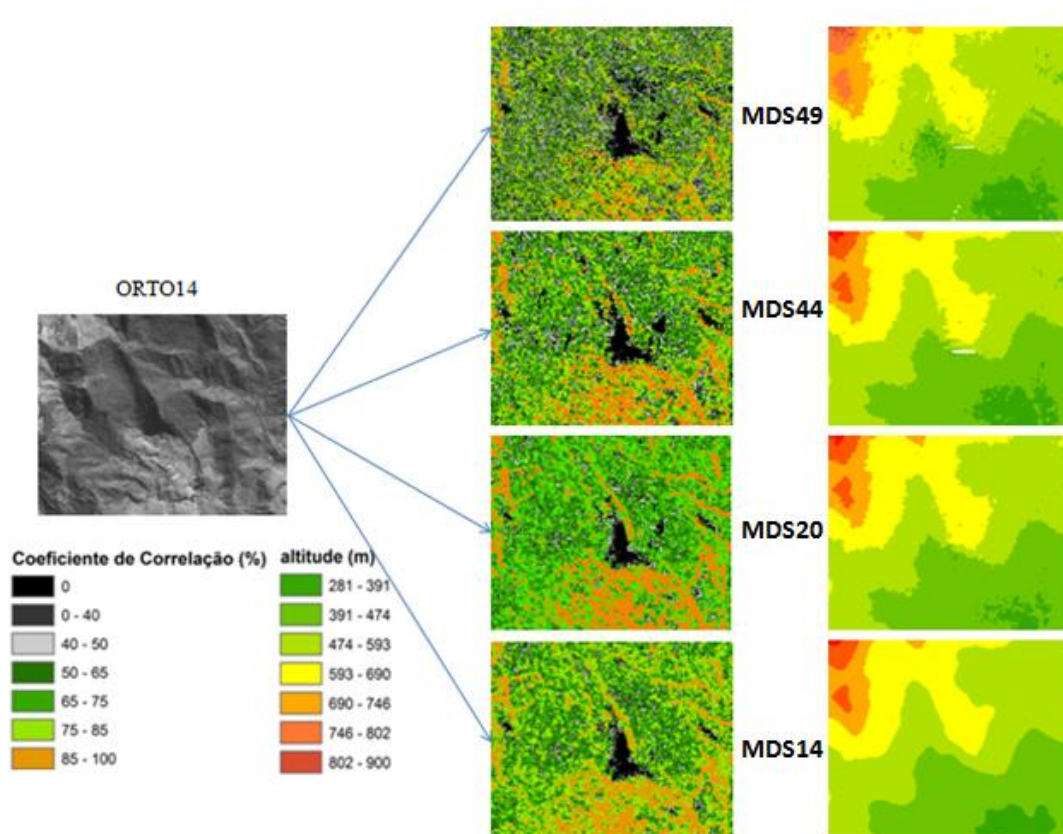


Figura 44 - Análise visual de área contendo sombra e os valores da altitude obtidos

Da Figura 44 pode-se verificar falhas na correlação em todos os MDSs avaliados neste teste, mostrando a ineficiência do algoritmo ao se trabalhar em regiões que apresentam sombra. Ao se comparar os MDSs 20 (7 pontos de controle) e 49 (60 pontos de controle), pode-se observar regiões com maior falha na correlação e presença de ruídos nos Modelos. O MDS14 apresentou uma menor área com coeficiente de correlação igual a zero e como seu Modelo foi gerado utilizando a opção de preenchimento de vazios e filtragem, não foi detectada a presença de ruídos para a área avaliada. Para outras regiões os resultados foram similares, sendo estes não apresentados no trabalho. Como a análise realizada foi apenas visual e devido a falta de dados acurados para regiões de sombra não foi possível a realização de uma análise quantitativa.

### 6.7.2. Influência da declividade

As Tabelas 43, 44, 45, 46 e 47 apresentam os resultados obtidos com relação a variação de declividade e os melhores MDSs avaliados neste trabalho.

Tabela 19 - Indicativo da correlação em função da declividade para o MDS 49

MDS49 Coeficiente de correlação	Faixa de declividade					
	0-3%	3-8%	8-13%	13-20%	20-45%	>45%
0-40%	4.020.700	14.392.200	19.485.700	31.047.500	87.195.400	70.901.800
40-50%	3.830.800	13.249.700	16.973.400	25.375.400	57.128.400	20.577.200
50-65%	10.166.300	33.036.100	39.842.600	54.395.000	101.012.300	30.642.400
65-75%	11.704.600	35.104.600	37.989.500	45.705.300	68.524.300	19.202.700
75-85%	18.041.500	48.259.000	44.693.000	45.728.900	55.576.600	15.683.700
85-100%	22.475.000	47.692.300	34.353.100	28.152.700	26.496.400	8.252.500

Da Tabela 43 é possível verificar que para áreas com declividade maior que 45% o número de pixels com coeficiente de correlação variando entre zero e 50% foi elevado, o que ilustra a dificuldade por parte do algoritmo em atribuir valores de altitude para regiões que apresentam relevo montanhoso. Em regiões com relevo plano (declividades entre 0 a 3%) pode-se constatar que o número de pixels com coeficiente de correlação maior que 50% é elevado. Ao se aumentar a declividade o número de pixels com coeficiente de correlação menor que 50% aumenta significativamente.

Tabela 20 - Indicativo da correlação em função da declividade para o MDS 44

MDS44 Coeficiente de correlação	Faixa de declividade					
	0-3%	3-8%	8-13%	13-20%	20-45%	>45%
0-40%	4.835.500	9.009.000	11.857.700	17.712.300	40.339.700	25.330.900
40-50%	4.407.600	7.733.200	10.211.100	15.387.200	33.395.400	7.255.100
50-65%	10.081.900	20.971.700	27.729.400	41.339.800	80.258.500	13.288.200
65-75%	10.855.000	25.663.700	32.317.400	44.974.700	74.736.200	9.848.500
75-85%	17.094.300	41.663.200	47.023.400	57.911.900	80.932.000	91.82.900
85-100%	26.553.500	60.318.300	55.742.600	55.786.100	61.297.700	6.365.000

Analisando a Tabela 44, verifica-se um comportamento semelhante para o MDS 44, com relação ao aumento da inclinação do terreno. Para áreas com baixa declividade, o número de pixels com coeficiente de correlação maior que 50% é mais alto do que ao se analisar áreas com declividade acima de 45% (área montanhosa), onde existe uma alta concentração de pixels, cujo coeficiente ficou na faixa de 0 a 40%. Vale ressaltar que este MDS, assim como o MDS 20 foram gerados através do par epipolar com as cenas *Backward* e *Forward*.

Tabela 21 - Indicativo da correlação em função da declividade para o MDS 20

<b>MDS20</b> <b>Coefficiente de correlação</b>	<b>Faixa de declividade</b>					
	0-3%	3-8%	8-13%	13-20%	20-45%	>45%
0-40%	10.995.000	4.728.400	5.293.900	7.918.200	19.555.400	1.772.000
40-50%	13.692.400	5.293.900	6.459.400	9.916.800	22.966.900	6.237.200
50-65%	31.974.300	18.735.400	22.864.600	35.458.400	74.142.900	14.419.200
65-75%	30.760.300	27.323.700	32.613.600	47.876.500	84.146.200	12.650.300
75-85%	40.030.500	5.272.3100	55.975.600	1.025.989	10.2474.300	12.799.400
85-100%	51.5172.00	101.559.300	79.858.300	78.205.900	81.493.100	8.746.700

Já para o MDS 20, pode se constatar que o aumento da declividade não causou efeitos negativos relacionados à correlação. Para áreas montanhosas, a maior parte dos pixels se concentrava entre 50 a 100%, indicando sucesso na correlação. Este MDS foi gerado com 7 pontos de controle.

Tabela 22 - Indicativo da correlação em função da declividade para o MDS 14

<b>MDS14</b> <b>Coefficiente de correlação</b>	<b>Faixa de declividade</b>					
	0-3%	3-8%	8-13%	13-20%	20-45%	>45%
0-40%	5.497.000	11.742.800	12.928.900	19.729.200	24.718.800	21.422.100
40-50%	4.716.700	9.685.100	11.448.500	18.572.200	17.352.100	5.063.200
50-65%	13.444.000	2.8134.100	34.998.900	60.380.900	56.205.000	8.974.100
65-75%	16.789.700	35.913.100	42.827.800	72.773.800	64.348.500	6.489.400
75-85%	30.784.600	62.581.500	65.427.200	98.786.900	75.843.200	5.900.900
85-100%	56.793.100	104.712.600	86.999.800	98.891.500	52.720.900	3.368.800

Para o MDS 14 os indicadores de correlação mostraram uma grande quantidade de pixels, com coeficiente de correlação acima de 50%, embora em áreas com declividade acima de 45% houve uma grande parcela de pixels enquadrados na classe de 0-40%.

A Tabela 47 apresenta um resumo contendo as classes de declividade em função a faixa de correlação com maior quantidade de pixels classificados.

Tabela 23 - Coeficientes de Correlação levando em consideração maior ocorrência de pixels correlacionados para cada Classe de declividade

	<b>Classes de declividade/ Coeficiente de Correlação</b>					
	0-3%	3-8%	8-13%	13-20%	20-45%	>45%
MDS49	85-100%	75-85%	75-85%	50-65%	50-65%	0-40%
MDS44	85-100%	85-100%	85-100%	75-85%	75-85%	0-40%
MDS20	85-100%	85-100%	85-100%	85-100%	75-85%	50-65%
MDS14	85-100%	85-100%	85-100%	85-100%	75-85%	0-40%

Pode-se verificar que o uso do mapa de isodeclividade permitiu obter um indicativo da influência da inclinação do terreno no processo de correlação estéreo. Pôde-se verificar também que os MDSs que utilizaram um maior número de pontos de controle (60 pontos, no caso desta avaliação) para a geração dos pares epipolares foram mais susceptíveis a influência da inclinação do terreno do que aqueles que utilizaram uma menor quantidade (7 pontos no caso desta avaliação), sendo que o MDS 20 foi o que apresentou melhores resultados conforme pode ser visto na Tabela 45. Acredita-se que além das áreas com maior inclinação do terreno, que de modo geral, apresentaram correlação com valores de coeficiente baixos, a maior quantidade de pontos inseridos no ajustamento, e conseqüentemente, mais observações sujeitas a incertezas em sua identificação, contribuíram para uma maior ocorrência de coeficientes com baixa proporção de acerto.

#### **6.8. Geração e avaliação do MDS Composto**

Após emprego da rotina descrita no item 5.3.4.4 obteve-se os seguintes Modelos.

**MDScomp01:** Gerado através da combinação entre os MDSs 14, 20, 44 e 49.

Como o Modelo gerado era composto de MDSs obtidos através da opção de preenchimento de vazios do *Software* PCI habilitada (MDSs 14 e 49) e desabilitada (MDSs 20 e 44) e se dispunha de Modelos que mesmo não tendo sido avaliados no Teste 04 apresentavam uma boa qualidade altimétrica quando comparados em relação ao PEC, optou-se por gerar mais dois MDSs Compostos sendo eles obtidos através da combinação entre os seguintes Modelos:

**MDScomp02:** Gerado através da combinação entre os MDSs 14, 46, 47 e 48, sendo todos obtidos com a opção de preenchimento de falhas disponibilizada pelo PCI Geomatica

**MDScomp03:** Gerado através da combinação entre os MDSs 20, 49, 50 e 51 e sem a opção de preenchimento de falhas disponibilizada pelo PCI.

As Figuras 45, 46 e 47 apresentam, respectivamente os modelos compostos MDScomp01, MDScomp02 e MDScomp03.

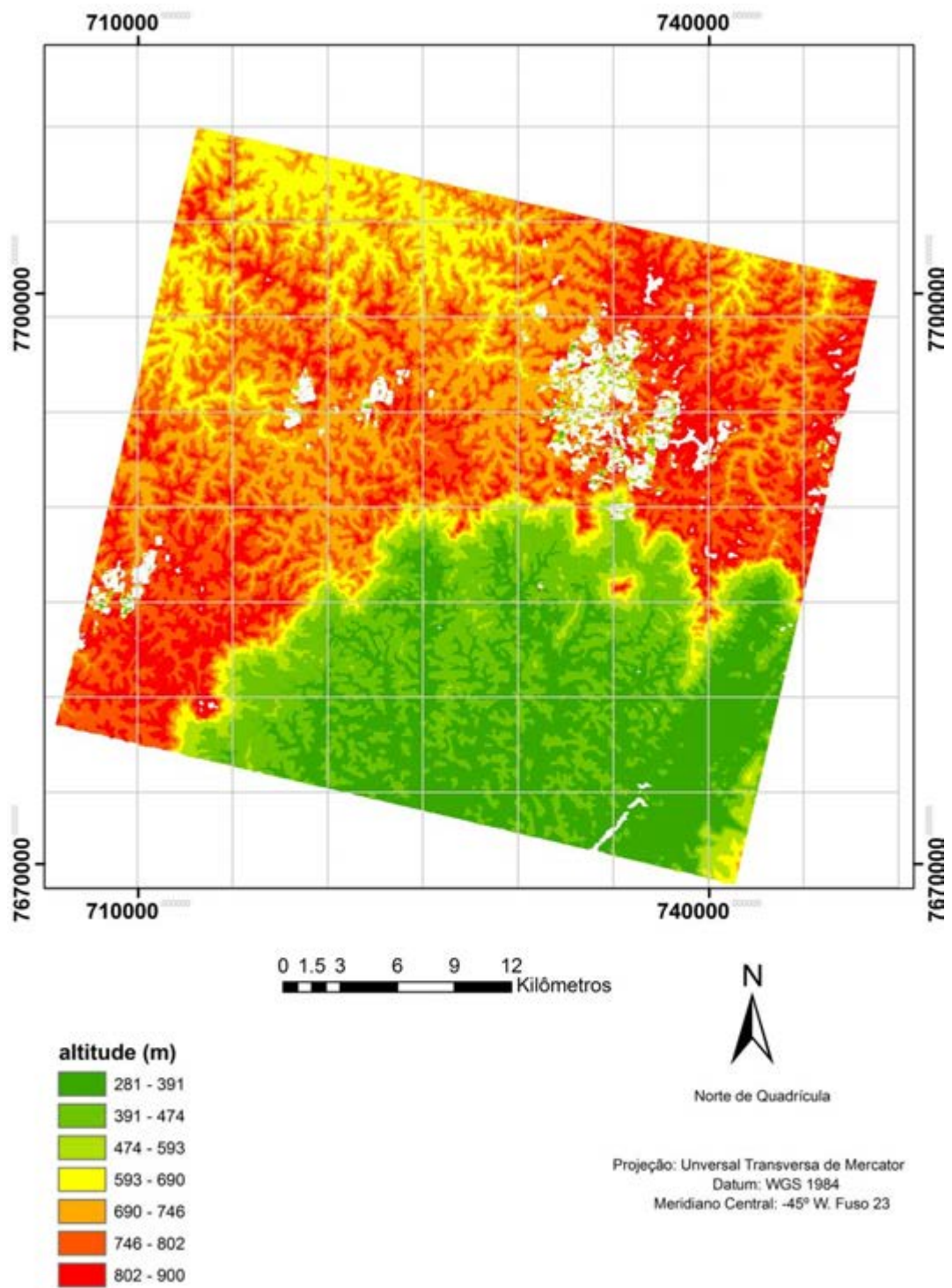


Figura 45 - MDScomp01 obtido através da combinação entre os Modelos 14, 20, 44 e 49

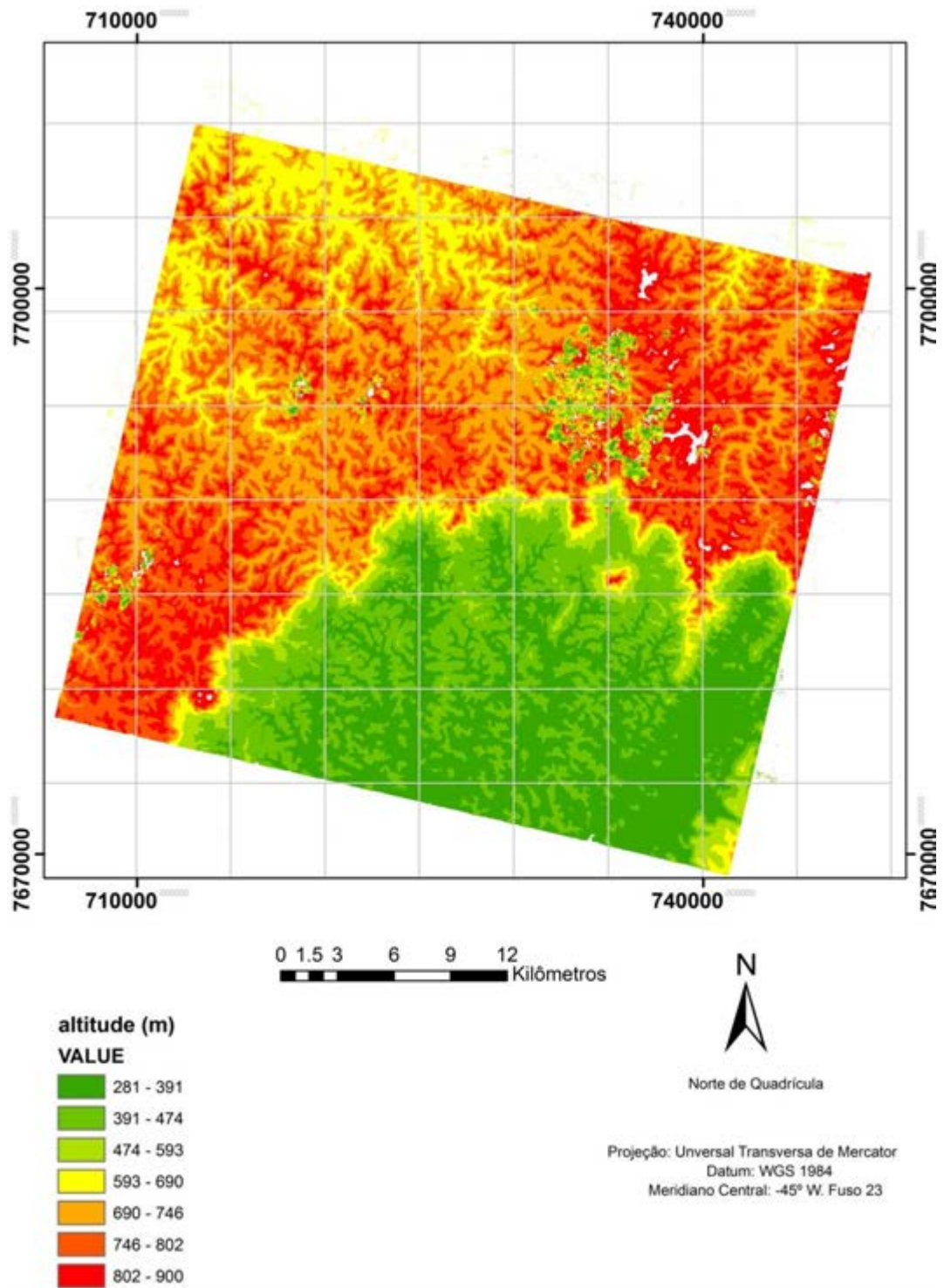


Figura 46 - MDScomp02 obtido através da combinação entre os Modelos 46, 47, 48 e 14, todos com preenchimento de falhas

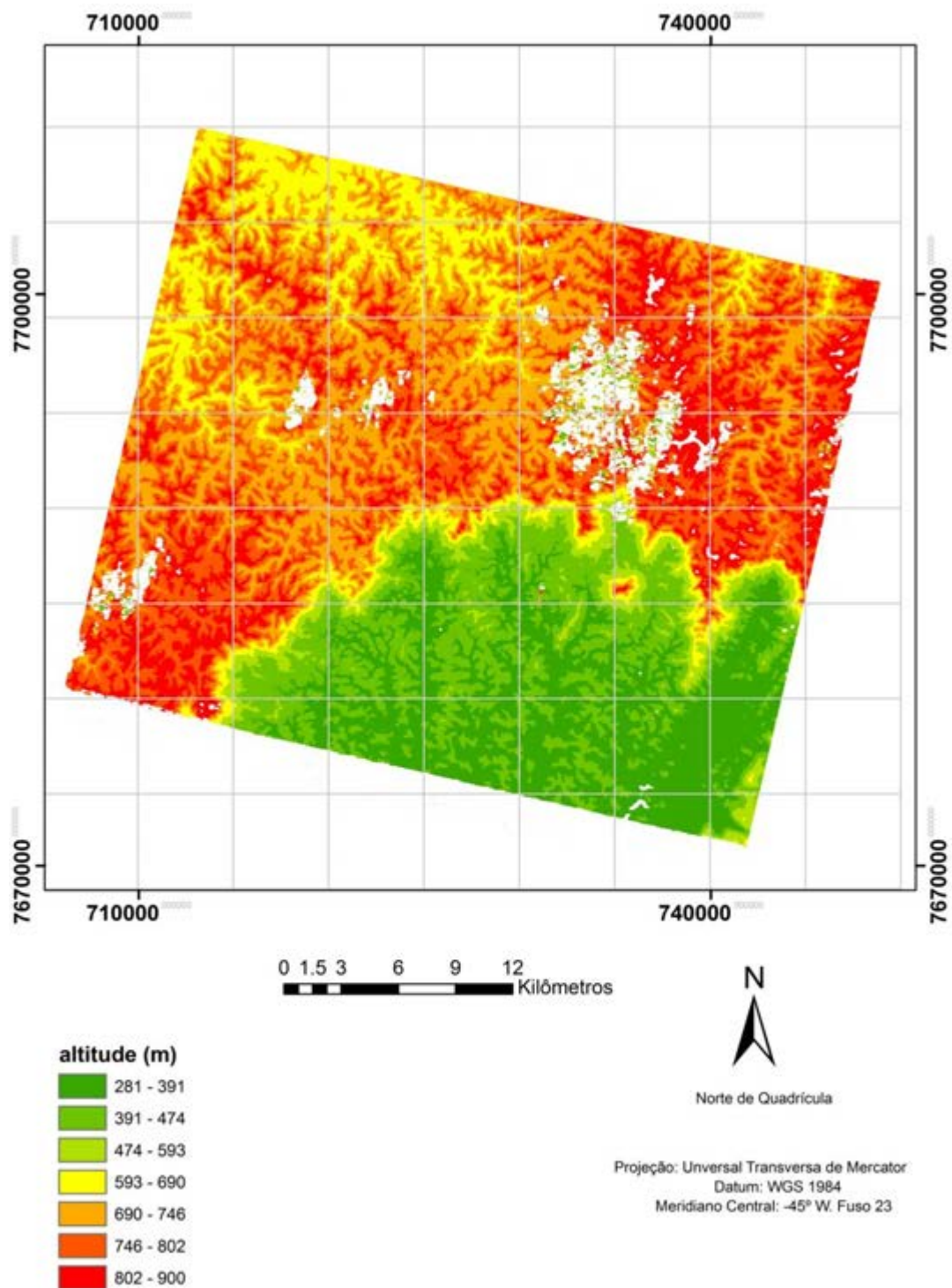


Figura 47 - MDScomp03 obtido através da combinação entre os Modelos 49, 50, 51 e 20, todos sem a opção de preenchimento de vazios

Estes MDSs foram avaliados empregando o PEC e os mesmos pontos de controle usados na avaliação de cada modelo individual visando a verificação de possíveis erros na implementação da rotina, visto que todos os Modelos após emprego da metodologia deveriam apresentar valores de discrepância idênticos a

cada um dos Modelos gerados individualmente, contudo, não apresentando necessariamente o menor valor. Após a avaliação verificou-se que todos os Modelos gerados foram enquadrados na Classe A para a escala 1:25.000 e grade com espaçamento igual a 10 metros. As discrepâncias da componente altimétrica seguem distribuição Normal para cada um dos Modelos. Além disso, não foi detectado presença de erros sistemáticos após emprego do Teste t *de Student*. Um resumo desta avaliação é apresentado na Tabela 24.

Visando uma comparação local do MDS composto gerado com os MDSs 14, 20, 44 e 49, realizou-se uma nova análise utilizando o PEC, contudo desta vez utilizou-se um novo conjunto de pontos que estão distribuídos ao longo da bacia do Ribeirão São Bartolomeu na região de Viçosa. Suas coordenadas são apresentadas no Apêndice A e sua distribuição espacial é apresentada na Figura 25.

De posse dos pontos de Checagem, realizou-se a análise empregando o PEC para os MDSs. Os resultados são apresentados na Tabela 25.

Tabela 24 - Avaliação dos MDSs compostos para toda a área de estudo

MDS	Média	Desvio	Erro	RMS	Distribuição	Apresenta	$\Delta h < PEC$	Classificação	Classificação	Classificação
	Padrão	Máximo	Calculado	normal?	tendência?	(%)	(PEC)	$\chi^2$	Final	
MDScomp01_MDS_14_20_44_49	-0,202	2,595	5,975	2,603	sim	não	93,3	A	A	A
MDScomp02_MDS_46_47_48_14cpv	0,198	2,674	4,135	2,681	sim	não	93,3	A	A	A
MDScomp03_MDS_49_50_51_20n	0,265	2,140	5,135	2,157	sim	não	96,7	A	A	A

Tabela 25 - Avaliação dos MDSs para a região de Viçosa

MDS	Média	Desvio	Erro	RMS	Distribuição	Apresenta	$\Delta h < PEC$	Classificação	Classificação	Classificação
	Padrão	Máximo	Calculado	normal?	tendência?	(%)	(PEC)	$\chi^2$	Final	
MDScomp01_MDS_14_20_44_49	-0,325	2453	-8301	2475	sim	não	96,7	A	A	A
MDScomp02_MDS_46_47_48_14cpv	-0,558	2716	9301	2775	sim	não	93,3	A	A	A
MDScomp03_MDS_49_50_51_20n	0,075	2170	6452	2171	sim	não	96,7	A	A	A
MDS 14 teste02_7_pontos_BF_BN_NF_10m_cpv	-0,158	2492	-8301	2497	não	não*	93,3	A	A	A
MDS 20 teste03_07_pontos_BN_10m	1,442	2,253	7,699	2,689	sim	sim	93,3	A**	A**	A
MDS 44 teste02_60_pontos_BN_10m	-0,858	2503	8699	2651	não	sim*	93,3	A***	A***	A
MDS49 tst04DEM_60PTS_BN_BF_10m_n	-0,758	3102	-13301	3197	não	não*	96,7	A*	A*	A

\*MDS reprovado no Teste de Normalidade

\*\*MDS reprovado no Teste de Tendência

\*\*\*MDS Reprovado no Teste de Normalidade e Tendência

Analisando a Tabela 25 verifica-se que todos os MDSs compostos gerados apresentaram distribuição Normal para a região de Viçosa. As discrepâncias relacionadas a componente altimétrica para os MDSs 14, 44 e 49 não seguem distribuição Normal. Isto se deve a influência da área de nuvens sobre o ponto de checagem CF03 que estava identificado sobre uma região que sofreu interferência de sombra (principalmente sobre as cenas *Backward* e *Nadir*) e conseqüentemente teve o seu valor de desvio mais elevado (-8,3 metros para o MDS14, 8,7 metros para o MDS 44 e -13,3 metros para o MDS 49) e com isso influenciou no Teste de Normalidade para estes MDSs. A retirada deste ponto permitiu que todos resíduos apresentassem distribuição Normal.

Verificou-se após análise de tendência que os MDSs 20 e 44 apresentaram erros sistemáticos para a componente altimétrica. Estes MDSs foram gerados apenas com a combinação de visadas *Backward* e *Forward* com 7 e 60 pontos de controle em sua geração. Os MDSs gerados utilizando a combinação entre os pares epipolares e os MDSs compostos não apresentaram erros sistemáticos.

Com relação ao PEC, verifica-se que os MDSs compostos foram enquadrados na Classe A, assim como os MDSs gerados no Teste 04, para esta área de estudo. Os MDSs compostos apresentaram resultados ligeiramente superiores aos demais, tomando como base o valor de RMS.

Analisando os MDSs após emprego do Teste Qui-Quadrado, constatou-se também que todos os modelos foram enquadrados como Classe A, para a escala de 1:25.000, com MDSs obtidos com espaçamento da grade igual a 10 metros.

Logo, após realizadas as análises de Tendência e Precisão, verificou-se que todos os Modelos avaliados foram enquadrados na Classe A, havendo a presença de erros sistemáticos para os MDSs 20 e 44 que não foram gerados através da combinação entre pares epipolares. O MDScomp03 foi aquele que apresentou os melhores resultados, considerando seus valores de média, desvio-padrão, erro máximo e RMS, o que permite dizer que a geração de MDSs compostos tomando como base o erro vertical em função da declividade apresentado pela Formula de Koppe modificada acarretou numa melhora na qualidade dos Modelos para a região estudada. As Figuras 48 e 49 apresentadas ilustram um comparativo entre os MDSs avaliados para a região de Viçosa.

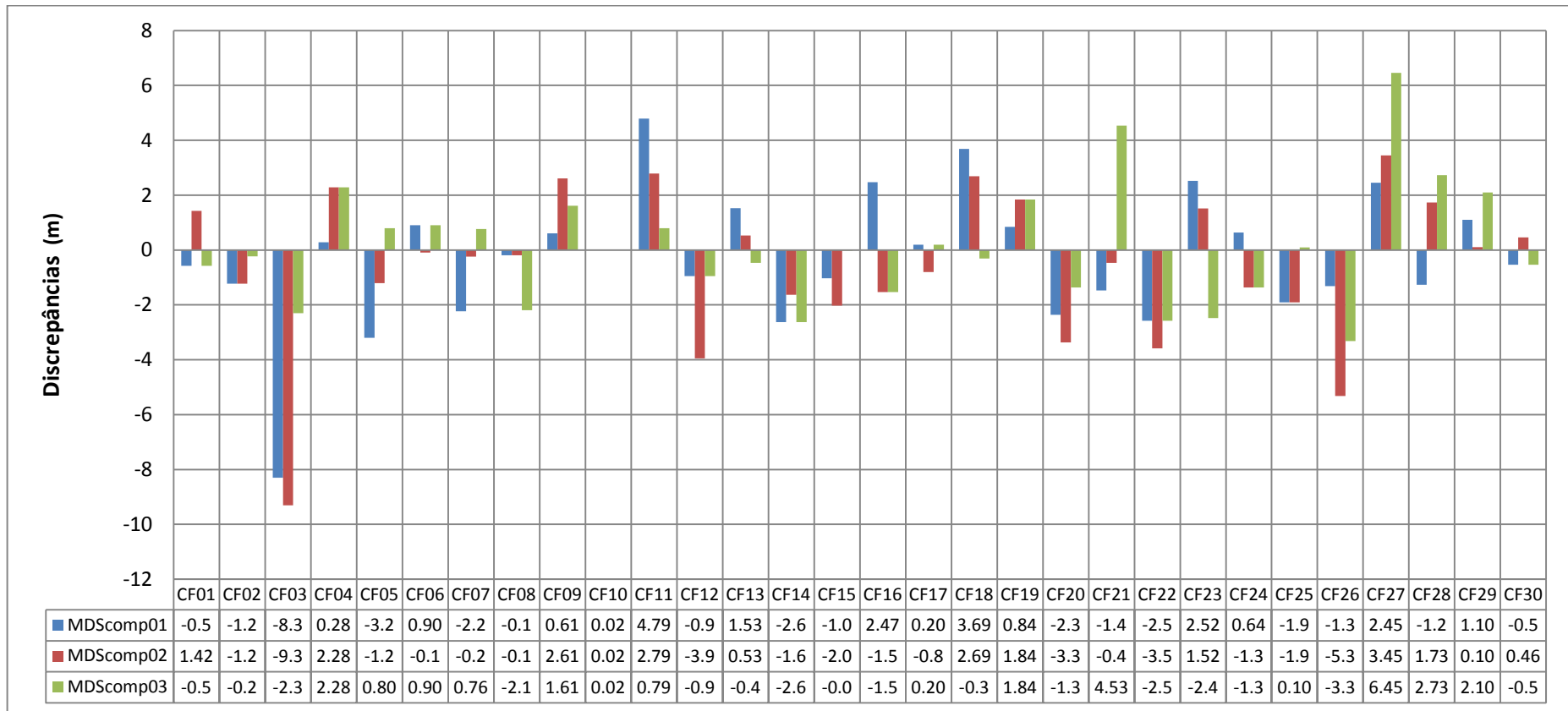


Figura 48 - Comparativo entre os MDSs Compostos avaliados para a região de Viçosa

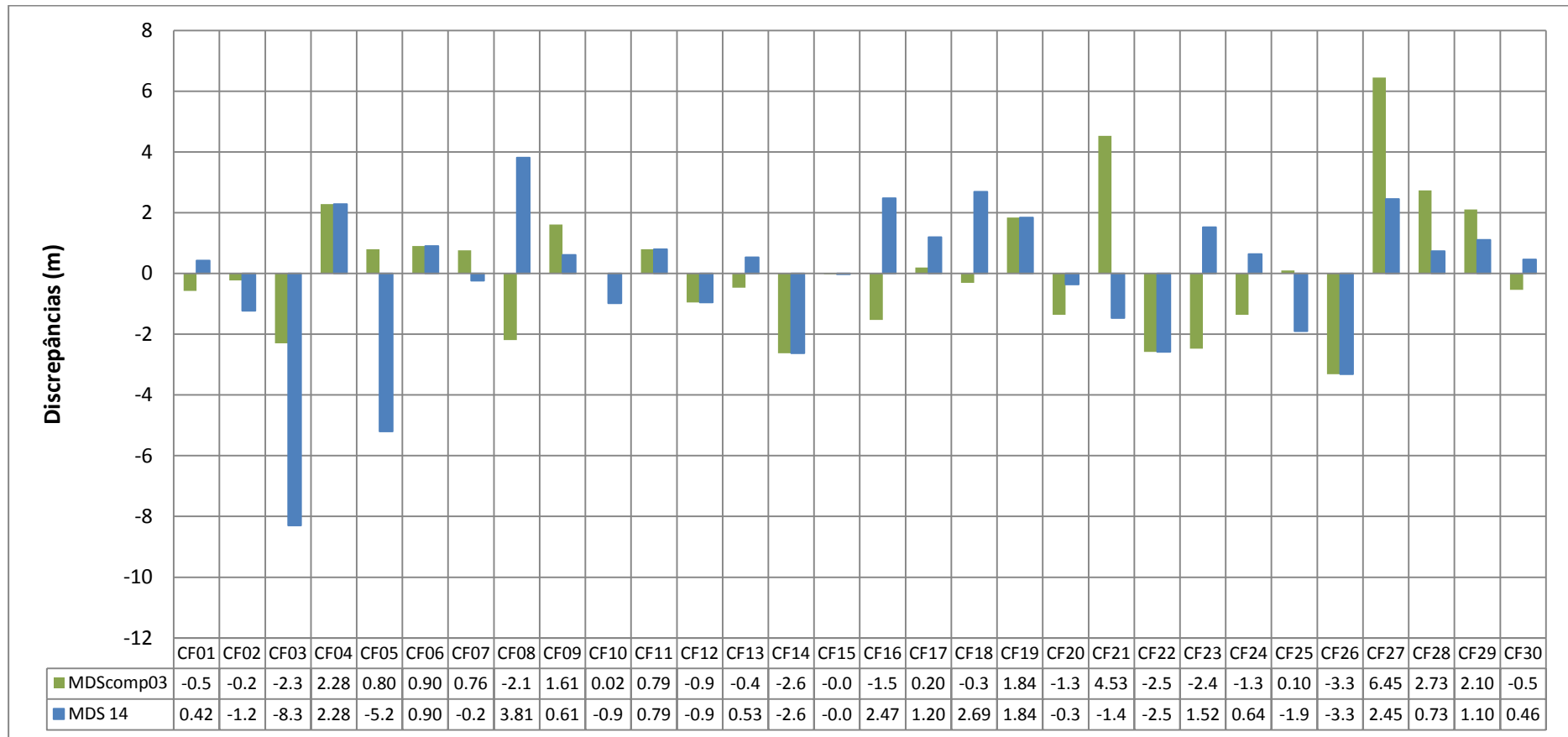


Figura 49 - Comparativo entre o MDSComp03 e o MDS 14 para a região de Viçosa

Comparando-se as Discrepâncias para a componente altimétrica, pode-se verificar que o MDS composto apresentou bons resultados, visto que as discrepâncias para cada um dos 30 pontos avaliados se mostraram de maneira consistente. Da Figura 48 ao se comparar as discrepâncias entre os MDSs compostos, verifica-se que o MDSComp03 foi aquele que apresentou menores valores. Da Tabela 25 também é possível verificar que este MDS obteve o menor valor de desvio-padrão além do mesmo ter sido enquadrado na Classe A. O MDS 14 que obteve melhor classificação foi comparado com o MDSComp03, sendo este último apresentando melhores resultados. O mesmo pode ser dito quando se analisa as discrepâncias para a região de Viçosa, o que pode ser visto na Figura 50, onde o MDSComp03 apresenta menores valores.

Analisando visualmente os Modelos gerados e comparando-os com os MDSs comuns, pode-se verificar que áreas antes não preenchidas e parcialmente preenchidas passaram a receber valores referentes aos Modelos gerados, mostrando que o uso da rotina para estimativa do indicativo do erro altimétrico com base na declividade e preenchimento com os valores de altitude pode ser empregado para cenas PRISM, melhorando a qualidade dos MDSs obtidos e explorando com mais eficiência a capacidade de mapeamento proporcionada pelo Sensor PRISM.

Vale ressaltar que existe a necessidade de realização de novas análises, dado o fato que para o caso estudado e conforme dito anteriormente, foi realizado apenas o preenchimento dos pixels que apresentavam menor indicativo de erro altimétrico após emprego da Fórmula de Koppe modificada. Nenhum método de interpolação, tomando como base, este erro altimétrico estimado, foi realizado, havendo então a necessidade realização de mais testes para validação do emprego da formulação adotada e possibilidade de aplicação a dados provenientes de outros sensores orbitais.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos, pôde-se verificar que as imagens do Sensor PRISM/ALOS produto 1B2R permitem a geração de Modelos Digitais de Superfície compatíveis a Classe A do PEC para a escala de 1:25.000, empregando o Modelo de Toutin implementado no *Software* PCI Geomatica 10.3. Contudo, parâmetros relacionados ao número de pontos de controle, pares epipolares a serem utilizados e disposição destes pares devem ser levados em consideração ao se trabalhar com dados derivados deste Sensor.

As cenas PRISM associadas aos MDSs que apresentaram melhor avaliação neste trabalho, permitiu obtenção de ortoimagens avaliadas como Classe A para a escala de 1:25.000, contudo devido a resolução radiométrica de 8 bits o processo de vetorização manual, principalmente em áreas urbanas é dificultado e elementos básicos como o sistema viário são de difíceis identificação.

O número mínimo de pontos de Controle exerce forte influência na geração dos MDSs, sendo que para o caso estudado, verificou-se a necessidade de sete pontos de Controle para sua geração, embora o fabricante do *Software* PCI Geomatica recomende um número mínimo de seis pontos ao se utilizar o Modelo de Toutin.

Com relação ao número mínimo de pontos de ligação a ser utilizado, para o caso estudado, verificou-se a necessidade de uma quantidade de doze pontos, sendo estes associados aos sete pontos de Controle para obtenção de Modelos compatíveis ao normativo que rege a Cartografia Nacional.

A utilização da Metodologia proposta por IBGE (2009) para a área de estudo apresentou resultados similares a aqueles encontrados na região de Itaguaí pelo IBGE. Embora haja a necessidade de realização de mais testes para validação em outras regiões, o emprego desta metodologia pode ser realizado em locais que apresentem relevo com características semelhantes ao estudado neste trabalho.

O aumento do número de pontos de Controle não trouxe melhorias significativas aos Modelos Digitais obtidos neste trabalho, contudo os MDSs que

apresentaram melhores resultados (Modelos enquadrados na Classe A segundo o PEC e sem a presença de erros sistemáticos) foram obtidos com o número máximo de pontos de controle (60 pontos).

A Resolução Radiométrica das imagens PRISM exerce influência na qualidade altimétrica dos MDSs, devido a dificuldade em se identificar pontos sobre as cenas principalmente quando se utiliza um maior número de pontos de controle. Para o caso estudado, ao se utilizar um conjunto de pontos de controle maior ou igual a quatorze, a identificação destes pontos sobre a cena acarreta em maiores erros com relação a altimetria, além de exigir um maior trabalho na etapa de identificação e localização dos pontos na coleta em campo, principalmente sobre o par *Nadir X Forward*, que para o caso estudado, apresentou os piores resultados.

Outro aspecto encontrado a respeito da radiometria está relacionado ao contraste entre as imagens. Regiões sobre as cenas que apresentam baixo contraste têm o processo de correlação prejudicado e conseqüentemente um pior resultado com relação a altimetria a nível local. Áreas contendo sombra, seja da vegetação ou de nuvens interferem de maneira significativa no produto final, havendo a necessidade de verificação e/ou retirada destas regiões ou a realização de um pós-processamento com vistas a preencher as falhas geradas.

Os MDSs obtidos com apenas um conjunto de pares epipolares, que apresentaram melhores resultados foram aqueles gerados através da combinação entre as visadas *Backward* e *Nadir*. Os Modelos obtidos pelo par *Backward X Forward* também apresentaram bons resultados. Os que obtiveram pior avaliação foram aqueles obtidos através do estereopar *Nadir X Forward*.

Como pôde ser observado nos resultados, áreas que apresentam maior inclinação do terreno sofrem maior influência no processo de correlação automática entre as cenas. A análise local permitiu a obtenção de um indicativo com base na declividade, onde pôde-se verificar que áreas com declividade superior a 50% apresentam valores inferiores de coeficiente de correlação e conseqüentemente Modelos com piores resultados.

O emprego da Fórmula de Koppe modificada por Kraus (2004) permite a obtenção de um indicativo da localização do erro altimétrico com base na inclinação do terreno. Seu uso torna-se interessante para geração de Modelos Híbridos, ou no caso deste trabalho, a geração de MDSs Compostos, visto que o emprego da mesma permite obter em cada Modelo Digital um indicativo do erro altimétrico para cada

pixel de uma maneira homogênea, o que permite a utilização de técnicas de integração destes MDSs com outros obtidos através de diferentes fontes, como realizado por DRUZINA (2007) e outros autores, e conseqüentemente o uso de técnicas de interpolação para a obtenção de MDSs Híbridos ou a combinação destes Modelos com base no indicativo do erro altimétrico estimado, obtendo-se então Modelos Compostos.

Os MDSs compostos obtidos neste trabalho apresentaram resultados ligeiramente superiores a cada MDS gerado, seja de forma individual (pares epipolares obtidos através da combinação entre as cenas *Backward X Nadir*, *Backward X Forward* e *Nadir X Forward*) ou através da combinação entre cada um destes pares, contudo novos testes devem ser realizados para diferentes áreas de estudo, mas por ser uma Metodologia de fácil implementação e por preservar os valores originais dos pixels de altitude torna-se interessante o seu uso, dado o fato de que a mesma pode fazer um refinamento nos Modelos e apresentar um MDS resultante com os valores de altitude otimizados.

Recomenda-se para trabalhos futuros o uso de técnicas de estimativa de área contendo sombras em cenas PRISM empregando o Modelo Linear de Mistura Espectral, uma vez que de posse destas regiões é possível verificar locais onde houve falha na correlação e conseqüentemente analisar erros grosseiros relacionados à altimetria de maneira quantitativa, bem como localizar área de falhas sobre os MDSs. No caso deste trabalho esta identificação se deu através da localização de áreas realizada de maneira manual.

É recomendado também o estudo de parâmetros da Fórmula de Koppe adequados ao uso de dados oriundos de Sensores Ópticos, bem como o emprego da Fórmula de Koppe original, com estimativa de seus parâmetros tomando como dados de referencia, fontes derivadas de levantamentos empregando *Scanner à Laser (Airbone Laser Scanning)*.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, I. R. A. A.; **O Uso de Técnicas de Sensoriamento Remoto na Identificação de formas na região de Porto Rico, Planície de Inundação do Alto Rio Paraná, MS/PR.** 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Maringá, Maringá, 2008.

ANDRIOTTI, J. S. L.; **Fundamentos de Estatística e Geoestatística,** Rio Grande do Sul, Editora Unisinos, 2009. 165p.

ARIZA, F. J. **Calidad en la Producción Cartográfica,** Madrid, Espanha: Editora RA-MA, 2002. 389p.

BARROS, R. S. **Avaliação de Modelos Digitais de Elevação Obtidos a partir de Sensores Orbitais.** 2006. 172 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BIAS, E. S; COSTA, R. R. J; BAPTISTA, G. M. M; BERNARDI, J. V. E. **Avaliação da precisão do MDE obtido por meio do SRTM e pela carta do IBGE na escala 1:100.000.** Revista Brasileira de Cartografia (Impresso), n. 63, p. 149-155, 2011.

BRASIL. **Decreto Lei 89.817, de 20 de Junho de 1984.** Estabelece instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Brasília, 1984. Disponível em: <<http://www.concar.ibge.gov.br/indexf7a0.html?q=node/41>>. Acesso em: 04 ago. 2010.

CAMARGO, F. F. 2008. **Análise orientada a objeto aplicada ao mapeamento de unidades geomorfológicas a partir de dados ASTER/Terra.** 2008. 171f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2008.

CARELLI NETTO. C. **Dinâmica da distribuição diamétrica de povoamentos de *Pinus taeda* L. em diferentes idades e espaçamentos.** 2008. 105f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CHRYSOULAKIS, N; DIAMANDAKIS, M. ; PRASTACOS, P. **GIS integration of ASTER stereo imagery for the support of watershed management.** Global Nest: the International Journal, No. 5, p. 1–10, 2004a.

CHRYSOULAKIS, N; ABRAMS, M; FEIDAS, H; VELIANITIS, D. **Analysis of ASTER multispectral stereo imagery to produce DEM and land cover databases for Greek Islands: the REALDEMS project.** In Proceedings of e-Environment: Progress and Challenge, P. Prastacos, U. Cortes, J.L. de Leon and M. Murillo (Eds), p. 411–424, 2004b.

CNES. **SPOT: Looking down on Earth.** 2008. Disponível em: <http://www.cnes.fr/web/CNES-en/1415-spot.php>. Acesso em 11 Dez. 2011.

CONCAR. **Planejamento estratégico – Cenário situacional.** Disponível em: <http://www.concar.ibge.gov.br/planejEstrategico.aspx?sub=3#subsidiios>. Acesso em: 24 ago. 2010.

COSTA, E,R. **Geração automática de Modelos Digitais de Terreno a partir de câmaras digitais.** 2006. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** Ed. Revisada. Campinas: UNICAMP, 1993.

CUARTERO, A.; FELICISIMO, A. M.; ARIZA, F.J. **Accuracy of DEM generation from TERRA-ASTER stereo data.** In: ISPRS, Vol. 35, Parte B2, Comissão 2, p. 559-563. Istambul – Turquia, 2004.

DALMOLIN, Q.; LEAL, E. M. **Análise da qualidade posicional em bases cartográficas geradas em CAD.** In: GIS BRASIL 99 f, p.5. 1999. Salvador. **Anais...** Salvador, 1999.

DEBIASI, P. **Ortorretificação de imagens CCD CBERS 2B através da transformação DLT.** 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DRUZINA, A. G. S. **Integração de dados altimétricos obtidos através de diferentes técnicas para geração de um novo Modelo Digital de Elevação.** 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

DSG – Diretoria do Serviço Geográfico, 2010. **Especificação Técnica para Aquisição da Geometria dos Dados Vetoriais Geo-espaciais da Infra-Estrutura Brasileira de Dados Geo-espaciais (ET-ADGV) –Versão Preliminar.** Brasília.

ERDAS, Inc. **ERDAS Field Guide,** November 2008, 812 p.

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. **Modelagem Numérica do Terreno.** In Introdução à Ciência da Geoinformação. (ed) INPE, 2001. São José dos Campos, p.

07-36. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2010.

FERRAZ, A. S. **Estimação dos estoques de biomassa e carbono na parte aérea de um fragmento de floresta estacional semidecidual por meio de imagens de satélite IKONOS II**. 2012. 88 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Departamento de Engenharia Florestal. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2012.

FILLIBEN, J. J. **The Probability Plot Correlation Coefficient Test for Normality**. *Technometrics*, Washington, Vol. 17, n. 1, p. 111-117, 1975.

GALINDO, J. R. F.; **Análise da reconstrução 3D a partir de um par estereoscópico HRC-CCD/CBERS2 usando dois modelos matemáticos**. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Departamento de Cartografia. Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

GALO, M.; CAMARGO, P. DE O, 1994. **Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas**. In- Anais do 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário - COBRAC, Vol. II, Florianópolis - SC, Brasil, p. 41-48.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações – Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR, 1994. 319 p.

GOKGOZ, T. **Generalization of Contours Using Deviation Angles and Error Bands**. *The Cartographic Journal*, Vol. 42. p. 145-156, 2005.

GONÇALVES, J. A. **Orientation of SPOT stereopairs by means of matching a relative DEM and the SRTM-DEM**. *Proceedings of the International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW2006*, Barcelona, 2006.

GONÇALVES, J. A. **Orientation and DEM extraction from ALOS PRISM images using the SRTM DEM as ground control**. *Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 37. Part B1, p. 1177-1182, 2008.

GRIPP, JR. J. **Ortorretificação de imagens de alta resolução para aplicação em cadastro técnico rural e mapeamento de áreas de preservação permanente e reservas legais**. 2009. 151f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal, Departamento de Engenharia Florestal. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2009.

GUSTAFSON, G. C.; LOON J. C. **Contour accuracy and the National Map Accuracy Standards**. *Surveying and Mapping*, Vol. 42. p. 385-402, 1982.

HEIPKE, C. **Overview of image matching techniques**. In: *Workshop on the application of digital photogrammetric workstations*, 1996, Lausanne. *Proceedings...* Lausanne: OEEPE, 1996.

HODGSON, M. E.; JENSEN, JOHN. R.; SCHMIDT, L.; SCHILL, STEVE.; DAVIS, B. **An evaluation of LIDAR – and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs.** In Remote Sensing of Environment, Vol. 84, p. 295-308, 2003.

IBGE. **Avaliação geométrica de imagens ALOS/PRISM níveis 1B2G e 1B2R ortorretificada – estudo de caso: Itaguaí RJ.** 2009. Relatório. Disponível em: <<http://ibge.gov.br/alos/relatorios.php>>. Acesso em: 18 ago. 2009.

IBGE. **Glossário Cartográfico.** Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/glossario/glossario\\_cartografico.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/glossario/glossario_cartografico.shtm)>. Acesso em: 03 Abr. 2011.

IBGE. **Imagens do satélite ALOS.** 2010. Retirado de: <<http://www.ibge.gov.br/alos/sensores.php>>. Acesso em: 25 de ago. 2010.

INPE. **Tutorial de Geoprocessamento.** Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html>>. Acesso em: 20 ago. 2010.

IMHOF, E. **Cartographic Relief Presentation.** Washington D.C: ESRI Press, 2007. 389 p.

JAXA. **Alos on Orbit.** In: Advanced Land Observing Satellite, 2004. Disponível em: <http://alos.jaxa.jp/3/library-e.html>. Acesso em: 21 Fev. 2012.

JAXA. **Advanced Land Observing Satellite “DAICHI” (ALOS).** In: Missions-Satellites and Spacecraft, 2007. Disponível em: [http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index\\_e.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_e.html). Acesso em: 25 ago. 2010.

JAXA. **ALOS User Handbook.** 2007. Disponível em: [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/alos\\_userhb\\_en.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/alos_userhb_en.pdf). Acesso em: 25 ago. 2010.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres.** 2.ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009, 604 p.

JOHANSEN, I. M. **Digital Mapping in Norway – Experiences from an accuracy Test.** In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 27, p. 170-179, 1988.

KAAB, A.; HUGGEL, C.; PAUL, F.; WESSELS, R.; RAUP, B.; KIEFFER, H.; KARGEL, J. **Glacier monitoring from ASTER imagery: accuracy and applications.** In Proceedings of EARSeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space, 11–13 March 2002, Bern, Germany, 2, p. 43–53, 2003.

KAREL, W.; KRAUS, K. **Quality Parameters of Digital Terrain Models.** In Seminar on Automated Quality Control of Digital Terrain Models, Aalborg, Denmark. EuroSDR. Impress, 2006.

KAREL, W.; PFEIFER, N.; BRIESE, C. **DTM Quality Assessment**. In: ISPRS Technical Commission II Symposium, 7, Vienna, 2006.

KAMP, U.; BOLCH, T.; OLSENHOLLER, J. **Geomorphometry of Cerro Sillajhuay (Andes, Chile/Bolivia): comparison of digital elevation models (DEMs) from ASTER remote sensing data and contour maps**. Geocarto International, No. 20(1), p. 23–33, 2005.

KRAUS, K. **Photogrammetrie. Band 1: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen**, 7. Ed. Berlin., Germany: Walter de Gruyter, 2004, 397 p.

LEOTTI, V. B.; BIRCK, A. R.; RIBOLD, J. **Comparação dos testes de aderência a normalidade Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Cramer-Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação**. In XI Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica (SEAGRO), 2005. Anais da 50ª RBRAS e do 11 SEAGRO, 2005.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology**. Florida, U.S.A. Editora CRC Press, 2005. 318p.

LIMA, A. B.; VIEIRA, A. M.; SOARES, C. B. S. S. **Utilização de imagens ALOS/PRISM nível 1B2R para a extração de MDE em área urbana de Manaus/AM**. In Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, Curitiba. 2011.

LUIZ, S.; SANTOS, A. R. S.; Brenner. T. L. **Geração de Modelo Digital de Elevação a partir de imagens Reference Stereo do Satélite IKONOS**. In Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis. 2007.

MACHADO E SILVA, A. J. F. **Geometria de imagens: Do Projeto do Satélite à geração dos Produtos**. 2007, 224f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2007.

MAROTTA, G. S. **Análise de diferentes modelos para a correção geométrica de imagens orbitais de altíssima resolução**. 2008, 118 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2008.

MARTINS, C. M. T. **1º Curso Intensivo de Estatística Computacional**. Departamento de Matemática, Universidade de Coimbra, 2007. Disponível em: <http://www.mat.uc.pt/~cmtm/>. Acesso em 11 dez. 2011.

MATSUOKA, C. T. **Atualização Cartográfica urbana utilizando imagem Quickbird**. 2006, 66 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MERCHANT, D. C. **Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps.** In Proceedings of the Technical Congress on Surveying and Mapping (1), 222-231, 1982.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações.** São Paulo: Editora UNESP, 2007. 2ª Edição. 476 p.

NERO, M. A. **Propostas para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase na componente posicional.** 2005, 181f. Tese (Doutorado) Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, L. F. O. **Análises de Modelos Digitais de Superfície gerados a partir de imagens do Sensor PRISM/ALOS.** 2011, 163f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2011.

OSAWA, Y.; HAMAZAKI, T. **Japanese Spaceborne Three-Line Sensor and its mapping capability.** In International Achievements of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B4, Amsterdam, Holland, p. 779-782, 2000.

OUVERNEY, M. L. M.; ANTUNES, M. A. H.; BARBOSA, L.G.; SEDANO, R. A. **Avaliação da Ortoretificação de imagens do Sensor Quickbird II usando modelo de orientação via RPCs.** Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis. 2007.

PAPASAIKA, H.; BALTASAVIAS, E. **Fusion of LIDAR and photogrammetric generated Digital Elevation Models.** In Proceedings ISPRS Hannover Workshop on High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, Hannover, Germany, 2-5 June, 2009.

PCI GEOMATICS. **PCI OrthoEngine 10.1 – User Guide.** Ontário, 2007. Canadá.

PEREIRA, L. C.; LOMBARDI NETO, F. **Avaliação da aptidão agrícola das Terras: proposta metodológica.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004, 36p.

PINHEIRO, E.S. **Comparação entre dados altimétricos Shuttle Radar Topography Mission, cartas topográficas e GPS: numa área com relevo escarpado.** Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, n. 58, p. 1-9, 2006.

POLI, D., REMONDINO, F. and DOLCI, C., 2004, **Use of satellite imagery for DTM extraction, landscape modeling and GIS applications.** In Proceedings of International Workshop on Processing and Visualization Using High-Resolution Imagery, Pitsanulok, Thailand 18–20 November 2004.

RABER, G. **The effect of LIDAR Posting Density on DEM accuracy and Flood Extent delineation – A GIS Simulation Approach.** In University Consortium of Geographic Information Science, 17, 2003. California.

RACOVITEANU, A.E.; MANLEY, W.F.; ARNAUD, Y.; WILLIAMS, M. W. **Evaluating digital elevation models for glaciological applications: an example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes.** Global and Planetary Change, No 59, p. 110–125, 2006.

REINARTZ, P.; MULLER, R.; HOJA, D.; LEHNER, M.; SCHRODER, M. **Comparison and fusion of DEM derived from SPOT-5 HRS and SRTM data and estimation of forest heights.** In: Earsel Workshop on 3D Remote Sensing, Portugal, 6-11 Junho, 2005.

RODRIGUES, D. D. **Topografia: Planimetria para Engenheiros Agrimensores e Cartógrafos.** (em desenvolvimento). Notas de Aula. Universidade Federal de Viçosa. 2008.

SANHUEZA, J. A. F. **Extração automática de feições planas e cálculo de entidades pontuais a partir dos dados LIDAR para o apoio fotogramétrico.** 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Cartografia Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SANTOS, A. P. **Avaliação do Padrão de Exatidão Cartográfica em Imagens IKONOS e CBERS 2B da Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, em Viçosa-MG.** Monografia. Universidade Federal de Viçosa. 2008.

SANTOS, A. P. **Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais com uso da estatística espacial.** 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2010.

SCHOWENGERDT, R. **Remote sensing: models and methods for image processing.** San Diego: Academic Press, 1997.

SCHINDLER, K.; PAPSAIKA, H.; SCHUTZ, S.; BALTASAVIAS, E. **Improving Wide-Area DEMs Through Data Fusion – Chances and Limits.** In: Proceedings of 53<sup>o</sup> Photogrammetric Week, Stuttgart, Germany, p. 3-14, 2011.

SEFERCIK, U.; JACOBSEN, K.; **Analysis of SRTM Height Models.** Turkish-German Geodetic Days, Berlin, 2006.

SILVA, C. T.; FERREIRA, E. B. **Desempenho dos testes de normalidade via simulação de Monte Carlo.** In-53<sup>a</sup> Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, 2008, Lavras, MG, Anais... 53<sup>a</sup> Reunião anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS). Lavras, Minas Gerais, 2008.

SOUZA, G. V. **Geração de MDT usando Triplet de imagens ALOS e Transformação Linear Direta (DLT).** Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

STEVENS, N.F., GARBEIL, H. and MOUGINIS-MARK, J.P. **NASA EOS ASTER: Volcanic topographic mapping and capability**. Remote Sensing of Environment, No. 90, p. 405–414, 2004.

TOUTIN, T. **Review article: geometric processing of remote sensing images: Models, algorithms and methods**. International Journal of Remote Sensing, Vol.25 No. 10, p. 1893-1924, 2004.

TOUTIN, T. **ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: a review**. In- International Journal of Remote Sensing, Vol. 29 No. 7, p. 1855-1875, 2008.

UCHIYAMA, Y.; HONDA, M.; MIZUTA, Y.; OTSUKA, K.; ISHIZEKI, T.; OKATANI, T.; TAMURA, E. **Revising 1:25.000-Scale Topographic Maps Using ALOS/PRISM Imagery**. Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol. 56, 2008.

UREÑA, M. A.; MOZAS, A. T.; PÉREZ, J. L. **Preliminary analysis of accuracy of contour lines using positional quality control methodologies for linear elements**. In: 25<sup>th</sup> International Cartographic Conference, Paris, França, 3-8 Julho, 2011.

VALENZUELA, L. O. **Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica Catastral de Isla de Pascua y Evaluación Métrica de su Cartografía Base**. 2007. 100.p Monografía (graduação) – Universidade de Santiago de Chile, Santiago, 2007.

WELCH, R.; JORDAN, T.; LANG, H.; MURAMAKI, H. **ASTER as a Source for Topographic Data in Late 1990' s**. IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, n°4, p. 1282-1289, 1998.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry with applications in GIS, Third Edition**. New York, U.S.A: McGraw-Hill, 2004. 608p.

XU, C.; WEI, M.; GRIFFITHS, S.; MERCER, B.; ABDOULLAEV, R. **Hybrid DEM generation and evaluation from spaceborne radargrammetric and optical stereoscopic DEM**. 2010. Proceedings of Canadian Geomatics Conference, Disponível em: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part1/11/11\\_02\\_Paper\\_123.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part1/11/11_02_Paper_123.pdf). Acesso em: 02 maio 2011.

ZANARDI, R. P. **Geração de Modelo Digital de Terreno a Partir de Par Estereoscópico do Sensor CCD do satélite CBERS-2 e Controle de Qualidade das Informações Altimétricas**. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

## APÊNDICE A

## A.1. Modelo de Caderneta de Campo utilizada para coleta dos pontos de controle e Checagem



 <b>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA</b> <b>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL</b> <b>PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL</b> <b>ÁREA DE CONCENTRAÇÃO – INFORMAÇÕES ESPACIAIS</b> 																							
<b>LEVANTAMENTO DE CAMPO EMPREGANDO RECEPTORES GNSS</b>																							
<b>Projeto:</b>																							
<b>Equipe:</b>																							
<b>Receptor:</b>	<b>Antena:</b>																						
<b>Altura Antena:</b>	<b>Taxa Rastreio</b>																						
<b>Data:</b>	<b>Data Juliana:</b>																						
<b>Local:</b>	<b>Município/UF:</b>																						
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"><b>Posicionamento GPS</b></td> <td colspan="2" style="text-align: center;"><b>Tipo de Ponto</b></td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Estático</td> <td><input type="checkbox"/> Absoluto</td> <td><input type="checkbox"/> HV</td> <td><input type="checkbox"/> Base GPS</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Cinemático</td> <td><input type="checkbox"/> Média</td> <td><input type="checkbox"/> V</td> <td><input type="checkbox"/> Est. geodésica</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Stop-and-go</td> <td><input type="checkbox"/> Relativo</td> <td><input type="checkbox"/> Paisagem</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table>		<b>Posicionamento GPS</b>		<b>Tipo de Ponto</b>		<input type="checkbox"/> Estático	<input type="checkbox"/> Absoluto	<input type="checkbox"/> HV	<input type="checkbox"/> Base GPS	<input type="checkbox"/> Cinemático	<input type="checkbox"/> Média	<input type="checkbox"/> V	<input type="checkbox"/> Est. geodésica	<input type="checkbox"/> Stop-and-go	<input type="checkbox"/> Relativo	<input type="checkbox"/> Paisagem	<input type="checkbox"/>						
<b>Posicionamento GPS</b>		<b>Tipo de Ponto</b>																					
<input type="checkbox"/> Estático	<input type="checkbox"/> Absoluto	<input type="checkbox"/> HV	<input type="checkbox"/> Base GPS																				
<input type="checkbox"/> Cinemático	<input type="checkbox"/> Média	<input type="checkbox"/> V	<input type="checkbox"/> Est. geodésica																				
<input type="checkbox"/> Stop-and-go	<input type="checkbox"/> Relativo	<input type="checkbox"/> Paisagem	<input type="checkbox"/>																				
<b>Horário</b>	<b>PDOP</b>	<b>Latitude (aproximada)</b>	<b>Longitude (aproximada)</b>																				
<b>Altitude</b>		↑	↑N																				
<b>Início:</b>		IMAGEM	CROQUI																				
<b>Fim:</b>																							
<b>Observações:</b>		<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td colspan="2"><b>Posicionamento GPS absoluto</b></td> </tr> <tr> <td>E: _____</td> <td>m</td> </tr> <tr> <td>N: _____</td> <td>m</td> </tr> <tr> <td>h: _____</td> <td>m</td> </tr> <tr> <td colspan="2"><b>Datum:</b></td> </tr> <tr> <td colspan="2"><b>UTM – Fuso:</b></td> </tr> <tr> <td colspan="2"><b>Arquivos de Fotos:</b></td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>_____</td> </tr> </table>		<b>Posicionamento GPS absoluto</b>		E: _____	m	N: _____	m	h: _____	m	<b>Datum:</b>		<b>UTM – Fuso:</b>		<b>Arquivos de Fotos:</b>		1	_____	2	_____	3	_____
<b>Posicionamento GPS absoluto</b>																							
E: _____	m																						
N: _____	m																						
h: _____	m																						
<b>Datum:</b>																							
<b>UTM – Fuso:</b>																							
<b>Arquivos de Fotos:</b>																							
1	_____																						
2	_____																						
3	_____																						
<b>Coordenadas Pós-Processadas</b>																							
Software:																							
Tipo de Processamento:																							
Bases:																							
Datum:																							
UTM-Fuso 23 S																							
λ: _____	σλ: _____	E: _____	m																				
φ: _____	σφ: _____	N: _____	m																				
h: _____	σh: _____	h: _____	m																				

Figura 50 - Modelo de Planilha utilizada para levantamento dos pontos de controle e checagem

## A.2. Coordenadas dos pontos de Controle coletados em campo

Tabela 26 - Pontos de Controle levantados em Campo

PONTO	E (m)	$\sigma_E$ (m)	N (m)	$\sigma_N$ (m)	h (m)	$\sigma_h$ (m)
P001	713800,736	0,034	7709380,808	0,034	620,089	0,029
P002	719695,567	0,021	7708919,412	0,026	654,680	0,036
P003	713615,572	0,013	7708206,608	0,014	631,011	0,024
P004	718833,994	0,026	7708136,923	0,025	641,970	0,036
P005	717378,783	0,008	7704622,006	0,09	647,660	0,015
P006	724835,459	0,03	7708086,283	0,03	636,341	0,08
P007	727205,815	0,007	7704896,132	0,011	735,022	0,018
P008	738529,086	0,012	7703887,868	0,013	738,922	0,027
P009	716742,785	0,017	7702016,063	0,016	695,414	0,029
P010	718458,598	0,023	7703059,269	0,015	665,637	0,035
P011	721401,920	0,025	7698918,884	0,017	689,123	0,035
P012	724597,722	0,007	7700450,381	0,007	677,945	0,011
P013	729231,187	0,024	7703216,447	0,026	670,076	0,036
P014	741691,882	0,013	7700346,458	0,021	669,987	0,028
P015	747180,994	0,03	7702146,030	0,031	672,164	0,059
P016	712260,445	0,01	7697105,519	0,01	656,317	0,024
P017	721981,207	0,032	7696466,729	0,039	729,281	0,062
P018	723410,843	0,045	7695270,726	0,09	738,769	0,12
P019	726773,686	0,006	7694692,705	0,006	709,816	0,013
P020	727925,720	0,03	7696733,902	0,03	684,686	0,08
P021	730872,903	0,013	7695654,694	0,014	698,025	0,025
P022	739721,132	0,021	7694427,163	0,024	771,565	0,045
P023	744185,798	0,036	7698044,691	0,037	721,654	0,046
P024	746067,078	0,076	7694888,353	0,1	755,873	0,124
P025	709183,010	0,003	7689574,741	0,003	656,317	0,009
P026	712265,177	0,005	7692518,847	0,006	705,863	0,017
P027	726213,966	0,016	7690846,372	0,029	754,608	0,036
P028	728798,639	0,016	7693186,185	0,019	705,192	0,036
P029	742253,989	0,017	7691472,443	0,019	732,383	0,035
P030	710222,272	0,026	7686532,205	0,066	741,925	0,09
P031	714148,061	0,055	7687349,744	0,018	751,240	0,039
P032	717394,732	0,004	7685972,026	0,004	726,891	0,012
P033	724272,120	0,023	7686137,856	0,021	378,529	0,035
P034	727285,871	0,017	7685432,249	0,026	394,135	0,038
P035	733328,958	0,003	7684945,114	0,003	401,974	0,01
P036	742498,967	0,084	7684455,587	0,081	385,695	0,109
P037	709428,036	0,033	7679111,173	0,025	822,873	0,13
P038	713248,905	0,005	7681469,202	0,005	804,908	0,01
P040	721888,145	0,026	7682356,374	0,043	379,194	0,057
P041	726235,351	0,03	7680220,010	0,041	417,995	0,047
P042	732632,263	0,005	7681671,637	0,005	358,885	0,013

Tabela 27 - Pontos de Controle levantados em Campo (continuação)

PONTO	E (m)	$\sigma_E$ (m)	N (m)	$\sigma_N$ (m)	h (m)	$\sigma_h$ (m)
P043	736814,637	0,004	7681208,821	0,006	395,529	0,011
P044	742234,597	0,158	7680747,885	0,12	353,246	0,147
P045	710020,590	0,004	7678200,447	0,005	781,939	0,013
P046	711588,978	0,004	7677373,132	0,004	777,081	0,013
P047	714268,966	0,108	7675972,287	0,126	400,997	0,145
P048	719790,904	0,035	7678312,367	0,034	378,710	0,077
P049	716589,586	0,164	7677239,657	0,138	388,749	0,113
P050	721985,805	0,048	7677125,053	0,042	349,371	0,073
P051	727925,752	0,036	7677034,320	0,035	339,613	0,053
P052	734366,449	0,003	7675552,847	0,004	342,694	0,013
P053	738542,415	0,07	7675469,271	0,068	321,862	0,09
P054	741140,401	0,061	7674680,339	0,058	348,421	0,131
P055	728999,137	0,031	7673469,996	0,031	336,659	0,069
P056	732666,922	0,105	7672472,376	0,092	343,620	0,097
P057	734845,052	0,056	7671578,890	0,051	304,771	0,126
P058	737194,122	0,081	7670985,340	0,083	332,548	0,105
P059	739153,348	0,055	7671257,589	0,08	353,975	0,118
P060	741192,663	0,067	7669737,704	0,07	612,965	0,13
P061	719015,825	0,013	7696347,150	0,017	785,645	0,05
P062	722077,785	0,015	7706116,670	0,025	660,441	0,06

E: Coordenada Leste

N: Coordenada Norte

 $\sigma_E$ : Desvio-Padrão da coordenada Leste $\sigma_N$ : Desvio-Padrão da coordenada Norte

h: Altitude elipsoidal

 $\sigma_h$ : Desvio Padrão da altitude

### A.3. Coordenadas dos pontos de Checagem coletados em campo

Tabela 28 - Pontos de Checagem levantados em campo

PONTO	E (m)	$\sigma_E$ (m)	N (m)	$\sigma_N$ (m)	h (m)	$\sigma_h$ (m)
C002	715491,889	0,022	7705017,678	0,023	646,860	0,035
C003	719896,181	0,024	7705995,308	0,026	636,076	0,044
C004	725805,256	0,003	7703753,487	0,004	651,081	0,01
C006	718797,770	0,041	7701758,596	0,039	734,540	0,047
C007	720222,202	0,03	7699664,620	0,031	682,081	0,059
C008	723048,743	0,002	7701725,681	0,002	671,356	0,005
C009	726289,781	0,007	7699957,788	0,008	711,922	0,017
C011	745975,640	0,038	7700710,115	0,039	682,703	0,044
C012	713937,279	0,004	7694891,924	0,004	691,380	0,011
C013	725059,936	0,013	7697729,317	0,013	712,713	0,016
C014	728182,009	0,02	7694092,934	0,022	705,383	0,029
C015	736732,909	0,018	7696950,745	0,02	777,581	0,036
C016	745781,158	0,047	7696027,678	0,05	743,570	0,052
C017	744717,995	0,041	7693768,672	0,039	739,907	0,047
C018	720008,971	0,026	7682752,973	0,031	389,644	0,063
C019	710663,683	0,003	7690237,016	0,004	751,975	0,009
C020	726569,117	0,013	7691071,916	0,021	756,472	0,028
C021	744926,482	0,013	7691552,967	0,013	745,657	0,016
C025	737009,297	0,005	7685079,546	0,006	399,429	0,012
C026	742539,162	0,022	7686243,731	0,024	767,981	0,037
C028	711079,901	0,004	7682359,259	0,004	770,135	0,01
C029	724911,239	0,022	7682285,743	0,022	359,549	0,048
C030	726837,430	0,024	7682738,371	0,023	418,658	0,046
C031	731906,512	0,003	7679080,706	0,004	340,533	0,009
C032	736639,680	0,004	7678866,047	0,004	344,058	0,009
C033	741688,559	0,055	7682001,833	0,055	351,188	0,096
C037	726114,904	0,034	7674914,734	0,036	346,739	0,093
C038	732525,919	0,006	7676150,637	0,008	354,747	0,031
C039	736584,002	0,005	7676773,748	0,004	346,406	0,015
C040	731737,264	0,033	7673656,604	0,031	348,630	0,069

E: Coordenada Leste

N: Coordenada Norte

$\sigma_E$ : Desvio-Padrão da coordenada Leste

$\sigma_N$ : Desvio-Padrão da coordenada Norte

h: Altitude elipsoidal

$\sigma_h$ : Desvio Padrão da altitude

#### A.4. Coordenadas dos pontos de Checagem utilizadas na análise local

Tabela 29 - Pontos de Checagem utilizados na análise local das Cenas PRISM

PONTO	E (m)	N (m)	h (m)
CF01	724016,404	7694684,534	775,425
CF02	723410,843	7695270,726	738,7690
CF03	722186,326	7695307,764	768,699
CF04	721981,207	7696466,729	729,281
CF05	723371,665	7696795,532	718,797
CF06	719731,457	7697594,553	715,903
CF07	720828,046	7698566,959	682,764
CF08	721956,567	7699476,651	728,809
CF09	719049,962	7699237,780	699,611
CF10	721495,050	7698826,517	691,017
CF11	720676,748	7696210,390	731,792
CF12	720899,025	7699704,094	673,047
CF13	717880,654	7700660,248	757,528
CF14	720793,828	7700932,184	665,372
CF15	721872,709	7702434,982	650,974
CF16	721575,334	7702900,347	648,472
CF17	722376,785	7702290,815	656,198
CF18	723098,184	7701657,522	673,690
CF19	717092,925	7702389,281	771,843
CF20	718458,598	7703059,269	665,637
CF21	719269,790	7704370,334	652,530
CF22	718244,205	7704521,874	652,420
CF23	719894,331	7705624,495	710,519
CF24	719218,119	7705620,902	619,637
CF25	722023,689	7704252,322	663,096
CF26	721719,693	7705636,817	655,681
CF27	719404,573	7701920,851	741,452
CF28	721923,296	7697556,281	743,731
CF29	719740,197	7700635,839	673,102
CF30	721263,648	7703276,929	643,462

E: Coordenada Leste  
N: Coordenada Norte  
h: Altitude elipsoidal

## APÊNDICE B

### B.1. Estatísticas para avaliação dos MDSs após realização do Teste 01.

Tabela 30 - Resultado do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk para os Modelos Digitais de Superfície gerados no Teste 01

MDS	$W_{\text{calculado}}$	$W_{\text{tabelado}}$	p VALOR > 0,05	RESULTADO DO TESTE
	$\Delta h$			Amostra segue distribuição normal?
MDS 01 teste01_7_pontos_BN_10m_3tp	0,980	0,927	sim	sim
MDS 02 teste01_7_pontos_BF_10m_3tp	0,947		sim	sim
MDS 03 teste01_7_pontos_NF_10m_3tp	0,920		não	não
MDS 04 teste01_7_pontos_BN_10m_6tp	0,989		sim	sim
MDS 05 teste01_7_pontos_BF_10m_6tp	0,982		sim	sim
MDS 06 teste01_7_pontos_NF_10m_6tp	0,923		não	não
MDS 07 teste01_7_pontos_BN_10m_9tp	0,948		sim	sim
MDS 08 teste01_7_pontos_BF_10m_9tp	0,977		sim	sim
MDS 09 teste01_7_pontos_NF_10m_9tp	0,857		não	não
MDS 10 teste01_7pontos_BN_10m_12tp	0,984		sim	sim
MDS 11 teste01_7_pontos_BF_10m_12tp	0,932		sim	sim
MDS 12 teste01_7_pontos_NF_10m_12tp	0,934		sim	sim

Tabela 31 - Resultados do Teste t de Student para a componente altimétrica

MDS	$\Delta h$		
	$t_{\text{calculado}}$	$t_{\text{tabelado}}$	Apresenta tendência?
MDS 01 teste01_7_pontos_BN_10m_3tp	-1,7509	1,6991	sim
MDS 02 teste01_7_pontos_BF_10m_3tp	1,2277		não
MDS 03 teste01_7_pontos_NF_10m_3tp	-2,4780		sim*
MDS 04 teste01_7_pontos_BN_10m_6tp	-2,7464		sim
MDS 05 teste01_7_pontos_BF_10m_6tp	-0,6880		não
MDS 06 teste01_7_pontos_NF_10m_6tp	-1,2488		não*
MDS 07 teste01_7_pontos_BN_10m_9tp	-3,2159		sim
MDS 08 teste01_7_pontos_BF_10m_9tp	0,1117		não
MDS 09 teste01_7_pontos_NF_10m_9tp	-0,3893		não*
MDS 10 teste01_7_pontos_BN_10m_12tp	-0,3397		não
MDS 11 teste01_7_pontos_BF_10m_12tp	-1,5679		não
MDS 12 teste01_7_pontos_NF_10m_12tp	-1,066		não

Tabela 32 - Resultados da avaliação dos Modelos para a componente altimétrica empregando o PEC

MDS	$\Delta h$ (Valores de PEC, EP e RMS em metros)					
	Escala	PEC Decreto-Lei	Erro Padrão Decreto-Lei	RMS Calculado	$\Delta h < PEC$ (%)	Classe Enquadrada
MDS 01 teste01 7 pontos BN 10m 3tp	1:25.000	5	3,333	2,712	93,3	A**
MDS 02 teste01 7 pontos BF 10m 3tp		6	4	3,196	93,3	B
MDS 03 teste01 7 pontos NF 10m 3tp		7.5	5	4,627	83,3	Reprovado***
MDS 04 teste01 7 pontos BN 10m 6tp		5	3,333	2,242	93,3	A**
MDS 05 teste01 7 pontos BF 10m 6tp		5	3,333	3,223	90,0	A
MDS 06 teste01 7 pontos NF 10m 6tp		7.5	5	6,387	96,7	C*
MDS 07 teste01 7 pontos BN 10m 9tp		5	3,333	2,251	93,3	A**
MDS 08 teste01 7 pontos BF 10m 9tp		6	4	3,195	93,3	B
MDS 09 teste01 7 pontos NF 10m 9tp		7.5	5	6,605	93,3	C*
MDS 10 teste01 7 pontos BN 10m 12tp		5	3,333	2,156	93,3	A
MDS 11 teste01 7 pontos BF 10m 12tp		5	3,333	2,431	93,3	A
MDS 12 teste01 7 pontos NF 10m 12tp		7.5	5	4,025	90,0	C

Tabela 33 - Resultados do Teste de Precisão para os MDSs avaliados no teste 01

MDS	$\chi^2_h$ Calculado	$\chi^2$ tabelado	Preciso para a classe
MDS 01 teste01 7 pontos BN 10m 3tp	6,303	39,100	A**
MDS 02 teste01 7 pontos BF 10m 3tp	25,345		A
MDS 03 teste01 7 pontos NF 10m 3tp	32,018		B***
MDS 04 teste01 7 pontos BN 10m 6tp	6,942		A**
MDS 05 teste01 7 pontos BF 10m 6tp	26,669		A
MDS 06 teste01 7 pontos NF 10m 6tp	47,302		Reprovado para as três classes*
MDS 07 teste01 7 pontos BN 10m 9tp	6,531		A**
MDS 08 teste01 7 pontos BF 10m 9tp	26,625		A
MDS 09 teste01 7 pontos NF 10m 9tp	50,337		Reprovado para as três classes*
MDS 10 teste01 7 pontos BN 10m 12tp	19,138		A
MDS 11 teste01 7 pontos BF 10m 12tp	14,221		A
MDS 12 teste01 7 pontos NF 10m 12tp	28,252		B

## B.2. Estatísticas para avaliação dos MDSs após realização do Teste 02.

Tabela 34 - Resultados da avaliação dos Modelos para a componente altimétrica empregando o PEC para o Teste 02

MDS	W <sub>calculado</sub>	W <sub>tabelado</sub>	p VALOR > 0,05	RESULTADO DO TESTE
	$\Delta h$			Amostra segue distribuição normal?
MDS13teste02_7pontos_BF_BN_NF_10m_spv	0,959	0,927	sim	sim
MDS14teste02_7pontos_BF_BN_NF_10m_cpv	0,982		sim	sim
MDS15teste02_7pontos_BN_NF_10m_cpv	0,959		sim	sim
MDS16teste02_7pontos_BN_NF_20m_cpv	0,993		sim	sim
MDS17teste02_7pontos_BF_BN_NF_20m_spv	0,978		sim	sim
MDS18teste02_7pontos_BF_BN_NF_20m_cpv	0,945		sim	sim

Tabela 35 - Resultados do Teste t de Student para a componente altimétrica

MDS	$\Delta h$		
	t <sub>calculado</sub>	t <sub>tabelado</sub>	Apresenta tendência?
MDS 13teste02_7pontos_BF_BN_NF_10m_spv	2,5294	1,6991	sim
MDS 14teste02_7pontos_BF_BN_NF_10m_cpv	-1,0995		não
MDS 15teste02_7pontos_BN_NF_10m_cpv	-0,5501		não
MDS 16teste02_7pontos_BN_NF_20m_cpv	-4,5558		sim
MDS 17teste02_7pontos_BF_BN_NF_20m_spv	-4,9173		sim
MDS 18teste02_7pontos_BF_BN_NF_20m_cpv	-2,8688		sim

Tabela 36 - Resultados da avaliação dos Modelos para a componente altimétrica empregando o PEC

MDS	$\Delta h$ (Valores de PEC, EP e RMS em metros)					
	Escala	PEC Decreto-Lei	Erro Padrão Decreto-Lei	RMS Calculado	$\Delta h < PEC$ (%)	Classe Enquadrada
MDS13teste02_7pontos_BF_BN_NF_10m_spv	1:25.000	5,000	3,333	2,381	96,7	A**
MDS14teste02_7pontos_BF_BN_NF_10m_cpv		5,000	3,333	2,396	96,7	A
MDS15teste02_7pontos_BN_NF_10m_cpv		5,000	3,333	2,351	93,3	A
MDS16teste02_7pontos_BN_NF_20m_cpv		8,000	5,000	4,307	93,3	C**
MDS17teste02_7pontos_BF_BN_NF_20m_spv		8,000	5,000	4,578	90,0	C**
MDS18teste02_7pontos_BF_BN_NF_20m_cpv		6,000	4,000	3,248	93,3	B**

Tabela 37 - Resultados do Teste de Precisão para os MDSs avaliados no Teste 02

MDS	$\chi^2_h$	$\chi^2$ tabelado	Preciso para a classe
	Calculado		
MDS 13 teste02_7pontos_BF_BN_NF_10m_spv	14,199	39,100	A**
MDS 14 teste02_7pontos_BF_BN_NF_10m_cpv	12,276		A
MDS 15 teste02_7pontos_BN_NF_10m_cpv	14,274		A
MDS 16 teste02_7pontos_BN_NF_20m_cpv	28,219		A**
MDS 17 teste02_7pontos_BF_BN_NF_20m_spv	13,256		A**
MDS 18 teste02_7pontos_BF_BN_NF_20m_cpv	21,451		A**

\*\* Modelos reprovados no Teste de Tendência

### B.3. Estatísticas para avaliação dos MDSs após realização do Teste 03.

Tabela 38 - Resultado do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk para os Modelos Digitais de Superfície gerados no Teste 03

MDS	$W_{\text{calculado}}$	$W_{\text{tabelado}}$	p VALOR > 0,05	RESULTADO DO TESTE
	$\Delta h$			Amostra segue distribuição normal?
MDS 19 teste03_07_pontos_BF_10m	0,984	0,927	sim	sim
MDS 20 teste03_07_pontos_BN_10m	0,932		sim	sim
MDS 21 teste03_07_pontos_NF_10m	0,934		sim	sim
MDS 22 teste03_14_pontos_BF_10m	0,949		sim	sim
MDS 23 teste03_14_pontos_BN_10m	0,933		sim	sim
MDS 24 teste03_14_pontos_NF_10m	0,959		sim	sim
MDS 25 teste03_21_pontos_BF_10m	0,987		sim	sim
MDS 26 teste03_21_pontos_BN_10m	0,935		sim	sim
MDS 27 teste03_21_pontos_NF_10m	0,975		sim	sim
MDS 28 teste03_28_pontos_BF_10m	0,959		sim	sim
MDS 29 teste03_28_pontos_BN_10m	0,957		sim	sim
MDS 30 teste03_28_pontos_NF_10m	0,974		sim	sim
MDS 31 teste03_35_pontos_BF_10m	0,980		sim	sim
MDS 32 teste03_35_pontos_BN_10m	0,971		sim	sim
MDS 33 teste03_35_pontos_NF_10m	0,978		sim	sim
MDS 34 teste03_42_pontos_BF_10m	0,970		sim	sim
MDS 35 teste03_42_pontos_BN_10m	0,960		sim	sim
MDS 36 teste03_42_pontos_NF_10m	0,975		sim	sim
MDS 37 teste03_49_pontos_BF_10m	0,840		não	não
MDS 38 teste03_49_pontos_BN_10m	0,955		sim	sim
MDS 39 teste03_49_pontos_NF_10m	0,864		não	não
MDS 40 teste03_56_pontos_BF_10m	0,846		não	não
MDS 41 teste03_56_pontos_BN_10m	0,955		sim	sim
MDS 42 teste03_56_pontos_NF_10m	0,864		não	não
MDS 43 teste03_60_pontos_BF_10m	0,830		não	não
MDS 44 teste03_60_pontos_BN_10m	0,986		sim	sim
MDS 45 teste03_60_pontos_NF_10m	0,917		não	não

Tabela 39 - Resultados do Teste *t* de *Student* para a componente altimétrica

MDS	$\Delta h$		
	$t_{\text{calculado}}$	$t_{\text{tabelado}}$	Apresenta tendência?
MDS 19 teste03_07_pontos_BF_10m	-0,3397	1,6991	não
MDS 20 teste03_07_pontos_BN_10m	-1,5679		não
MDS 21 teste03_07_pontos_NF_10m	-1,0660		não
MDS 22 teste03_14_pontos_BF_10m	-1,2436		não
MDS 23 teste03_14_pontos_BN_10m	2,0047		sim
MDS 24 teste03_14_pontos_NF_10m	-6,9510		sim
MDS 25 teste03_21_pontos_BF_10m	-4,3137		sim
MDS 26 teste03_21_pontos_BN_10m	-1,1264		não
MDS 27 teste03_21_pontos_NF_10m	-6,3372		sim
MDS 28 teste03_28_pontos_BF_10m	-6,1465		sim
MDS 29 teste03_28_pontos_BN_10m	-3,8244		sim
MDS 30 teste03_28_pontos_NF_10m	-5,4479		sim
MDS 31 teste03_35_pontos_BF_10m	-6,7714		sim
MDS 32 teste03_35_pontos_BN_10m	-2,5408		sim
MDS 33 teste03_35_pontos_NF_10m	-7,3036		sim
MDS 34 teste03_42_pontos_BF_10m	-6,7732		sim
MDS 35 teste03_42_pontos_BN_10m	-3,3103		sim
MDS 36 teste03_42_pontos_NF_10m	-7,0654		sim
MDS 37 teste03_49_pontos_BF_10m	-0,7833		não*
MDS 38 teste03_49_pontos_BN_10m	0,6484		não
MDS 39 teste03_49_pontos_NF_10m	1,9693		sim*
MDS 40 teste03_56_pontos_BF_10m	1,5313		não*
MDS 41 teste03_56_pontos_BN_10m	-0,7833		não
MDS 42 teste03_56_pontos_NF_10m	1,9693		sim*
MDS 43 teste03_60_pontos_BF_10m	1,3293		não*
MDS 44 teste03_60_pontos_BN_10m	-0,0997		não
MDS 45 teste03_60_pontos_NF_10m	2,0879		sim*

\* Modelos Reprovados no Teste de Normalidade

Tabela 40 - Resultados da avaliação dos Modelos para a componente altimétrica empregando o PEC

MDS	Δh (Valores de PEC, EP e RMS em metros)					
	Escala	PEC Decreto-Lei	Erro Padrão Decreto-Lei	RMS Calculado	Δh < PEC (%)	Classe Enquadrada
MDS19 teste03 07 pontos BF 10m	1:25.000	5	3,333	2,156	93,3	A
MDS20 teste03 07 pontos BN 10m		5	3,333	2,431	93,3	A
MDS21 teste03 07 pontos NF 10m		7,5	5,000	4,025	90,0	C
MDS22 teste03 14 pontos BF 10m		5	3,333	2,418	90,0	A
MDS23 teste03 14 pontos BN 10m		5	3,333	2,152	93,3	A**
MDS24 teste03 14 pontos NF 10m		7,5	4,000	4,011	93,3	C**
MDS25 teste03 21 pontos BF 10m		5	3,333	2,117	100,0	A**
MDS26 teste03 21 pontos BN 10m		5	3,333	2,491	93,3	A
MDS27 teste03 21 pontos NF 10m		6	4,000	3,383	96,7	B**
MDS28 teste03 28 pontos BF 10m		5	3,333	2,571	96,7	A**
MDS29 teste03 28 pontos BN 10m		5	3,333	2,111	93,3	A**
MDS30 teste03 28 pontos NF 10m		7,5	5,000	4,531	90,0	C**
MDS31 teste03 35 pontos BF 10m		5	3,333	2,341	96,7	A**
MDS32 teste03 35 pontos BN 10m		5	3,333	2,069	96,7	A**
MDS33 teste03 35 pontos NF 10m		7,5	5,000	4,467	93,3	C**
MDS34 teste03 42 pontos BF 10m		5	3,333	2,298	96,7	A**
MDS35 teste03 42 pontos BN 10m		5	3,333	2,010	96,7	A**
MDS36 teste03 42 pontos NF 10m		7,5	5,000	4,776	90,0	C**
MDS37 teste03 49 pontos BF 10m		5	3,333	2,602	93,3	A*
MDS38 teste03 49 pontos BN 10m		5	3,333	2,539	96,7	A
MDS39 teste03 49 pontos NF 10m		6	4,000	4,931	90,0	B***
MDS40 teste03 56 pontos BF 10m		5	3,333	4,457	93,3	A*
MDS41 teste03 56 pontos BN 10m		5	3,333	2,602	96,7	A
MDS42 teste03 56 pontos NF 10m		6	4,000	4,931	90,0	B**
MDS43 teste03 60 pontos BF 10m		5	3,333	3,530	96,7	A*
MDS44 teste03 60 pontos BN 10m		5	3,333	1,916	100,0	A
MDS45 teste03 60 pontos NF 10m		5	3,333	3,965	93,3	A***

\* Modelos Reprovados no Teste de Normalidade

\*\* Modelos reprovados no Teste de Tendência

\*\*\* Modelos reprovados nos Testes de Normalidade e Tendência

Tabela 41 - Resultados do Teste de Precisão para os MDSs avaliados no Teste 03

MDS	$\Delta h$		Preciso para a classe
	$\chi^2_h$ Calculado	$\chi^2_h$ tabelado	
MDS 19 teste03_07pontos_BF_10m	19,138	39,100	A
MDS 20 teste03_07pontos_BN_10m	14,221		A
MDS 21 teste03_07pontos_NF_10m	28,252		B
MDS 22 teste03_14pontos_BF_10m	14,485		A
MDS 23 teste03_14pontos_BN_10m	10,489		A**
MDS 24 teste03_14pontos_NF_10m	7,619		A**
MDS 25 teste03_21pontos_BF_10m	7,128		A**
MDS 26 teste03_21pontos_BN_10m	15,522		A
MDS 27 teste03_21pontos_NF_10m	12,528		A**
MDS 28 teste03_28pontos_BF_10m	7,494		A**
MDS 29 teste03_28pontos_BN_10m	7,729		A**
MDS 30 teste03_28pontos_NF_10m	26,481		A**
MDS 31 teste03_35pontos_BF_10m	5,542		A**
MDS 32 teste03_35pontos_BN_10m	9,142		A**
MDS 33 teste03_35pontos_NF_10m	18,342		A**
MDS 34 teste03_42pontos_BF_10m	5,336		A**
MDS 35 teste03_42pontos_BN_10m	5,314		A**
MDS 36 teste03_42pontos_NF_10m	21,879		A**
MDS 37 teste03_49pontos_BF_10m	16,591		A*
MDS 38 teste03_49pontos_BN_10m	17,301		A
MDS 39 teste03_49pontos_NF_10m	38,876		B***
MDS 40 teste03_56pontos_BF_10m	33,307		B*
MDS 41 teste03_56pontos_BN_10m	17,301		A
MDS 42 teste03_56pontos_NF_10m	38,876		B***
MDS 43 teste03_60pontos_BF_10m	30,657		A*
MDS 44 teste03_60pontos_BN_10m	9,580	A	
MDS 45 teste03_60pontos_NF_10m	30,283	A***	

\* Modelos Reprovados no Teste de Normalidade

\*\* Modelos reprovados no Teste de Tendência

\*\*\* Modelos reprovados nos Testes de Normalidade e Tendência

## B.4. Estatísticas para avaliação dos MDSs após realização do Teste 04.

Tabela 42 - Resultado do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk para os Modelos Digitais de Superfície gerados no Teste 04

MDS	W <sub>calculado</sub>	W <sub>tabelado</sub>	p VALOR > 0,05	RESULTADO DO TESTE
	Δh			Amostra segue distribuição normal?
MDS46tst04DEM_60PTS_BN_BF10m_cpv	0,943	0,927	sim	sim
MDS47tst04DEM_60PTS_BN_NF10m_cpv	0,936		sim	sim
MDS48tst04DEM_60PTS_BN_BF_NF10m_cpv	0,947		sim	sim
MDS49tst04DEM_60PTS_BN_BF_10m_n	0,962		sim	sim
MDS50tst04DEM_60PTS_BN_NF_10m_n	0,967		sim	sim
MDS51tst04DEM_60PTS_BN_BF_NF_10m_n	0,930		sim	sim

Tabela 43 - Resultados da Análise de Tendência para o Teste 04

MDS	Δh		
	t <sub>calculado</sub>	t <sub>tabelado</sub>	Apresenta tendência?
MDS46tst04DEM_60PTS_BN_BF10m_cpv	0,4121	1,6991	não
MDS47tst04DEM_60PTS_BN_NF10m_cpv	1,1665		não
MDS48tst04DEM_60PTS_BN_BF_NF10m_cpv	0,4253		não
MDS49tst04DEM_60PTS_BN_BF_10m_n	0,7368		não
MDS50tst04DEM_60PTS_BN_NF_10m_n	1,9680		sim
MDS51tst04DEM_60PTS_BN_BF_NF_10m_n	0,9377		não

Tabela 44 - Classificação dos Modelos após emprego do Padrão de Exatidão Cartográfica

MDS	Δh					Classe Enquadrada
	Escala	PEC Decreto-Lei	Erro Padrão Decreto-Lei	RMS Calculado	Δh < PEC (%)	
MDS46 tst04DEM_60PTS_BN_BF10m_cpv	1:25.000	5	3,333	2,201	96,7	A
MDS47 tst04DEM_60PTS_BN_NF10m_cpv		6	4,000	4,638	90,0	B
MDS48 tst04DEM_60PTS_BN_BF_NF10m_cpv		5	3,333	2,629	93,3	A
MDS49 tst04DEM_60PTS_BN_BF_10m_n		5	3,333	1,989	96,7	A
MDS50 tst04DEM_60PTS_BN_NF_10m_n		5	3,333	3,819	90,0	A**
MDS51 tst04DEM_60PTS_BN_BF_NF_10m_n		5	3,333	2,955	96,7	A

\*\* Modelos reprovados no Teste de Tendência

Tabela 45 - Classificação dos Modelos após Análise de Precisão

MDS	Δh		
	χ <sup>2</sup> <sub>h</sub> Calculado	χ <sup>2</sup> <sub>h</sub> tabelado	Preciso para a classe
MDS46tst04DEM_60PTS_BN_BF10m_cpv	12,574	39,100	A
MDS47tst04DEM_60PTS_BN_NF10m_cpv	25,245		A
MDS48tst04DEM_60PTS_BN_BF_NF10m_cpv	12,118		A
MDS49tst04DEM_60PTS_BN_BF_10m_n	10,138		A
MDS50 tst04DEM_60PTS_BN_NF_10m_n	34,393		A**
MDS51tst04DEM_60PTS_BN_BF_NF_10m_n	15,366		A

\*\* Modelos reprovados no Teste de Tendência

## B.5. Estatísticas para avaliação das Ortoimagens após realização do Teste 04.

Tabela 46 - Resultado do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk para as Ortoimagens geradas

ORTOIMAGEM	W <sub>calculado</sub>			W <sub>tabelado</sub>	p VALOR > 0,05		Amostra segue distribuição normal? ΔE/ΔN/Δresultante
	ΔE	ΔN	Δresultante		ΔE/ΔN	Δresultante	
ORTO14tst02_07PTS BN BF NF 10m cpv	0,959	0,960	0,901	0,927	sim/sim	sim	sim/sim/não
ORTO20tst03_07PTS BN 10m n	0,978	0,951	0,918		sim/sim	sim	sim/sim/não
ORTO49tst04_60PTS BN BF 10m n	0,886	0,971	0,904		sim/sim	sim	não
ORTO44tst03_60PTS BN 10m n	0,903	0,899	0,814		sim/sim	sim	não

Tabela 47 - Resultados do teste t para as Ortoimagens avaliadas

ORTOIMAGEM	t <sub>calculado</sub>		t <sub>tabelado</sub>	Apresenta tendência? ΔE/ΔN
	ΔE	ΔN		
ORTO14tst02_07PTS BN BF NF 10m cpv	-1,2404	-0,5741	1,6991	não/não
ORTO20tst03_07PTS BN 10m n	0,4364	-1,0698		não/não
ORTO49tst04_60PTS BN BF 10m n	0,2940	-0,8000		não/não*
ORTO44tst03_60PTS BN 10m n	1,2081	-0,5647		não/não*

(\*) Ortoimagens reprovadas no Teste de Normalidade para as discrepâncias para as coordenadas E e N

Tabela 48 - Classificação das Ortoimagens avaliadas

ORTO	Escala	PEC Decreto-Lei	Erro Padrão Decreto-Lei	RMS (Calculado)			Δh < PEC (%)	Classe Enquadrada
				ΔE	ΔN	Δres		
ORTO14	1:25.000	12,5	7,5	3,856	4,207	5,706	100,0	A
ORTO20		12,5	7,5	3,583	2,944	4,638	100,0	A
ORTO49		12,5	7,5	3,494	3,176	4,722	100,0	A*
ORTO44		12,5	7,5	3,652	3,285	4,912	100,0	A*

(\*) Ortoimagens reprovadas no Teste de Normalidade para as discrepâncias para as coordenadas E e N

Tabela 49 - Resultados da avaliação das Ortoimagens após emprego do teste de precisão

ORTOIMAGEM	ΔE	ΔN	χ <sup>2</sup> tabelado	Preciso para a classe
	χ <sup>2</sup> E Calculado	χ <sup>2</sup> N Calculado		
ORTO14tst02_07PTS BN BF NF 10m cpv	14,555	18,044	39,100	A
ORTO20tst03_07PTS BN 10m n	13,153	8,599		A
ORTO49tst04_60PTS BN BF 10m n	12,550	10,174		A
ORTO44tst03_60PTS BN 10m n	13,094	11,004		A

Tabela 50 - Principais estatísticas utilizadas na avaliação das ortoimagens

ORTO	Média			Desvio-Padrão			Erro Máximo			RMS		
	ΔE	ΔN	Δres	ΔE	ΔN	Δres	ΔE	ΔN	Δres	ΔE	ΔN	Δres
ORTO 14	-0,851	-0,438	4,785	3,757	4,183	2,979	8,184	9,102	11,859	3,856	4,207	5,706
ORTO20	0,285	-0,564	3,723	3,572	2,888	2,678	9,377	7,668	12,113	3,583	2,944	4,638
ORTO 49	0,188	-0,459	3,818	3,489	3,141	2,689	9,701	6,740	11,117	3,494	3,176	4,722
ORTO 44	0,786	-0,337	3,507	3,564	3,267	3,378	10,494	8,167	12,004	3,652	3,285	4,912

## B.6. Estatísticas para avaliação dos MDSs após avaliação para a região de Viçosa.

Tabela 51 - Resultado dos MDSs após emprego do Teste de Normalidade

MDS	W <sub>calculado</sub>	W <sub>tabelado</sub>	p VALOR > 0,05	RESULTADO DO TESTE
	$\Delta h$			Amostra segue distribuição normal?
MDScomp01 MDS_14_20_44_49	0,941	0,927	sim	sim
MDScomp02 MDS_46_47_48_14_cpv	0,927		sim	sim
MDScomp03 MDS_49_50_51_20_n	0,943		sim	sim
MDS_14 teste02_7_pontos_BF_BN_NF_10m_cpv	0,906		sim	não
MDS_20 teste03_07_pontos_BN_10m	0,971		sim	sim
MDS_44 teste02_60_pontos_BN_10m	0,848		não	não
MDS49 tst04DEM_60PTS_BN_BF_10m_n	0,791		não	não

Tabela 52 - Classificação dos Modelos após emprego do Teste t de Student

MDS	$\Delta h$		
	t <sub>calculado</sub>	t <sub>tabelado</sub>	Apresenta tendência?
MDScomp01_14_20_44_49	-0,7252	1.6991	não
MDScomp02_46_47_48_14_cpv	-1,1254		não
MDScomp03_49_50_51_20_n	0,1899		não
MDS_14 teste02_7_pontos_BF_BN_NF_10m_cpv	-0,3475		não
MDS_20 teste03_07_pontos_BN_10m	3,5050		sim
MDS_44 teste02_60_pontos_BN_10m	-1,8774		sim
MDS49 tst04DEM_60PTS_BN_BF_10m_n	-1,3383		não

Tabela 53 - Avaliação dos MDSs após Análise empregando o PEC

MDS	$\Delta h$					
	Escala	PEC Decreto-Lei	Erro Padrão Decreto-Lei	RMS Calculado	$\Delta h < PEC$ (%)	Classe Enquadrada
MDScomp01 MDS14_20_44_49	1:25.000	5,000	3,333	2,475	96,7	A
MDScomp02 MDS46_47_48_14_cpv		5,000	3,333	2,775	93,3	A
MDScomp03 MDS49_50_51_20_n		5,000	3,333	2,171	96,7	A
MDS14 teste02_7_pontos_BF_BN_NF_10m_cpv		5,000	3,333	2,497	93,3	A
MDS20 teste03_07pontos_BN_10m		5,000	3,333	2,689	93,3	A
MDS44 teste02_60pontos_BN_10m		5,000	3,333	2,651	93,3	A
MDS49 tst04DEM_60PTS_BN_BF_10m_n		5,000	3,333	3,197	96,7	A

Tabela 54 - Avaliação dos MDSs após Análise de Precisão

MDS	$\Delta h$		
	$\chi^2_h$ Calculado	$\chi^2_h$ tabelado	Preciso para a classe
MDScomp01_14_20_44_49	10,902	39,100	A
MDScomp02_46_47_48_14_cpv	19,252		A
MDScomp03_49_50_51_20_n	12,289		A
MDS 14 teste02_7_pontos_BF_BN_NF_10m_cpv	16,202		A
MDS 20 teste03_07_pontos_BN_10m	13,252		A
MDS 44 teste02_60_pontos_BN_10m	16,352		A
MDS49 tst04DEM_60PTS_BN_BF_10m_n	25,121		A

## APÊNDICE C

### C.1. Implementação da rotina para cálculo da Fórmula de Koppe no ArcGIS 9.3 utilizando a ferramenta *ModelBuilder*

A rotina que segue foi implementada para a geração da imagem contendo o erro altimétrico de cada pixel associado ao MDS 51, que foi utilizado na geração do MDSComp03. O processo de geração dos demais modelos ocorreu de forma análoga.

Primeiramente calculou-se a declividade deste modelo (utilizando o comando *Slope*) e posteriormente realizou-se a conversão de graus para radianos (multiplicação pelo fator 0,017453 inserido no campo *Input raster or*) e cálculo da tangente (comando *Tan*), obtendo o arquivo *Tan\_grau\_rad* conforme apresentado na Figura 51.

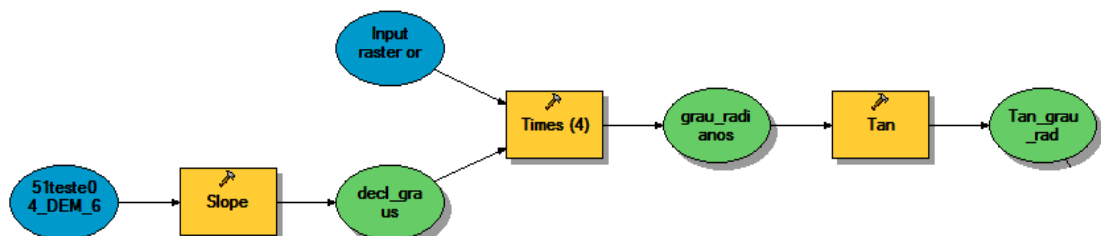


Figura 51 - Rotina para a determinação da tangente da declividade

Posteriormente calculou-se a altura de voo através da subtração entre a altitude de voo do satélite pela altitude do ponto sobre o terreno, obtendo o arquivo *hv51*, conforme apresentado na Figura 52.

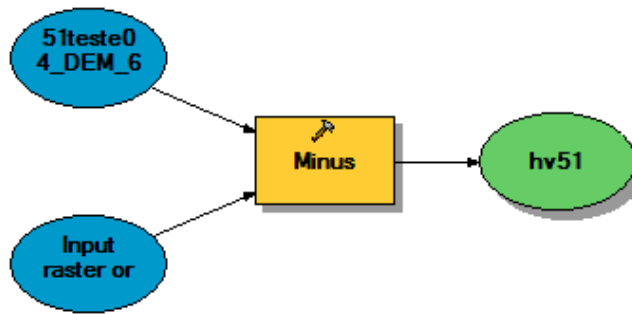


Figura 52 - Determinação da altura de voo

De posse do valor da altura de voo, calculou-se a relação de escala ( $h/c$ ), onde  $c$  é a distância focal do Sensor PRISM, cujo valor é igual a 1.939mm, conforme apresentado na Figura 53, obtendo-se o arquivo *hv\_c51*.

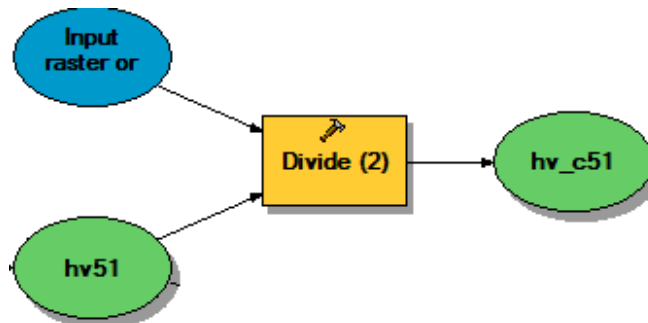


Figura 53 - Determinação da relação de escala

O procedimento seguinte foi a multiplicação do arquivo *hv\_c51* pelo fator 0,0055 utilizando para isso a função *Times* apresentado na Figura 54, obtendo o arquivo *055\_Hvc\_51*.

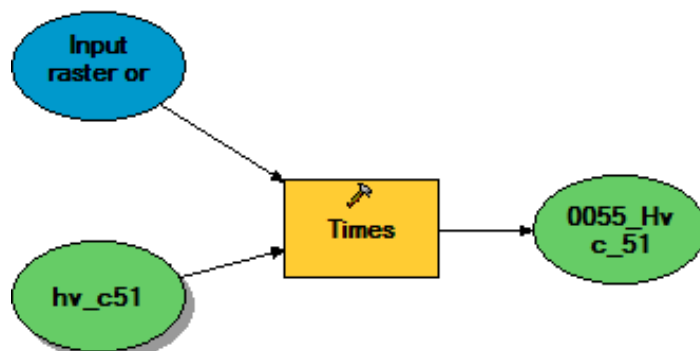


Figura 54 - Determinação do fator 0,0055.h/c

De posse do arquivo apresentado na Figura 51, realizou-se a multiplicação do termo *055\_Hvc\_51* pela tangente da declividade, obtendo o arquivo *Btan51* conforme apresentado na Figura 55.

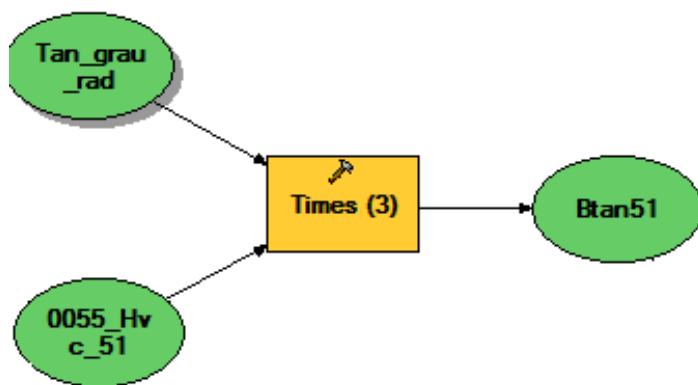


Figura 55 - Obtenção do termo  $Btan\alpha$  da Fórmula de Koppe

O último passo foi a realização da soma entre o termo  $A$  e o termo  $Btan\alpha$  da Fórmula de Koppe utilizando a função *Plus*, obtendo-se assim a imagem final contendo o valor de erro associado a componente altimétrica, estimado para cada pixel do MDS 51, arquivo *s51* apresentado na Figura 56.

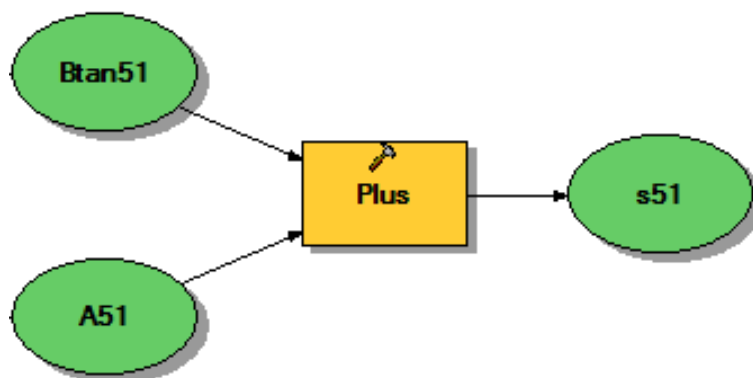


Figura 56 - Obtenção do erro altimétrico associado ao MDS 51

## C.2. Implementação da rotina para geração do MDS composto no ArcGIS 9.3 utilizando a ferramenta *ModelBuilder*

A rotina apresentada foi utilizada para obtenção do MDScomp03, que utilizou os MDSs 20, 49, 50, e 51 em sua geração. O processo de obtenção dos demais modelos se deu de maneira análoga, substituindo-se apenas os dados de entrada.

Primeiramente realizou-se a comparação entre as imagens contendo o erro altimétrico associado aos MDSs 50 e 51, estimados pela Fórmula de Koppe. Essa comparação foi realizada utilizando a ferramenta *Less Than*, que origina uma imagem associando o valor 1 se o pixel da imagem de erro do MDS 50 (arquivo *s50*) for menor que o pixel da imagem de erro do MDS 51 (arquivo *s51*) e o valor 0, caso contrário. Gerou-se então o arquivo *s50menors51*. Feito isso, utilizou-se a ferramenta *Less Than Equal* com a finalidade de comparar o arquivo *s51* com o *s50*, gerando-se uma imagem contendo os pixels do arquivo *s51* cujos valores eram menores ou iguais ao do *s50*, gerando o arquivo *s51\_menigs50*. Analogamente, utilizou-se as mesmas ferramentas para comparação entre os arquivos de erro para os MDSs 20 e 49.

As Figuras 57 e 58 apresentam o exposto.

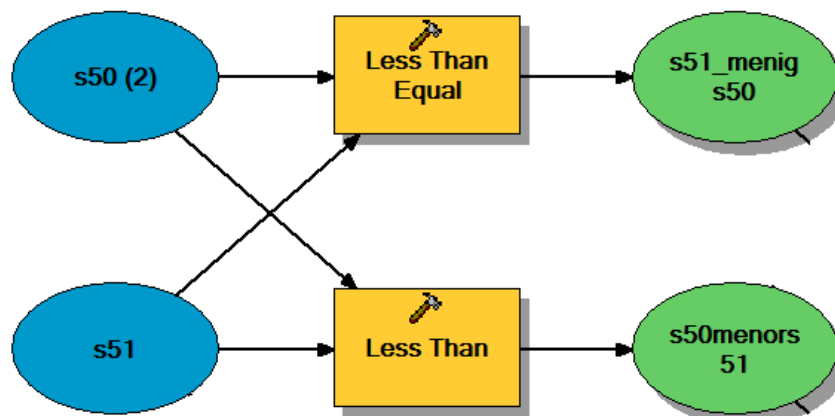


Figura 57 - Localização dos pixels com menor valor de erro altimétrico para os MDSs 50 e 51

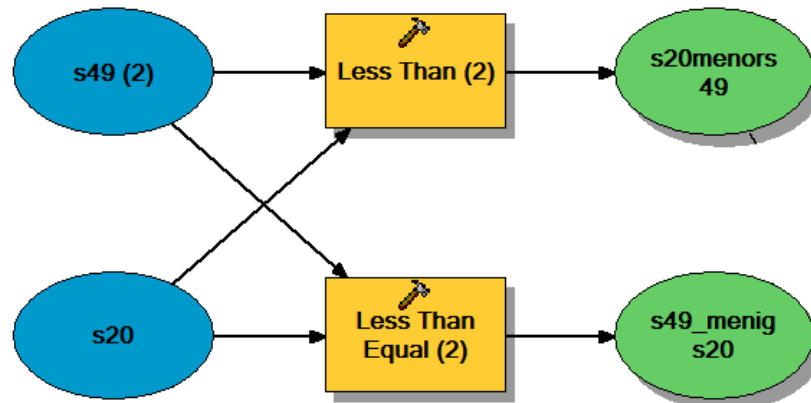


Figura 58 - Localização dos pixels com menor valor de erro altimétrico para os MDSs 20 e 49

De posse dos arquivos binários gerados, utilizou-se a ferramenta *Times*, onde realizou-se a multiplicação do MDS pelo respectivo arquivo, ou seja, o MDS 51 pelo arquivo binário *s51\_menigs50* (gerando arquivo resultante *menor\_MDS50*) e o MDS 50 ao arquivo binário *s50menors51* (gerando arquivo resultante *menor\_MDS51*). Estes arquivos foram posteriormente somados, utilizando a ferramenta *Plus*, obtendo-se assim um novo MDS cujos pixels apresentavam o menor valor de erro altimétrico (arquivo *MDEH1\_5051*).

Procedimento análogo foi realizado para a obtenção da imagem de erro associada ao *MDEH1\_5051*, dando origem a imagem de erro *menor\_s50s51*.

A Figura 59 apresenta a rotina gerada.

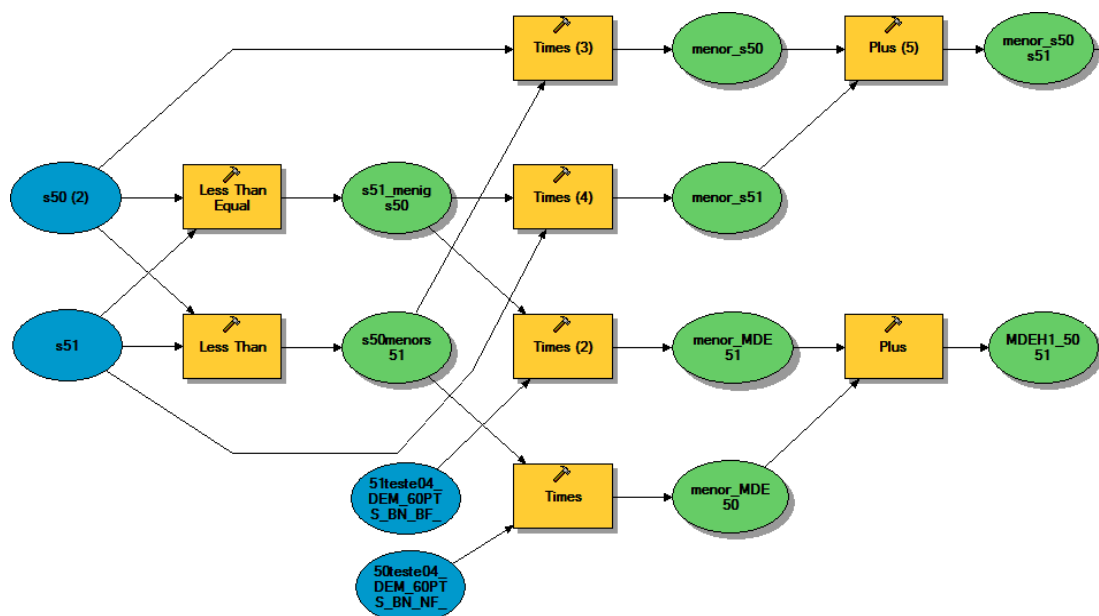


Figura 59 - Procedimento para obtenção do MDS Composto e imagem de erro associada aos MDSs 50 e 51

O mesmo procedimento foi empregado para obtenção do MDS Composto e imagem de erro derivados do MDS49 e MDS 20, onde obteve-se o Modelo *MDEH2\_2049* e *menor\_s49s20*, conforme apresentado na Figura 60.

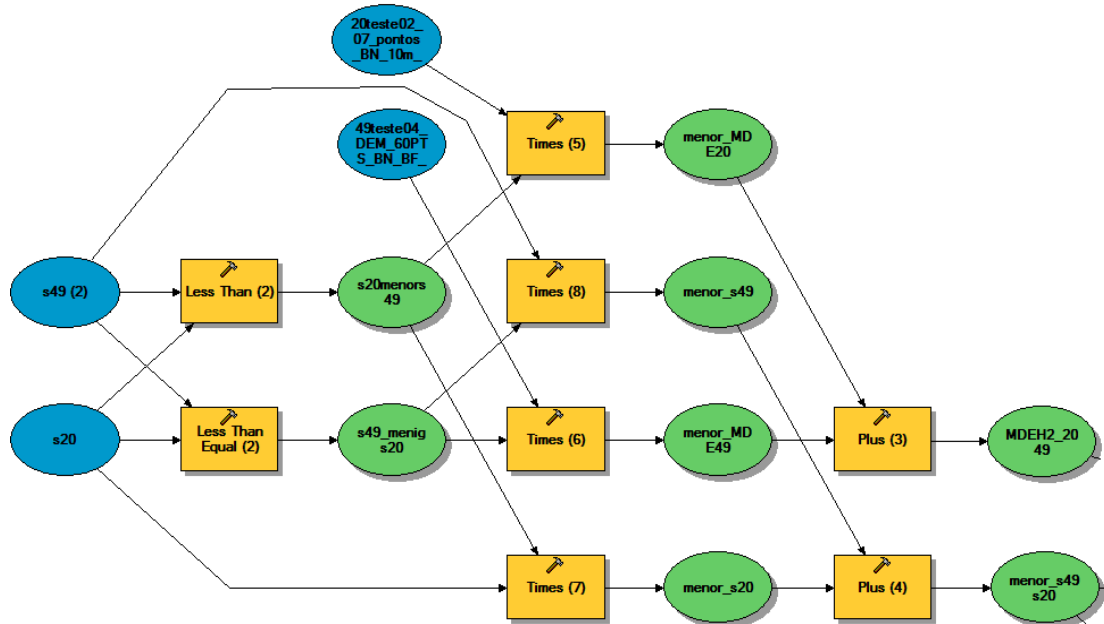


Figura 60 - Procedimento para obtenção do MDS Composto e imagem de erro associado aos MDSs 20 e 49

A geração do produto final (*MDEcomp03*) foi realizada de maneira análoga, onde utilizou-se as ferramentas *Less Than* e *Less Than Equal* para geração dos arquivos binários de erro e posteriormente o MDS composto, conforme apresentado na Figura 61.

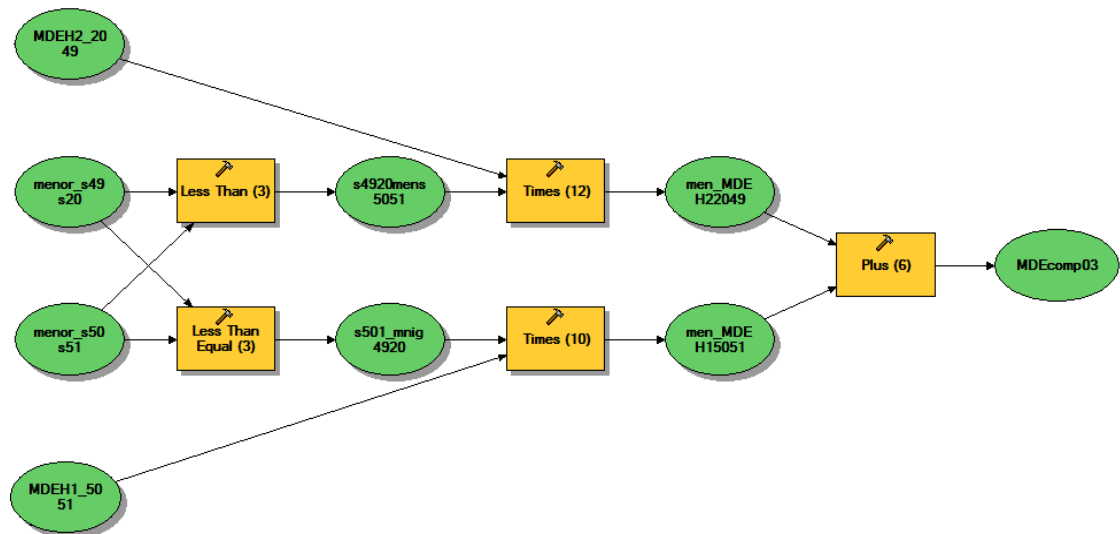


Figura 61 - Procedimento para obtenção do MDS Composto - MDEcomp03