JOSÉ ROBERTO FERNANDES GALINDO

ANÁLISE DA RECONSTRUÇÃO 3D A PARTIR DE UM PAR ESTEREOSCÓPICO HR-CCD/CBERS-2 USANDO DOIS MODELOS MATEMÁTICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Presidente Prudente

2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIENCIA E TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

JOSÉ ROBERTO FERNANDES GALINDO

ANÁLISE DA RECONSTRUÇÃO 3D A PARTIR DE UM PAR ESTEREOSCÓPICO HR-CCD/CBERS-2 USANDO DOIS MODELOS MATEMÁTICOS

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, para obtenção do título de mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Júlio Kiyoshi Hasegawa

Co-Orientador: Prof. Dr. Maurício Galo

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Presidente Prudente

2008

DEDICATÓRIA

Dedicado a Marcos Galindo,
com AMOR.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à DEUS, por tudo.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Júlio Kiyoshi Hasegawa e Prof. Dr. Maurício Galo, pela orientação, contribuições, estímulo e principalmente pela paciência. Os acertos deste trabalho devo a eles e os erros são de minha total exclusividade.

Aos membros da banca examinadora: Prof. Dr. João Fernando Custodio Silva e Prof. Dr. Hideo Araki, pela disponibilidade e valiosas sugestões.

À Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em especial ao Eng. Cart. Marcelo Rodrigues de Albuquerque Maranhão, e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelos dados fornecidos para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos professores do Departamento de Cartografia, Matemática, Estatística e Computação da FCT/UNESP e demais, pelo ensino e formação acadêmica.

Aos amigos da sala de permanência da Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, pelo apoio, debates e companheirismo.

Aos funcionários da FCT/UNESP, bem como ao Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da FCT/UNESP, pelos auxílios prestados no decorrer desta pesquisa e na elaboração dessa dissertação.

À CAPES pela concessão da bolsa durante o desenvolvimento dessa pesquisa.

Em especial a minha família, pelo amor, carinho e incentivo.

A todos que direta e indireta me ajudaram na realização desta pesquisa, serei eternamente grato.

EPÍGRAFE

"Poucos são os anos de nossas vidas.
A maior parte deles, sofrimento e vaidade...
O tempo passa depressa e desaparecemos.
Fazei valer as tuas boas obras!
Sim, fazei prosperar a bondade de teu coração."

Prece de Moisés, homem de **DEUS.**

RESUMO

Desde o advento dos primeiros satélites de Sensoriamento Remoto, vários são os estudos desenvolvidos com o intuito de utilizar as imagens produzidas por estes sensores para fins cartográficos. Apesar das imagens de baixa e média resolução não possuírem a precisão requerida para aplicações cartográficas em escalas grandes, existem vantagens como: serem imagens multiespectrais, possuírem periodicidade e menores custos para a sua aquisição, quando comparadas com as obtidas através dos tradicionais levantamentos aerofotogramétricos. Uma melhoria presente nos satélites de alta e média resolução é a capacidade de visada *off nadir*, o que permite à formação de pares estereoscópicos e a reconstrução 3D da cena imageada, a geração de modelos digitais de elevação (MDE) e a produção de imagens ortorretificadas, dentre outros produtos. Com os primeiros pares estereoscópicos adquiridos pelo sensor HR-CCD (*High Resolution Charge-Coupled Devices*) do CBERS-2 (2004), surgiu a possibilidade de realizar estudos objetivando a geração de produtos cartográficos a partir desses estereopares. Neste contexto, este trabalho avaliou a qualidade geométrica de um estereopar HR-CCD do CBERS-2 fazendo uso do modelo matemático DLT (Transformação Linear Direta) e do modelo *Polynomial Based - Pushbroom*, disponível no sistema fotogramétrico digital *Leica Photogrammetry Suite* (LPS) da *Leica Geosystems*, classificando-os de acordo com os Padrões de Exatidão Cartográfica (PEC). O procedimento proposto consiste em avaliar a ordem do polinômio que melhor se adapta a utilização deste estereopar no LPS e, utilizando os dois modelos matemáticos citados, avaliar estatisticamente a qualidade da triangulação gerada considerando-se diferentes quantidades de pontos de apoio. Outro teste realizado foi quanto aos resultados obtidos quando da utilização do MDE gerado pelo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) como um referencial altimétrico para pontos de passagem gerados de forma automática no LPS. Por fim, avaliou-se a qualidade de duas ortoimagens produzidas a partir do MDE gerado no LPS. As avaliações estatísticas mostram que, através dos métodos aplicados, as ortoimagens geradas a partir do MDE obtido pela aplicação do modelo polinomial atingem a exatidão geométrica das cartas 1:100.000 classe A.

PALAVRAS CHAVE: Pares estereoscópicos HR-CCD/CBERS-2, modelo digital de elevação, Fotogrametria Digital, sensor de varredura, modelo polinomial, Transformação Linear Direta.

ABSTRACT

Since the advent of the first Remote Sensing satellites, many studies have been developed with the intention of using the images produced by these sensors for cartographic purpose. Although these images of the average resolution do not possess the accuracy required for cartographic applications in big scales, their advantages include being multispectral, periodic repetition of acquisition, and lower cost when compared to images obtained through traditional aerial photogrammetric surveys. An improvement present in medium and high resolution satellites is their off nadir capacity, which allows 3D reconstruction based on stereoscopy, the generation of digital elevation models (DEM) and the production of orthorectified images, among others products. With the first stereoscopic pairs acquired by the CBERS-2 (2004) HR-CCD (High Resolution Charge-Coupled Device) sensor, the possibility now exists of realizing studies whose goal is generating cartographic products from these stereo pairs. Within this context, this work evaluated the geometric quality of a CBERS-2 HR-CCD stereo pair making use of the DLT (Direct Linear Transformation) mathematical model and Polynomial-Based Pushbroom model, available from the Leica Photogrammetry Suite (LPS) digital photogrammetry system by Leica Geosystems, classifying them in accordance with the Cartographic Accuracy Standards. The proposed methodology consists in evaluating the polynomial degree that best adapts to the usage of this stereo pair within LPS and, using the two stated mathematical models, in statistically evaluating the quality of triangulation generated based on varying quantities of control points. Another test conducted involved the results obtained by using the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM as an altimetric reference for points automatically generated in LPS. Finally, the quality of the two orthoimages produced from the DEM generated in LPS was evaluated. Statistical evaluations show that, through the applied methods, the orthoimages generated based on the DEM obtained by the application of the polynomial model reach the geometric accuracy of 1:100,000 class A maps.

KEY WORDS*: Stereopairs HR-CCD/CBERS-2, digital elevation model, Digital Photogrammetry, pushbroom sensor, polynomial model, Direct Linear Transformation.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Representação da varredura do sensor HR-CCD/CBERS-2	23
Figura 2 -	Configuração do SRTM no *Space Shuttle Endeavour* - detalhe para o mastro que permitiu a interferometria na mesma órbita	32
Figura 3 -	Condição de colinearidade para sensor de quadro e para sensor *pushbroom*	38
Figura 4 -	O efeito de pequenas mudanças nos parâmetros para sensor de quadro e sensor *pushbroom*	41
Figura 5 -	Localização da área de estudo e articulação dos ortomosaicos 1:25.000 do IBGE	57
Figura 6 -	Composições coloridas (RGB-342) do estereopar HR-CCD/CBERS-2. Imagens de 16/06/2004 (a) e 01/07/2004 (b)	58
Figura 7 -	Exemplo de ortomosaico (a) e MDE (b) do IBGE utilizados para obtenção das coordenadas X, Y e Z dos pontos de apoio e de verificação	59
Figura 8 -	Fluxograma das etapas do trabalho	61
Figura 9 -	Imagem da banda 2 (de 01/07/2004) sem correção de névoa e contraste (a) e após a correção (b)	64
Figura 10 -	Distribuição dos pontos de apoio e verificação sobre o estereopar HR-CCD/CBERS-2	66
Figura 11 -	Gráfico de tamanho de amostra para $\varepsilon = 33\%$	73
Figura 12 -	Comportamento do erro em E, N e H para 20 diferentes combinações de ordens dos polinômios	76
Figura 13 -	Comportamento do erro em E, N e H para 5 diferentes combinações de ordens dos polinômios	77
Figura 14 -	Distribuição dos pontos de apoio para os diferentes processamentos	78
Figura 15 -	Erro observado nos pontos de verificação na realização do experimento 1, para diferentes quantidades de pontos de apoio	80
Figura 16 -	Desvio padrão das coordenadas E, N e H na realização do experimento 1, para diferentes quantidades de pontos de apoio	81
Figura 17 -	Distribuição dos pontos de passagem sobre o estereopar HR-CCD/CBERS-2	83
Figura 18 -	Erro observado nos pontos de verificação na realização do experimento 2, para diferentes quantidades de pontos de apoio	84
Figura 19 -	Desvio padrão das coordenadas E, N e H na realização do experimento 2, para diferentes quantidades de pontos de apoio	85
Figura 20 -	Erro observado nos pontos de verificação na realização do experimento 3, para diferentes quantidades de pontos de apoio	87

Figura 21 - Desvio padrão das coordenadas E, N e H na realização do experimento 3, para diferentes quantidades de pontos de apoio 88

Figura 22 - Erro observado nos pontos de verificação na realização do experimento 4, para diferentes quantidades de pontos de apoio 90

Figura 23 - Desvio padrão das coordenadas E, N e H na realização do experimento 4, para diferentes quantidades de pontos de apoio 91

Figura 24 - Comportamento do erro médio quadrático em E, N e H para o modelo DLT e polinomial, considerando diferentes quantidades de pontos de apoio 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-	Características da câmara HR-CCD do satélite CBERS-2	22
Tabela 2	-	Discrepâncias encontradas nos testes de precisão do SRTM 90 x 90m	33
Tabela 3	-	Valores do Padrão de Exatidão Cartográfica	49
Tabela 4	-	Coordenadas dos *pixels* das imagens e valores de ND encontrados	63
Tabela 5	-	Informações do levantamento aerofotogramétrico 1:35.000	68
Tabela 6	-	Informações sobre o sensor HR-CCD/CBERS-2	69
Tabela 7	-	Valores dos desvios padrões adotados	70
Tabela 8	-	Parâmetros do sensor	71
Tabela 9	-	Tamanho de amostra - Carta de escala 1:100.000. Erros (ε) de 10%	73
Tabela 10	-	Valores de erro padrão para classificação de carta na escala 1:100.000	79
Tabela 11	-	Resultados das análises estatísticas dos dados gerados no experimento 1	82
Tabela 12	-	Resultados das análises estatísticas dos dados gerados no experimento 2	86
Tabela 13	-	Resultados das análises estatísticas dos dados gerados, ao incorporar as informações do SRTM	89
Tabela 14	-	Resultados das análises estatísticas dos dados gerados no experimento 4 – PEC cartas 1:100.000	92
Tabela 15	-	Resultados das análises estatísticas dos dados gerados no experimento 4 – PEC cartas 1:250.000	93
Tabela 16	-	Discrepâncias dos pontos de verificação medidos nas ortoimagens	96
Tabela 17	-	Resultados das análises estatísticas realizadas nas ortoimagens	97

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 12

1.1 Considerações Iniciais 12

1.3 Justificativa 15

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 17

2.1 Sensoriamento Remoto 17

2.2 Programa CBERS 20

2.3 Processamentos em Imagens Digitais 26

2.4 Fotogrametria Digital 29

2.5 Modelos Digitais de Representação da Superfície 30

2.5.1 *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) 32

2.6 Modelos Matemáticos Aplicados a Sensores Orbitais 34

2.6.1 Modelo de Colinearidade Modificado 37

2.6.2 Transformação Linear Direta (DLT) 42

2.7 Ortoimagens 46

2.8 Controle de Qualidade de Produtos Cartográficos 47

2.8.1 Análise de Tendência e Precisão 49

2.8.2 Tamanho da Amostra 53

3 MATERIAIS E MÉTODOS 56

3.1 Considerações Iniciais 56

3.2 Área de Estudo 56

3.3 Materiais 58

3.4 Método 60

3.4.1 Pré-processamento das Imagens HR-CCD/CBERS-2 61

3.4.2 Planejamento, Preparação dos Dados e Obtenção dos Pontos de Apoio e de Verificação 64

3.4.3 Avaliação do tamanho da amostra 72

4 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES 75

4.1 Considerações Iniciais 75

4.2 Experimento 1 – Triangulação com modelo matemático polinomial e sem a utilização de pontos de passagem 79
4.3 Experimento 2 – Triangulação com modelo matemático polinomial e utilizando pontos de passagem 83
4.4 Experimento 3 – Triangulação com modelo matemático polinomial e as informações altimétricas do SRTM 86
4.5 Experimento 4 – Triangulação com modelo matemático DLT 89
4.6 Geração de ortoimagens no LPS e controle de qualidade 95

5 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES 98

ANEXO I 106

1 INTRODUÇÃO e OBJETIVOS

1.1 Considerações Iniciais

Com os avanços das pesquisas no campo das ciências espaciais e objetivando o uso de sensores orbitais para coleta remota de informações da superfície terrestre, foram colocados em órbita, a partir de 1970, vários satélites de Sensoriamento Remoto. As imagens produzidas por estes sensores orbitais têm se mostrado como uma fonte de informação econômica e eficaz para o planejamento e monitoramento dos recursos naturais e do meio ambiente.

Desde o lançamento do sensor orbital ERTS-1 (*Earth Resources Tecnology Satellite 1*), em 1972 (LILLESAND e KIEFER, 2000), vários outros satélites de Sensoriamento Remoto foram lançados, possuindo características das mais variadas e sempre objetivando atender a uma demanda de novas aplicações e necessidades da comunidade científica. Com isso, inúmeros estudos foram desenvolvidos com o intuito de utilizar as imagens produzidas por esses sensores para fins cartográficos.

Atualmente, os satélites de Sensoriamento Remoto disponibilizam imagens com elemento de resolução de 20m, 10m, ou ainda menores, como, por exemplo, os satélites Ikonos, QuickBird, Alos, etc. Esses satélites geram imagens com periodicidade e custos menores do que os obtidos através dos tradicionais levantamentos aerofotogramétricos, tendo como fator limitante aplicações cartográficas em escalas grandes, pois essas imagens não possuem a resolução espacial necessária para algumas aplicações. Outro avanço considerável foi a introdução, nesses sistemas sensores, da visada fora do nadir (*off nadir*), o que tornou possível a obtenção de pares estereoscópicos, permitindo assim a reconstrução 3D da cena imageada. Imagens assim obtidas há tempos vêm motivando discussões, gerando estudos e propiciando aplicações destas para obtenção de informação altimétrica da superfície terrestre.

Alguns satélites comerciais mais estudados já se destacam por sua capacidade em obter imagens estereoscópicas, podendo-se citar os sensores norte-americanos ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), a bordo da plataforma EOS-TERRA) e Ikonos II, da empresa *Space Imaging*, o japonês ALOS-2 (*Advanced Land-Observing Satellite*) e o francês SPOT (*Système Pour l'Observacion de la Terre*) (ZANARDI, 2006).

O que se percebe é que o Sensoriamento Remoto por satélites orbitais tem evoluído no sentido de tornar-se uma importante fonte de informações da superfície terrestre para estudos de características topográficas, tais como a elevação do terreno (TOUTIN, 2004).

Satélites de alta e média resolução, com capacidade de obter imagens em estereoscopia têm permitido a geração de uma série de produtos como, por exemplo, modelos digitais de elevação (MDE) e imagens ortorretificadas. Diversos trabalhos foram realizados utilizando estereopares obtidos por sensores remotos orbitais, como descritos em Hirano et al. (2003), Silva et al. (2003), Toutin (2004), Ewiak e Kaczyński (2004), dentre outros.

Não alheio a esta evolução tecnológica e no anseio de adquirir conhecimento, obter tecnologia para construção de satélites imageadores orbitais e produzir imagens para monitorar o seu vasto território, o Brasil e a China, através de um acordo de parceria, construíram e lançaram, até a data deste trabalho, três satélites de observação da Terra. Este programa é intitulado Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (*China-Brazil Earth Resources Satellite*), mais conhecido pela sigla CBERS. Apenas em 2004, já com o segundo satélite em órbita, é que o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) veio a adquirir os primeiros pares estereoscópicos do sensor HR-CCD (*High Resolution Charge-Coupled Devices*) do CBERS-2 (MARANHÃO e RAIVEL, 2005). O programa CBERS vem gerando bons resultados e permitiu ao Brasil ingressar no grupo de países detentores de tecnologia de Sensoriamento Remoto orbital, adquirindo assim autonomia na aquisição de imagens de média resolução. Atualmente se encontra em órbita o CBERS-2B e está em franco desenvolvimento a construção do CBERS-3 e CBERS-4, com lançamentos previstos para 2009 e 2011, respectivamente. O grande destaque para estes novos satélites é a melhoria da resolução espacial da câmara HR-CCD, que é de 2,7m para o CBERS-2B e 5m para os CBERS-3 e CBERS-4 (EPIPHANIO, 2005 e INPE, 2007).

Vários modelos matemáticos têm sido propostos para extrair informações 3D a partir de estereopares obtidos de sensores remotos que utilizam imageadores do tipo *pushbroom*, modelos estes que diferem em complexidade, rigor e precisão. Os sensores do tipo *pushbroom* são formados por uma única linha de células fotodetectoras o que permite a geração de uma imagem por varredura, ao longo da trajetória da plataforma. Conseqüentemente, cada linha da imagem é tomada de uma posição (X_{CP},Y_{CP},Z_{CP}) e atitude (κ,φ,ω) diferente. Muitos dos sistemas fotogramétricos digitais já dispõem de soluções, ou vêm aprimorando aplicativos, que permitem o processamento destas imagens orbitais nos quais os mesmos conceitos e os modelos clássicos da Fotogrametria, alguns deles com algumas adaptações, são utilizados, sendo que as principais abordagens incluem modelos como: modelos de polinômios racionais,

Transformação Linear Direta (DLT) e Equação de Projeção Paralela (*Affine Projection Model*). A partir da utilização desses modelos tenta-se descrever a geometria de obtenção da imagem para sensores do tipo *pushbroom*, incorporando-lhes parâmetros para modelagem de erros e orientação interior, trajetória da órbita ou dados de efemérides, quando estas são conhecidas.

Os pares estereoscópicos produzidos pelo sensor HR-CCD do CBERS-2 aparecem como alternativa para a geração de produtos cartográficos a partir de observações no modo estéreo, graças a sua capacidade de apontamento lateral. Apesar disso, existem poucos estudos envolvendo medições utilizando estereopares CBERS, devido, em grande parte, a dificuldades técnicas de obtenção de pares estereoscópicos pelo seu sistema de imageamento. Esta dificuldade se deve a uma falha no sistema de apontamento lateral do espelho, que ocasionava sobrecarga nas baterias do satélite, o que resultou em uma única aquisição de dados em estereoscopia que ainda foi muito prejudicada por uma excessiva cobertura de nuvens e problemas de turbulência (ZANARDI, 2006 e INPE, 2007).

Entre as pesquisas utilizando esse mesmo estereopar CBERS está o trabalho de Maranhão e Raivel (2005) que, processando as imagens no sistema fotogramétrico digital *Leica Photogrammetry Suite* (LPS), destaca a melhoria da interpretação das imagens devido à possibilidade de visão tridimensional. Em outro trabalho, Zanardi (2006) realizou um estudo quantitativo de um MDE gerado a partir de dados altimétricos extraídos do par estereoscópico HR-CCD/CBERS-2, utilizando o software LPS.

As estações fotogramétricas digitais são sistemas com grande capacidade de armazenamento de dados e com recursos modernos de visualização estereoscópica e aplicativos para geração automática de MDE e ortoimagens, possuindo em muitos casos customizações específicas para o processamento de imagens de sensores orbitais *pushbroom*. Estas estações, antes utilizadas apenas para o formato padrão de fotos aéreas, podem ser utilizadas também para imagens obtidas através de sensores orbitais, mostrando-se como uma alternativa viável para a manipulação e processamento de imagens do sensor CBERS.

Este trabalho pretende, utilizando um estereopar HR-CCD/CBERS-2 e dois diferentes modelos matemáticos, realizar estudos e efetuar avaliações geométricas dos dados planialtimétricos gerados classificando-os quanto à sua exatidão, de acordo com as Normas Técnicas da Cartografia Nacional. O objeto deste estudo é extrair informações 3D do estereopar HR-CCD/CBERS-2 utilizando-se técnicas fotogramétricas digitais e inferir através de análises estatísticas sobre as possíveis aplicações dos estereopares gerados por esse sensor orbital na geração de produtos cartográficos.

1.2 Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo principal avaliar a qualidade geométrica de um MDE e de uma ortoimagem obtidos a partir de um par estereoscópico HR-CCD/CBERS-2 fazendo uso de dois modelos matemáticos: o modelo matemático DLT, implementado em linguagem C, e o modelo *Polynomial Based - Pushbroom*, disponível no sistema fotogramétrico digital LPS.

Neste contexto, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- avaliar a ordem do polinômio que melhor se adapta a utilização desse estereopar no sistema fotogramétrico digital LPS;
- utilizando o *Polynomial Based – Pushbroom* e a DLT, efetuar avaliações geométricas dos dados planialtimétricos gerados, classificando-os de acordo com o PEC;
- considerando quantidade e distribuição dos pontos de apoio na cena, avaliar o resultado da triangulação gerada;
- avaliar a influência do uso de informações do MDE da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), obtido através dos dados oriundos do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), nos produtos gerados; e
- fazer a geração de ortoimagens no LPS e avaliar a sua qualidade geométrica.

1.3 Justificativa

O processo de geração de informação tridimensional do terreno tem como finalidade a representação da superfície topográfica. Uma maneira de se obter dados que possam representar essas superfícies, e que dispense levantamentos de campo, é através das imagens estereoscópicas da área de interesse. Com a característica técnica de obter visadas *off nadir*, o CBERS-2 gerou os primeiros pares estereoscópicos, possibilitando o processamento em estações fotogramétricas digitais. As estações fotogramétricas digitais possuem aplicativos que facilitam a geração automática de MDE e ortoimagens, grande eficiência e agilidade para a realização de restituição de feições devido a sua capacidade de visualização estereoscópica da cena, possuem ainda programas específicos para realização das etapas de orientação interior e exterior das imagens, fototriangulação, entre outros.

Entre as vantagens advindas da utilização de imagens orbitais para geração de produtos cartográficos está a redundância de informações oriunda das várias bandas espectrais, freqüente disponibilização de dados adquiridos de forma sistemática, a baixos custos e em formato digital, que as tornam uma ótima fonte de informação para o monitoramento e mapeamento cartográfico de grandes áreas (MEDEIROS, 2007).

Devido ao fato do CBERS-2 ser um satélite relativamente novo, estudos sobre modelos matemáticos e a utilização de técnicas fotogramétricas digitais, para o caso específico de imagens HR-CCD/CBERS-2, podem contribuir com o desenvolvimento do projeto CBERS e fomentar a utilização dessas imagens para geração de produtos cartográficos (de escalas médias) atualizados do território brasileiro.

Por fim, considerando-se os vários trabalhos já desenvolvidos sobre utilização de sensores orbitais do tipo *pushbroom* para mapeamento cartográfico, desenvolver uma pesquisa para o uso de imagens CBERS valoriza um produto vindo de tecnologia brasileira.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sensoriamento Remoto

"Sensoriamento Remoto é a ciência e arte de obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno, pela análise dos dados adquiridos por um dispositivo que não entra em contato direto com este objeto, área, ou fenômeno investigado" (LILLESAND e KIEFER, 2000). Esses dispositivos são os sistemas sensores que, segundo Novo (1992), podem ser definidos como qualquer equipamento capaz de transformar alguma forma de energia em um sinal passível de ser convertido em informação sobre o ambiente, sendo essa energia, para o caso específico do Sensoriamento Remoto, a radiação eletromagnética.

O desenvolvimento da tecnologia do Sensoriamento Remoto orbital facilitou a aquisição de dados e informações da superfície terrestre, que antes podiam ser obtidos por levantamentos aerofotogramétricos ou por observações e medições locais diretas, o que era demorado e oneroso. Os modernos sensores orbitais se mostram como uma solução para os casos onde se requer maior resolução temporal, radiométrica e espectral.

Entre todas as formas de energia existente, a que tem maior importância para o Sensoriamento Remoto é a radiação eletromagnética, cuja fonte principal é o Sol. A radiação emitida por este astro trafega no espaço sob forma de um fluxo, cuja intensidade varia com o comprimento de onda (λ). Ao se propagar pelo espaço a radiação eletromagnética pode interagir com a matéria, sendo por essa absorvida, refletida ou transmitida (LILLESAND e KIEFER, 2000). Portanto, à medida que a radiação eletromagnética se propaga pela atmosfera terrestre, sofre atenuações causadas por absorção, reflexão e espalhamento por parte dos constituintes atmosféricos, partículas dispersas e nuvens. Estas atenuações fazem com que a radiação que chega a superfície terrestre seja reduzida.

Existem regiões do espectro eletromagnético para os quais a atmosfera absorve grande parte da energia eletromagnética incidente, dificultando a chegada dessa energia na superfície terrestre. Nessas regiões a atmosfera tem um comportamento opaco através dos seus constituintes, sendo os principais o vapor d'água, oxigênio, gás carbônico e ozônio. As regiões do espectro eletromagnético onde a atmosfera quase não afeta a energia eletromagnética são conhecidas como janelas atmosféricas e, ao contrário das bandas de absorção, são regiões onde a atmosfera se comporta de forma transparente, permitindo desta

forma que a radiação eletromagnética se propague através de seus vários comprimentos de onda, com pouca ou quase nenhuma interferência (LILLESAND e KIEFER, 2000). Portanto, os sistemas sensores passivos devem sempre operar nas regiões conhecidas por janelas atmosféricas.

Nas técnicas de Sensoriamento Remoto por sistemas passivos, a faixa do espectro mais utilizada estende-se do ultravioleta até o infravermelho. A radiação natural forma um espectro contínuo, que contém comprimentos de ondas de milésimos de nanômetros até dezenas de quilômetros. A região do espectro que compreende as radiações do ultravioleta, visível e infravermelho, é denominada de Espectro Óptico. O ultravioleta está compreendido entre 0,1μm até 0,38μm. A banda espectral do visível representa um pequeno intervalo entre 0,38μm e 0,72μm, seguida pelo infravermelho, que chega até 1000μm (STEFFEN et al., 1996).

Para extrair informações, a partir de dados de Sensoriamento Remoto, é fundamental o conhecimento do comportamento espectral dos objetos da superfície terrestre e dos fatores que interferem nesse comportamento. A qualidade e a quantidade da radiação refletida pelos objetos terrestres resultam das modificações que o fluxo de radiação solar experimenta ao interagir com os mesmos. Essas alterações são provocadas pelas diferentes propriedades físico-químicas dos objetos e determinam a sua aparência nas imagens dos sensores remotos (NOVO, 1992). Assim, é possível distinguir espectralmente alvos como vegetação, solo e água. De acordo com Steffen et al. (1996), os objetos terrestres também podem emitir radiação eletromagnética cuja quantidade e qualidade dependerá da natureza e da temperatura dos mesmos.

Para realizar o registro da radiação eletromagnética proveniente dos objetos, faz-se necessário a utilização de um sistema sensor. Esses sistemas são constituídos, de forma geral, por um coletor (lente, espelho ou antena), um sistema de registro (detector), que pode ser um filme ou, mais modernamente, um arranjo de fotodetectores, um processador e memória para armazenamento (MOREIRA, 2003).

Quanto ao princípio de funcionamento, os sensores são agrupados em duas categorias: não-varredura (*non scanning*) e de varredura (*scanning*). Os sensores de não-varredura ou de quadro registram a radiação refletida de uma área da superfície terrestre em sua totalidade, num mesmo instante. Nos sistemas de varredura, a imagem da cena é formada pela aquisição seqüencial de uma linha a cada instante (sensores *pushbroom*) ou pela aquisição seqüencial de um *pixel* (*picture element*) a cada instante (sensores de varredura pontual, ou *whiskbroom*)

(WOLF e DEWITT, 2000 e MOREIRA, 2003). O satélite CBERS é um exemplo de sensor *pushbroom*.

2.2 Programa CBERS

Em 6 de julho de 1988 o Brasil e a China, através do INPE e da *Chinese Academy of Space Technology* (CAST), assinam um acordo de parceria para o desenvolvimento de dois satélites avançados de Sensoriamento Remoto, surgindo assim o Programa CBERS. Esse programa conjunto, que nasceu de uma parceria técnico-científica no setor espacial, combina os recursos financeiros e de especialistas dos dois países.

O programa contemplou, num primeiro momento, a construção de dois satélites, CBERS-1 e CBERS-2. O CBERS-1 foi o primeiro satélite desenvolvido sendo lançado em 14 de outubro de 1999 e ficando em órbita durante três anos e dez meses, até o dia 13 de agosto de 2003. Ele ultrapassou em muito sua expectativa de vida operacional de dois anos. Com o sucesso do CBERS-1, ambos os governos decidiram expandir o acordo e incluir dois outros satélites da mesma categoria, os satélites CBERS-3 e 4. Atualmente está em operação o CBERS-2 que, apesar de vários problemas apresentados e de ultrapassar o tempo formal de dois anos previsto para a sua vida útil, continua produzindo imagens. Como o CBERS-3 está planejado para ser lançado apenas em 2009 e objetivando evitar uma eventual falta de dados entre o fim do CBERS-2 e o lançamento do CBERS-3, outro acordo foi assinado para a construção do CBERS-2B, que já se encontra em órbita e está em fase de comissionamento (INPE, 2007).

Os satélites CBERS dispõem de um sistema de controle de atitude e de um conjunto de propulsores a hidrazina (combustível para foguetes) que também auxiliam nas eventuais manobras de correção da órbita nominal do satélite. Sua plataforma é estabilizada em três eixos, numa órbita síncrona com o Sol, com uma inclinação de 98,504º em relação aos pólos terrestres. Essa inclinação permite sincronizar o movimento do satélite com a rotação da Terra e assim compensar o deslocamento relativo da projeção do satélite sobre a superfície terrestre. Nesta órbita, o satélite passa aproximadamente à mesma hora (solar) acima de qualquer ponto no planeta garantido as mesmas condições de iluminação solar, o que auxilia a comparação de imagens tomadas em dias diferentes. O CBERS-2 está a uma altura de 778km e completa 14 revoluções na Terra por dia. O satélite demora 26 dias para retornar ao mesmo ponto de cobertura da Terra, sendo este o tempo necessário para que a mesma área do terreno seja imageada pelas câmaras do satélite (INPE, 2007).

O satélite CBERS-2 é composto de dois módulos que acomodam os sistemas ópticos e eletrônicos, usados para observação da Terra e coleta de dados. O módulo "carga útil" acomoda as câmaras HR-CCD, IRMSS (*Infrared Multispectral Scanner*) e WFI (*Wide Field*

Imager). O módulo "serviço" contém os equipamentos que asseguram o suprimento de energia, os controles, as telecomunicações e demais funções necessárias à operação do satélite (EPIPHANIO, 2005).

A câmara IRMSS é um sensor de varredura com quatro bandas espectrais: duas no infravermelho de ondas curtas e uma pancromática, com resolução espacial de 80m, e uma na região do infravermelho termal, com resolução espacial de 156m. Esta câmara demora 26 dias para ter imagens de todo o globo terrestre, possuindo um campo de visada de 120km. A câmara WFI é um sistema de varredura com duas bandas espectrais de resolução espacial de 258m e uma largura de faixa imageada de 890km. Esta câmara pode imagear uma mesma área do terreno em um intervalo de tempo de 5 dias. A câmara HR-CCD é um dos principais instrumentos a bordo do satélite CBERS-2. Ela é utilizada para adquirir cenas da superfície terrestre a partir do modo de varredura do tipo *pushbroom* e opera em 5 faixas espectrais. O sensor HR-CCD adquire simultaneamente imagens nas bandas espectrais do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, além da banda pancromática. A resolução espacial de cada banda é de 19,5m, o que equivale a mais ou menos 6000 *pixels* por banda (EPIPHANIO, 2005 e INPE, 2007).

Segundo Maranhão e Raivel (2005), ao satélite CBERS-2 foi adicionada uma nova capacidade técnica não existente no CBERS-1, que foi a possibilidade de sua câmara HR-CCD obter visadas *off nadir* que, tomadas de pontos de vista diferentes, permitem a formação de pares estereoscópicos. Exceto pela incorporação desta capacidade em obter visadas laterais, o satélite CBERS-2 é tecnicamente idêntico ao CBERS-1. Com a possibilidade de obter pares estereoscópicos, a HR-CCD torna-se um importante instrumento para fins de extração de feições para a representação tridimensional do terreno.

TABELA 1: Características da câmara HR-CCD do satélite CBERS-2.

Características da Câmara HR-CCD	
Bandas espectrais	0,45 - 0,52µm – azul
	0,52 - 0,59µm – verde
	0,63 - 0,69µm – vermelho
	0,77 - 0,89µm – infravermelho próximo
	0,51 - 0,73µm – pan
Campo de Visada	8,32º
Inclinação	98,504º
Elemento de resolução espacial	19,5 x 19,5m
Largura da faixa imageada	113km
Altura da órbita	778km
Capacidade de apontamento do espelho	±32º
Resolução temporal	26 dias (visada vertical); 3 dias (visada lateral.)
Freqüência da portadora de RF	8103 e 8321MHz
Taxa de dados da imagem	2 x 53Mbits/s; tempo de gravação de 15min.

(Fonte: INPE, 2007)

A câmara HR-CCD possui uma distância focal de 520mm e a capacidade técnica de orientar seu campo de visada em ±32º em relação à trajetória regular do satélite. Possui esta característica graças à existência de um espelho móvel, cuja função é permitir aquisição de pares estereoscópicos, bastante úteis para extração de informação altimétrica ou para monitorar desastres ou emergências, como inundações, por exemplo (EPIPHANIO, 2005).

As imagens formadas pelo sensor HR-CCD do satélite CBERS diferem das tradicionais imagens de quadro, que geram uma imagem instantânea do terreno. O sensor HR-CCD é formado por fotodetectores organizados em um arranjo linear, o que permite a geração de uma imagem por varredura. Isto é realizado sem qualquer outro movimento mecânico, exceto o movimento do satélite. O sensor opera através de visada vertical e em uma direção fixa, imageando linhas sucessivas de uma cena abaixo dele, construindo uma imagem bidimensional enquanto o satélite se move. Em termos gerais este tipo de sensor consiste de um sistema óptico que projeta uma imagem sobre o arranjo linear de sensores. Em um dado instante, apenas alguns pontos são imageados no plano definido pelo centro perspectivo e a linha que contem o sensor (Figura 1).

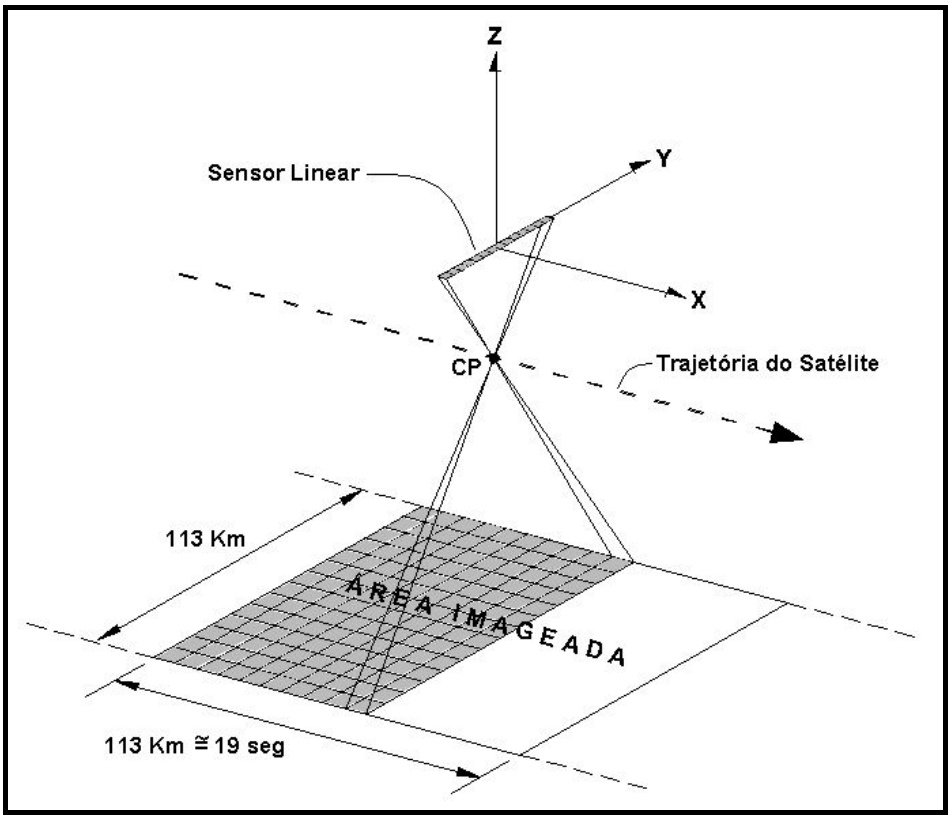


FIGURA 1 - Representação da varredura do sensor HR-CCD/CBERS-2
(Fonte: Adaptado de WOLF e DEWITT, 2000)

Em uma configuração *pushbroom* o sensor linear é orientado perpendicularmente a trajetória da plataforma móvel. Esses fotodetectores captam a energia refletida e a quantificam como uma imagem. A configuração mais comum é a que utiliza sensores de estado sólido organizados em uma única linha, tendo em vista que estes arranjos lineares são mais fáceis de serem construídos do que os de arranjo matricial. Esta geometria é usada em câmaras de reconhecimento e em muitos sensores orbitais (Mikhail et al., 2001). Os tipos mais comuns de detectores de estado solido atualmente são o *charge-coupled device* (CCD) e o *complementary metal–oxide–semiconductor* (CMOS), sendo o CCD utilizado no satélite CBERS.

As imagens obtidas por sensores *pushbroom* são afetadas por diferentes fatores, como por exemplo: órbita do satélite, variações de atitude e altitude, variações de velocidade da plataforma, e geometria de sensor. Nesses sensores não há uma geometria do tipo perspectiva central única, como numa imagem de quadro (ou *frame*) e a cena formada é uma combinação das imagens obtidas em diferentes posições do centro perspectivo e com diferentes parâmetros de atitude.

Modelar uma câmara orbital *pushbroom* é uma tarefa complexa, e devem ser levados em conta vários fatores, como distorção do sistema óptico, instabilidade da plataforma, distância focal calibrada, além do fato de a aquisição da imagem por varredura linear (*pushbroom*) não ser instantânea. Como nos sensores *pushbroom* as imagens não são instantâneas, cada linha da imagem é tomada de uma posição e atitude diferente, ao contrário da imagem de quadro, que possui um único conjunto de parâmetros de orientação exterior (três rotações e três coordenadas do centro perspectivo) para cada imagem. No caso do sensor *pushbroom* existem seis incógnitas para cada linha que compõe a imagem, que são determinadas diretamente durante a coleta das imagens, usando sensores de orientação direta como GPS, giroscópios, sensores solares e rastreadores estelares. A qualidade destes dados, entretanto, não é compatível com a resolução da imagem, que pode ser de 1 metro, como as imagens Ikonos, por exemplo. Uma alternativa é usar apoio de campo para melhorar a qualidade dos dados de orientação (MEDEIROS, 2007).

O uso de feições lineares como apoio de campo para a orientação de imagens CBERS é uma técnica que vem sendo estudada. Em trabalhos recentes, Scalco (2006) e Medeiros (2007) utilizaram feições lineares como estradas, limites de propriedades, entre outras feições presentes na cena para determinar os parâmetros de orientação exterior e realizar a correção geométrica de imagens CBERS.

Um modelo matemático tenta reproduzir a realidade física do sensor no momento em que a imagem é capturada. Este modelo deve ser capaz de relacionar coordenadas do espaço objeto (3D) com coordenadas do espaço imagem (2D). Vários modelos matemáticos foram propostos para esta finalidade, como se pode ver em Orun e Natarajan (1994), Mitishita e Saraiva (2002), Ok e Turker (2004), Scalco (2006), Medeiros (2007), entre outros.

Os modelos físicos são baseados na geometria interna e externa do sensor, bem como outros fenômenos físicos como velocidade da plataforma, tempo de integração de detecção do sinal, e etc. Como já mencionado anteriormente, para sensores *pushbroom*, como por exemplo o sensor HR-CCD/CBERS-2, cada linha que forma a imagem foi tomada em um instante diferente, durante o movimento da plataforma em sua órbita. Conseqüentemente, os parâmetros necessários para que se realize a orientação exterior (três ângulos de atitude e três coordenadas do centro perspectivo) mudam a cada linha imageada. De modo geral, a rigidez geométrica de imagens *pushbroom* linear é fraca, visto que cada linha é uma imagem independente e tem sua própria posição e orientação devido ao movimento da plataforma. No entanto os parâmetros de orientação interior, que são a distância focal da câmara, as

coordenadas do ponto principal e os coeficientes de distorção são os mesmos para todas as linhas imageadas (TOMMASELLI, 2006).

Para as imagens CBERS, que são disponibilizadas gratuitamente, correções geométricas e radiométricas são realizadas. Para as correções geométricas são usados dados de efemérides e atitude, mas como esses dados possuem baixa precisão, devido à qualidade dos sensores embarcados, essas imagens apresentam erros posicionais acentuados (INPE, 2007).

O modelo fotogramétrico, assim chamado devido à semelhança com o modelo de equações de colinearidade usado em fototriangulação, tem sido utilizado pelo INPE para geração de imagens, obtidas por sensores orbitais, com correção de sistema. A correção geométrica de sistema efetuada nas imagens usa a posição, a velocidade e a atitude do satélite, bem como parâmetros específicos de cada câmara, para definir uma direção de visada num certo instante. Com a posição do satélite e a direção de visada determinam-se as coordenadas de um ponto sobre a superfície do elipsóide de referência adotado. Fica então estabelecida uma relação entre coordenadas do espaço imagem com coordenadas do espaço objeto. (D'ALGE, 1997). Essa correção é realizada sem a utilização de pontos de apoio, e as imagens CBERS assim corrigidas, podem apresentar um erro de posicionamento de até 15km (INPE, 2007).

De acordo com Costa et al. (2007) e Medeiros (2007), o INPE aplica atualmente quatro níveis de correção nas imagens adquiridas pelo satélite CBERS, sendo eles classificados em:

- Nível 0: imagem bruta, recebida diretamente pela estação de recepção no INPE e sem tratamento de espécie alguma, armazenada juntamente com os dados de calibração radiométrica e os parâmetros orbitais (atitude e efemérides), entre outros. Nesta imagem há a fusão das sub-imagens obtidas pelos sensores lineares, e o ordenamento das linhas;
- Nível 1: é a imagem Nível 0 com correção radiométrica. O cabeçalho do arquivo contém informações geográficas básicas, tais como coordenadas geodésicas dos cantos e do centro da cena;
- Nível 2: é a imagem Nível 0 com correção radiométrica e correção geométrica de sistema, usando os dados de efemérides. Esta correção não é precisa, tendo em vista que os sensores embarcados são giroscópios, sensor solar e sensor de horizonte, e estes não apresentam a precisão requerida para a realização dessa correção.

- Nível 3: imagem com correções radiométrica e geométrica, refinada pelo uso de pontos de apoio. Os pontos de apoio podem ser obtidos automaticamente de uma base de dados ou selecionados por um operador.

Para os próximos satélites, o INPE pretende incorporar a geração de imagens ortorretificadas, e estas serão denominadas de Nível 4 de processamento.

2.3 Processamentos em Imagens Digitais

Entende-se por processamento de imagens digitais as técnicas de manipulação e interpretação de imagens digitais com a ajuda de um computador, com a finalidade de modificar ou melhorar a qualidade dessas, facilitando assim o poder de discriminação dos objetos presentes na cena e a sua análise (LILLESAND e KIEFER, 2000).

Segundo Gonzalez e Woods (2000), imagem digital pode ser definida como uma função discreta e bidimensional da intensidade da luz f(x,y), onde x e y denotam as coordenadas espaciais e o valor da função f em qualquer ponto (x,y) é proporcional ao brilho ou nível de cinza da imagem naquele ponto. Desta forma, uma imagem digital pode ser entendida como uma matriz, onde cada célula que compõe esta matriz é chamada de *pixel*. O sistema de coordenadas de uma imagem digital é um sistema plano-retangular com origem no canto superior esquerdo, sendo o eixo x coincidente com a primeira linha e o eixo y coincidente com a primeira coluna, formando um sistema levógiro. Neste sistema, a contagem das linhas é crescente para baixo e a das colunas é crescente para a direita.

Para aquisição de uma imagem digital, segundo Gonzalez e Woods (2000), são necessários:

- um dispositivo físico que seja sensível a uma faixa do espectro de energia eletromagnética, capaz de produzir um sinal elétrico de saída proporcional a intensidade de luminosidade incidente na sua matriz de fotodetectores; e
- um dispositivo para a conversão desse sinal elétrico, produzido pelo sistema sensor, para a forma digital.

Nesse processo de formação das imagens digitais, cada *pixel* da imagem representa a quantidade de energia eletromagnética proveniente de uma porção correspondente da superfície imageada, na qual possui características fundamentais como resolução geométrica e

resolução radiométrica. A resolução geométrica (ou elemento de resolução) refere-se ao tamanho que um *pixel* representa no terreno, e a resolução radiométrica, que é uma função do nível de quantização e da resolução espectral (intervalo de comprimento de onda do espectro eletromagnético que o sensor é capaz de distinguir), refere-se ao número inteiro de valores que são utilizados para converter a amplitude da energia eletromagnética original em sinal digital (WOLF e DEWITT, 2000).

A idéia central do processamento de uma imagem digital é de fácil entendimento. Os *pixels* de uma imagem digital são manipulados através de processos computacionais que inserem estes dados em uma equação, ou séries de equações, e então armazena os resultados computados para cada *pixel*. Estes resultados formam uma imagem digital nova que pode ser exibida ou pode ser registrada em formato pictórico ou que ainda pode ser novamente manipulada através de outros procedimentos computacionais (LILLESAND e KIEFER, 2000). Para o caso do sensoriamento remoto orbital o processamento digital de imagens visa à melhoria do aspecto visual das feições de interesse, facilitando a interpretação, quer seja por visão humana ou por processos computacionais de extração automática de informação.

Segundo Lillesand e Kiefer (2000), as formas possíveis de manipulação da imagem digital são literalmente infinitas. Entretanto, de um modo geral, estes procedimentos podem ser categorizados em um, ou mais, dos quatro seguintes tipos de operações computacionais:

- Retificação e Restauração de Imagens: são operações realizadas com o objetivo de corrigir as distorções e degradações dos dados de uma imagem, com a finalidade de criar uma representação mais fiel da cena. Essa etapa envolve tipicamente o processamento inicial dos dados brutos da imagem, sendo realizados procedimentos de correções referentes às distorções geométricas e radiométricas da cena;
- Realce de Imagens: estes procedimentos são aplicados aos dados de uma imagem com o objetivo de melhorar efetivamente a visualização da cena, para subseqüentes interpretações visuais ou digitais. Normalmente, o realce de imagens envolve técnicas de contraste, filtragem e operações aritméticas, que aumentam a distinção visual entre os alvos presentes na cena;
- Classificação de imagens: esta operação tem a finalidade de substituir a interpretação visual de imagens por técnicas quantitativas de análise automática, visando à identificação das feições presentes na cena;

– Fusão de Dados (*data merging*): este é um procedimento usado para agrupar dados oriundos de fontes de informação diferentes, referentes a uma mesma área geográfica, integrando níveis de informações diferentes com o objetivo de gerar uma imagem que reúna as melhores características espectrais e espaciais dos conjuntos utilizados.

A calibração radiométrica de um sensor tem por finalidade estabelecer as relações entre os números digitais das imagens geradas por esse sensor e os valores da radiância dos objetos imageados. Ela visa minimizar as perturbações causadas por fatores como atenuações atmosféricas e características ópticas e eletrônicas do sensor.

Imagens geradas por sensores remotos orbitais podem possuir distorções na formação da cena, de uma linha para outra. Essas distorções geométricas, que geram falta de concatenação entre as linhas imageadas, são causadas pela velocidade de rotação da Terra, variações na velocidade do satélite, alterações da atitude da plataforma, etc.

Outro problema que pode ser encontrado no processo de formação de uma imagem digital, ocasionado por falhas nos fotodetectores ou devido a deficiências do sistema eletrônico do sensor, é o surgimento de ruídos. Ruídos podem aparecer distribuídos pela cena como *pixels* isolados ou linhas (horizontais ou verticais) com níveis de cinza bem diferentes da sua vizinhança, podendo estar distribuídos aleatoriamente ou de forma sistemática.

O realce de imagens digitais diz respeito a procedimentos aplicados com o intuito de modificar os valores dos *pixels* da imagem, melhorando a sua qualidade visual. Portanto, um novo valor de brilho para um dado *pixel* será gerado a partir de seu valor original na imagem, com o objetivo de aumentar a discriminação visual entre os objetos presentes na cena. A partir dessa modificação, teremos uma nova distribuição para as intensidades dos níveis de cinza que nela ocorrem. A imagem ideal para análise visual é aquela onde os níveis de cinza encontram-se bem distribuídos no histograma, ou seja, razoavelmente espalhadas ao longo de todo o intervalo máximo e mínimo do gráfico. A técnica de equalização de histogramas consiste em alterar o histograma da imagem original de tal forma que a imagem modificada tenha um histograma mais uniforme.

Entre os fatores que influenciam o contraste das imagens adquiridas por sensores orbitais estão às condições atmosféricas, má iluminação da cena, características de resposta de instrumento, geometria de visada ou devido às próprias características da cena (LILLESAND e KIEFER, 2000).

Uma característica observada nas imagens a serem utilizadas neste experimento é a aparência desfocada, sendo esse um obstáculo ao processo de interpretação das feições existentes na cena. Através de técnicas de processamento digital, como as descritas, pode-se diminuir a degradação inserida quando do processo de geração das imagens, realçando as feições a serem interpretadas.

2.4 Fotogrametria Digital

De acordo com as suas origens, Fotogrametria significa "medir graficamente usando luz", e é definida pela *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* como: "Arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre os objetos físicos, e do meio ambiente, através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos".

Segundo Andrade (2003), os avanços tecnológicos na área da Fotogrametria e das demais ciências cartográficas, como Geodésia, Topografia e Cartografia, proporcionaram a automação de algumas tarefas e a otimização de procedimentos, pois processos que antes dependiam de instrumentos para serem feitos analogicamente, agora podem ser feitos de forma analítica ou digital. Dentro deste contexto, a Fotogrametria digital utiliza imagens digitais para obtenção e representação das informações cartográficas.

Entende-se por Fotogrametria Digital a área da Fotogrametria que, utilizando-se de imagens digitais, armazenadas em meio magnético e na forma de *pixels*, trata dos aspectos geométricos do uso dessas imagens, com a finalidade de obter valores precisos de comprimentos, alturas e formas dos objetos físicos (Silva, 1999). Como o próprio nome indica, a Fotogrametria Digital utiliza imagens digitais em vez de fotografias analógicas e esta é a principal distinção entre ela e a Fotogrametria Analógica e Analítica, e quase todas as outras diferenças são uma conseqüência desta.

Conforme Schenk (1999), enquanto a Fotogrametria Digital tem sua origem na década de 50, a maior parte das atividades de pesquisa somente se inicia a partir dos anos 80, impulsionadas pelos significativos avanços alcançados pelas áreas da eletrônica e da informática, como por exemplo, o aparecimento de câmaras digitais e o aumento da capacidade de processamento e armazenamento de dados dos computadores. Um progresso considerável tem sido atingido durante os últimos anos, conforme se percebe pelos atuais

equipamentos e softwares fotogramétricos disponíveis em escala comercial, como as estações fotogramétricas digitais e programas computacionais de geração de produtos cartográficos.

Enquanto os princípios básicos da matemática e da Fotogrametria permanecem inalterados, as implementações e aplicações destinadas à produção cartográfica estão em constante evolução. Este fato torna-se evidente com o surgimento das estações fotogramétricas digitais (MIKHAIL et al., 2001).

Dowman et al. (1992) define um sistema fotogramétrico digital como um conjunto de hardware e softwares destinados à obtenção de produtos fotogramétricos a partir de imagens digitais usando técnicas manuais e automáticas. São ambientes de trabalho voltados inteiramente para a Fotogrametria Digital, com computadores de grande capacidade de processamento e armazenamento de dados além de recursos adicionais, como por exemplo, dispositivos de visão estereoscópica, cursores 3D, placas gráficas, programas específicos para orientação interior e exterior de imagens, fototriangulação, geração de modelos digitais de elevação e ortorretificação de imagens, restituição de feições, entre outros.

Para *International Systemap Corp.* (I.S.M., 1997) os sistemas fotogramétricos digitais não possuem dispositivos mecânicos, e processos antes analógicos, tornam-se totalmente digitais. Estas estações são compostas por modernos dispositivos como o *trackball* e óculos especiais que, através de técnicas como cintilamento e polarização da luz, fazem com que se alterne a visão para cada olho do operador, permitindo a visualização tridimensional do modelo.

2.5 Modelos Digitais de Representação da Superfície

O termo Modelo Numérico de Elevação (MNE) é um termo genérico e se refere a qualquer representação numérica de elevação de superfície, servindo tanto para designar à representação 3D de um objeto qualquer como para a representação tridimensional de uma superfície topográfica. Percebe-se na literatura cartográfica que não existe uma padronização de nomenclatura quanto a este tema.

As pesquisas iniciais na área de modelos numéricos de representação de terreno datam da década de 50 e são creditadas a dois engenheiros americanos, Miller e LaFlamme, do *Massachussets Institute of Technology*, que definiram MDT (ou *Digital Terrain Model*) como uma representação estatística da superfície contínua do terreno por um extenso número de pontos selecionados com coordenadas (X, Y, Z) conhecidas em um sistema de coordenadas

arbitrário (MILLER e LaFLAMME[1], 1958 apud EL-SHEIMY, 1999). Desde então diversos outros termos surgiram para descrever os modelos numéricos de representação da superfície.

El-Sheimy (1999) define MDT considerando outros elementos, que não somente elevação e altura, mais também outras feições, tais como as linhas de talvegue de um rio, etc. No senso comum, um MDT representa o relevo do terreno é contem dados planimétricos e de elevação do terreno. Além disso, a partir do MDT pode-se obter dados derivados do terreno, tais como declividade, visibilidade, entre outros. Para este mesmo autor, o termo elevação, em Modelo Digital de Elevação (MDE) (ou *Digital Elevation Model*), enfatiza a medida da altura acima do datum e a altitude absoluta ou elevação dos pontos no modelo.

Andrade (2003) considera que modelar um terreno significa reproduzir a sua forma. Quando esta reprodução é realizada por meios digitais, diz-se que se fez um MDT, sendo esta sigla usada quando se refere à superfície topográfica. Quando se trata da superfície visível, diz-se MDE.

Mikhail et al. (2001) definem MDE como uma representação discreta da superfície contínua da Terra, que é representada digitalmente por um conjunto de pontos com suas respectivas alturas. A fidelidade com que à superfície da Terra pode ser representada é determinada pelo espaçamento horizontal e pela precisão vertical, na determinação das medidas de altitudes, dos pontos que compõem o MDE. Galo (2006) adota as seguintes definições:

- Modelo Digital de Superfície (MDS) (ou *Digital Surface Model*): é o conjunto de pontos, de elevação, que representam uma porção da superfície terrestre, incluindo as feições como árvores e as antrópicas, como edificações, rodovias, etc.
- MDT: se refere à representação da superfície física, sem as feições antrópicas (edificações, rodovias, etc), árvores, etc.

Pelas definições apresentadas percebe-se que, de uma forma geral, não existe entre os autores uma padronização quanto às definições para os diferentes termos utilizados para designar os modelos digitais de representação da superfície terrestre. Nota-se que o termo MDE é mais genérico, e que MDT é utilizado para o caso onde a representação se refere apenas à superfície topográfica do terreno. A nomenclatura MDS é utilizada quando as elevações dos objetos presentes na cena são também representadas no modelo.

[1] MILLER, C.; LaFLAMME, R. A. The digital terrain modeling – theory and applications. **Photogrammetric Engineering**, v.24, p. 433-442.

No desenvolvimento deste trabalho adotou-se a nomenclatura MDE para designar os modelos numéricos de representação da superfície, tendo em vista que os dados analisados e gerados conterão, além da altitude dos pontos na superfície do terreno, as altitudes de outros objetos de superfície presentes na cena, tais como árvores e edificações.

2.5.1 *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM)

A *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi o resultado de um projeto cooperativo entre a NASA, a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) e agências espaciais da Alemanha (*Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* - DLR) e da Itália (*Agenzia Spaziale Italiana* - ASI). Esta missão foi realizada durante os dias 11 e 22 de fevereiro de 2000, visando gerar um modelo digital de elevação quase-global para as regiões compreendidas entre as latitudes 60ºN e 56ºS. Os dados foram obtidos através da utilização de um radar de abertura sintética, o *Spaceborne Imaging Radar-C* (SIR-C), a bordo do *Space Shuttle Endeavour*, numa altitude de vôo de 233 km e com uma inclinação de 57º, adquirindo dados de cerca de 80% da superfície terrestre nas bandas C e X, fazendo uso da técnica de interferometria. A missão obteve dados topográficos (de elevação) de uma grande parte da superfície terrestre usando interferometria de "passagem única", isto é, pares de imagens foram adquiridos ao mesmo tempo usando duas antenas de radar fisicamente separadas por um mastro de 60m metros de comprimento, criando assim uma linha de referência fixa. A interferometria é uma técnica que compara duas imagens de radar tomadas de pontos ligeiramente diferentes para obter elevação ou informação de mudanças na superfície (CRUZ et al., 2005, JPL, 2006 e FARR et al., 2007).

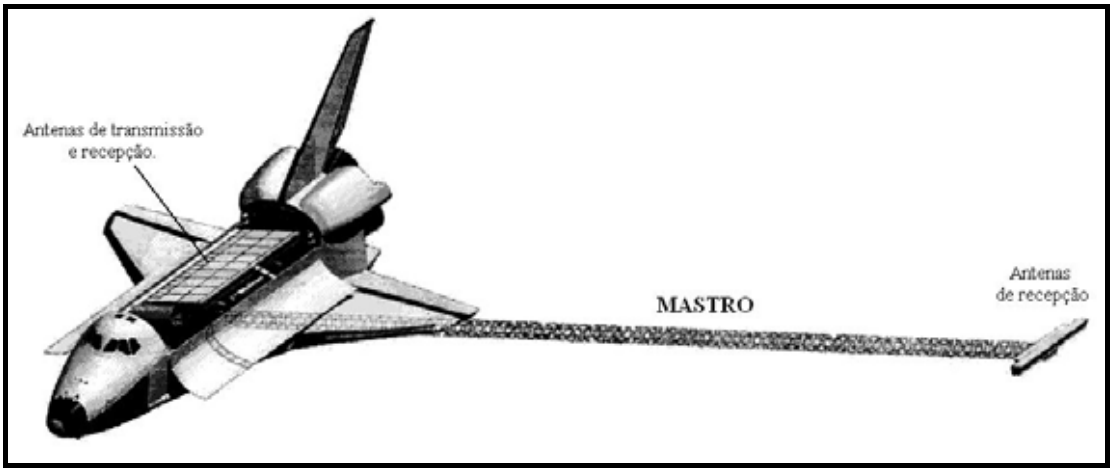


FIGURA 2 - Configuração do SRTM no *Space Shuttle Endeavour* - detalhe para o mastro que permitiu a interferometria na mesma órbita (Fonte: JPL, 2006).

Para coleta dos dados a missão SRTM colocou em órbita, a bordo do compartimento de carga da nave espacial *Endeavour*, um equipamento SAR (*Synthetic Aperture Radar*) interferométrico operando nas bandas C e X. Uma haste mecânica presa a nave e que se estendia para fora deste compartimento contava com duas antenas de recepção (uma na banda C e outra na banda X) presas a sua extremidade (Figura 2). Esta configuração possibilitou a aquisição dos dados em uma mesma órbita. Os dados foram adquiridos com resolução de 1 arco de segundo, ou aproximadamente 30 por 30 metros no terreno, e 3 arcos de segundo, com resolução de 90 por 90 metros, quando da passagem pelo equador. O MDE relativo à banda C, que possui resolução de 90m, está sendo distribuído gratuitamente pela NASA para as regiões da América do Sul e do Norte. Os dados relativos à banda X estão sendo processados e distribuídos pelo DLR – Centro Aeroespacial Alemão (JPL, 2006).

Segundo Rodríguez et al. (2006), como parte do projeto SRTM, uma campanha global foi administrada pela NASA/JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) para obter dados que pudessem permitir a validação global do MDE gerado pelo SRTM. As exigências de desempenho esperadas para o MDE gerado eram de que:

- o erro linear vertical absoluto da altitude seja menor que 16m para 90% dos dados;
- o erro linear vertical relativo da altitude seja menor que 10m para 90% dos dados;
- o erro circular posicional absoluto seja menor que 20m para 90% dos dados;
- o erro circular posicional relativo seja menor que 15m para 90% dos dados.

A Tabela 2 mostra o resumo da comparação dos dados obtidos para validação do MDE gerado pelo SRTM. Todos os valores representam 90% dos erros. Percebe-se que o MDE gerado pelo SRTM obteve valores bem abaixo dos esperados.

TABELA 2: Discrepâncias encontradas nos testes de precisão do SRTM 90 x 90m.

TIPOS DE ERRO	Ásia	Austrália	América do Norte	América do Sul
erro posicional absoluto	11,9 m	7,2 m	12,6 m	9,0 m
erro absoluto da altitude	5,6 m	6,0 m	9,0 m	6,2 m
erro relativo da altitude	9,8 m	4,7 m	7,0 m	5,5 m

(Fonte: Rodríguez et al., 2006)

Outros trabalhos também indicam que podem ser atingidas precisões melhores do que as estimadas antes do inicio da missão, como por exemplo, em Heipke et al. (2002), que estima em até 6 metros o erro vertical. Para atingir tais metas, os dados devem ser

processados a fim de se eliminar imperfeições do sistema, tais como valores espúrios próximos ao litoral e alguns vazios no continente, referentes a áreas de sombra do sinal.

Os MDE's do SRTM estão sendo disponibilizados via ftp em arquivos com extensão htg compactados. Cada arquivo htg cobre uma área de 1º por 1º no terreno e são identificados pelas informações das coordenadas geográficas (latitude e longitude) do canto inferior esquerdo (ex: S23W043). Esta coordenada identifica o último ponto da grade no canto inferior esquerdo que, no caso de dados para a América do Sul, estão distanciados de aproximadamente 90 metros em extensão. Cada arquivo possui 1201 linhas e 1201 colunas, possuindo uma linha e uma coluna de sobreposição com os arquivos correspondentes as áreas adjacentes. O sistema de projeção é geográfico e as altitudes são representadas em metros e referenciadas ao *Datum* WGS84 EGM96 (CRUZ et al., 2005 e FARR et al., 2007).

O *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) da NASA, na Califórnia, é o responsável pela pesquisa de qualidade dos dados produzidos, a NGA promove processamentos adicionais para gerar produtos de mapeamento e o *United States Geological Survey* (USGS) provê o arquivamento final e a distribuição dos dados do SRTM.

O emprego destes dados como fonte de informação altimétrica pode vir a suprir as necessidades decorrentes da desatualização ou mesmo ausência de cartografia em muitas regiões do Brasil, devido à carência de cartas do mapeamento sistemático.

2.6 Modelos Matemáticos Aplicados a Sensores Orbitais

A orientação de imagens é um problema clássico em Fotogrametria, onde as operações de recuperação da posição das imagens em relação à câmara (orientação interna) e da posição e atitude dessas segundo um referencial no espaço objeto (orientação externa) são essenciais à reconstrução (ou restituição) de uma superfície de interesse (Andrade, 2003), sendo a geração de MDE's usando estereopares uma de suas várias aplicações. Orientada as imagens e formado o modelo estereoscópico, a determinação das coordenadas de um ponto no espaço objeto (X,Y,Z) pode ser conseguida a partir da obtenção das coordenadas deste ponto (x,y) em pelo menos duas imagens (WOLF e DEWITT, 2000), o que pressupõe o conhecimento de um modelo matemático que relaciona os pontos do espaço imagem com os seus homólogos no espaço objeto e permitira a reconstrução da geometria 3D da região imageada.

Diversos modelos matemáticos têm sido estudados com a finalidade de extrair informações planialtimétricas a partir de imagens obtidas por sensores remotos que utilizam

imageadores de varredura linear. Segundo Baltsavias et al. (2001), modelos matemáticos têm sido desenvolvidos usando o conhecimento de informações do sensor e modificando equações de colinearidade, em alguns casos incluindo parâmetros para modelagem de erros e orientação interior ou calibração em órbita ou ainda, incorporando informações orbitais. Modelos como *Affine Projection Model*, *Rational Function Model*, entre outros, são muito pesquisados, conforme se pode verificar em Fritsch e Stallmann (2000), Yang (2000), Mitishita e Saraiva (2002), Mitishita et al. (2003), Boccardo et al. (2004) e Poli (2004), sendo em alguns casos empregada a equação de colinearidade (ou modificações dessa), que é um dos principais modelos matemáticos utilizados em Fotogrametria. A equação de colinearidade é deduzida com base na condição que três pontos pertencem a uma mesma linha, sendo essa o raio que parte do centro de projeção da câmara, passando por um determinado ponto no espaço imagem e encontrando seu homólogo no espaço objeto, ou seja, um ponto P(X,Y,Z), no espaço objeto, o seu correspondente p(x,y), no espaço imagem, e a estação de exposição (centro perspectivo) são colineares.

O modelo matemático de colinearidade é dado por (LUGNANI, 1987):

$$x = -f \frac{r_{11}(X - X_{CP}) + r_{12}(Y - Y_{CP}) + r_{13}(Z - Z_{CP})}{r_{31}(X - X_{CP}) + r_{32}(Y - Y_{CP}) + r_{33}(Z - Z_{CP})}$$

$$y = -f \frac{r_{21}(X - X_{CP}) + r_{22}(Y - Y_{CP}) + r_{23}(Z - Z_{CP})}{r_{31}(X - X_{CP}) + r_{32}(Y - Y_{CP}) + r_{33}(Z - Z_{CP})} \quad (1)$$

onde:

r_{ij}: elementos da matriz de rotação (R), em função dos ângulos de orientação do sensor (ω , φ, κ);

x, y: coordenadas de pontos no referencial da imagem;

X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}: coordenadas do centro perspectivo, no referencial de terreno;

X, Y, Z: coordenadas de pontos no referencial de terreno; e

f: distância focal.

A matriz de rotação R é o produto de três matrizes de rotação, e pode ser escrita por:

$$R = R(\kappa) * R(\varphi) * R(\omega) \quad (2)$$

sendo que:

$$R(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos k & -\text{sen}k & 0 \\ \text{sen}k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\text{sen}\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix}; R(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\text{sen}\omega \\ 0 & \text{sen}\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

portanto:

$$R = \begin{bmatrix} \cos k.\cos\varphi & \text{sen}k.\cos\omega + \cos k.\text{sen}\varphi.\text{sen}\omega & \text{sen}k.\text{sen}\omega - \cos k.\text{sen}\varphi.\cos\omega \\ -\text{sen}k.\cos\omega & \cos k.\cos\omega - \text{sen}k.\text{sen}\varphi.\text{sen}\omega & \cos k.\text{sen}\omega + \text{sen}k.\text{sen}\varphi.\cos\omega \\ \text{sen}\varphi & -\cos\varphi.\text{sen}\omega & \cos\varphi.\cos\omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

sendo:

ω: rotação em torno do eixo X;

φ: rotação em torno do eixo Y;

κ: rotação em torno do eixo Z.

Os modelos matemáticos que fazem uso dos parâmetros de orientação interior e exterior do sensor são conhecidos como modelos matemáticos rigorosos, pois são modelos baseados nas equações de colinearidade. Segundo Mitishita et al. (2003), para a aplicação desses modelos matemáticos rigorosos, faz-se necessário o conhecimento dos dados de calibração do sensor, informações da órbita do satélite e atitude do sensor. Como esses dados encontram-se, na maioria das vezes, indisponíveis ou são de difícil obtenção para a maioria dos satélites imageadores disponíveis no mercado, torna-se necessário o desenvolvimento de modelos matemáticos aproximados, empregados na transformação entre referenciais da imagem e do terreno, que melhorem a exatidão posicional da imagem.

Modelos geométricos são necessários para estabelecer a relação funcional entre espaços imagem e objeto. Os modelos podem ser físicos ou generalizados (HU et al., 2004). Nos modelos físicos, cada parâmetro tem um significado físico e tem relação com a posição e a orientação do sensor com relação a um sistema de coordenadas do terreno. Nos modelos generalizados, a transformação entre os espaços imagem e objeto é representada como uma

função geral como, por exemplo, um polinômio. Em geral, por não precisarem de conhecimento da geometria do sensor, os modelos generalizados podem ser aplicados a diferentes tipos de sensores (HUINCA, et al., 2005).

Nas imagens de satélite CBERS os parâmetros geométricos da órbita e atitude do satélite são disponibilizados via arquivo xml, encaminhados junto com as imagens.

Far-se-á agora um breve estudo sobre os dois modelos que serão utilizados neste trabalho para a realização dos experimentos.

2.6.1 Modelo de Colinearidade Modificado

Para o caso das tradicionais câmaras de quadro, onde a cena inteira é tomada por uma única exposição, somente um conjunto de parâmetros de orientação (X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}, ω, φ, κ) é necessário para cada cena. Já para os sensores *pushbroom* cada linha imageada vai possuir um centro perspectivo e ângulos de rotação. Assim, para utilizar as equações de colinearidade é necessário realizar algumas modificações (YANG, 2000).

Os sensores do tipo *pushbroom* são formados por um conjunto de fotodetectores organizados em uma única linha e permitem a geração de uma imagem por varredura. As imagens dos sensores *pushbroom* não são instantâneas, cada linha da imagem é tomada de uma posição e orientação diferente, ao contrário da imagem *frame*, que possui uma única posição e orientação. Portanto, nas imagens *frame*, para cada cena existem 6 parâmetros de orientação exterior e para as imagens formadas por sensores *pushbroom*, existem 6 parâmetros para cada linha imageada (TOMMASELLI, 2006).

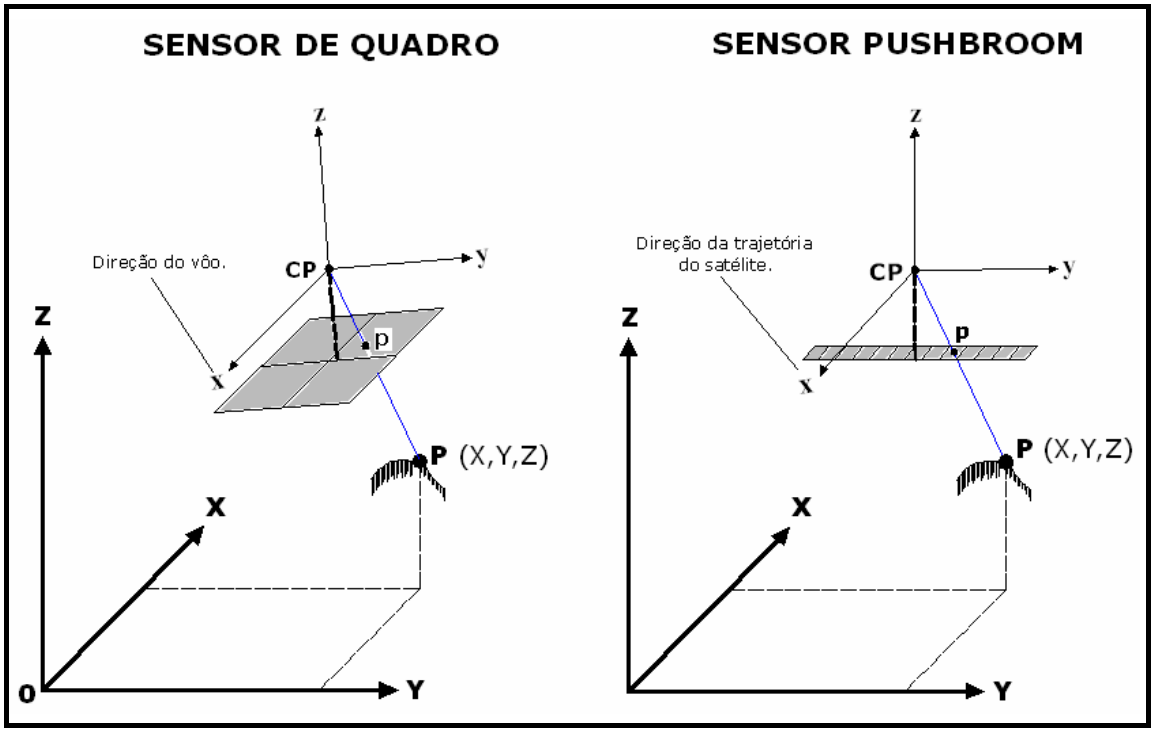


FIGURA 3 - Condição de colinearidade para sensor de quadro e para sensor *pushbroom* (Fonte: GALO, 2006).

Com isto, Orun e Natarajan (1994) propuseram o seguinte modelo de orientação, baseado nas equações de colinearidade:

$$x(t) = 0 = -f \quad \frac{r_{11}^t\left(X - X_{CP}^t\right) + r_{12}^t\left(Y - Y_{CP}^t\right) + r_{13}^t\left(Z - Z_{CP}^t\right)}{r_{31}^t\left(X - X_{CP}^t\right) + r_{32}^t\left(Y - Y_{CP}^t\right) + r_{33}^t\left(Z - Z_{CP}^t\right)}$$

$$y(t) = -f \quad \frac{r_{21}^t\left(X - X_{CP}^t\right) + r_{22}^t\left(Y - Y_{CP}^t\right) + r_{23}^t\left(Z - Z_{CP}^t\right)}{r_{31}^t\left(X - X_{CP}^t\right) + r_{32}^t\left(Y - Y_{CP}^t\right) + r_{33}^t\left(Z - Z_{CP}^t\right)} \tag{5}$$

onde:

r_{ij}^t: elementos da matriz de rotação (R), função de ω^t, φ^t, κ^t;

x(t), y(t): coordenadas de pontos no referencial da imagem;

X_{CP}^t, Y_{CP}^t, Z_{CP}^t: coordenadas do centro perspectivo, no referencial de terreno;

X, Y, Z: coordenadas de pontos no referencial de terreno; e

f: distância focal;

t é um dado instante de tempo.

Assumindo que cada linha da imagem tem seu próprio centro perspectivo e orientação e que a origem do referencial da imagem seja no centro da linha, e adotando que o eixo x é na

direção de deslocamento do sensor e o eixo y é perpendicular a direção de deslocamento do sensor, a coordenada x(t) na Equação 5 pode ser negligenciada, e definida como zero.

Conforme Galo (2006), considerando-se que num determinado instante inicial (t_0) os parâmetros de orientação exterior sejam $X_{CP}^{t_0}$, $Y_{CP}^{t_0}$, $Z_{CP}^{t_0}$, ω^{t_0}, φ^{t_0}, κ^{t_0}, e assumindo que estes parâmetros variam no tempo de acordo com um polinômio de ordem n, a posição num instante genérico t pode ser dada por:

$$\begin{aligned}
X_{CP}(t) &= X_{CP}^{t_0} + a_1(t-t_0) + a_2(t-t_0)^2 + ... + a_n(t-t_0)^n \\
Y_{CP}(t) &= Y_{CP}^{t_0} + b_1(t-t_0) + b_2(t-t_0)^2 + ... + b_n(t-t_0)^n \\
Z_{CP}(t) &= Z_{CP}^{t_0} + c_1(t-t_0) + c_2(t-t_0)^2 + ... + c_n(t-t_0)^n \\
\omega(t) &= \omega^{t_0} + d_1(t-t_0) + d_2(t-t_0)^2 + ... + d_n(t-t_0)^n \\
\varphi(t) &= \varphi^{t_0} + e_1(t-t_0) + e_2(t-t_0)^2 + ... + e_n(t-t_0)^n \\
\kappa(t) &= \kappa^{t_0} + f_1(t-t_0) + f_2(t-t_0)^2 + ... + f_n(t-t_0)^n,
\end{aligned} \tag{6}$$

onde a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i são coeficientes que podem ser determinados por um ajustamento envolvendo os pontos de apoio e os pontos correspondentes medidos sobre as imagens.

É natural que, dependendo da ordem do polinômio, a função terá um comportamento diferente (linear, quadrático, cúbico, etc) e dependendo da ordem escolhida deve-se ter mais ou menos pontos de apoio para fazer o ajustamento. Além disso, pode-se ter também uma ordem diferente para cada uma das equações que determinam X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}, ω, φ, κ. Este tipo de análise pode ser feito a partir da observação do comportamento do satélite no tempo, como, por exemplo, informações da órbita (Galo, 2006).

De acordo com Wolf e Dewitt (2000), a depender do comportamento do satélite em sua órbita, é recomendado que seja utilizado um polinômio de menor ordem, sendo uma aproximação, exceto para a coordenada Z, que deve ser modelada por um polinômio de segunda ordem. As equações são apresentadas a seguir:

$$\begin{aligned}
X_{CP}(t) &= X_{CP}^{t_0} + a_1(t-t_0) \\
Y_{CP}(t) &= Y_{CP}^{t_0} + b_1(t-t_0) \\
Z_{CP}(t) &= Z_{CP}^{t_0} + c_1(t-t_0) + c_2(t-t_0)^2 \\
\omega(t) &= \omega^{t_0} + d_1(t-t_0) \\
\varphi(t) &= \varphi^{t_0} + e_1(t-t_0) \\
\kappa(t) &= \kappa^{t_0} + f_1(t-t_0)
\end{aligned} \tag{7}$$

onde:

a_1, b_1,..., f_1: coeficientes que descrevem a variação dos parâmetros de orientação da imagem;

$X_{CP}(t)$, $Y_{CP}(t)$, $Z_{CP}(t)$, $\omega(t)$, $\varphi(t)$, $\kappa(t)$: parâmetros de orientação exterior do sensor no momento (t) em que a linha i é imageada;

$X_{CP}^{t_0}$, $Y_{CP}^{t_0}$, $Z_{CP}^{t_0}$, ω^{t_0}, φ^{t_0}, κ^{t_0}: parâmetros de orientação exterior do sensor no momento inicial (t_0);

t é um dado instante de tempo.

Segundo Ok e Turker (2004), a melhor formulação para sensores *pushbroom*, e que são mais extensamente usados, é obtida através de polinômios de ordem 2 nos parâmetros de orientação exterior:

$$\begin{aligned}
X_{CP}(t) &= X_{CP}^{t_0} + a_1(t-t_0) + a_2(t-t_0)^2 \\
Y_{CP}(t) &= Y_{CP}^{t_0} + b_1(t-t_0) + b_2(t-t_0)^2 \\
Z_{CP}(t) &= Z_{CP}^{t_0} + c_1(t-t_0) + c_2(t-t_0)^2 \\
\omega(t) &= \omega^{t_0} + d_1(t-t_0) + d_2(t-t_0)^2 \\
\varphi(t) &= \varphi^{t_0} + e_1(t-t_0) + e_2(t-t_0)^2 \\
\kappa(t) &= \kappa^{t_0} + f_1(t-t_0) + f_2(t-t_0)^2
\end{aligned} \tag{8}$$

Conforme se observa nos 18 coeficientes apresentados na Equação 8, um conjunto específico de coeficientes pode ser determinado como incógnitas e resolvidos através de um processo de ajustamento. Para o caso de sensores do tipo *pushbroom*, ao contrário dos sensores de quadro, essas equações contendo 18 incógnitas não fornecem um conjunto consistente de parâmetros devido ao fato de certos parâmetros serem altamente correlacionados entre si (Figura 4), conduzindo a uma solução muito instável (ORUN e NATARAJAN, 1994). Esse problema foi discutido e resolvido por Orun e Natarajan (1994), que determinaram que qualquer variação em φ e ω são absorvidas por X e Y, não causando efeito para a solução final, no caso de sensores lineares. Como conseqüência, há uma redução dos 18 parâmetros a serem determinados, no modelo original, para apenas 12 parâmetros (OK e TURKER, 2004).

Pela Figura 4 percebem-se os diferentes efeitos causados em sensores de quadro e em sensores lineares quando são variados os parâmetros de orientação exterior do sensor.

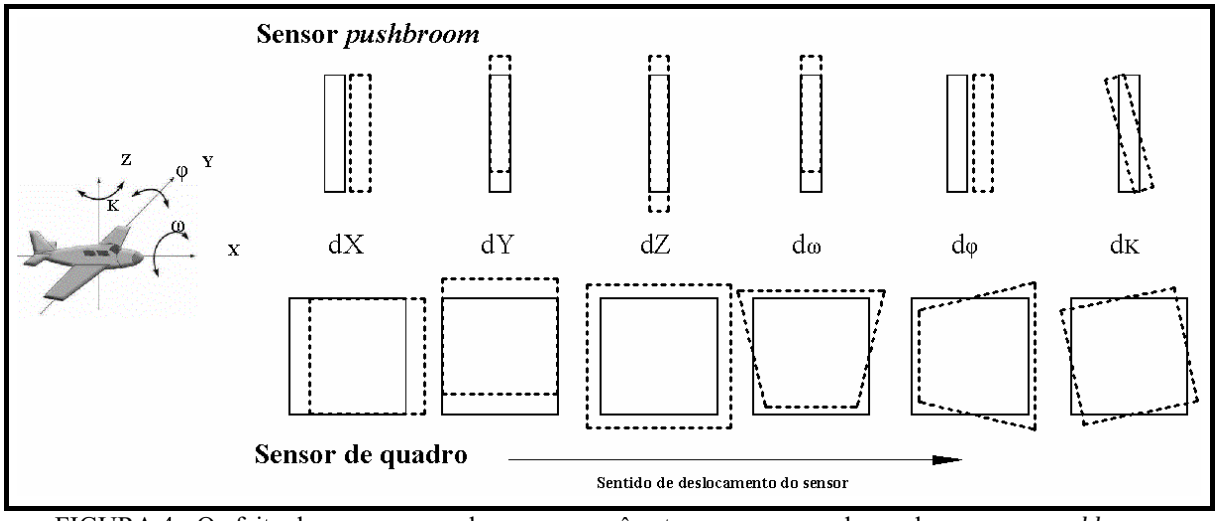


FIGURA 4 - O efeito de pequenas mudanças nos parâmetros para sensor de quadro e sensor *pushbroom* (Fonte: ORUN e NATARAJAN, 1994).

Observa-se que uma pequena mudança em ω possui o mesmo efeito que uma pequena mudança em Y, e que pequenas mudanças em φ não são muito diferentes de pequenas mudanças em X. Portanto, existe uma alta correlação entre ω e Y e entre φ e X, tornando-se então evidente a necessidade de se eliminar ω ou Y e φ ou X do conjunto de parâmetros e, assim, obter as equações com 12 parâmetros incógnitos para cada imagem (OK e TURKER, 2004; MEDEIROS, 2007). Ao contrário do sensor de quadro, essa solução instável reflete a natureza unidimensional de um vetor linear. Com esta solução, as equações ficam reduzidas a:

$$\begin{aligned} X_{CP}(t) &= X_{CP}^{t_0} + a_1(t-t_0) + a_2(t-t_0)^2 \\ Y_{CP}(t) &= Y_{CP}^{t_0} + b_1(t-t_0) + b_2(t-t_0)^2 \\ Z_{CP}(t) &= Z_{CP}^{t_0} + c_1(t-t_0) + c_2(t-t_0)^2 \\ \kappa(t) &= \kappa^{t_0} + f_1(t-t_0) + f_2(t-t_0)^2 \end{aligned} \tag{9}$$

Para as aplicações a serem realizadas no sistema LPS da *Leica Geosystems*, será usado um modelo matemático implementado no software, cuja categoria é o *Generic Pushbroom*, com um modelo, para o sensor, denominado de *Polynomial Based – Pushbroom*. Nesse modelo, polinômios são utilizados para determinar a trajetória do satélite.

O LPS permite que os parâmetros de orientação exterior sejam modelados por polinômios que variam de ordem 1 até 5 para as coordenadas X, Y e Z do sensor, no referencial do espaço objeto, e por polinômios que variam de ordem 0 até 3 para os ângulos de orientação (ω, φ, κ). Uma destas combinações formará a função polinomial mais adequada para a triangulação do par estéreo HR-CCD do CBERS-2.

Como já mencionado a ordem dos polinômios depende do comportamento de X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}, ω, φ e κ, durante a aquisição das imagens. Este comportamento pode ser obtido a partir da análise dos arquivos xml que acompanha as imagens (do CBERS), levando em conta tanto o comportamento quanto a correlação existente entre alguns dos parâmetros, conforme discutido anteriormente.

2.6.2 Transformação Linear Direta (DLT)

A equação da DLT foi introduzida por Y. I. Abdel–Aziz e H. M. Karara em 1971, e foi inicialmente empregada com o intuito de relacionar diretamente o espaço objeto e o espaço imagem, dispensando a necessidade de se conhecer os parâmetros de orientação interior (KARARA, 1980), o que é útil para a utilização em câmaras não métricas e para imagens obtidas a partir de sensores orbitais.

Uma forma de se deduzir as equações da DLT é a partir das equações de colinearidade. Galo (2006) apresenta uma demonstração de como obter as equações da DLT a partir do modelo das equações de colinearidade (Equação 1) na forma direta. Nesta demonstração são acrescentados às equações de colinearidade os termos referentes aos erros sistemáticos (Δx,Δy), ficando então a equação escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} x + \Delta x &= -f \cdot \frac{r_{11}(X - X_{CP}) + r_{12}(Y - Y_{CP}) + r_{13}(Z - Z_{CP})}{r_{31}(X - X_{CP}) + r_{32}(Y - Y_{CP}) + r_{33}(Z - Z_{CP})} \\ y + \Delta y &= -f \cdot \frac{r_{21}(X - X_{CP}) + r_{22}(Y - Y_{CP}) + r_{23}(Z - Z_{CP})}{r_{31}(X - X_{CP}) + r_{32}(Y - Y_{CP}) + r_{33}(Z - Z_{CP})} \end{aligned} \tag{10}$$

Multiplicando todos os termos do numerador por -f obtém-se:

$$\begin{aligned} x + \Delta x &= \frac{-fr_{11}(X - X_{CP}) - fr_{12}(Y - Y_{CP}) - fr_{13}(Z - Z_{CP})}{r_{31}(X - X_{CP}) + r_{32}(Y - Y_{CP}) + r_{33}(Z - Z_{CP})} \\ y + \Delta y &= \frac{-fr_{21}(X - X_{CP}) - fr_{22}(Y - Y_{CP}) - fr_{23}(Z - Z_{CP})}{r_{31}(X - X_{CP}) + r_{32}(Y - Y_{CP}) + r_{33}(Z - Z_{CP})} \end{aligned} \tag{11}$$

Expandindo o numerador e o denominador e isolando os termos que dependem de X, Y e Z dos demais:

$$x + \Delta x = \frac{-fr_{11}X - fr_{12}Y - fr_{13}Z + (fr_{11}X_{CP} + fr_{12}Y_{CP} + fr_{13}Z_{CP})}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z - (r_{31}X_{CP} + r_{32}Y_{CP} + r_{33}Z_{CP})}$$

$$y + \Delta y = \frac{-fr_{21}X - fr_{22}Y - fr_{23}Z + (fr_{21}X_{CP} + fr_{22}Y_{CP} + fr_{23}Z_{CP})}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Zr_{31} - (r_{31}X_{CP} + r_{32}Y_{CP} + r_{33}Z_{CP})} \quad (12)$$

Fazendo a troca de variáveis $L^{-1} = -(r_{31}X_{CP} + r_{32}Y_{CP} + r_{33}Z_{CP})$ e multiplicando-se as Equações 13 por (L/L) obtém-se:

$$x + \Delta x = \frac{-fr_{11}LX - fr_{12}LY - fr_{13}LZ + Lf(r_{11}X_{CP} + r_{12}Y_{CP} + r_{13}Z_{CP})}{r_{31}LX + r_{32}LY + r_{33}LZ + 1}$$

$$y + \Delta y = \frac{-fr_{21}LX - fr_{22}LY - fr_{23}LZ + Lf(r_{21}X_{CP} + r_{22}Y_{CP} + r_{23}Z_{CP})}{r_{31}LX + r_{32}LY + r_{33}LZ + 1} \quad (13)$$

Pode-se observar que assumindo como sendo constante, para uma determinada câmara, a posição do CP, a orientação e o valor de f, os seguintes valores também serão constantes:

$$L = -1 / (r_{31}X_{CP} + r_{32}Y_{CP} + r_{33}Z_{CP})$$

$$L_1 = -fr_{11}L \quad L_2 = -fr_{12}L \quad L_3 = -fr_{13}L$$
$$L_5 = -fr_{21}L \quad L_6 = -fr_{22}L \quad L_7 = -fr_{23}L \quad (14)$$
$$L_9 = r_{31}L \quad L_{10} = r_{32}L \quad L_{11} = r_{33}L$$

$$L_4 = Lf(r_{11}X_{CP} + r_{12}Y_{CP} + r_{13}Z_{CP}) \quad L_8 = L(r_{21}X_{CP} + r_{22}Y_{CP} + r_{23}Z_{CP})$$

Reescrevendo as equações anteriores e incorporando os elementos $L_1,...,L_{11}$ e os termos Δx e Δy, correspondentes aos erros sistemáticos, tem-se:

$$x + \Delta x = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}$$

$$y + \Delta y = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (15)$$

onde:

x, y: coordenadas de pontos no referencial da imagem;

X, Y, Z: coordenadas de pontos no referencial de terreno; e

L_1, L_2,...,L_{11}: parâmetros de transformação.

Para a solução das equações da DLT (determinação dos 11 parâmetros, L_1,...,L_{11}, para cada uma das imagens) é necessário o conhecimento das coordenadas de pelo menos 6 pontos de apoio. Uma vez determinado os referidos parâmetros, é possível calcular x e y.

Assumindo que o modelo para correção dos erros sistemáticos seja simplificado, i. e., $x_0=y_0=0$ e $K_2=K_3=0$, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} \Delta x &= xK_1r^2 \\ \Delta y &= yK_1r^2 \end{aligned} \tag{16}$$

Incorporando o modelo dado pela Equação 16 nas Equações 15 e desenvolvendo os termos, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4 &= L_9xX + L_{10}xY + L_{11}xZ + x + xK_1r^2A \\ L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8 &= L_9yX + L_{10}yY + L_{11}yZ + y + yK_1r^2A \\ A &= L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1 \end{aligned} \tag{17}$$

Partindo da Equação (4) e admitindo que n pontos nos dois espaços possuem suas coordenadas conhecidas, ou seja, $(x,y)_i$ e $(X,Y,Z)_i$, com $i \in \{1,2,...,n\}$ tem-se, de modo genérico:

$$\begin{aligned} x_i &= L_1X_i + L_2Y_i + L_3Z_i + L_4 - L_9x_iX_i - L_{10}x_iY_i - L_{11}x_iZ_i - x_iK_1r^2A \\ y_i &= L_5X_i + L_6Y_i + L_7Z_i + L_8 - L_9y_iX_i - L_{10}y_iY_i - L_{11}y_iZ_i - y_iK_1r^2A \end{aligned} \tag{18}$$

A partir da Equação 18 pode-se aplicar os modelos matemáticos de ajustamento de observações adequados, permitindo a recuperação dos parâmetros L_1, L_2,..., L_{11} e K_1A.

O modelo dado pela Equação 18, escrito para n pontos e na forma de um sistema linear com 2^n equações a 12 incógnitas pode ser rescrito por (Galo, 2006):

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -x_1Y_1 & -x_1Z_1 & -x_1r_1^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -y_1X_1 & -y_1Y_1 & -y_1Z_1 & -y_1r_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_nX_n & -x_nY_n & -x_nZ_n & -x_nr_n^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -y_nX_n & -y_nY_n & -y_nZ_n & -y_nr_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{10} \\ L_{11} \\ K_1A \end{bmatrix} \tag{19}$$

Uma vez obtidos os 12 parâmetros, a partir do sistema linear (Equação 19) pode-se considerar as Equações 18 para recuperar as coordenadas (X,Y,Z) de outros pontos, se pelo menos duas imagens forem disponíveis, ou, se uma das coordenadas (X,Y,Z) for conhecida, no caso de se ter uma única imagem. Supondo o caso de se ter duas imagens, onde as fotocoordenadas na imagem da esquerda $(x^e,y^e)_j$ e da direita $(x^d,y^d)_j$ são conhecidas, o seguinte sistema de equações pode ser formado (a partir da Equação 17):

$$\begin{aligned} (L_1^e - L_9^e x_j^e)X_j + (L_2^e - L_{10}^e x_j^e)Y_j + (L_3^e - L_{11}^e x_j^e)Z_j &= x_j^e(1 + K_1 r^2 A) - L_4^e \\ (L_5^e - L_9^e y_j^e)X_j + (L_6^e - L_{10}^e y_j^e)Y_j + (L_7^e - L_{11}^e y_j^e)Z_j &= y_j^e(1 + K_1 r^2 A) - L_8^e \\ (L_1^d - L_9^d x_j^d)X_j + (L_2^d - L_{10}^d x_j^d)Y_j + (L_3^d - L_{11}^d x_j^d)Z_j &= x_j^d(1 + K_1 r^2 A) - L_4^d \\ (L_5^d - L_9^d y_j^d)X_j + (L_6^d - L_{10}^d y_j^d)Y_j + (L_7^d - L_{11}^d y_j^d)Z_j &= y_j^d(1 + K_1 r^2 A) - L_8^d \end{aligned} \tag{20}$$

que na forma de um sistema linear fica

$$\begin{bmatrix} L_1^e - L_9^e x_j^e & L_2^e - L_{10}^e x_j^e & L_3^e - L_{11}^e x_j^e \\ L_5^e - L_9^e y_j^e & L_6^e - L_{10}^e y_j^e & L_7^e - L_{11}^e y_j^e \\ L_1^d - L_9^d x_j^d & L_2^d - L_{10}^d x_j^d & L_3^d - L_{11}^d x_j^d \\ L_5^d - L_9^d y_j^d & L_6^d - L_{10}^d y_j^d & L_7 - L_{11}^d y_j^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_j^e(1 + K_1 r_e^2 A) - L_4^e \\ y_j^e(1 + K_1 r_e^2 A) - L_8^e \\ x_j^d(1 + K_1 r_d^2 A) - L_4^d \\ y_j^d(1 + K_1 r_d^2 A) - L_8^d \end{bmatrix} \tag{21}$$

desde que sejam conhecidas as fotocoordenadas $(x^e,y^e)_j$ e $(x^d,y^d)_j$.

A utilização da transformação DLT, devido ao fato de não exigir o conhecimento dos parâmetros de orientação interior e valores aproximados dos elementos de orientação exterior do sensor, tem sido crescente nas aplicações de relacionamento do espaço objeto R^3 para o plano da imagem R^2, principalmente quando estes parâmetros não estão disponíveis, como é o caso das imagens Ikonos e QuickBird. A vantagem desta transformação é que, conforme o modelo estocástico adotado, pode ser escrita como sendo linear, simplificando o processo de

ajustamento, não sendo necessário fazer iterações. A desvantagem deste modelo é que seus parâmetros (L_1,...,L_{11}) não possuem significados físicos, como nas equações de colinearidade.

A DLT é considerada como sendo um caso particular da transformação matemática denominada de Razão de Polinômios, que é vastamente empregada na extração de informações 3D ou 2D a partir de imagens de satélite em que não são conhecidos os parâmetros geométricos do sensor e órbita do satélite.

2.7 Ortoimagens

Ortoimagem, segundo Andrade (2003), é uma imagem digital em projeção cartográfica. Desta maneira os objetos ou pormenores nela contidos são apresentados em suas verdadeiras posições no terreno e, conforme Wolf e Dewitt (2000), é obtida por meio de processo onde as incorreções de posicionamento devido à inclinação da câmara e a altitude da superfície (ou do relevo) são eliminadas.

As cartas ou plantas topográficas são projeções ortográficas, nas quais as linhas projetantes são perpendiculares ao plano de referência horizontal. Com isso, a escala é sempre uniforme e a mudança de altitude não afeta a representação de um objeto. O processo de ortorretificação de uma imagem consiste na retificação diferencial da imagem com o objetivo de remover os efeitos da inclinação, variações de altitude da câmara aérea e deslocamentos devidos ao relevo.

O procedimento de ortorretificação para geração de ortoimagens a partir de um modelo digital de elevação é conceitualmente simples, estando descrito por Andrade (2003), Mikhail et al. (2001), e Kraus (2000). O método de retificação diferencial de imagens (ortorretificação) consiste em transferir os tons de cinza dos *pixels* da imagem para uma malha regular que representa a projeção ortogonal do terreno, sendo necessário para isso o uso de um modelo digital de elevação e o conhecimento dos parâmetros de orientação interior e exterior do sensor.

Enquanto que nas cartas e mapas são utilizados símbolos e linhas para representação das feições, nas ortoimagens são apresentadas as próprias imagens dos objetos mapeados (MIKHAIL et al., 2001).

Como em todos os processos da Fotogrametria digital, a geração de ortofotos é realizada matematicamente com auxílio do computador. Os modelos fotogramétricos utilizados para geração de ortofotos digitais são as equações de colinearidade na forma direta

e inversa, portanto, na Fotogrametria digital existem dois métodos para geração de ortofotos: o método direto e o método indireto, sendo o indireto o mais utilizado e implementado nos sistemas fotogramétricos digitais (GALO, 2006). O processo de aplicação do método indireto consiste nos seguintes passos:

- Para cada ponto da ortofoto, no referencial do espaço objeto, faz-se a transformação para o sistema fotogramétrico, utilizando as equações de colinearidade. A informação de altura de cada ponto é obtida por interpolação a partir de um MDE;
- As coordenadas do ponto no sistema fotogramétrico, obtidas na etapa anterior, são transformadas para o sistema de imagem;
- Como geralmente os valores obtidos para as coordenadas no sistema de imagem não coincidem com as posições inteiras na imagem original, é necessário utilizar um processo de reamostragem de valores de brilho para determinar os tons de cinza (ou valores componentes da cor) do elemento correspondente na ortofoto.

Segundo Baltsavias et al. (2001), nos últimos anos vários modelos matemáticos vem sendo pesquisados para a obtenção de informações espaciais tridimensionais e geração de ortoimagens a partir de imagens digitais produzidas por sensores *pushbroom*.

Um dos requisitos para que se consiga gerar uma ortoimagem digital é a existência de um modelo digital de elevação da área de interesse.

2.8 Controle de Qualidade de Produtos Cartográficos

O controle da qualidade de um produto cartográfico é uma fase extremamente importante dentro das ciências cartográficas e é poucas vezes realizado no Brasil, apesar de ser obrigatório por lei. Uma parcela da culpa pode ser atribuída ao produtor do mapa, outra aos usuários e contratantes desses produtos, que não valorizam esta etapa, e por último, a falta de um processo sistemático de fiscalização. Imagina-se que o custo e o tempo gasto nesta etapa sejam fatores determinantes para a sua não realização (GALO e CAMARGO, 1994).

Um produto cartográfico poderá ser identificado como satisfatório ou não para o fim a que se destina quando submetido a um teste de controle de qualidade. Porém, este tipo de inspeção não está completamente livre do risco da não-detecção de erros. Tanto o produtor, quanto o consumidor do produto, desejará fixar, com base em sua experiência anterior e

razões econômicas, os riscos a que estarão expostos ao adotarem um critério de decisão, e tal objetivo é alcançado por meio da inspeção por amostragem. Assim, para auferir a qualidade de uma carta consideram-se duas partes distintas: o risco do usuário e o risco do produtor (NOGUEIRA, 2003).

Risco do usuário é dado pela existência da possibilidade da aceitação de um produto cartográfico desqualificado a partir da execução dos testes de controle de qualidade com utilização de amostra de boa qualidade.

Risco do produtor caracteriza-se pela existência da possibilidade da rejeição de um produto cartográfico qualificado, a partir da execução do teste de controle de qualidade com uma amostra de má qualidade (NOGUEIRA, 2003).

O objetivo, tanto do produtor quanto do usuário, é reduzir os riscos, mas sempre objetivando escolher um tamanho de amostra n mínima, mas suficiente, e que gere um custo de inspeção também mínimo. Desta forma essa amostra viria a satisfazer o teste de controle de qualidade aplicado em discriminar produtos de boa e má qualidade. No item 2.8.2, serão detalhados os testes necessários para determinação do tamanho da amostra para avaliação de produtos cartográficos.

Dentre os elementos avaliados em um produto cartográfico está a qualidade posicional das feições representadas e, segundo Nogueira (2003), dois termos são de fundamental importância quando da realização desta verificação: precisão e acurácia (ou exatidão). O *Federal Geographic Data Comitee*, através do *Geospatial Accuracy Standards*, define acurácia como sendo a proximidade de um valor estimado (medido ou calculado) comparado com o seu valor "verdadeiro", ou aceito como verdadeiro, de uma grandeza particular. A acurácia é a proximidade entre o valor medido e o valor esperado. Para Gemael (1994), precisão indica o grau de concordância entre medidas sucessivas, quando da realização de duas ou mais observações, indicando a dispersão destas. A precisão está vinculada aos efeitos aleatórios enquanto que a acurácia está vinculada aos efeitos aleatórios e sistemáticos.

Para realizar esta análise, tanto quantitativa quanto qualitativa, é importante considerar os documentos que estabelecem as normas para a classificação destes produtos. No Brasil, a qualidade dos produtos cartográficos é baseada no PEC, contido no Decreto Lei 89.817 de 20 de junho de 1984. Os Artigos 8° e 9°, deste Decreto, estabelecem as Normas Técnicas da Cartografia Nacional, fazendo a classificação de um produto cartográfico quanto à sua exatidão.

O PEC permite classificar as cartas como A, B ou C após os testes de avaliação da exatidão posicional e precisão das coordenadas planialtimétricas. Para tanto são necessárias

feições a serem avaliadas bem definidas na carta, de modo a possibilitar a comparação de suas coordenadas com as homólogas tidas como referências.

As cartas topográficas no Brasil devem obedecer quanto à acurácia planimétrica e altimétrica, ao PEC, que é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade e que define a exatidão de trabalhos cartográficos. A Tabela 3 representa os valores do PEC definido pelo Decreto Lei 89.817.

TABELA 3: Valores do Padrão de Exatidão Cartográfica.

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

onde:
PEC - Padrão de Exatidão Cartográfico; EP - Erro Padrão; Eq. - Eqüidistância das curvas de nível.
FONTE: BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984.

Quanto ao número de pontos e a sua distribuição para que garantam uma análise segura quanto à qualidade do produto cartográfico gerado, Merchant (1982) sugere que se utilize um número mínimo de vinte pontos bem distribuídos por todos os quadrantes da carta.

De acordo com Merchant (1982), a avaliação específica para a análise da exatidão de um mapa consiste na realização de um teste de detecção de tendências, que se baseia na distribuição *t* de *Student* (nesta etapa é verificada a presença de erros sistemáticos) e em um teste de análise de precisão, baseada na distribuição Qui-quadrado.

2.8.1 Análise de Tendência e Precisão

Segundo Galo e Camargo (1994), fundamentados em Merchant (1982), a análise de exatidão da carta é baseada na análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas medidas na carta (X_i) com as coordenadas tomadas como de referência (X_i^r), calculadas para cada ponto i pela Equação 22. Nas equações que se seguem, a variável X pode representar tanto coordenadas planimétricas como altimétricas.

$$\Delta X_i = X_i - X_i^r \tag{22}$$

A média, bem como o desvio padrão das discrepâncias amostrais, deve ser calculado por:

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta X_i \tag{23}$$

$$S_{\Delta X}^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\Delta X_i - \overline{\Delta X})^2 \tag{24}$$

sendo n o número de pontos amostrais.

Na análise do teste de tendência, são assumidas as seguintes hipóteses:

$$H_0 : \overline{\Delta X} = 0 \text{ , contra} \tag{25}$$

$$H_1 : \overline{\Delta X} \neq 0 \tag{26}$$

Para essa análise deve-se obter o valor tabelado *t* de *student* e verificar se o valor "*t*" amostral está no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula. O valor de "*t*" amostral deve ser calculado através de:

$$t_x = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}}\sqrt{n} \tag{27}$$

O valor limite $t_{(n-1,\alpha/2)}$ é obtido na tabela *t* de *student* para um nível de confiança de $(1-\alpha)$. O intervalo de confiança é dado por:

$$\left|t_x\right| < t_{(n-1,\alpha/2)} \tag{28}$$

Se o módulo do valor calculado para a estatística *t* for menor que o valor de *t* tabelado, com n-1 graus de liberdade e nível de significância α, aceita-se a hipótese nula de que a carta pode ser considerada como livre de tendências significativas. Mas, uma vez que a estatística *t* amostral não satisfaça esta condição, a hipótese é rejeitada, ou seja, o produto cartográfico não pode ser considerado livre de tendências. Observado à existência de tendência, significa a ocorrência de algum problema.

Uma vez identificada a existência de tendência em alguma direção, algumas alternativas podem ser executadas para minimizar seus efeitos, pois a sua ocorrência indica problemas cujas causas podem ser as mais variadas. Uma das alternativas, segundo Galo e Camargo (1994), é a subtração ou adição do valor tendencioso a cada coordenada extraída do produto cartográfico, cujo procedimento pode ser feito em toda a população de pontos.

O teste estatístico (Equação 28) mostra-se adequado em ocasiões em que o desvio-padrão populacional é desconhecido. Contudo, há casos em que, havendo tendência em um conjunto de dados, o mesmo pode ser considerado não tendencioso em relação a um determinado intervalo de confiança. Uma alternativa é a utilização do desvio-padrão "populacional" da classe da carta analisada ao invés do amostral (NOGUEIRA, 2003).

Deste modo, o teste passa a ser baseado na distribuição normal, sendo:

$$z = \frac{\Delta\overline{X}}{\sigma_X / \sqrt{n}}, \tag{29}$$

sendo o intervalo de confiança dado por:

$$|z| < z_{\alpha/2} \ . \tag{30}$$

De acordo com Nogueira (2003), apesar do teste estatístico baseado na distribuição *t* de *Student* ser o mais utilizado atualmente, há a possibilidade de que, para determinados intervalos de confiança, a estatística *t* não detecte a presença de tendência quando a mesma existe, ou que a tendência seja detectada quando, devido à escala da carta, ela possa ser desprezada. Devido a estes motivos, é recomendada a utilização do teste baseado na distribuição normal.

Para verificar a precisão, a análise é realizada comparando-se o desvio padrão das discrepâncias com o Erro Padrão (EP) esperado para a classe desejada. O teste de hipótese a ser formulado é o seguinte:

$$H_0 : S^2_{\Delta X} = \sigma^2_x \text{, contra} \tag{31}$$

$$H_1 : S^2_{\Delta X} > \sigma^2_x \tag{32}$$

O termo σ_x corresponde ao desvio padrão ou erro padrão esperado para a coordenada X em questão. Considerando que o erro padrão é fixado não para uma coordenada, mas para a resultante das coordenadas planimétricas X e Y, considera-se para os testes planimétricos:

$$\sigma_x = \frac{EP}{\sqrt{2}} \tag{33}$$

Uma vez calculada a variância esperada, pode-se calcular a seguinte estatística:

$$\chi^2_x = (n-1)\frac{S^2_{\Delta x}}{\sigma^2_x} \tag{34}$$

e verificar se o valor acima calculado está no intervalo de aceitação, ou seja:

$$\chi^2_x \leq \chi^2_{(n-1,\alpha)} \tag{35}$$

Se a expressão anterior for falsa, rejeita-se a hipótese nula (H_0) de que o produto cartográfico atende a precisão pré-estabelecida. No caso de a análise ser feita não sobre as componentes, mas sobre as resultantes planimétricas X e Y, a Equação 33 fica reduzida a:

$$\sigma_x = EP \tag{36}$$

2.8.2 Tamanho da Amostra

A partir de técnicas estatísticas pode-se estudar uma população através de evidências fornecidas por uma amostra, ou seja, a amostra contém os elementos necessários que podem ser observados e, a partir deles, quantidades de interesse podem ser medidas como se estivessem sendo realizadas na população (MAGALHÃES e LIMA, 2005). Portanto, se o objetivo é fazer inferências estatísticas sobre os valores dos parâmetros de uma população com base nas observações obtidas de uma amostra, deve-se procurar obter uma amostra que seja representativa, isto é, que tenha as mesmas características da população de onde foi retirada.

O tamanho de uma amostra diz respeito à quantidade de unidades do universo que são pesquisadas ou analisadas. Sabe-se que a seleção das amostras deve ser feita mediante um processo aleatório, a fim de que seja evitada uma possível tendenciosidade (NOGUEIRA, 2003).

Segundo Nogueira (2003), o tamanho da amostra, necessário para um dado grau de acurácia requerido para o modelo a ser analisado, depende da variação associada com a variável aleatória, isto é, no caso de testes de acurácia de produtos cartográficos, os valores das coordenadas planimétricas e altimétricas.

Para Pereira[2] (1979, apud NOGUEIRA, 2003) são dois os fatores que interferem no dimensionamento da amostra:

- Estabelecimento do erro máximo permissível ε;
- Valor do intervalo de confiança 1-α (probabilidade de acerto).

Considerando que $\overline{X}$ é a média de uma amostra aleatória de uma população de tamanho n, e que μ é a média populacional, ou seja, o valor verdadeiro da variável aleatória, a probabilidade (P) de que a diferença entre a média amostral $\left(\overline{X}\right)$ e a média populacional (μ) seja menor que o erro máximo absoluto permissível corresponde ao valor do intervalo de confiança (1-α), ou seja, em 100 repetições desse experimento. Deste modo pode-se garantir que em (1-α)% deles a diferença $\left(\overline{X} - \mu\right)$ é menor que o erro máximo permissível, ou seja:

$$P\left\{\left(\overline{X} - \mu\right) < \varepsilon\right\} = 1 - \alpha \qquad (37)$$

[2] PEREIRA, R. **A estatística e suas aplicações**. Porto Alegre: Ed. Grafosul, 1979.

Se $\overline{X}$ tem distribuição normal, com média $\mu = 0$ e variância $\sigma^2/n = 1$, tem-se a distribuição normal padrão ou reduzida, e a variável aleatória Z terá uma distribuição N (0,1), mesmo que a população não possua uma distribuição simétrica, contanto que o tamanho da amostra seja suficientemente grande. Estudos, envolvendo simulações, mostram que, em muitos casos, amostras com trinta elementos fornecem aproximações bastante boas para aplicações práticas. Em casos em que a distribuição da população seja simétrica, excelentes aproximações são conseguidas, mesmos com valores de amostra inferiores a trinta. O Teorema do Limite Central afirma que $\overline{X}$ aproxima-se de uma curva normal quando n tende para o infinito. A rapidez desta convergência depende da distribuição da população da qual a amostra é retirada (MAGALHÃES e LIMA, 2005). Desta forma,

$$Z = \frac{\sqrt{n}\left(\overline{X} - \mu\right)}{\sigma} \approx N(0,1) \tag{38}$$

podendo-se escrever,

$$\left(\overline{X} - \mu\right) = Z\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{39}$$

onde:

Z: é obtido a partir da tabela de distribuição normal em função do intervalo de confiança;

σ: é o desvio padrão populacional; e

n: é o tamanho da amostra.

Como $\overline{X} - \mu = \varepsilon$, substituindo na Equação 39, tem-se,

$$\varepsilon = Z\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{40}$$

Da Equação 40 pode-se obter o valor de n, ou seja,

$$n = \frac{Z^2\sigma^2}{\varepsilon^2} \tag{41}$$

A Equação 41, segundo Pereira (1979, apud NOGUEIRA, 2003), é valida para uma população (N) infinita. No caso de uma população (N) finita, é necessário introduzir um fator de correção, sendo.

$$\varepsilon = Z\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\sqrt{\frac{N-n}{N-1}} \tag{42}$$

Deste modo, é possível obter o valor de n, que é dado por

$$n = \frac{Z^2\sigma^2 N}{(N-1)\ \varepsilon^2 + Z^2\sigma^2} \tag{43}$$

A Equação 43 indica o tamanho mínimo que deve ter a amostra para uma população finita ao se fazer a estimação de μ com um erro máximo ε, a um nível de confiança $(1-\alpha)$ desejado.

Dependendo do valor de Z, tem-se uma certa probabilidade $P(1-\alpha)$. Assim, para $Z = 1{,}64$, $P(1-\alpha) = 0{,}90$. Isto significa que a probabilidade de se extrair uma amostra de modo que $(\overline{X} - \mu)$ seja menor do que Z em 100 casos corresponde a 90% (NOGUEIRA, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações Iniciais

Nos capítulos 1 e 2 foram apresentados conceitos importantes envolvidos no escopo deste trabalho, sendo essa uma revisão teórica fundamental para o desenvolvimento do método utilizado. Nesse capítulo serão apresentadas as características da área de estudo e realizadas algumas considerações acerca dos materiais utilizados, bem como serão expostos os detalhes das diversas fases que compõem a metodologia desenvolvida.

3.2 Área de Estudo

A área de estudo, abrangida pelos estereopares HR-CCD/CBERS-2, está localizada no extremo oeste do Estado de Minas Gerais e parte do extremo sul do Estado de Goiás, na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, recobrindo as microrregiões de Uberlândia, Patrocínio e Araxá. As coordenadas do retângulo envolvente são: φ = 18° 14' S, λ = 48° 07 W e φ = 19° 25' S e λ = 47° 12' W (Figura 5), e recobre uma área de aproximadamente 14.150,00 km^2.

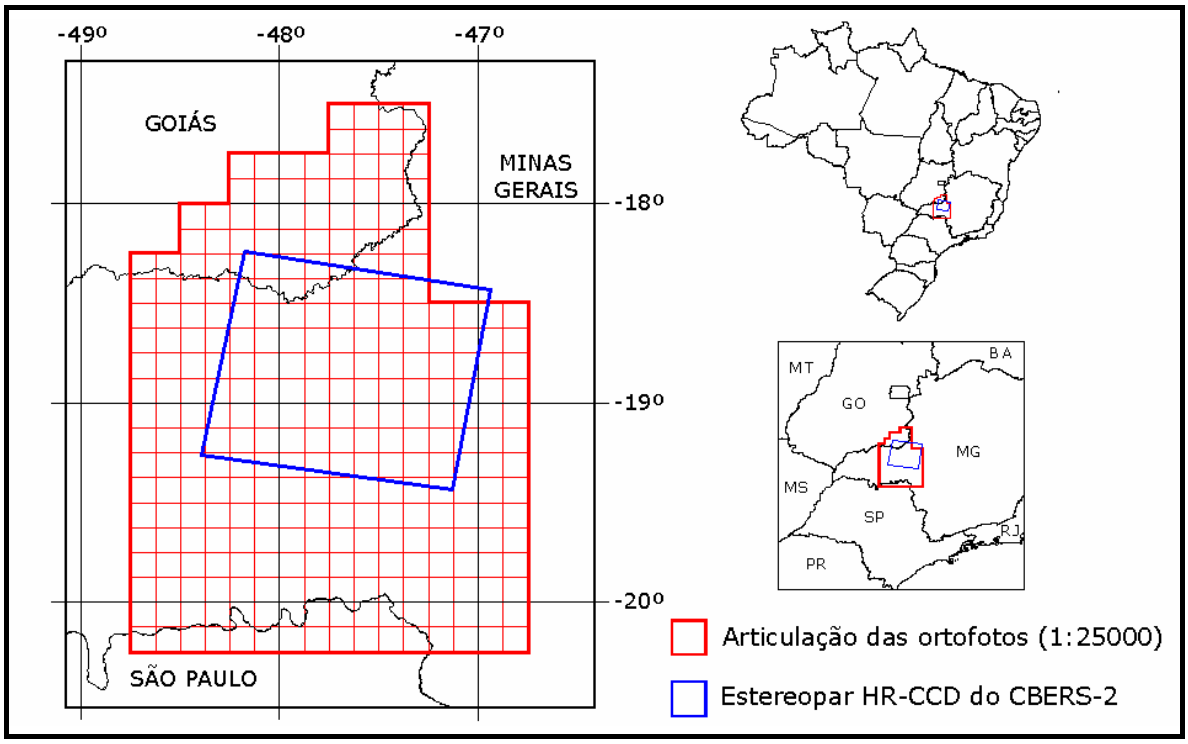


FIGURA 5 - Localização da área de estudo e articulação dos ortomosaicos 1:25.000 do IBGE (Fonte: Adaptado de MARANHÃO e RAIVEL, 2005).

A região apresenta relevo predominantemente ondulado e montanhoso, com altitudes variando entre 600 e 1100 metros, sendo Araguari e Uberlândia as suas principais cidades, ambas localizadas no estado de Minas Gerais. As imagens também abrangem a área de três represas: na parte norte das imagens está à represa de Emborcação, localizada no Rio Paranaíba, situada na divisa entre Minas Gerais e Goiás, na região sudeste das imagens está à represa de Nova Ponte e na região sudoeste a represa de Miranda, ambas localizadas no Rio Quebra-Anzol. Pelas imagens, observa-se que a paisagem da região é predominantemente rural, possuindo muitos recursos hídricos, o que propicia o desenvolvimento das lavouras irrigadas, como pode ser percebido pelo elevado número de áreas com irrigação do tipo pivô central.

A escolha da área para obtenção do estereopar, pelo INPE, foi devida à existência de material cartográfico atualizado e em escala adequada à realização de estudos tendo em vista que, desde 2002, a Coordenação de Cartografia do IBGE vem executando o Projeto SP/MG/GO, que visa produzir cartas do mapeamento sistemático (ortomosaicos) nas escalas 1:50.000 e 1:25.000 de grande parte da região do Triângulo Mineiro. Os ortomosaicos estão sendo produzidas a partir de 4.000 fotos coloridas obtidas de um levantamento aéreo na escala 1:35.000 (MARANHÃO e RAIVEL, 2005).

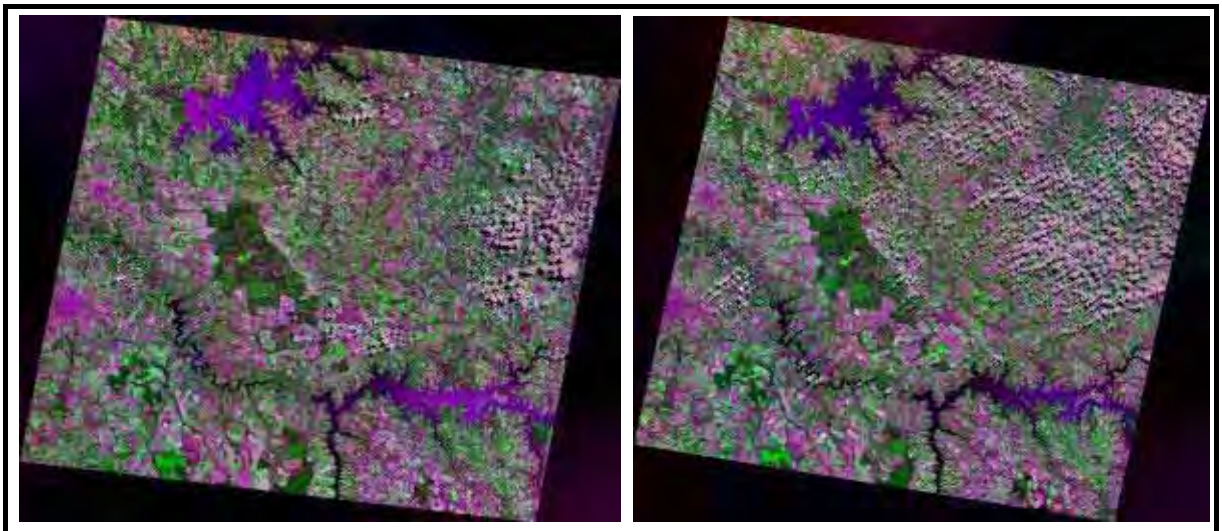
Como se pode verificar pela Figura 5, o estereopar está quase que totalmente recoberto pelo mapeamento 1:25.000 produzido pelo Projeto SP/MG/GO do IBGE, restando apenas uma pequena área não mapeada pelas cartas. A área não recoberta localiza-se na região nordeste do estereopar e compreende apenas 2% da área total das imagens CBERS.

Todos os ortomosaicos na escala 1:25.000 já se encontram disponíveis e podem ser adquiridas gratuitamente a partir da página do IBGE.

3.3 Materiais

Os materiais utilizados na execução deste trabalho são os listados a seguir:

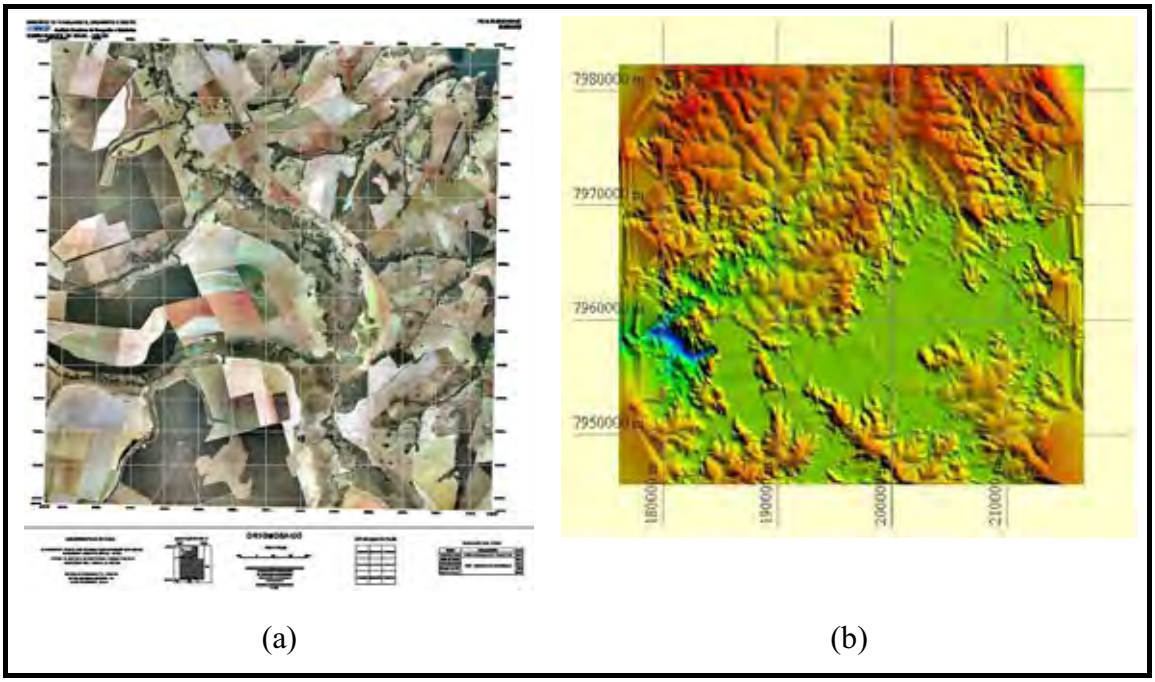
1. Estereopar HR-CCD/CBERS-2 (Figura 6), sendo a primeira imagem obtida em 16/06/2004, quando da passagem do satélite pela órbita 159 (a oeste da região imageada) e com ângulo de visada de -18º35'05", e a segunda imagem obtida em 01/07/2004, quando da passagem do satélite pela órbita 154 (a leste da região imageada) e com ângulo de visada de +17º01'02". As imagens recobrem uma região que se encontra entre as órbitas 156 e 157, estando quase que totalmente contida na órbita-ponto 156/121. As imagens são compostas pelas bandas espectrais 2, 3 e 4 e possuem Nível 1 de processamento;



(a) (b)

FIGURA 6 – Composições coloridas (RGB-342) do estereopar HR-CCD/CBERS-2.
Imagens de 16/06/2004 (a) e 01/07/2004 (b).

2. Oitenta e seis ortomosaicos na escala 1:25.000 (Figura 7a);
3. MDE da região de estudo, com resolução de 20 metros, editado e cedido pelo IBGE (Figura 7b);
4. MDE adquirido pela missão da NASA (SRTM), com resolução de 90 metros, editado e corrigido pela Embrapa Monitoramento por Satélites (2007), disponível para *download* gratuitamente no endereço: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>.
5. Software SPRING – Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas;
6. Software *Global Mapper* 7.0 (Versão de avaliação);
7. Software *MicroStation* V8;
8. Software *Leica Photogrammetry Suíte* da *Leica Geosystems* (Sistema Fotogramétrico Digital);
9. Software PDLT (Transformação Linear Direta), implementado em linguagem C e cedido pelo Prof. Júlio Hasegawa (UNESP);
10. Estação Fotogramétrica Digital, disponível no laboratório de Fotogrametria Digital do curso de Engenharia Cartografia da UNESP/FCT.



(a) (b)

FIGURA 7 – Exemplo de ortomosaico (a) e MDE (b) do IBGE utilizados para obtenção das coordenadas X, Y e Z dos pontos de apoio e de verificação.

3.4 Método

Como mencionado nos objetivos, este trabalho irá avaliar a qualidade da informação planialtimétrica obtida a partir da aplicação de técnicas fotogramétricas digitais em um estereopar HR-CCD/CBERS-2, utilizando para isso pontos de apoio distribuídos pela imagem e cujas coordenadas de terreno sejam conhecidas. Esses pontos, fotoidentificáveis e uniformemente distribuídos pela imagem, terão suas coordenadas no espaço imagem (linha, coluna) relacionadas às coordenadas dos seus homólogos no espaço objeto (E, N, H) e serão utilizados para a realização do processo de triangulação nos softwares LPS e PDLT, sendo posteriormente realizada a análise dos resultados obtidos.

O LPS é um Sistema Fotogramétrico Digital composto por aplicativos que permitem automatizar tarefas de um projeto fotogramétrico, como, por exemplo, a importação de imagens e a extração de feições para a elaboração de cartas. Ele faz uso de algoritmos matemáticos para realizar tarefas de medição de pontos e extração automática de pontos do terreno com precisão *subpixel*. Como produtos o sistema permite, entre outras coisas, a geração de MDE, ortorretificação de imagens digitais, geração de mosaicos e a realização de restituição em ambiente CAD (*Computer-Aided Design*).

O PDLT é um aplicativo implementado em linguagem C e realiza o processo de triangulação utilizando o modelo matemático DLT.

A partir desses dois softwares os modelos matemáticos polinomial e DLT foram testados, utilizando-se o mesmo conjunto de pontos de apoio e de verificação, sendo assim avaliada a qualidade da informação gerada.

Com o objetivo de facilitar a compreensão das etapas que compõem este trabalho, na Figura 8 é apresentado um fluxograma contendo os principais passos, sendo as atividades para obtenção e tratamento dos dados utilizados descritas a seguir.

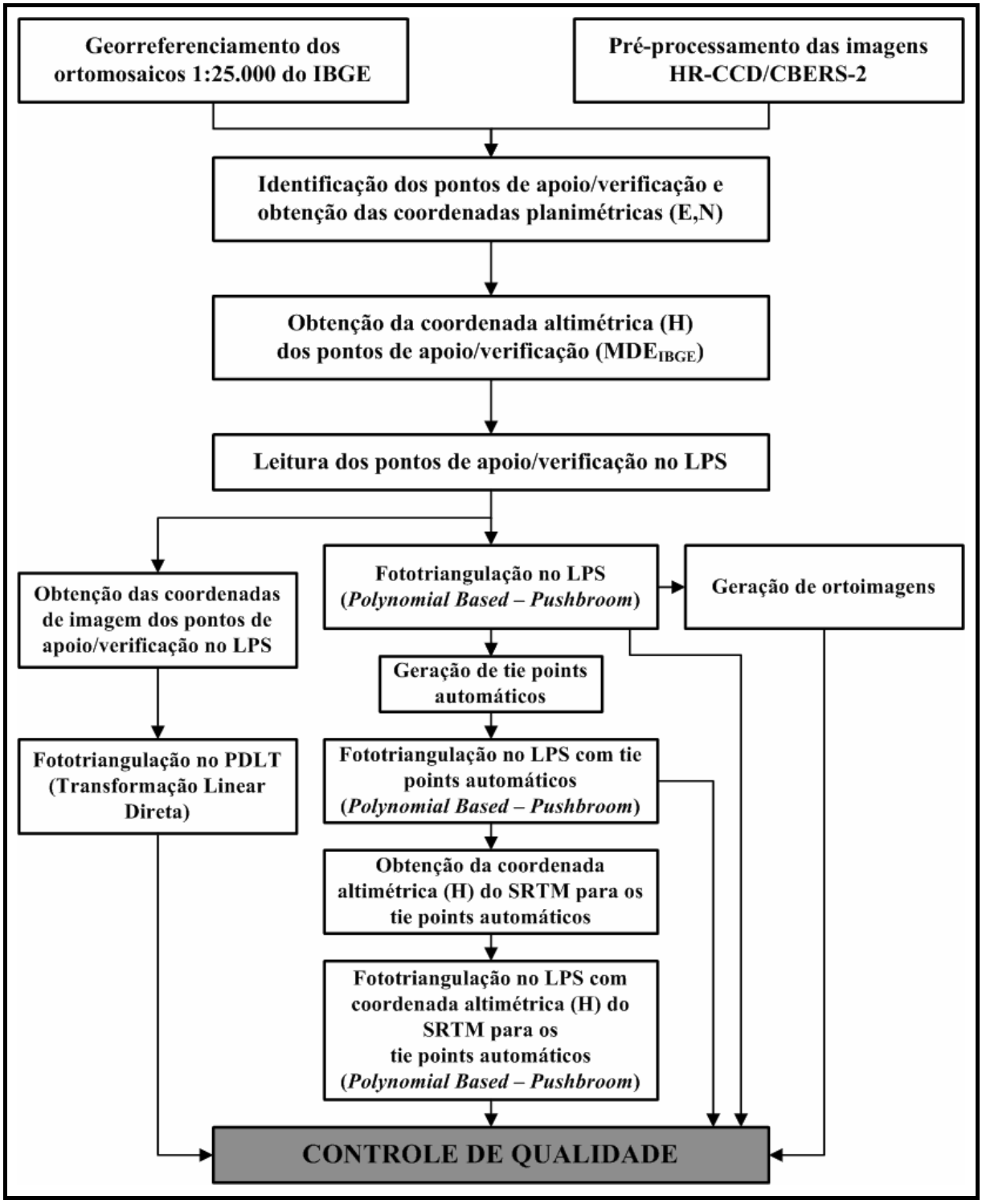


FIGURA 8 – Fluxograma das etapas do trabalho.

3.4.1 Pré-processamento das Imagens HR-CCD/CBERS-2

Devido às degradações do sinal que ocorrem no momento de aquisição da cena, decorrentes de fatores como: condições atmosféricas, variação da iluminação da cena,

geometria de visada, etc, as imagens obtidas por sensores orbitais tendem a apresentar baixo contraste. Tal fato dificulta a identificação de feições de interesse como pontes, cruzamento de estradas, confluência de rios, etc, que estando bem definidas na imagem poderão ser utilizados como pontos de apoio. A fim de atenuar esse efeito e realçar as informações de interesse na cena, técnicas de processamento digital de imagens foram empregadas nas imagens CBERS utilizadas neste trabalho.

A primeira etapa de pré-processamento das imagens teve como objetivo atenuar o efeito causado pela névoa atmosférica, também conhecida como radiância de trajetória. A segunda etapa foi aplicada para o melhoramento do contraste, realçando a imagem e, assim, ajudando a percepção de feições de interesse presentes na cena. Para os procedimentos descritos e processamentos realizados, utilizou-se as ferramentas existentes no software SPRING.

Para efetuar a correção da névoa atmosférica, e assim minimizar os efeitos da radiância de trajetória, foi realizado o procedimento de observar os *pixels* que apresentam reflectância próxima de zero. Para tanto, segundo Lillesand e Kiefer (2000), faz-se a aplicação de um método denominado de Correção Atmosférica pelo Pixel Escuro (*Dark Object Subtraction-DOS*). Segundo esse método, em toda e qualquer cena e em qualquer banda espectral, existem pixels que deveriam assumir o valor zero, uma vez que estes poderiam não receber radiação incidente. Portanto, estes pixels não poderiam refletir radiação (sobras na região do visível, por exemplo), podendo também absorvê-la totalmente, o que igualmente implicaria em valores nulos de reflexão (corpos d'água límpida nas regiões do infravermelho próximo e médio, por exemplo). Casos esses pixels apresentem valores de Número Digital (ND) maiores que zero, o valor excedente deve ser explicado pela interferência aditiva do espalhamento atmosférico. A correção é feita então segundo um procedimento bem simples que tem como objetivo identificar, em cada banda espectral, quais quantidades de ND que deveriam ser subtraídas de cada imagem como um todo. Em outras palavras, são definidos valores de ND que são subtraídos de todos os ND's da cena, considerando que a interferência atmosférica é uniforme ao longo de toda a cena.

Para esta operação foi utilizada a banda 4 das imagens, pelo fato de ter apresentado melhor visualização dessas áreas, sendo observado que os *pixels* que apresentaram as menores reflectâncias foram os correspondentes às áreas de sombra de nuvens e corpos d'água. Foram realizadas leituras em oito áreas cujos *pixels* possuem reflectância próxima de zero, obtendo-se o valor do nível de cinza, ou ND, mais baixo encontrado em cada uma dessas áreas. A coordenada (linha, coluna) de cada *pixel* onde foi lido o menor valor de ND foi anotada e,

com essa mesma coordenada, o procedimento foi repetido para as bandas 2 e 3, sendo registrados os valores de ND encontrados (Tabela 4).

TABELA 4: Coordenadas dos *pixels* das imagens e valores de ND encontrados.

Ponto	**IMAGEM 01/07/2004**					**IMAGEM 16/06/2004**				
	Coluna	Linha	B4	B3	B2	Coluna	Linha	B4	B3	B2
			ND	ND	ND			ND	ND	ND
1	3182	1041	***13***	22	61	2882	948	***13***	26	74
2	593	4307	21	19	41	5394	1821	28	21	38
3	2145	1172	20	33	80	6686	796	25	20	36
4	3842	481	18	20	46	6742	3273	28	18	***35***
5	5245	2884	36	24	44	599	2646	20	17	37
6	6528	4315	19	20	40	2010	3705	19	***15***	37
7	3976	5729	17	***18***	***38***	3959	5818	18	19	38
8	6938	1291	36	29	48	5130	5020	19	28	64

De posse desses valores, observou-se para cada banda qual o menor valor de ND encontrado e subtraiu-se esse valor de todos os *pixels* dessa banda. Pretendeu-se, com essa operação de subtração, atenuar a influência da radiância de trajetória.

Após o processo de subtração a imagem tende a ficar mais escura, fato esse observado e que afetou o contraste das bandas. Assim, realizou-se uma transformação radiométrica (realce) para melhorar a discriminação visual entre os objetos presentes na cena. Essa transformação foi realizada através da função de manipulação de contraste denominada "Linear" e existente no SPRING, sendo aplicadas às bandas 2, 3 e 4 de cada imagem, separadamente.

Após a realização dos procedimentos descritos, as imagens apresentaram uma melhor qualidade visual, se comparadas às imagens originais. Na Figura 9 é apresentada uma das imagens (banda 2, imagem de 01/07/2004) antes e após o processamento, juntamente com o histograma correspondente.

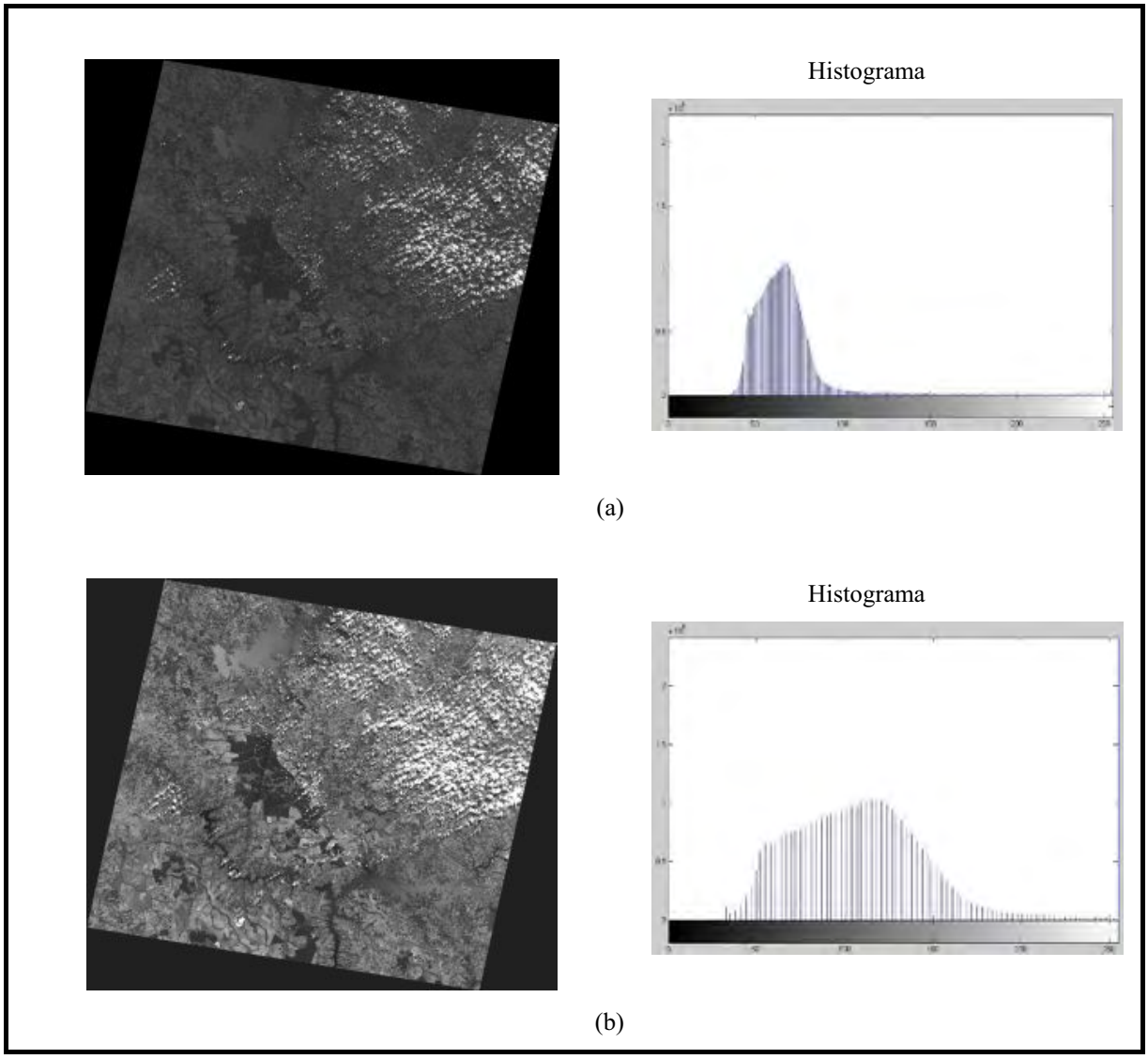


FIGURA 9 – Imagem da banda 2 (de 01/07/2004) sem correção de névoa e contraste (a) e após a correção (b).

Após o processamento digital de todas as bandas que compõem as duas imagens, foi realizada uma composição destas bandas (RGB-342) para obtenção das imagens coloridas (Figura 6).

3.4.2 Planejamento, Preparação dos Dados e Obtenção dos Pontos de Apoio e de Verificação

O apoio topográfico consiste na operação que permite determinar as coordenadas de pontos, no referencial do espaço objeto, que claramente se consiga identificar no terreno e nas imagens. Esse apoio servirá para referenciar as imagens ao sistema de coordenadas de terreno selecionado e, conseqüentemente, toda a informação que venha a ser compilada dessas

imagens. Levantamentos geodésicos e topográficos (utilizando *Global Positioning System* – GPS, estações totais, teodolitos, etc.) em campo são algumas das alternativas possíveis de se determinar as coordenadas de pontos de apoio, mas demandam altos custos e tempo que podem vir a tornar inviável a sua execução. Uma alternativa que propicia baixo custo e rapidez, mas que está aquém das precisões e exatidões conseguidas com os métodos anteriormente descritos é a obtenção de coordenadas de pontos de apoio a partir de cartas topográficas, desde que estas atendam aos requisitos de exatidão necessária.

Para execução deste trabalho as coordenadas planimétricas dos pontos de apoio e verificação foram obtidas a partir de ortomosaicos 1:25.000 do mapeamento sistemático, produzidos em 2005 e 2006, e a informação altimétrica obtida a partir dos MDE's (cedidos pelo IBGE) utilizados para geração destes ortomosaicos.

Os ortomosaicos, utilizando-se uma transformação afim, foram georreferenciados com o software *MicroStation* e, identificados os pontos de interesse, suas coordenadas planimétricas foram obtidas por captura automática em tela. Ao total foram identificados 80 pontos, sendo desses 24 escolhidos como pontos de apoio e 56 como pontos de verificação. De posse das coordenadas planimétricas, a componente altimétrica foi obtida através de captura automática nos MDE's do IBGE, utilizando-se o software *Global Mapper*.

Mais três pontos determinados por GPS e cedidos pelo IBGE foram selecionados como pontos de apoio, obtendo-se um total de 27 pontos de apoio e 56 pontos de verificação. Os três pontos de apoio obtidos por levantamento GPS são os pontos 25, 26 e 27 (Anexo I). Todos os pontos utilizados estão referenciados ao sistema de coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*), fuso 23 Sul, *Datum* Horizontal SAD-69 (*South Americam Datum* 1969) e *Datum* Vertical Imbituba – SC.

Apesar de ser adotado o fuso 23 como o sistema cartesiano métrico de referência para as coordenadas planimétricas dos pontos utilizados, o estereopar apresenta cerca de 30% de sua área na região do fuso 22 (Figura 5), se prolongando sobre este aproximadamente 20'. De acordo com IBGE (1998) "*cada fuso deve ser prolongado até 30' sobre os fusos adjacentes criando-se assim uma área de superposição de 1º de largura. Esta área de superposição serve para facilitar o trabalho de campo em certas atividades*". Desta forma, optou-se como fuso aquele no qual a maior parte da área de interesse está localizada.

Dos 83 pontos utilizados 20 foram coletados com as suas coordenadas referenciadas ao fuso 22 (9 pontos de apoio e 11 de verificação), sendo o programa de Transformação de

Coordenadas e Datum (TCD)[3] disponível no Departamento de Cartografia da UNESP/FCT, utilizado para obter as coordenadas planimétricas desses 20 pontos referenciadas ao fuso 23. No Anexo I são apresentadas as coordenadas E, N e H dos 83 pontos utilizados e na Figura 10 visualiza-se a distribuição espacial destes pontos sobre o estereopar.

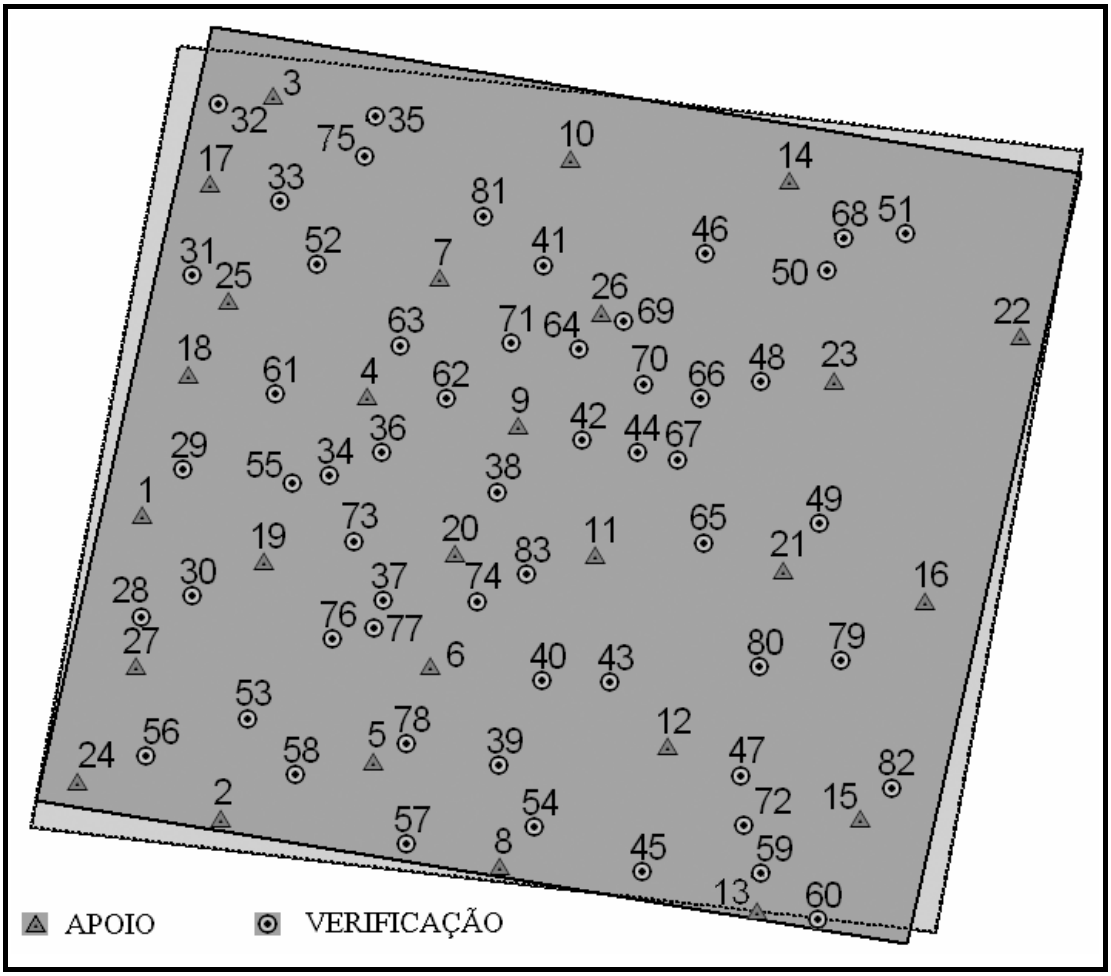


FIGURA 10 – Distribuição dos pontos de apoio e verificação sobre o estereopar HR-CCD/CBERS-2.

Para determinação dos valores de desvios padrão adotados para as coordenadas E, N e H dos pontos de apoio e verificação utilizados, considerando-se as diferenças existentes entre as fontes de dados de onde foram obtidos, estabeleceram-se os seguintes critérios:

- para os três pontos obtidos através de levantamento GPS e disponibilizados pelo IBGE, considerou-se uma precisão de um metro para as coordenas E, N e H, tendo em vista que serviram para apoiar o vôo na escala 1:35.000 utilizado para produzir os ortomosaicos 1:25.000;

[3] GALO, M. **Sistema para processamento de dados em geodésia e cartografia**. Presidente Prudente, 1992. Relatório interno, Departamento de Cartografia, FCT/UNESP.

– para as coordenadas E e N dos 80 pontos obtidos nos ortomosaicos, adotou-se uma precisão estabelecida de acordo com o erro padrão (EP) planimétrico para cartas 1:25.000 classe A (Tabela 3). Assim sendo, adotou-se 5,30m $\left(EP/\sqrt{2}\right)$ como o erro esperado na obtenção da medida destas coordenadas sobre as cartas.

Para a coordenada H, obtida de um MDE restituído a partir de imagens aéreas na escala 1:35.000, a estimativa da precisão foi realizada utilizando-se a equação proposta por Kraus (2000) para o caso de um par de imagens verticais:

$$\sigma_Z = \frac{Z^2}{f \cdot B}\sigma_{px} \tag{44}$$

sendo:

σ_Z : é o erro esperado na coordenada Z;

Z: altura de vôo;

f: é a distância focal;

B: é a aerobase;

σ_{px} : é o erro esperado na medida da paralaxe.

O valor de σ_{px} da Equação 44 pode ser obtido por propagação de covariâncias a partir da equação de paralaxe (KRAUS, 2000). A paralaxe é definida como:

$$p_x = x_e - x_d \tag{45}$$

onde:

p_x : é a paralaxe do ponto x;

x_e, x_d : são as fotocoordenadas do ponto x na foto da esquerda e da direita, respectivamente.

Por propagação de covariâncias na Equação 45, tem-se:

$$\sum_{p_x} = G\Sigma_x G^T \tag{46}$$

onde:

$$\Sigma_x = \begin{bmatrix} \sigma^2_{x_e} & 0 \\ 0 & \sigma^2_{x_d} \end{bmatrix} \tag{47}$$

e

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_x}{\partial_{x_e}} & \frac{\partial p_x}{\partial_{x_d}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} \tag{48}$$

portanto,

$$\sum_{p_x} = 2\sigma^2_x \tag{49}$$

Considerando as variâncias das medidas iguais, chega-se à equação final para a variância. O desvio padrão é a raiz quadrada da variância, portanto:

$$\sigma_{px} = \sigma_x \cdot \sqrt{2} \tag{50}$$

onde σ_x é o erro esperado na leitura da coordenada x.

Considerando-se os dados da Tabela 5 nas Equações 44 e 50, e um σ_x de 1 *pixel* (28μm), obtém-se um valor de 2,3 metros como erro altimétrico esperado para os pontos fototriangulados a partir dos modelos 1:35.000 e utilizados para gerar os MDE's do IBGE.

TABELA 5: Informações do levantamento aerofotogramétrico 1:35.000.

Dados para o cálculo de σ_Z	
Escala de vôo	1:35.000
Distância focal	153mm
Sobreposição	60%
Quadro focal	23 x 23cm
Aerobase	3220m
Altura de vôo	5355m
Resolução da imagem	28μm

Kraus (2000) também propõe as seguintes equações para determinação de σ_X e σ_Y:

$$\sigma_X = \sqrt{\left(\frac{x}{f} D_{ef} \frac{Z}{B} \sigma_{px}\right)^2 + \left(D_{ef}\ \sigma_x\right)^2} \quad (51)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\left(\frac{y}{f} D_{ef} \frac{Z}{B} \sigma_{px}\right)^2 + \left(D_{ef}\ \sigma_y\right)^2} \quad (52)$$

onde:

σ_X e σ_Y: é o erro esperado nas coordenadas X e Y;

D_{ef}: denominador da escala da imagem.

A partir das Equações 44, 51 e 52, dos dados apresentados na Tabela 6 e adotando $\sigma_x = \sigma_y = 1$ *pixel* (13μm) pode-se fazer uma previsão para os valores de erros a serem obtidos nas coordenadas E, N e H extraídas a partir do estereopar HR-CCD/CBERS-2.

TABELA 6: Informações sobre o sensor HR-CCD/CBERS-2.

Dados para o cálculo do erro esperado em E, N e H	
Escala de imagem	1:1.496.154
Distância focal	520mm
Quadro focal	70 x 70mm
Aerobase	470km
Altura de vôo	778km
Resolução da imagem	13μm

Realizados os cálculos foram obtidos os valores de $\sigma_X = \sigma_Y = 19{,}70$m e $\sigma_Z = 45{,}50$m, sendo estes os erros esperados nas coordenadas E, N e H obtidas a partir do processo de triangulação a ser realizado no LPS e PDLT.

Além dos pontos de apoio e verificação foram também gerados 68 pontos de passagem, por correlação no LPS. Esses pontos, obtidos automaticamente, cujas coordenadas são determinadas por triangulação, serão utilizados apenas nos experimentos 2 e 3, onde se pretende observar se haverá uma melhora nos resultados quando da utilização dos dados altimétricos advindos do SRTM.

Para esses 68 pontos de passagem gerados as precisões adotadas para as coordenadas E, N e H foram de 200 metros. Com os valores das coordenadas obtidas para os pontos de passagem, foram interpoladas as coordenadas altimétricas do SRTM, sendo então essas coordenadas inseridas como as novas coordenadas H. Esses pontos foram considerados como pontos de apoio altimétricos, cujo desvio padrão adotado foi de 20 metros. A precisão de 20m nos pontos de apoio altimétrico (extraídos do SRTM) foi adotada devido ao fato das coordenadas planimétricas (E, N) terem sido obtidas da triangulação.

A opção de utilização de desvio padrão nas observações permite a obtenção de melhor precisão, adequando a qualidade dos resultados à confiabilidade da fonte de coordenadas utilizadas.

Na Tabela 7 são apresentadas as precisões adotadas, para os diferentes grupos de dados, para a realização da triangulação no LPS.

TABELA 7: Valores dos desvios padrões adotados.

Ponto	E (m)	N (m)	H (m)
Ortomosaicos 1:25.000	5,3	5,3	2,3
GPS	1,0	1,0	1,0
Pontos de passagem	200	200	200
SRTM	200	200	20

Na triangulação considerando o modelo matemático DLT, não se adotou peso para os pontos, e as coordenadas foram consideradas como livres de erros.

Definidas as características dos dados utilizados, a etapa seguinte foi a realização da triangulação no LPS e PDLT, sendo o LPS inicialmente utilizado. Para o processamento usando o aplicativo PDLT foram usadas as medidas realizadas no LPS, extraídas a partir do relatório da triangulação.

Para criação de um projeto no LPS faz-se necessário a escolha do tipo de sensor utilizado. Sendo as imagens CBERS obtidas por varredura linear, o sensor escolhido foi o *Generic Pusbroom* e o *Polynomial-Based Pushbroom* o modelo matemático adotado. Como já mencionado no item 2.6.1, o LPS permite a modelagem de polinômios de ordem 1 até 5 para a posição do sensor, e de polinômios de ordem 0 até 3 para os ângulos de orientação (ω,φ,κ), sendo então necessário definir qual a ordem dos polinômios que melhor modela cada parâmetro de orientação exterior. Foi realizada uma análise, em que foram utilizadas combinações para diferentes ordens dos polinômios envolvidos, sendo analisado o erro médio

quadrático em cada caso. O melhor resultado encontrado determinou as ordens polinomiais adotados para modelar os parâmetros de orientação exterior (E,N,H,ω,φ,κ) do sensor.

Quanto ao sistema de referência geodésica escolhida, adotou-se o elipsóide *South American* 1969 e o datum SAD-69 (Brasil), sendo utilizado o sistema de coordenadas UTM, fuso 23 Sul. As configurações dos parâmetros do sensor utilizados na criação do projeto são apresentados na Tabela 8.

TABELA 8: Parâmetros do sensor.

NOME DO SENSOR	CBERS_1606	CBERS_0107
Distância focal	520mm	520mm
Tamanho do *pixel* (CCD)	13μm	13μm
Número de colunas da imagem	7491	7478
Ângulo de visada	-18,60°	17,33°
Elemento de resolução espacial	19,5m	19,5m
Eixo de órbita do satélite	y	y

Devido à diferença do ângulo de visada e do número de colunas de cada imagem, fez-se necessário criar no LPS uma configuração diferente de sensor para cada imagem.

A última etapa antes da realização dos experimentos foi a inserção e medição dos pontos de apoio e verificação no estereopar HR-CCD/CBERS-2. Os pontos foram inseridos um a um e medidos aos poucos, sempre processando a triangulação à medida que iam sendo inseridos novos pontos. O objetivo era de se ter um maior controle e evitar erros grosseiros cometidos durante esse processo.

Observando-se a Equação 44, verifica-se que a precisão a ser obtida na componente altimétrica (H) com o procedimento fotogramétrico é inversamente proporcional as relações Base/Altura (B/Z) e escala da imagem (f/Z) e diretamente proporcional a precisão com que são medidas as coordenadas na imagem (σ_{px}). A relação B/Z é um parâmetro indicador da qualidade dos dados altimétricos gerados por processos estereoscópicos, sendo os melhores resultados obtidos quando essa relação é próxima de 1. Para o estereopar HR-CCD/CBERS-2, considerando-se um valor de B aproximadamente igual a 470km e sendo a altura de sua órbita 778km, obtêm-se uma relação B/Z = 0,6. Este valor é bem próximo ao obtido por outros sistemas de imageamento orbital mais comumente usados na obtenção de pares estereoscópicos, como ASTER (0,6), Ikonos (0,54-0,83) e SPOT (0,6-1,2) (ROSADO e SÁEZ, 2005).

3.4.3 Avaliação do tamanho da amostra

Conforme exposto na seção 2.8.2, pretende-se aplicar os estudos referentes à amostragem para validar o número de pontos de verificação *a priori* escolhido (56). Demonstrar-se-á que 56 pontos de verificação é uma quantidade suficiente e representativa da população, sendo apropriado para realização dos testes estatísticos de controle de qualidade propostos.

Pelo modelo matemático apresentado na Equação 43, para que se obtenha o tamanho da amostra (n) faz-se necessário definir o tamanho da população, o intervalo de confiança, o valor do erro máximo permissível e o desvio padrão. Nogueira (2003) sugere que, para utilização em trabalhos de avaliação de produtos cartográficos, o ε de 33% do erro padrão (ε = 1/3 EP) para a classe da carta a ser avaliada seja adotado. Segundo este mesmo autor, para um ε de 33%, os valores obtidos para tamanho de amostra são mais condizentes com a realidade, fornecendo valores praticáveis para realização do controle de qualidade de produtos cartográficos.

Partindo-se da consideração de que os produtos a serem gerados a partir do estereopar HR-CCD/CBERS-2 (elemento de resolução de 19,5 m) atinjam precisões compatíveis com a escala máxima de 1:100.000, adotou-se um EP (classe A) planimétrico de 30 metros e altimétrico de 16,67 metros (Tabela 3). Desta forma, se obtêm para planimetria um ε de 10m e para altimetria um ε 5,56m. Objetivando maior rigor na determinação de n, o valor 5,56m foi adotado. Os valores calculados para n, considerando intervalos de confiança de 90%, 95% e 98%, são apresentados na Tabela 9, e seu respectivo gráfico na Figura 11.

TABELA 9: Tamanho de amostra - Carta de escala 1:100.000
Erros (ε) de 10%

σ = 16,67m e ε = 5,56m (33%)			
N	**Probabilidade**		
	90%	**95%**	**98%**
(População)	**Z = 1,281552**	**Z = 1,644853**	**Z = 2,053748**
1	1	1	1
5	3,934110	4,293802	4,522849
10	6,212705	7,298975	8,081654
20	8,745297	11,228209	13,323427
50	11,576862	16,585146	21,811678
100	12,977485	19,721497	27,692588
150	13,522837	21,048282	30,427204
500	14,368145	23,236885	35,308563
1000	14,563218	23,766435	36,565590
1500	14,629425	23,948357	37,004728
2000	14,662755	24,040366	37,228276
3000	14,696237	24,133085	37,454541
4000	14,713035	24,179713	37,568708
5000	14,723133	24,207776	37,637543
10000	14,743369	24,264099	37,775973
20000	14,753508	24,292359	37,845570
50000	14,759599	24,309347	37,887452
100000	14,761630	24,315014	37,901433
200000	14,762646	24,317849	37,908428
500000	14,763255	24,319550	37,912625
1000000	14,763458	24,320118	37,914025
2000000	14,763560	24,320401	37,914725
40000000	14,763657	24,320671	37,915390
50000000	14,763658	24,320673	37,915397

Na Tabela 9 o valor máximo adotado para n foi de 50.000.000, fato justificado pela imagem possuir 7.488 colunas e 6.554 linhas e, portanto, um total de 49.076.352 *pixels*. Supondo que este seja o número máximo de pontos que possam ser coletados nas imagens, adotou-se como sendo o valor do tamanho da população. Percebe-se que, a partir de um determinado tamanho da população, o valor de n tende a se estabilizar (Figura 11). De acordo com a Tabela 9 verifica-se que mesmo para testes mais rigorosos, com um valor de Z = 2,05 (98%), a quantidade de 56 pontos de verificação utilizados neste trabalho seria suficiente para realização das análises propostas.

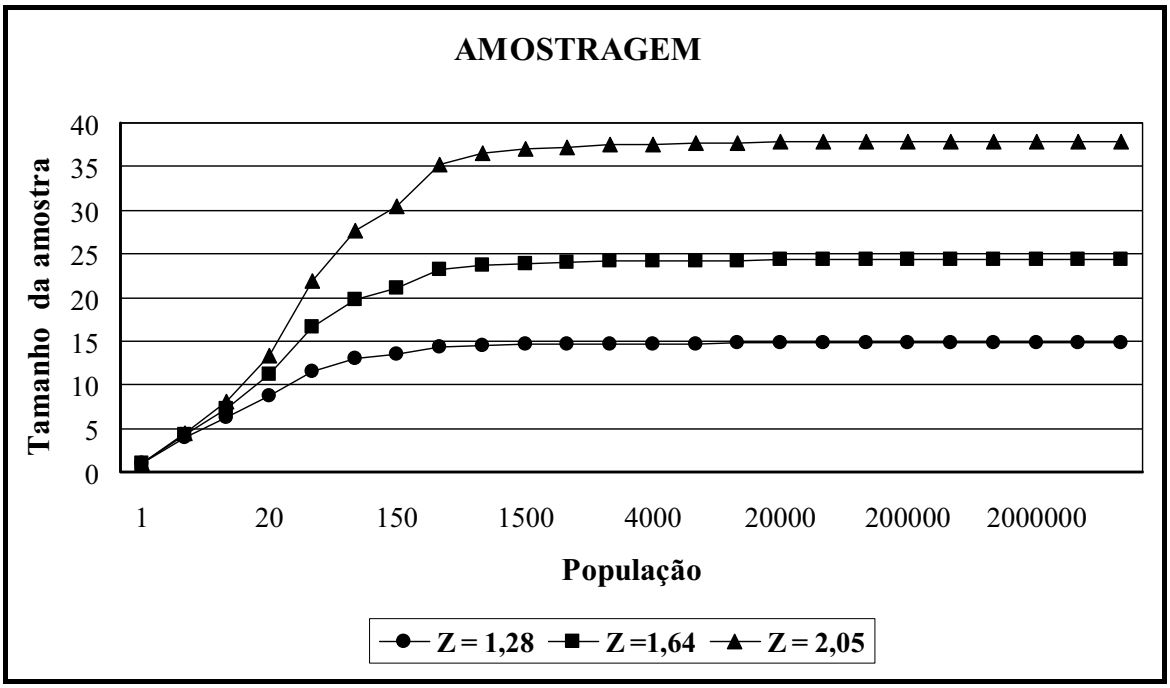


FIGURA 11: Gráfico de tamanho de amostra para ε = 33%.

Para os experimentos realizados neste trabalho, o intervalo de confiança adotado é de 90% (PEC), sendo 15 o número mínimo de pontos de verificação necessários. Portanto, os 56 pontos de verificação utilizados para efetuar as análises estatísticas são representativos da população.

Definidos e validados os dados de entrada, a etapa seguinte foi a avaliação dos modelos matemáticos propostos. Os experimentos realizados e os resultados obtidos são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

4 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerações Iniciais

Este trabalho visa, a partir de um estereopar HR-CCD/CBERS-2 obtido por visadas laterais, testar dois diferentes modelos matemáticos para extração de informações espaciais, sendo esses o modelo polinomial e a DLT. Contudo, é importante tomar em consideração que pelo fato do sensor HR-CCD/CBERS-2 obter imagens por varredura linear os parâmetros de orientação exterior para cada linha imageada mudam a todo instante, sendo esse um problema para reconstrução da geometria de imageamento da cena gerada.

Entre as diferentes soluções propostas o modelo *Polynomial Based – Pushbroom*, implementado no LPS, é uma alternativa para modelagem desses sensores, sendo necessário para a sua utilização (triangulação no LPS) que a ordem dos polinômios que irá modelar as coordenadas E, N e H e os parâmetros de atitude ω, φ e κ seja estabelecida.

Com esse objetivo, diversos experimentos foram realizados considerando diferentes ordens para os polinômios. Utilizando-se 27 pontos de apoio e 56 pontos de verificação, o erro médio quadrático (EMQ) obtido nas coordenadas E, N e H foi calculado, sendo esses dados empregados na escolha das ordens dos polinômios a serem utilizadas nos experimentos.

Considerando que o LPS permite modelar E, N e H por polinômios de ordem 1 até 5 e ω, φ e κ por polinômios de ordem 0 até 3, o número possível de combinações é da ordem de 8000. Mas, considerando o que foi proposto por Orun e Natarajan (1994), conforme explanado na seção 2.2.2, existe correlação entre (φ,ω) e (X,Y), o que permite adotar ordem zero para os polinômios que modelam esses dois parâmetros de atitude, reduzindo então para 500 a quantidade de combinações possíveis. Como 500 é ainda um número elevado de combinações e desejando reduzi-lo para facilitar as análises que se pretende realizar, adotou-se inicialmente que as coordenadas E, N e H seriam modelados por polinômios de iguais ordens e que para κ o polinômio poderia assumir ordem 0, 1, 2 ou 3. Desta forma chegou-se a um número de 20 combinações possíveis, sendo estas combinações processadas e cujos EMQ das coordenadas E, N e H dos pontos de verificação são apresentados no gráfico da Figura 12.

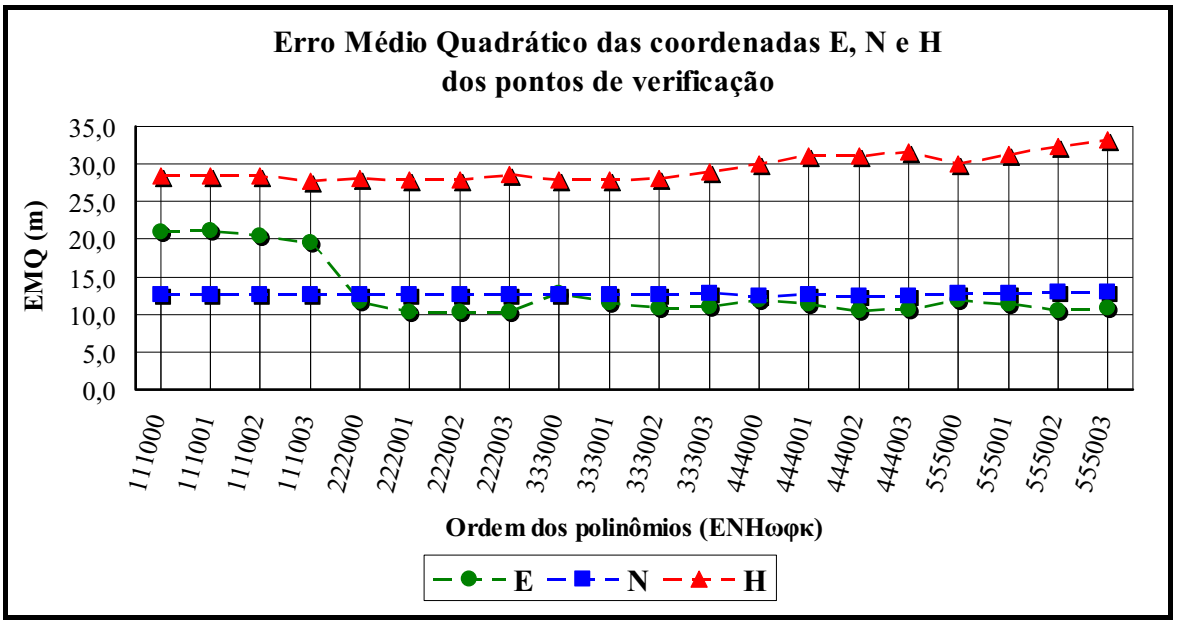


FIGURA 12: Comportamento do erro em E, N e H para 20 diferentes combinações de ordens dos polinômios.

Na coordenada E os menores valores de EMQ observados foram de 10,33m, 10,50m e 10,52m para polinômios de ordem 2, 4 e 5, respectivamente. Para a coordenada N observou-se um comportamento praticamente constante, sendo o menor valor de EMQ (12,54m) observado quando se fez uso de polinômio de ordem 1. Para a componente H os piores resultados de EMQ foram obtidos quando se utilizou polinômios de ordem 4 e 5 e o melhor resultado (27,80m) para polinômio de ordem 1.

A partir da observação desses primeiros resultados, optou-se por fazer uma nova análise, na qual se realizou novas combinações entre as ordens dos polinômios. Essas novas ordens foram escolhidas com base nos menores valores de EMQ observados na Figura 12. Atribuindo-se a N e H um polinômio de ordem 1, variou-se a ordem do polinômio de E de 2 até 5 e de κ de 1 até 3. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 13.

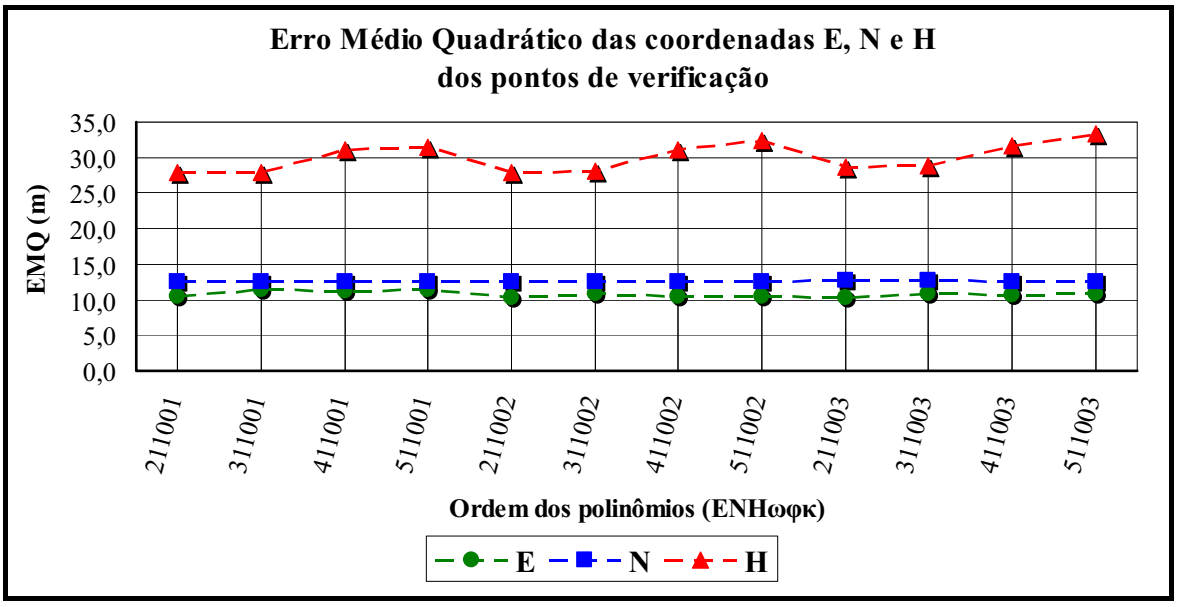


FIGURA 13: Comportamento do erro em E, N e H para 12 diferentes combinações de ordens dos polinômios.

Para essa nova análise obtiveram-se, como menores valores de EMQ, 10,33m, 12,53m e 27,88m para E, N e H, respectivamente. Com base nesses valores, determinou-se a ordem polinomial a ser adotada para efeito dos experimentos no LPS como $E^n = 2$, $N^n = 1$, $H^n = 1$, $\omega^n = 0$, $\varphi^n = 0$ e $\kappa^n = 2$. Para efeito de simplificação no texto desse trabalho, sempre que se referir à ordem do polinômio adotada para modelar cada uma das variáveis, a variável irá ser precedida de um n sobrescrito. Portanto, o n sobrescrito nas variáveis indica que o número após a igualdade está se referindo a ordem adotada para o polinômio que irá modelá-la.

Assim, definida as ordens polinomiais a serem empregadas no LPS, os experimentos referentes à avaliação do modelo polinomial foram realizados. O método adotado consistiu em, variando-se a quantidade de pontos de apoio na cena, avaliar o erro obtido nas coordenadas E, N e H dos pontos de verificação. A quantidade de pontos foi decrescente, subtraindo-se sempre 5 pontos por vez, de 27 até o valor mínimo de 7 pontos. Na realização desse procedimento tentou-se sempre manter uma distribuição uniforme dos pontos de apoio na cena, evitando situações em que os pontos ficassem concentrados em uma única área e sempre procurando preservar pontos nos extremos das imagens. Para os experimentos descritos nas seções seguintes, as quantidades de pontos de apoio consideradas foram de 27, 22, 17, 12 e 7 (Figura 14).

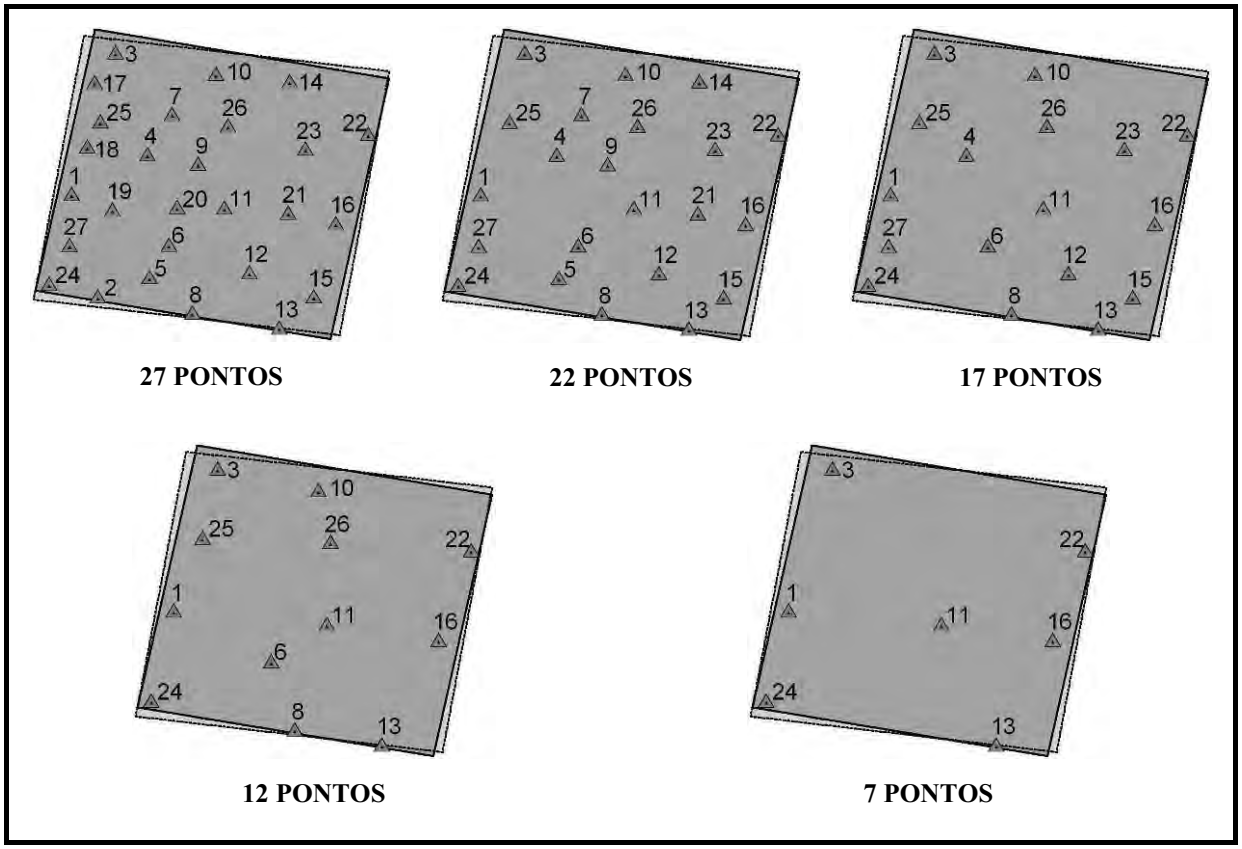


FIGURA 14: Distribuição dos pontos de apoio para os diferentes processamentos.

Como será mostrado, a fim de avaliar o potencial e a aplicabilidade dos dados produzidos a partir do estereopar HR-CCD/CBERS-2, foi verificado o comportamento das componentes E, N e H quando utilizados dois diferentes modelos matemáticos e diferentes quantidades de pontos de apoio na realização do processo de triangulação. O trabalho também faz uma análise quanto à utilização de pontos de passagem e quanto a utilização do SRTM como fonte de informação altimétrica. Tendo como base os erros observados nas coordenadas planialtimétricas dos pontos de verificação e aplicando-se os testes estatísticos propostos na seção 2.8, pôde-se constatar a qualidade dos dados extraídos nos quatro experimentos realizados.

A partir das discrepâncias observadas nos pontos de verificação, tomados como referência, aplicou-se o critério do PEC definido nas normas técnicas da cartografia nacional. Considerando-se que as imagens utilizadas possuem um GSD (*Ground Sample Distance*) de 19,5m, pressupõe-se a priori que a escala máxima a ser atendida pelos produtos cartográficos a serem gerado por esse estereopar seja de 1:100.000. Portanto, o erro padrão adotado foi o de cartas 1:100.000, os quais estão apresentados na Tabela 10, assumindo que as componentes

planimétricas possuem a mesma qualidade e que a eqüidistância entre as curvas de nível é de 50m.

TABELA 10: Valores de erro padrão para classificação de carta na escala 1:100.000.

Erro padrão para cartas 1:100.000			
	E (m)	**N (m)**	**H (m)**
Classe A	21,21	21,21	16,67
Classe B	35,36	35,36	20,00
Classe C	42,43	42,43	25,00

Os testes estatísticos de precisão e exatidão para os experimentos 1, 2, 3 e 4 foram feitos levando-se em consideração a metade do valor do erro padrão para uma carta na escala 1:100.000 (Tabela 10), tendo em vista que para esses experimentos o produto analisado foi o resultado bruto, obtido diretamente da triangulação automática do LPS e não um produto final, editado ou obtido por processo de restituição digital realizado por um operador.

4.2 Experimento 1 – Triangulação com modelo matemático polinomial e sem a utilização de pontos de passagem

Este experimento foi realizado utilizando o modelo polinomial disponível no LPS, sendo necessário para a sua utilização que inicialmente se estabeleçam certas configurações para execução do processo, como, por exemplo, o número máximo de iterações (*Maximum Normal Iterations*) e valor de convergência (*Convergence Value*), sendo adotados os valores 100 e 0,00001 *pixels*, respectivamente. Estes valores foram adotados tendo em vista que, a partir dos testes realizados, verificou-se que eles garantem que a triangulação seja realizada com um número suficiente de iterações, para que a convergência seja atingida. Para a opção de definição dos valores de desvio padrão específicos para cada ponto (*Different Weighted Values*), os valores adotados foram os calculados na seção 3.4.2 e apresentados na Tabela 6.

Para todos os experimentos realizados no LPS utilizou-se a ordem polinomial $E^n = 2$, $N^n = 1$, $H^n = 1$, $\omega^n = 0$, $\varphi^n = 0$ e $\kappa^n = 2$ na execução do procedimento de triangulação. Considerando estas ordens e as 5 diferentes quantidades/distribuição de pontos de apoio apresentados na Figura 14, foram realizados os processamentos e calculados os desvios padrão das discrepâncias observadas nos pontos de verificação. Os resultados das discrepâncias obtidas em cada um dos pontos de verificação são apresentados na Figura 15.

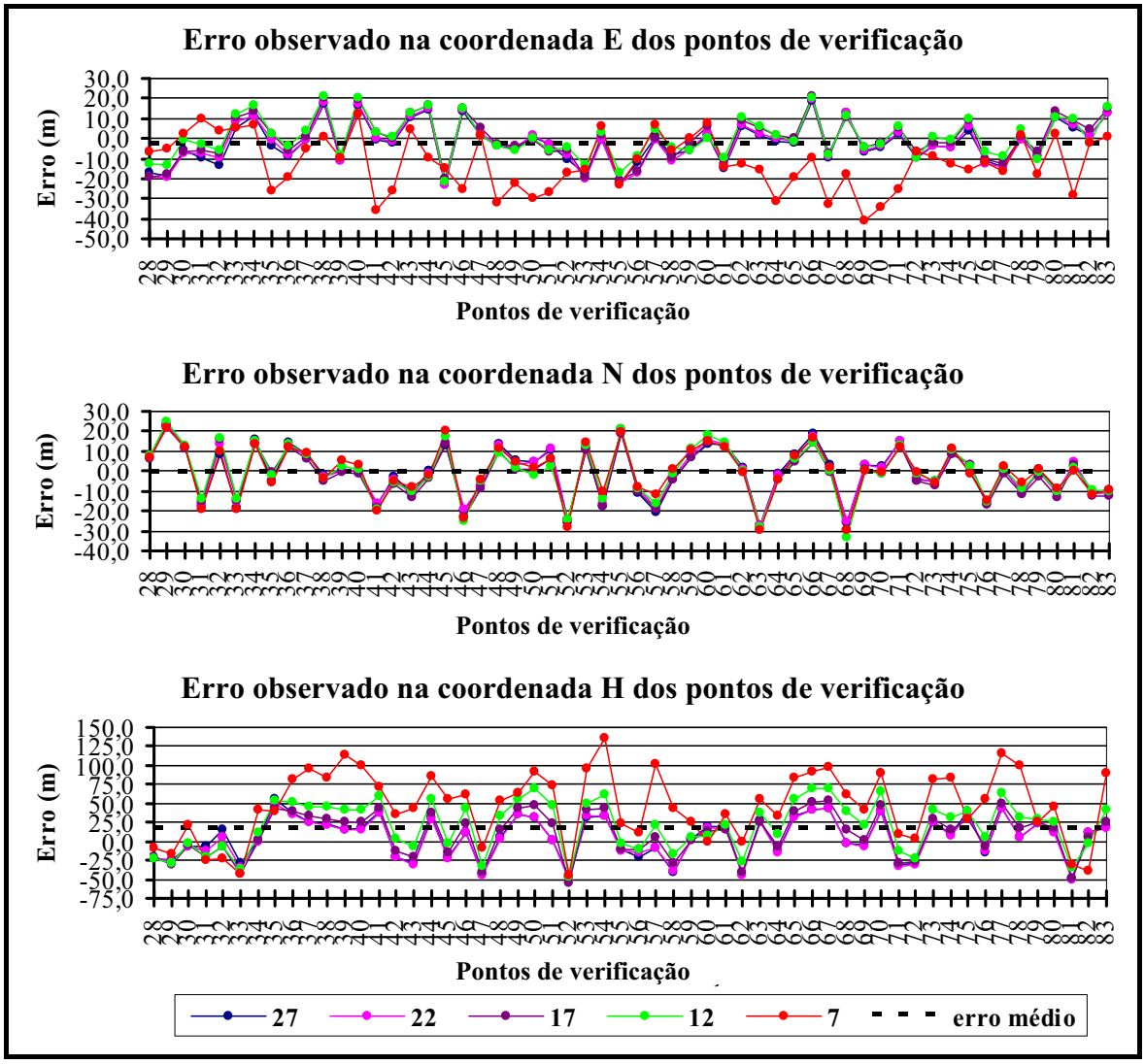


FIGURA 15: Erro observado nos pontos de verificação na realização do experimento 1, para diferentes quantidades de pontos de apoio.

Na Figura 15 pode-se observar o comportamento das discrepâncias planialtimétricas obtidas a partir da utilização do modelo polinomial. Para as diferentes quantidades de pontos de apoio, o erro na coordenada E teve um comportamento praticamente constante até um número mínimo de 12 pontos, sendo de aproximadamente 20,0m os valores máximos encontrados. Para a coordenada N observa-se um comportamento estável para as discrepâncias obtidas, mesmo para um número mínimo de 7 pontos de apoio. Na componente H, para configurações com menos que 17 pontos de apoio, os erros observados foram altos, chegando a valores maiores que 50 metros. Vale ressaltar que, considerando o valor de 1 *pixel* (19,5m) como sendo o desvio padrão de uma observação fotogramétrica, os valores de desvio padrão obtidos para as componentes E (10,45m), N (12,45m) e H (28,10m), calculados considerando-se as distribuições de 27, 22 e 17 pontos de apoio, podem ser considerados satisfatórios.

No gráfico da Figura 16 são apresentados os desvios padrões das discrepâncias calculadas para as diferentes quantidades de pontos de apoio utilizados nos processamentos. Neste primeiro experimento, onde não foram utilizados pontos de passagem, para valores inferiores a 17 pontos de apoio, os erros observados na coordenada H aumentaram gradativamente, quase que dobrando o valor do desvio padrão calculado para o caso de apenas 7 pontos de apoio.

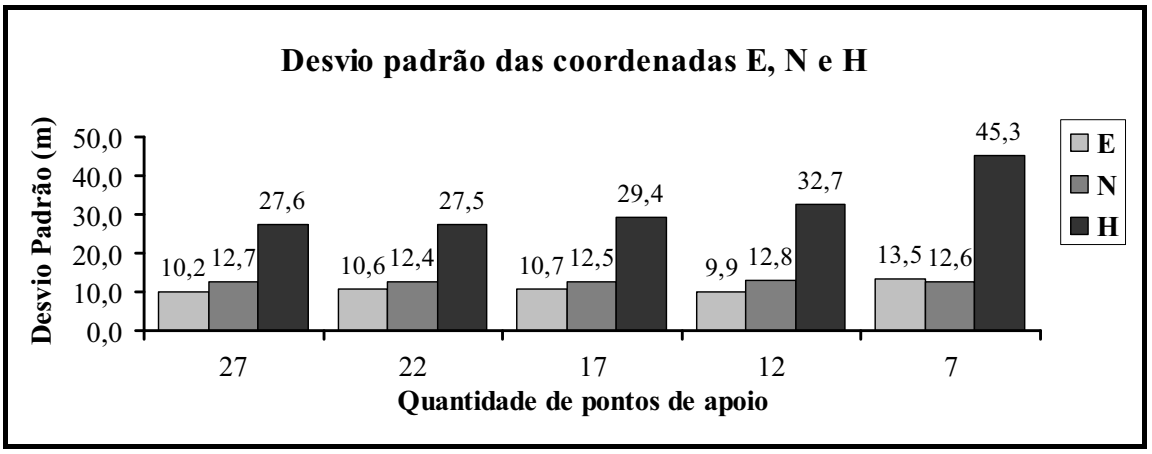


FIGURA 16: Desvio padrão das coordenadas E, N e H na realização do experimento 1, para diferentes quantidades de pontos de apoio.

Pelos resultados apresentados na Figura 16, considerando-se o GSD de 19,5m da imagem HR-CCD/CBERS-2, observa-se que os erros apresentados nas componentes planimétricas E e N foram de 0,5 *pixel* e na componente altimétrica H foram da ordem 1,5 a 2,2 *pixels*.

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas avaliações da qualidade geométrica dos dados gerados. Os erros obtidos nas avaliações geométricas foram confrontados com o PEC, o qual determina que 90% dos pontos de uma carta, quando testados, devem possuir erro inferior ao estabelecido para a classe da carta. Para realização dos testes *t* e χ^2, apresentados nas Equações 27 e 34 (seção 2.8.1), os valores tabelados obtidos para as análises foram $t_{tab.} = 2{,}01$ e $\chi^2_{tab.} = 68{,}79$, considerando um intervalo de confiança de 90%. Vale ressaltar que para os valores de EP utilizados para obtenção de $\chi^2_{calc.}$ apresentados nas tabelas das análises estatísticas dos experimentos que se seguem, considerou-se a metade do valor do erro padrão utilizado para classificação de cartas na escala 1:100.000 (Tabela 10).

TABELA 11: Resultados das análises estatísticas dos dados gerados no experimento 1.

Pontos		|Δmáx.| (m)	|Δmín.| (m)	|Δméd.| (m)	σ (m)	$\|t\|_{calc.}$	$\chi^2_{calc.}$ Classe A	$\chi^2_{calc.}$ Classe B	$\chi^2_{calc.}$ Classe C	Classe Atendida
27	E	23,44	0,42	2,24	10,17	1,65 ***ST****	50,59	18,21	12,65	***Classe A***
	N	27,31	0,13	0,50	12,68	0,30 ***ST****	78,58	28,29	19,65	***Classe B***
	H	54,84	1,28	5,59	27,56	1,52 ***ST****	601,60	417,78	267,38	*Sem Classe*
22	E	22,75	0,19	1,89	10,60	1,33 ***ST****	54,91	19,77	13,73	***Classe A***
	N	27,46	0,03	0,26	12,42	0,16 ***ST****	75,38	27,14	18,85	***Classe B***
	H	51,25	0,61	4,24	27,55	1,15 ***ST****	600,98	417,35	267,10	*Sem Classe*
17	E	20,78	0,06	0,23	10,75	0,16 ***ST****	56,50	20,34	14,12	***Classe A***
	N	29,70	0,46	1,81	12,50	1,09 ***ST****	76,35	27,49	19,09	***Classe B***
	H	54,91	1,65	9,40	29,42	2,39 ***CT****	685,43	475,99	304,63	*Sem Classe*
12	E	21,63	0,08	0,66	9,89	0,50 ***ST****	47,86	17,23	11,96	***Classe A***
	N	33,01	0,08	0,62	12,80	0,37 ***ST****	80,07	28,83	20,02	***Classe B***
	H	69,59	2,24	20,79	32,71	4,76 ***CT****	847,23	588,35	376,55	*Sem Classe*
7	E	41,01	0,02	11,96	13,51	6,62 ***CT****	89,26	32,13	22,32	***Classe B***
	N	29,90	0,08	0,45	12,65	0,27 ***ST****	78,19	28,15	19,55	***Classe B***
	H	135,56	0,22	47,05	45,27	7,78 ***CT****	1623,39	1127,35	721,50	*Sem Classe*

CT* **- Com Tendência;** ***ST**** **- Sem Tendência**

A Tabela 11 mostra a análise das discrepâncias planialtimétricas em E, N e H, resultantes das comparações realizadas nas triangulações, para os diversos números de pontos de apoio. Observa-se que as médias das discrepâncias obtidas nas coordenadas H mostram a existência de erro sistemático não parametrizado pelo modelo polinomial, sendo esse erro mais acentuado nos casos em que se utilizaram apenas 12 e 7 pontos de apoio. Esse erro pode estar relacionado à reconstrução inexata da geometria projetiva (por linha) durante a geração das imagens. Verifica-se que, exceto para a coordenada E no caso onde se utilizou apenas 7 pontos de apoio, as componentes planimétricas não apresentam tendência, sendo a componente E aceita nos testes de precisão para as classes A, B e C e a componente N aceita para as classes B e C de cartas 1:100.000, dentro do intervalo de confiança de 90%. Para a componente H, nas configurações com 17, 12 e 7 pontos, verificou-se tendência nas observações. A componente altimétrica não satisfez os requisitos para nenhuma das classes de cartas 1:100.000 no processo de triangulação, ficando os valores obtidos pelo teste χ^2 muito distantes do valor limite tabelado.

4.3 Experimento 2 – Triangulação com modelo matemático polinomial e utilizando pontos de passagem

Para a realização desse experimento, foram gerados de forma automática, por meio de um algoritmo de correlação existente no LPS, 90 pontos de passagem. Gerados os pontos, fez-se uma verificação e edição manual desses, sendo isso necessário devido ao fato de o procedimento automático geralmente gerar pontos correlacionados errados. Desses 90 pontos iniciais, depois de realizada uma criteriosa análise visual dos pontos homólogos e observando as informações constantes no relatório gerado pelo LPS, 68 pontos foram escolhidos para serem utilizados no experimento.

Com a utilização de pontos de passagem espera-se que o modelo estereoscópico fique mais concatenado, melhorando a geometria e assim propiciando melhores resultados no processo de triangulação. Na Figura 17 pode-se observar a distribuição espacial, sobre o modelo estereoscópico, dos 68 pontos de passagem escolhidos.

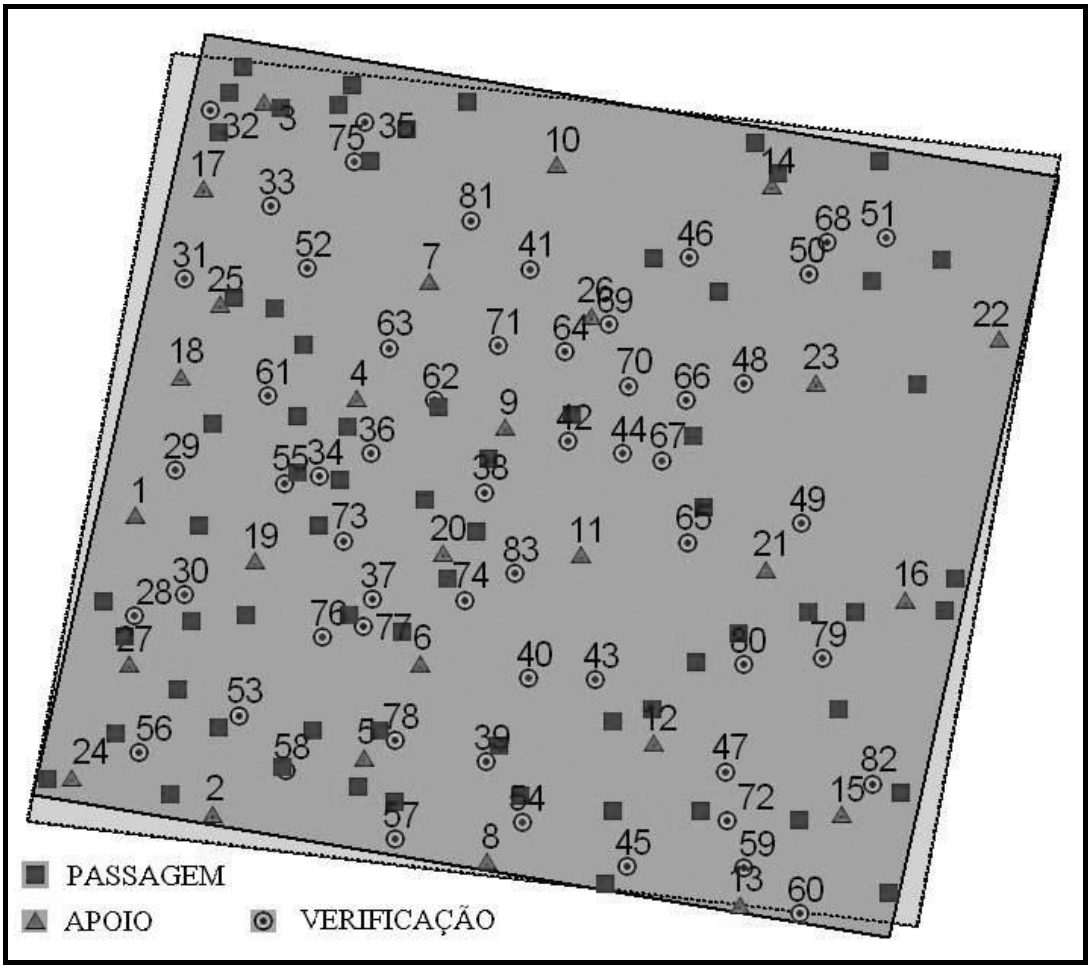


FIGURA 17 – Distribuição dos pontos de passagem sobre o estereopar HR-CCD/CBERS-2.

Para os pontos de passagem gerados por correlação automática, as precisões adotadas para as coordenadas E, N e H foram de 200 metros. Os resultados conseguidos após a realização da triangulação são apresentados pelos gráficos da Figura 18, onde se observam as discrepâncias obtidas nos pontos de verificação.

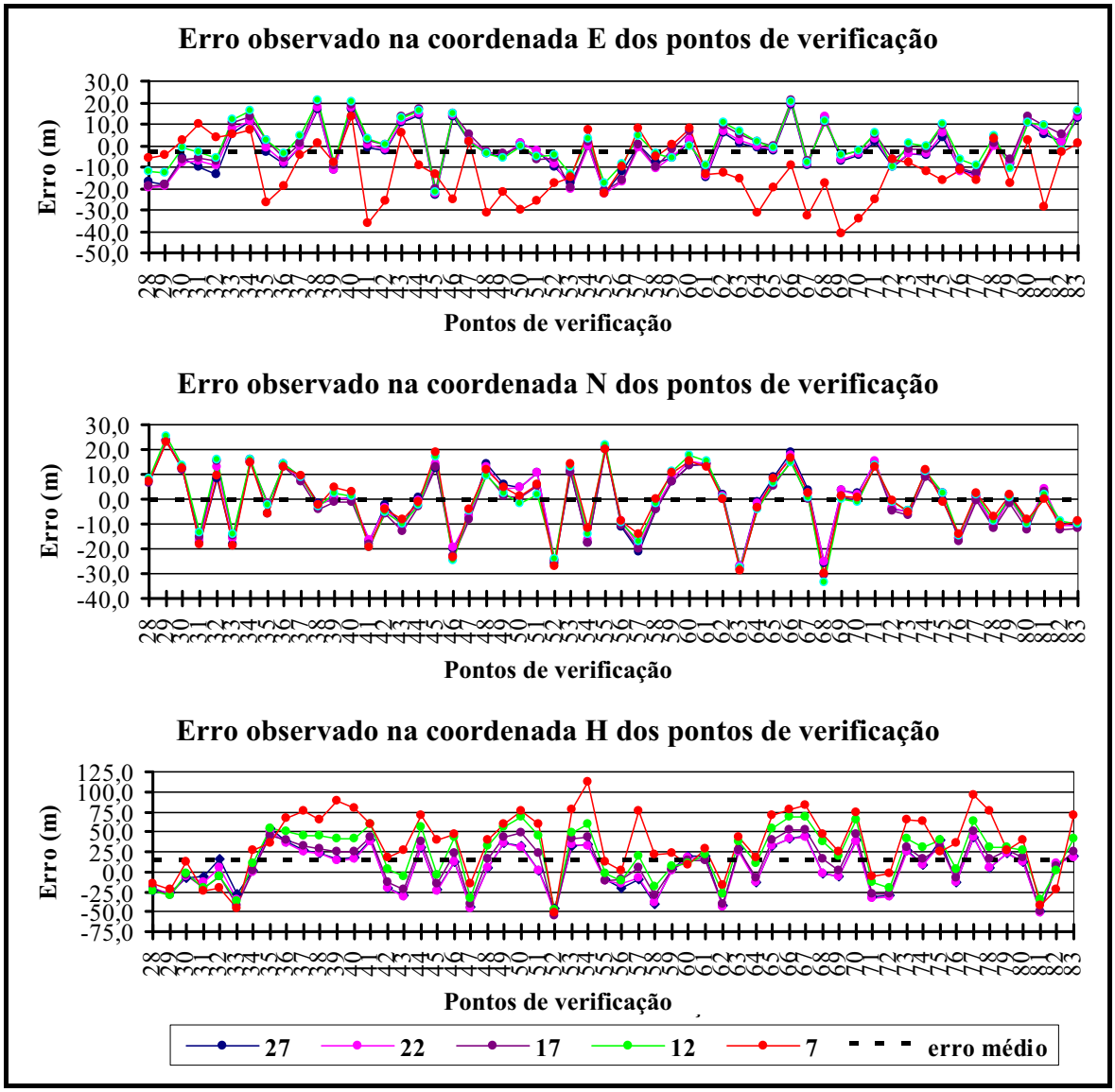


FIGURA 18: Erro observado nos pontos de verificação na realização do experimento 2, para diferentes quantidades de pontos de apoio.

A partir dos gráficos da Figura 18 percebe-se que o comportamento dos erros nas coordenadas E, N e H foram similares aos obtidos no experimento 1, onde não se utilizou pontos de passagem. O erro em E teve um comportamento constante até um número mínimo de 12 pontos. Na coordenada N observa-se um comportamento estável para as discrepâncias observadas, mesmo para um número mínimo de 7 pontos de apoio na cena. Já para componente H obteve-se um melhor resultado que o conseguido com o experimento 1 para o

caso de apenas 7 pontos de apoio. O erro máximo observado na componente altimétrica foi de 111,0m, sendo que para o experimento 1 o erro máximo observado foi de 135,0m. Conforme os valores mostrados no gráfico da Figura 19, observa-se que, para o caso de apenas 7 pontos, o valor de desvio padrão das discrepâncias observadas em H diminuiu 6,0m.

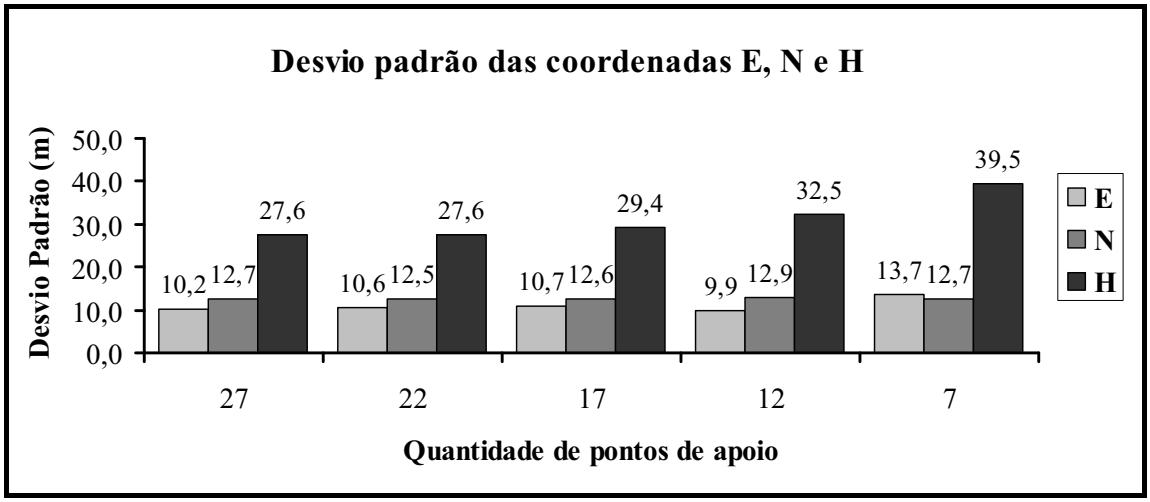


FIGURA 19: Desvio padrão das coordenadas E, N e H na realização do experimento 2, para diferentes quantidades de pontos de apoio.

Observando a Figura 19, para o experimento com a utilização de pontos de passagem os erros apresentados nas componentes planimétricas E e N foram de 0,5 *pixel*, ou seja, idêntico ao experimento 1, e para componente H foram da ordem 1,5 a 2,0 *pixels*, apresentando, portanto, uma sensível melhora para altimetria.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos nas avaliações da qualidade geométrica dos dados gerados. Como se pode observar, a não ser pelos valores apresentados pela coordenada H para o caso de 7 pontos de apoio, não houve melhora significativa nos dados gerados a partir dos processos de triangulação fazendo uso de pontos de passagem. Para esse experimento, em todas as configurações utilizadas e semelhantemente ao observado no experimento anterior, as componentes E e N não apresentam tendência, exceto a coordenada E no caso de 7 pontos de apoio. Os resultados obtidos mostram que para a componente E as precisões são compatíveis com as classes A, B e C e para a componente N com as classes B e C de cartas em escala 1:100.000. A componente H apresentou tendência nas observações para as configurações de 17, 12 e 7 pontos. Para os testes de precisão, a componente altimétrica H não atendeu a nenhuma das classes de cartas 1:100.000 no processo de triangulação, ficando os valores obtidos pelo teste χ^2, assim como no experimento1, muito distantes do valor limite tabelado.

TABELA 12: Resultados das análises estatísticas dos dados gerados no experimento 2.

Pontos		|Δmáx.| (m)	|Δmín.| (m)	|Δméd.| (m)	σ (m)	$\|t\|$ calc.	χ^2 calc. Classe A	χ^2 calc. Classe B	χ^2 calc. Classe C	Classe Atendida
27	E	22,60	0,33	2,22	10,16	1,63 ***ST****	50,48	18,17	12,62	***Classe A***
	N	26,08	0,15	0,46	12,73	0,27 ***ST****	79,18	28,51	19,80	***Classe B***
	H	54,90	1,35	5,63	27,57	1,53 ***ST****	602,04	418,08	267,57	*Sem Classe*
22	E	22,58	0,23	1,87	10,59	1,32 ***ST****	54,84	19,74	13,71	***Classe A***
	N	25,52	0,17	0,17	12,48	0,10 ***ST****	76,10	27,40	19,03	***Classe B***
	H	50,70	0,54	4,29	27,56	1,16 ***ST****	601,35	417,61	267,27	*Sem Classe*
17	E	20,69	0,03	0,21	10,74	0,15 ***ST****	56,41	20,31	14,10	***Classe A***
	N	28,03	0,10	1,68	12,59	1,01 ***ST****	77,45	27,88	19,36	***Classe B***
	H	52,45	1,60	9,34	29,35	2,38 ***CT****	682,36	473,86	303,27	*Sem Classe*
12	E	21,09	0,10	0,72	9,89	0,54 ***ST****	47,86	17,23	11,97	***Classe A***
	N	27,49	0,23	0,43	12,89	0,25 ***ST****	81,17	29,22	20,29	***Classe B***
	H	69,03	0,66	20,55	32,45	4,74 ***CT****	834,11	579,24	370,72	*Sem Classe*
7	E	36,03	0,39	11,62	13,69	6,35 ***CT****	91,56	32,96	22,89	***Classe B***
	N	29,05	0,02	0,33	12,70	0,19 ***ST****	78,85	28,39	19,71	***Classe B***
	H	111,86	1,65	35,04	39,51	6,64 ***CT****	1236,27	858,52	549,45	*Sem Classe*

CT* **- Com Tendência;** ***ST**** **- Sem Tendência**

4.4 Experimento 3 – Triangulação com modelo matemático polinomial e as informações altimétricas do SRTM

Neste experimento foram utilizados os mesmos 68 pontos de passagem gerados no experimento 2, fazendo-se apenas a substituição dos valores altimétricos (H) de todos os pontos por valores obtidos do MDE do SRTM. Pretende-se com esse experimento avaliar a influência da utilização dos dados altimétricos disponibilizados gratuitamente pela NASA no processamento das imagens HR-CCD/CBERS-2. Para se ter uma idéia das diferenças altimétricas apresentadas entre o MDE do IBGE e do SRTM, capturou-se o valor de elevação em ambos os modelos a partir de coordenadas planimétricas conhecidas. Utilizando os 27 pontos de apoio e os 56 pontos de verificação realizou-se, para efeito de teste, a diferença entre as coordenadas H extraídas dos dois modelos (H_{SRTM} - H_{IBGE}), obtendo-se como resultado um valor de 4,18m de desvio padrão para as discrepâncias observadas. Entre as diferenças altimétricas obtidas, 15,61m foi o maior valor observado e 0,03m o menor valor obtido. Destes 27 pontos de apoio e 56 pontos de verificação utilizados para obtenção da diferença entre as coordenadas H extraídas dos dois modelos, 65 apresentaram diferenças inferiores a 5,00m.

Os 68 pontos de passagem, para o caso desse experimento, foram utilizados apenas como apoio vertical, sendo 20,0m a precisão altimétrica adotada. Os resultados conseguidos após a realização da triangulação são apresentados pelos gráficos da Figura 20, onde se observam as discrepâncias obtidas nos pontos de verificação.

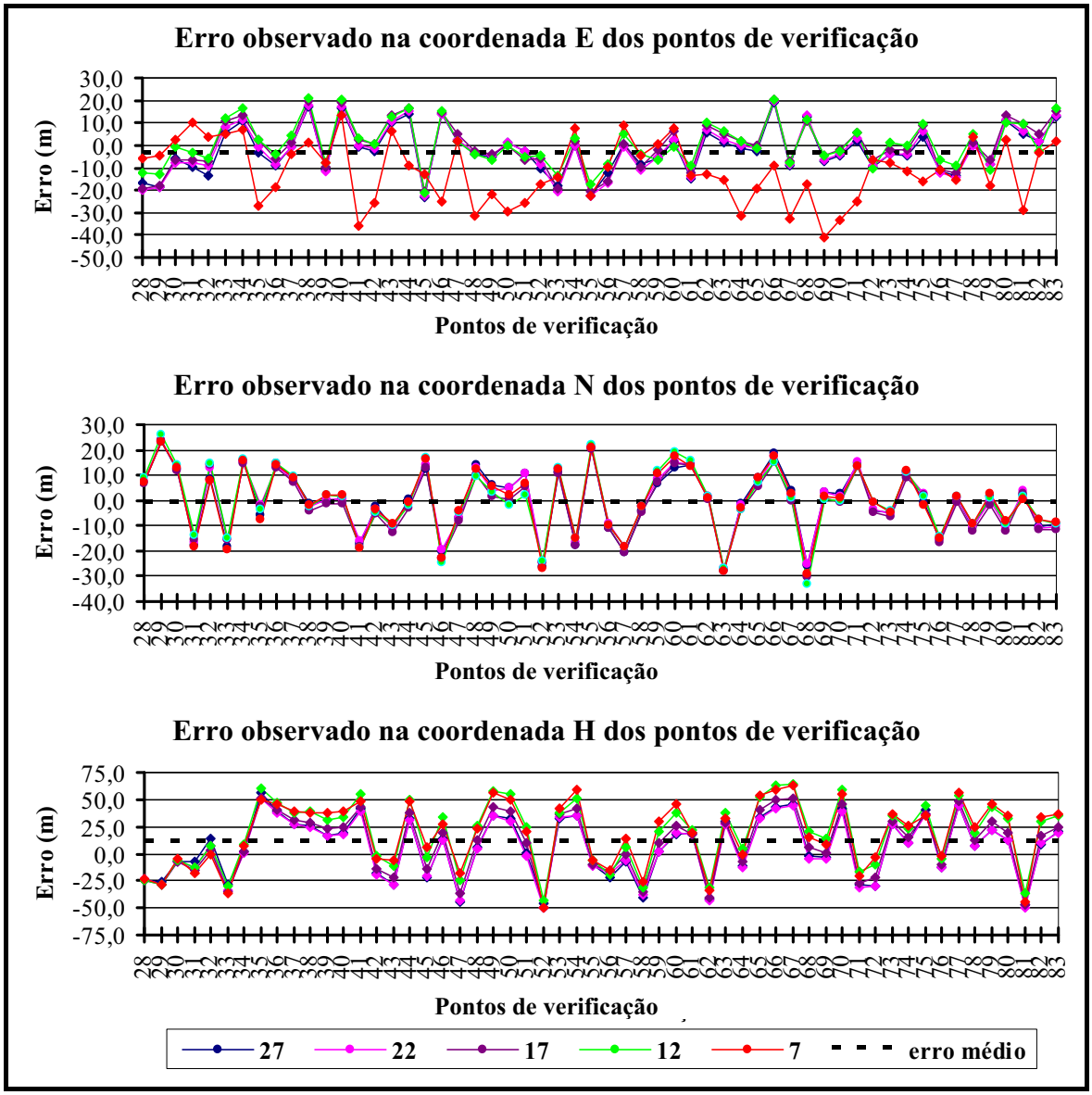


FIGURA 20: Erro observado nos pontos de verificação na realização do experimento 3, para diferentes quantidades de pontos de apoio.

A partir dos gráficos da Figura 20 percebe-se que o comportamento dos erros nas coordenadas E e N são similares aos obtidos no experimento 1 e 2. A coordenada E apresenta um comportamento constante até um número mínimo de 12 pontos e a coordenada N apresenta um comportamento estável para as discrepâncias observadas, mesmo para um número mínimo de 7 pontos de apoio. Na componente H obteve-se uma melhora significativa

para distribuições com 17, 12 e 7 pontos de apoio. Com a utilização do SRTM como apóio vertical, o erro máximo observado foi de 65,0m, contra os 111,0m e 135,0m observados nos experimentos 1 e 2, respectivamente. Conforme os valores mostrados no gráfico da Figura 21, observa-se que, para o caso de menos pontos de apoio na cena, como 17, 12 e 7 pontos, os valores de desvio padrão das discrepâncias observadas em H foram muito próximos dos obtidos com distribuições de 27 e 22 pontos de apoio.

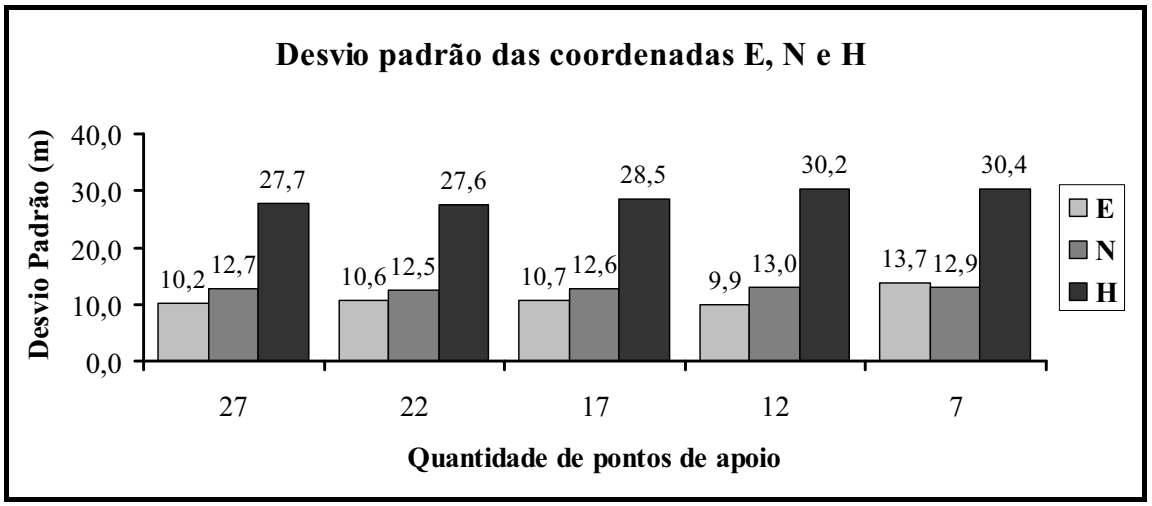


FIGURA 21: Desvio padrão das coordenadas E, N e H na realização do experimento 3, para diferentes quantidades de pontos de apoio.

Observando a Figura 21, para o experimento com a utilização de pontos de passagem com os valores altimétricos obtidos do SRTM, os erros apresentados nas componentes planimétricas E e N foram de 0,5 *pixel*, ou seja, idêntico aos experimentos 1 e 2, e para componente H foram da ordem 1,5 *pixels*, apresentando, portanto, uma sensível melhora para altimetria.

Na Tabela 13 são apresentados os resultados obtidos nas avaliações da qualidade geométrica dos dados gerados por esse experimento, no qual se fez uso de pontos de passagem com referencial altimétrico obtido do MDE do SRTM. Observa-se que, a não ser pela melhoria apresentada pela componente H para os casos em que se utilizam menos pontos de apoio, todos os outros dados são similares aos conseguidos nos experimentos 1 e 2.

TABELA 13: Resultados das análises estatísticas dos dados gerados, ao incorporar as informações do SRTM.

Pontos		|Δmáx.| (m)	|Δmín.| (m)	|Δméd.| (m)	σ (m)	$\|t\|_{calc.}$	$\chi^2_{calc.}$ Classe A	$\chi^2_{calc.}$ Classe B	$\chi^2_{calc.}$ Classe C	Classe Atendida
27	E	23,35	0,34	2,23	10,16	1,64 ***ST****	50,44	18,16	12,61	***Classe A***
	N	27,21	0,09	0,47	12,72	0,28 ***ST****	79,15	28,49	19,79	***Classe B***
	H	55,91	0,53	6,21	27,73	1,68 ***ST****	609,16	423,03	270,74	*Sem Classe*
22	E	22,69	0,24	1,89	10,59	1,33 ***ST****	54,80	19,73	13,70	***Classe A***
	N	27,17	0,19	0,16	12,48	0,10 ***ST****	76,09	27,39	19,02	***Classe B***
	H	51,48	0,65	5,15	27,62	1,40 ***ST****	604,01	419,45	268,45	*Sem Classe*
17	E	20,76	0,03	0,21	10,73	0,15 ***ST****	56,34	20,28	14,08	***Classe A***
	N	30,13	0,01	1,65	12,62	0,99 ***ST****	77,87	28,03	19,47	***Classe B***
	H	51,44	0,84	9,49	28,45	2,49 ***CT****	641,25	445,31	285,00	*Sem Classe*
12	E	21,46	0,06	0,74	9,91	0,56 ***ST****	48,02	17,29	12,00	***Classe A***
	N	33,22	0,42	0,20	13,00	0,11 ***ST****	82,64	29,75	20,66	***Classe B***
	H	64,42	2,15	18,56	30,21	4,60 ***CT****	722,96	502,05	321,31	*Sem Classe*
7	E	40,78	0,32	11,39	13,70	6,22 ***CT****	91,80	33,05	22,95	***Classe B***
	N	29,37	0,23	0,38	12,87	0,22 ***ST****	81,03	29,17	20,26	***Classe B***
	H	62,65	0,01	18,22	30,40	4,49 ***CT****	731,98	508,32	325,33	*Sem Classe*

CT* **- Com Tendência;** ***ST**** **- Sem Tendência**

4.5 Experimento 4 – Triangulação com modelo matemático DLT

Neste experimento foi utilizado o modelo matemático DLT. Para tanto se fez uso do software PDLT no qual a equação DLT foi implementada na forma linear usando o modelo estocástico mais simples, onde as coordenadas dos pontos de apoio são livres de erro. Na realização do processo de ajustamento das coordenadas, essas são injuncionadas na forma absoluta, ou seja, elas são consideradas como constantes, sendo atribuído o mesmo peso às coordenadas E, N e H dos 27 pontos de apoio utilizados. Os dados de entrada necessários ao processo de triangulação realizado pelo software, como as coordenadas imagens (linha, coluna) dos pontos de apoio e verificação, foram retirados do relatório da triangulação do LPS, onde são mostradas as observações feitas neste sistema. Ao final do processamento foram calculados os valores de E, N e H pelo modelo DLT. A partir das coordenadas calculadas pode-se obter os valores das discrepâncias observadas nos pontos de verificação, as quais são apresentadas nos gráficos da Figura 22.

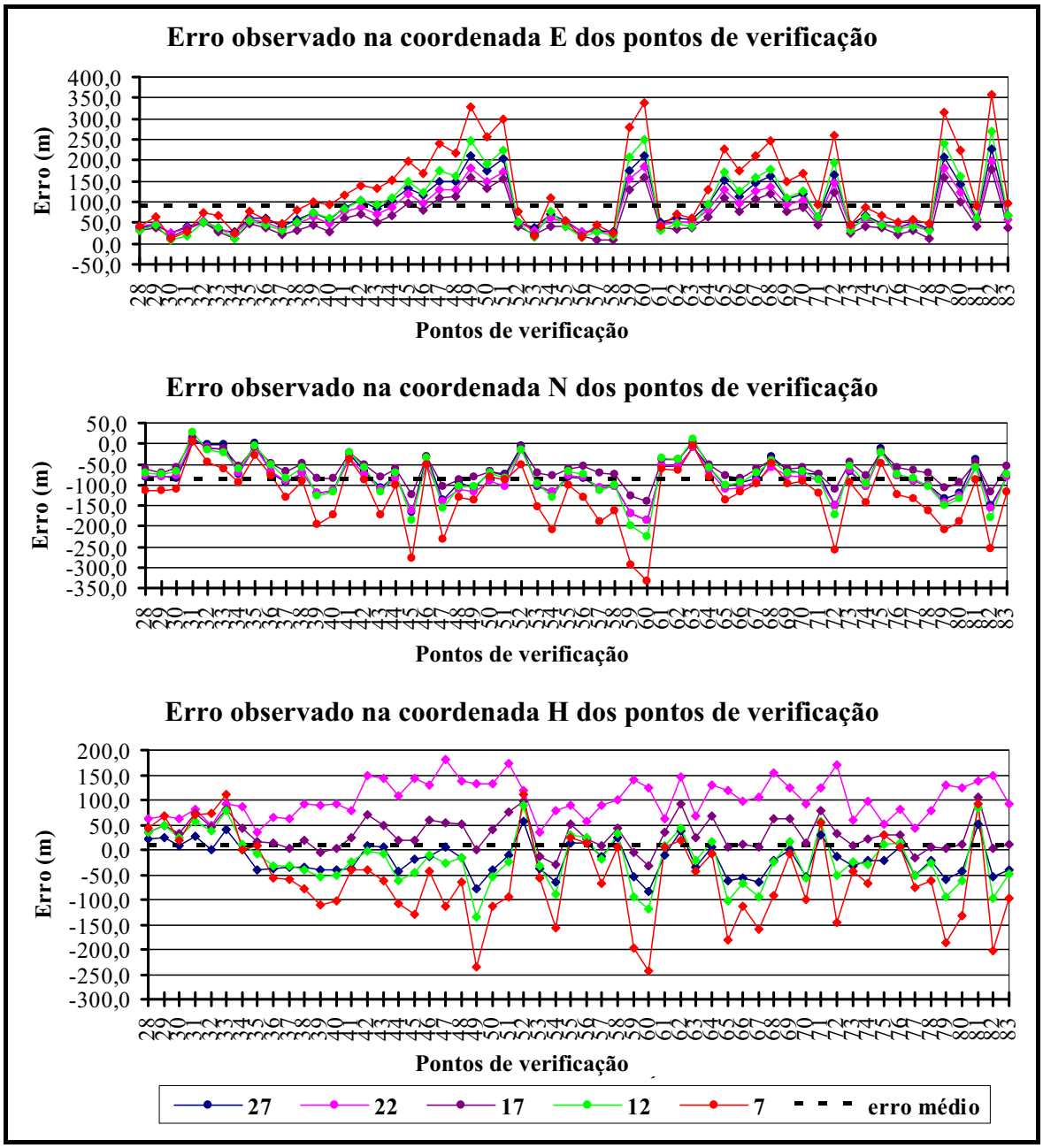


FIGURA 22: Erro observado nos pontos de verificação na realização do experimento 4, para diferentes quantidades de pontos de apoio.

Na Figura 22 são apresentadas as discrepâncias observadas em E, N e H a partir da utilização do modelo DLT. A partir da análise visual é possível verificar que os erros foram maiores que os observados com o modelo polinomial, com os valores estatísticos apresentados na Tabela 14 reforçando essa conclusão. Para as diferentes quantidades de pontos de apoio, o erro na coordenada E teve uma tendência semelhante nas distribuições com 27 e 12 pontos de apoio na cena, sendo um erro máximo de 359,0m observado quando se utilizou apenas 7 pontos. Para a coordenada N observa-se um comportamento análogo ao

observado em E, com um erro máximo de 335,0m obtido quando um número mínimo de 7 pontos de apoio foi utilizado no processo de triangulação. Na componente H, para valores menores que 17 pontos de apoio, observa-se que os valores de discrepâncias têm um aumento drástico, chegando a erros da ordem de 250,0m. Para as três componentes planialtimétricas aqui estudadas, os melhores resultados foram conseguidos quando se utilizou 17 pontos de apoio para realização da triangulação.

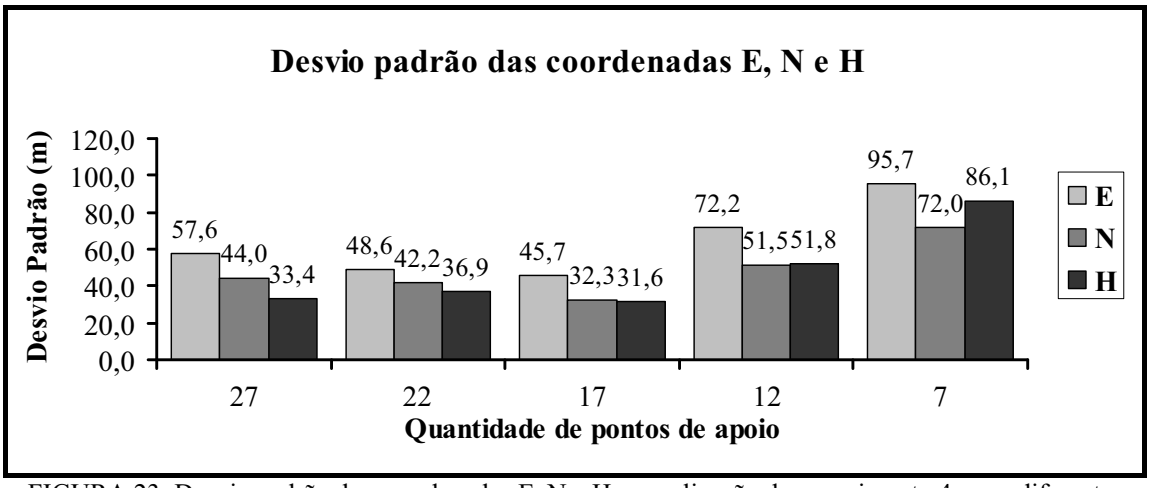


FIGURA 23: Desvio padrão das coordenadas E, N e H na realização do experimento 4, para diferentes quantidades de pontos de apoio.

Na Figura 23, pode-se notar que para baixas quantidades de pontos de apoio (12 e 7) os erros aumentam consideravelmente e, no caso de 7 pontos, obtêm-se valores de discrepância duas vezes maiores que as observadas na situação de 17 pontos.

Na utilização do modelo DLT os erros apresentados nas componentes planialtimétricas E, N e H foram de 1,5 a 4,5 *pixels*, ou seja, muito piores que os observados na utilização do modelo polinomial.

Da mesma forma que realizado para os outros experimentos, a Tabela 14 mostra os resultados obtidos nas avaliações da qualidade geométrica dos dados gerados a partir da aplicação do modelo DLT. Observando os resultados verifica-se que E, N e H, para todas as cinco configurações de pontos de apoio, apresentam tendência para os valores de *t* calculados. No teste de precisão, as coordenadas E, N e H foram rejeitadas para a escala 1:100.000 para qualquer uma das 5 diferentes quantidades de pontos de apoio. Os testes de precisão também foram analisados a um intervalo de confiança de 90%.

TABELA 14: Resultados das análises estatísticas dos dados gerados no experimento 4 – PEC cartas 1:100.000.

Pontos		|Δmáx.| (m)	|Δmín.| (m)	|Δméd.| (m)	σ (m)	$\|t\|_{calc.}$	$\chi^2_{calc.}$ Classe A	$\chi^2_{calc.}$ Classe B	$\chi^2_{calc.}$ Classe C	Classe Atendida
27	**E**	228,03	26,26	90,86	57,59	11,81 ***CT****	1621,35	583,68	405,34	*Sem Classe*
	N	187,36	0,17	80,83	44,03	13,86 ***CT****	947,90	341,24	236,97	*Sem Classe*
	H	84,03	0,03	18,53	33,44	4,15 ***CT****	885,50	614,93	393,56	*Sem Classe*
22	**E**	198,32	22,67	80,08	48,59	12,33 ***CT****	1154,11	415,48	288,53	*Sem Classe*
	N	186,17	9,48	85,84	42,22	15,35 ***CT****	871,32	313,68	217,83	*Sem Classe*
	H	180,61	34,17	102,08	36,92	20,69 ***CT****	1079,50	749,65	479,78	*Sem Classe*
17	**E**	178,19	8,35	64,17	45,68	10,51 ***CT****	1020,05	367,22	255,01	*Sem Classe*
	N	140,72	4,27	63,01	32,28	14,74 ***CT****	509,39	183,38	127,35	*Sem Classe*
	H	104,29	0,43	30,53	31,62	7,23 ***CT****	791,71	549,80	351,87	*Sem Classe*
12	**E**	270,00	9,19	94,30	72,20	9,77 ***CT****	2548,24	917,37	637,06	*Sem Classe*
	N	225,74	6,47	82,87	51,48	12,15 ***CT****	1295,79	466,48	323,95	*Sem Classe*
	H	135,91	1,49	20,11	51,75	2,91 ***CT****	2121,08	1472,97	942,70	*Sem Classe*
7	**E**	358,89	12,15	129,45	95,68	10,12 ***CT****	4475,73	1611,26	1118,93	*Sem Classe*
	N	334,94	5,09	125,09	71,97	13,12 ***CT****	2532,39	911,66	633,10	*Sem Classe*
	H	244,16	0,36	56,18	86,09	4,88 ***CT****	5869,50	4076,04	2608,67	*Sem Classe*

CT* **- Com Tendência**

Tendo em vista que para a escala 1:100.000 nenhuma das classes foi atendida, optou-se por refazer os testes de precisão e exatidão para o modelo DLT, mas agora considerando a escala 1:250.000. Para essa escala, os valores de erro padrão para as coordenadas planimétricas E e N são de 53,03m (classe A), 88,39m (classe B) e 106,07m (classe C) e para a coordenada altimétrica H, considerando uma eqüidistância de 100m entre as curvas de nível, são de 33,33m (classe A), 40,00m (classe B) e 50,00m (classe C). Os resultados obtidos para esses novos testes estão apresentados na Tabela 15, na qual os valores de $\chi^2_{calc.}$ foram obtidos considerando-se a metade do valor do erro padrão utilizado para classificação de cartas 1:250.000.

TABELA 15: Resultados das análises estatísticas dos dados gerados no experimento 4 – PEC cartas 1:250.000.

Pontos		|Δmáx.| (m)	|Δmín.| (m)	|Δméd.| (m)	σ (m)	$\|t\|_{calc.}$	$\chi^2_{calc.}$ Classe A	$\chi^2_{calc.}$ Classe B	$\chi^2_{calc.}$ Classe C	Classe Atendida
27	E	228,03	26,26	90,86	57,59	11,81 ***CT****	259,42	93,39	64,85	***Classe C***
	N	187,36	0,17	80,83	44,03	13,86 ***CT****	151,66	54,60	37,92	***Classe B***
	H	84,03	0,03	18,53	33,44	4,15 ***CT****	221,37	153,73	98,39	*Sem Classe*
22	E	198,32	22,67	80,08	48,59	12,33 ***CT****	184,66	66,48	46,16	***Classe B***
	N	186,17	9,48	85,84	42,22	15,35 ***CT****	139,41	50,19	34,85	***Classe B***
	H	180,61	34,17	102,08	36,92	20,69 ***CT****	269,87	187,41	119,94	*Sem Classe*
17	E	178,19	8,35	64,17	45,68	10,51 ***CT****	163,21	58,75	40,80	***Classe B***
	N	140,72	4,27	63,01	32,28	14,74 ***CT****	81,50	29,34	20,38	***Classe B***
	H	104,29	0,43	30,53	31,62	7,23 ***CT****	197,93	137,45	87,97	*Sem Classe*
12	E	270,00	9,19	94,30	72,20	9,77 ***CT****	407,72	146,78	101,93	*Sem Classe*
	N	225,74	6,47	82,87	51,48	12,15 ***CT****	207,33	74,64	51,83	***Classe C***
	H	135,91	1,49	20,11	51,75	2,91 ***CT****	530,27	368,24	235,68	*Sem Classe*
7	E	358,89	12,15	129,45	95,68	10,12 ***CT****	716,12	257,80	179,03	*Sem Classe*
	N	334,94	5,09	125,09	71,97	13,12 ***CT****	405,18	145,87	101,30	*Sem Classe*
	H	244,16	0,36	56,18	86,09	4,88 ***CT****	1467,37	1019,01	652,17	*Sem Classe*

CT* **- Com Tendência**

Observando os resultados apresentados na Tabela 15, verifica-se que E, N e H, para todas as cinco configurações de pontos de apoio, apresentam tendência para os valores de *t* calculados. No teste de precisão, as coordenadas E, N e H foram rejeitadas para cartas classe A na escala 1:250.000 para qualquer uma das 5 diferentes quantidades de pontos de apoio, sendo que para as configurações com 22 e 17 pontos de apoio a planimetria atendeu a classe B de cartas 1:250.000. A componente altimétrica H não foi aprovada em nenhum dos testes realizados.

A título de comparação são apresentados na Figura 24 os EMQ's das coordenadas planialtimétricas ajustadas, obtidas com a aplicação dos dois modelos matemáticos (polinomial e DLT) para as cinco diferentes combinações de pontos de apoio estudadas. Os resultados referentes ao modelo polinomial apresentados no gráfico são os obtidos no experimento 1, onde, semelhantemente ao processamento da DLT, não se utilizou pontos de passagem para realização da triangulação.

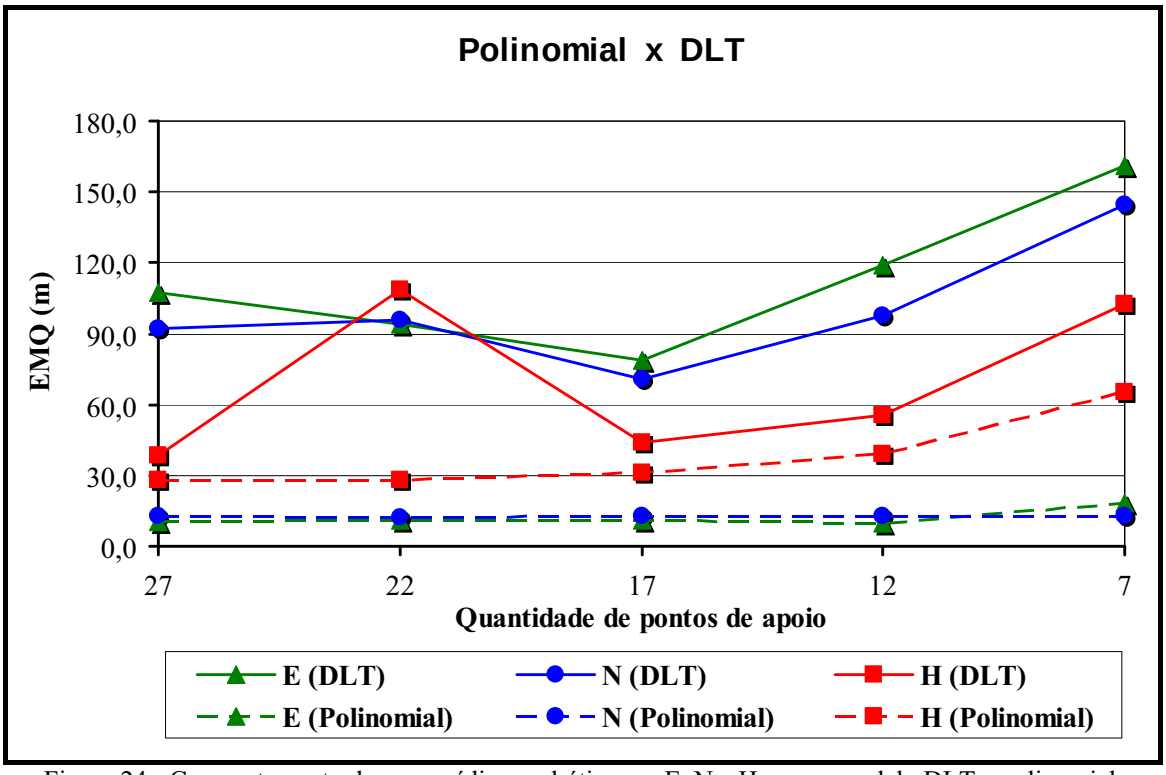


Figura 24 - Comportamento do erro médio quadrático em E, N e H para o modelo DLT e polinomial, considerando diferentes quantidades de pontos de apoio.

Observa-se que no modelo polinomial, para quantidades de 27 até 7 pontos de apoio, o EMQ nas coordenadas planimétricas é praticamente constante, apresentando valores da ordem de 10,5m (E) e 12,5m (N), com um erro ligeiramente maior na coordenada E quando se utilizou apenas 7 pontos (18,0m). Para a coordenada altimétrica, com quantidades de 27, 22 e 17 pontos, observou-se praticamente o mesmo EMQ (29,0m), com uma ligeira piora para a configuração de 12 pontos (39,0m) e praticamente dobrando de valor para a configuração de 7 pontos (65,0m). Comparando a exatidão planimétrica e altimétrica conseguida na análise realizada com o modelo polinomial, verifica-se que a planimétrica é aproximadamente duas vezes melhor que a altimétrica, fato esperado, tendo em vista os erros estimados a partir das equações propostas por Kraus (2000) e apresentadas na seção 3.4.2.

Para o modelo DLT a planimetria apresentou resultados piores que os observados na componente altimétrica, sendo os menores EMQ's observados em E (79,0m), N (71,0m) e H (44,0m) quando se utilizou a configuração de 17 pontos de apoio. Na configuração de 22 pontos foram observados resíduos elevados na componente altimétrica de todos os pontos de verificação. Supõe-se que tal fato esteja relacionado a distribuição dos pontos para a configuração com 22 pontos de apoio.

4.6 Geração de ortoimagens no LPS e controle de qualidade

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos pela utilização do MDE gerado no LPS a partir do estereopar HR-CCD/CBERS-2. Para a geração automática do MDE no LPS utilizou-se a configuração de 27 pontos de apoio apresentada no experimento 1. Para o processo de geração do MDE foi utilizado o módulo *DTM Extraction*, onde se fez necessário definir parâmetros como: formato de saída do MDE (DEM, TIN, ASCII,...), unidade de medida, espaçamento dos pontos do *grid* no terreno, entre outros.

Na definição do espaçamento do *grid* no terreno (direções E e N) a ser utilizado no modelo a ser gerado, o manual do LPS sugere que o valor seja calculado em função da dimensão do *pixel* da imagem original, na escala da imagem. Conhecendo-se essa dimensão, se recomenda como espaçamento das células do *grid* algo em torno de 10 vezes este valor, o que, para as imagens HR-CCD/CBERS-2, seria de 200,0 metros. Já pela *International Systemap Corp.* (I.S.M., 1997), o valor sugerido é de 3,0 a 4,0mm na escala do produto cartográfico a ser produzido. Como a pretensão desse estudo é de que se consiga gerar cartas na escala 100.000 a partir das imagens HR-CCD/CBERS-2, para um valor de 3,0mm tem-se um *grid* de 300,0m.

Neste trabalho, considerando-se como muito elevado os valores de 200,0m e 300,0m calculados a partir dos métodos aplicados, optou-se pelo valor de espaçamento de 90,0m para E e N, o que permite que os dados do SRTM, que possuem esse mesmo valor de *grid*, possam ser comparados com o novo MDE gerado.

Outro item a ser configurado na geração do MDE pelo LPS é quanto à opção de exclusão de áreas próximas a bordas, onde o erro no processo de extração do MDE é muito grande. Neste trabalho, a porcentagem de áreas excluídas próximas às bordas é de 5%, que é o valor padrão do LPS para esta opção.

Como no processo automático de geração do MDE o resultado final não é exatamente o correto, é necessário que se realize algumas edições no produto final. Devido à extensão da área de estudo, o modelo gerado neste experimento não sofreu nenhum tipo de edição, sendo utilizado na sua forma bruta na ortorretificação das duas imagens que compõem o estereopar HR-CCD/CBERS-2.

Aplicando-se os conceitos de controle de qualidade apresentados na seção 2.8, com 21 pontos de verificação planimétricos, foi realizado o controle de qualidade das ortoimagens criadas no LPS. Os 21 pontos utilizados foram escolhidos entre os 56 pontos utilizados nos experimentos, sendo selecionados de forma que ficassem homogeneamente distribuídos e

recobrissem toda a área de interesse. Feito isso, foram comparadas as coordenadas assim obtidas com as coordenadas tidas como verdadeiras (Tabela 15). Através de testes estatísticos foi verificada a qualidade geométrica das ortoimagens e realizada a sua classificação de acordo com o PEC (Tabela 16).

Para os testes apresentados na Tabela 16, considerando-se o cálculo de tamanho de amostra realizado na seção 3.4.3 (Tabela 9), foram considerados 20 graus de liberdade e um nível de significância de 10% para se obter os valores de *t* e qui-quadrado tabelados de 2,09 e 28,41, respectivamente.

TABELA 16: Discrepâncias dos pontos de verificação medidos nas ortoimagens.

Ponto	16/6/2004			1/7/2004		
	ΔE (m)	ΔN (m)	Δresultante (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	Δresultante (m)
28	25,22	-19,93	32,15	37,57	11,88	39,40
29	27,65	5,05	28,11	22,50	8,19	23,95
31	16,14	30,56	34,56	78,95	8,80	79,44
32	19,07	-11,12	22,08	18,56	-22,13	28,88
34	-16,05	-22,86	27,93	47,81	-23,30	53,19
38	-30,65	0,86	30,66	48,54	4,44	48,75
40	-23,82	2,34	23,94	41,55	18,62	45,53
46	-15,74	26,63	30,94	29,18	18,36	34,48
47	-8,38	11,39	14,14	66,29	29,88	72,71
48	-0,16	-13,67	13,67	39,15	-19,18	43,59
51	4,39	-10,89	11,74	54,66	-34,32	64,54
54	-13,40	2,90	13,71	70,96	29,44	76,82
56	23,17	-1,33	23,21	57,59	14,36	59,36
58	2,41	1,74	2,97	38,43	2,15	38,49
59	5,96	-1,13	6,06	35,87	15,65	39,14
63	-48,25	38,65	61,83	64,47	-28,20	70,36
65	-18,59	0,44	18,60	48,97	-5,58	49,28
70	3,41	0,01	3,41	57,96	-26,55	63,76
76	-8,47	11,52	14,30	13,33	35,77	38,18
79	16,48	4,01	16,96	64,18	8,64	64,76
81	-14,24	2,87	14,53	-15,98	10,18	18,95
Média	-2,57	2,77	21,21	43,84	2,72	50,17
Desvio Padrão	19,97	15,26	13,20	22,20	20,76	17,50

Analisando os resultados da Tabela 17, para as discrepâncias observadas nos pontos de verificação lidos nas ortoimagens geradas a partir do par estéreo HR-CCD/CBERS-2, onde é utilizado o desvio padrão amostral, foi detectada tendência para a componente E da imagem do dia 1/7/2004, para um nível de confiança de 90%. Os valores de desvio padrão amostral e média para esse conjunto de dados, depois de aplicado o teste *t*, resulta em valores altos,

fazendo com que seja rejeitada a hipótese de que a coordenada pode ser considerada como livre de tendência. Para as demais componentes das ortoimagens geradas não se detectou tendência significativa nos dados. No teste de precisão, também a um intervalo de confiança de 90%, todos os produtos foram aceitos para a escala 1:100.000 na classe A.

TABELA 17: Resultados das análises estatísticas realizadas nas ortoimagens.

		|Δmáx.| (m)	**|Δmín.| (m)**	**$\|t\|$ calc.**		**χ^2 calc.** Classe A	**χ^2 calc.** Classe B	**χ^2 calc.** Classe C	**Classe Atendida**
16/6/2004	**E**	48,25	0,16	0,59	***ST****	17,73	6,38	4,43	***Classe A***
	N	38,65	0,01	0,85	***ST****	10,35	3,73	2,59	***Classe A***
1/7/2004	**E**	78,95	13,33	9,05	***CT****	21,91	7,89	5,48	***Classe A***
	N	35,77	2,15	0,62	***ST****	19,15	6,89	4,79	***Classe A***

CT* **- Com Tendência;** ***ST**** **- Sem Tendência**

Portanto, conforme os resultados aqui apresentados, pode-se obter ortoimagens com padrão classe A de documentos cartográficos em escalas até 1:100.000 a partir de informações altimétricas obtidas dos MDE's extraídos de pares estereoscópicos do sensor HR-CCD do CBERS-2.

5 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

O objetivo principal proposto neste trabalho foi, a partir da utilização de técnicas fotogramétricas digitais, realizar a avaliação da informação planimétrica e altimétrica gerada a partir de um estereopar HR-CCD do CBERS-2. Nos experimentos realizados dois diferentes modelos matemáticos foram comparados, o *Polynomial Based – Pushbroom* e a DLT. Fazendo uso de diferentes quantidades de pontos de apoio e avaliando-se o resultado das triangulações geradas, verifica-se que os resultados, em alguns casos, atendem ao PEC para produtos cartográficos com escala 1:100.000.

Confrontando os resultados obtidos pela aplicação dos dois modelos, observou-se que ao utilizar o modelo polinomial foram obtidos erros planialtimétricos menores que os obtidos com a aplicação do modelo DLT, sendo observados melhores resultados em planimetria do que em altimetria, para o caso do modelo polinomial, e melhores resultados em altimetria do que em planimetria, quando utilizado a DLT (Figura 24). Porém, presume-se que os resultados poderiam ser ainda melhores, pois a precisão do MDE pode ter sido afetada por vários fatores, como a não calibração do sensor HR-CCD/CBERS-2, a utilização de distância focal nominal e a relação base/altura (0,6), uma vez que melhores resultados em altimetria são obtidos quando essa relação é próxima de 1.

Pelos resultados conseguidos nos experimentos 1 (sem pontos de passagem) e 2 (com pontos de passagem), verificou-se uma melhora significativa na componente altimétrica no segundo caso, mesmo para a configuração com menos pontos de apoio (7 pontos). Tanto no experimento 1 quanto no experimento 2, os erros apresentados nas componentes planimétricas E e N foram de 0,5 *pixel*. Na componente altimétrica os erros observados para o experimento 1 foram da ordem 1,5 a 2,2 *pixels* e, para o experimento 2, foram da ordem 1,5 a 2,0 *pixels*.

Os resultados apresentados no experimento 3 mostram que os dados do SRTM podem perfeitamente ser utilizados como fonte de apoio vertical no processo de triangulação de pares estereoscópicos HR-CCD do CBERS-2, melhorando assim a informação altimétrica gerada nos processos fotogramétricos digitais para casos em que se disponha de poucos pontos de apoio. Nesse experimento os erros apresentados nas componentes planimétricas E e N foram de 0,5 *pixel* e na componente altimétrica H foram de 1,5 *pixels*, apresentando, portanto, uma efetiva melhora para altimetria.

Para o experimento 4, onde se utilizou o modelo DLT, os resultados não foram tão bons quantos os apresentados pelo modelo polinomial. Diferentemente do observado no

modelo polinomial, a aplicação do modelo DLT apresentou melhores resultados na componente altimétrica que na planimétrica. Na utilização desse modelo os erros apresentados nas componentes planialtimétricas E, N e H foram de 1,5 a 4,5 *pixels*, ou seja, piores que os observados na utilização do modelo polinomial.

Vale ressaltar que, como previsto pelas equações apresentadas por Kraus (2000), onde se obteve valores esperados de erro de 1 *pixel* (19,70m) para planimetria e 2,3 *pixel* (45,50m) para altimetria, pode-se considerar como muito bom os resultados obtidos com a aplicação do modelo polinomial.

É importante frisar que, em trabalho recente e utilizando um estereopar HR-CCD do CBERS-2 e 10 pontos de apoio obtidos por GPS, Zanardi (2006) realizou estudos referente à geração de MDE utilizado o sistema fotogramétrico digital LPS. Em seus experimentos, foram obtidos resultados compatíveis com produtos classe A para escalas 1:250.000, que é uma escala menor que a conseguida por esse trabalho em que praticamente todos os pontos de apoio (24 dos 27 utilizados) foram obtidos a partir de ortomosaicos 1:25.000 do IBGE.

O modelo polinomial demonstrou ser um modelo mais rigoroso, pois utiliza as equações de colinearidade modificadas e é baseado na realidade física do processo de aquisição da cena, o que permitiu melhores resultados que os obtidos com modelo DLT. O modelo DLT não considera a variação temporal dos parâmetros de orientação exterior e não faz uso de parâmetros físicos do sensor como, por exemplo, a distância focal. Deve-se também considerar que para o caso da DLT na forma linear, utilizou-se um modelo estocástico simplificado.

Em relação à qualidade geométrica das ortoimagens produzidas no LPS, os resultados das avaliações revelam que só a ortoimagem de 16/6/2004 satisfez o requisito de ter, no máximo, 10% dos pontos de verificação com erros superiores à tolerância associada ao PEC planimétrico de cartas classe A (50,0m para a escala deste estudo). Com efeito, essa ortoimagem apresentou erro superior a 50,0m em apenas 1 ponto de verificação, sobre um total de 21. A ortoimagem de 1/7/2004, apesar de ter atendido a classificação A pelo teste qui-quadrado, apresentou 43% dos pontos de verificação com erro superior a esse valor, apresentando porem magnitude de erros inferiores a 80,0m, que indicam uma qualidade geométrica que corresponde à classe B de cartas 100.000.

É importante ressaltar que a realização de correções radiométricas, ou seja, a utilização de técnicas de correção dos efeitos da névoa atmosférica e a manipulação de contraste possibilitaram uma melhora significativa na qualidade visual das imagens. Essa correção é importante para a obtenção de bons resultados nas observações, facilitando a identificação dos

pontos de apoio na cena, assim como para a função de correlação utilizada na obtenção dos pontos de passagem automáticos no LPS.

A estação fotogramétrica digital LPS, com seu aplicativo para tratamento de imagens estereoscópicas obtidas por sensores orbitais, possui uma grande capacidade de processamento e se mostrou eficaz na geração de um MDE utilizando o estereopar HR-CCD do CBERS-2.

Considerando-se o método empregado, na qual se utilizou o modelo matemático polinomial existente no software LPS e, como apoio de campo, os pontos extraídos a partir de ortomosaicos 1:25.000, pode-se gerar ortoimagens com padrão de qualidade planimétrica classe A de cartas 1:100.000 a partir de um estereopar HR-CCD do satélite CBERS-2.

Conclui-se que os objetivos propostos pelo trabalho foram satisfatórios e espera-se que os resultados e análises aqui apresentados sirvam para trabalhos futuros referentes aos próximos satélites da série CBERS a serem lançados, tais como o CBERS-3 e CBERS-4.

Conforme INPE (2007), o programa CBERS terá melhorias consideráveis para os próximos satélites da série. O CBERS-2B, já em orbita, apresenta um sensor de alta resolução espacial (HRC/CCD) de 2,7 metros e, para as próximas câmaras PanMux existentes nos CBERS 3 e 4, a resolução espacial será de 5 metros. Por conta disso e para cumprir os rigorosos requisitos de apontamento das câmaras necessários à obtenção de imagens de alta resolução, esses satélites irão dispor de sensores de controle de atitude e órbita mais eficientes, incluindo sensores estelares e de posicionamento GPS, entre outros. A capacidade de visada lateral será mantida para os satélites CBERS 3 e 4, e as câmaras possuirão desempenhos geométricos e radiométricos melhorados. A órbita desses dois satélites será a mesma que a dos CBERS-1, 2 e 2B, sendo 2009 a previsão de lançamento para o CBERS-3 e 2011 para o CBERS-4.

Recomenda-se que em trabalhos futuros sejam empregados estereopares CBERS com menos ocorrência de nuvens e que sejam utilizados apenas pontos de apoio coletados em campo por posicionamento geodésico por satélite. Deste modo, análises estatísticas mais rigorosas poderão ser realizadas quanto à qualidade geométrica dos produtos gerados.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. 2ª ed. Curitiba: SBEE, 2003. 274p.

BALTSAVIAS, E.; PETERAKI, M.; ZHANG, L. Radiometric ang geometric evaluation of Ikonos geo images and their use for 3D guilding modelling. In: ISPRS, 2001, Hanover. **Proceedings**…, of the ISPRS joint Workshop "High Resolution Mapping From Space 2001", Germany: ISPRS, 19-21 September, 2001.

BOCCARDO, P.; MONDINO, E. B.; TONOLO, F. G.; LÍNGUA, A. Orthorectification of High Resolution Satellite Images. In: XXth ISPRS Congress, 2004, Istanbul, Trukey. **Geo-imagery bridging continents**, Istanbul: ISPRS 2004. p. 30-36.

BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 22 de junho de 1984.

COSTA, E. R.; SILVA, M. A. O.; NEVES, P. E.; SILVA, A. J. M. Ortorretificação: um passo a mais no processamento de imagens CBERS. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. **Anais**..., São José dos Campos, SP: INPE, 2007. p. 827-833.

CRUZ, C. B. M.; BARROS, R. S.; REIS, R. B. Ortorretificação de imagens CBERS-2 usando DEM do SRTM - Área de aplicação: Angra dos Reis-RJ. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. **Anais**..., São José dos Campos, SP: INPE, 2005. p. 899-906.

D'ALGE, J. C. L. **Atualização Cartográfica por Imagens de Satélite**: considerações teóricas e possibilidades de implementação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1997. 14 p.

DOWMAN, I. J.; Ebner, H.; HEIPKE, C. Overview of European developments in digital photogrammetric workstations. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 58, n. 1, p 51-56, 1992.

EL-SHEIMY, N. **Digital Terrain Modelling** - Lecture Notes for the ENGO 573 course. The University of Calgary, Department of Geomatics Engineering. Canadá, 1999-2005.

EPIPHANIO, J. C. N. CBERS - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. **Anais**..., São José dos Campos, SP: INPE, 2005. p. 915-922.

EWIAK, I.; KACZYŃSKI, R. Accuracy of DTM generated from SPOT 4 and SPOT 5 HRS data. In: ISPRS Congress in Istanbul July 2004, Istanbul, **Proceedings**… 2004.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. **The Shuttle Radar Topography Mission**. Jet Propulsion Laboratory – Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf>. Acesso em: 01out. de 2007.

FRITSCH, D.; STALLMANN, D. Rigorous Photogrammetric Modelling Processing of High-Resolution Satellite Imagery. **IAPRS**, Vol.33, Part B1, Amsterdam, 2000, p. 313-321.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. Utilização de GPS no controle de qualidade de cartas. In: I Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário - COBRAC, Florianópolis. **Anais**..., 1994.

GALO, M. **Fotogrametria III – Notas de aula**. Disciplina do Curso de Graduação em Engenharia Cartográficas da UNESP de Presidente Prudente, 2006.

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

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2000. 509p.

HEIPKE, C.;KOCH, A.; LOHNANN, P. Analysis of SRTM DTM – Metodology and Practical Results. In: **ISPRS** Commission – IV, WG IV/6. Symposium. Ottawa, 2002.

HIRANO, A.; WELCH, R.; LANG, H. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,** n. 57, p. 356-370, 2003.

HU, Y.; TAO, V.; CROITORU, A. Understanding the rational function model: methods and applications. In.: **XXth International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)**. Congress, 12-23 July, Istanbul, 2004, 6p.

HUINCA, S. C. M.; ARAKI, H.; CAVALHEIRO, A. C. Correção geométrica de imagem Quickbird para áreas urbanas utilizando modelos geométricos generalizados e dados de laser scanning. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, abril de 2005, Goiânia. **Anais**..., São José dos Campos, SP: INPE, 2005. p. 4545-4551.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Noções Básicas de Cartografia**. Rio de Janeiro, 1998. 127p.

INPE. **Satélite CBERS**. Disponível em: <http://www.cbers.inpe.br/>. Acesso em: 28 de setembro de 2007.

I.S.M. – International Systemap Corp. **The Fundamental of Digital Photogrammetry**. Canadá, 1997. 70p.

JPL. **Jet Propulsion Laboratory – Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataprod.htm>. Acesso em: 12 mar. de 2006.

KARARA, H. M. **Non-Topographic Photogrammetry**. In: Manual of Photogrammetry. American Society Photogrammetry. New York, Falls Church, 1980, p. 785-882.

KRAUS, K. **Photogrammetry**: Fundamentals and Standard Processes. Dümmler, Bonn, Alemanha, 2000, v. 1. 397p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 4ed. U.S.A.: John Wiley & Sons, 2000. 724p.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: Editora UFPR, 1987. 134p.

MEDEIROS, N. G. **Orientação exterior de imagens orbitais usando modelos rigorosos com feições retas**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual do Estado de São Paulo-UNESP, Presidente Prudente.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. **Noções de Probabilidade e Estatística**. 6ed. São Paulo: Editora Edusp, 2005. 392p.

MARANHÃO, M. R. A.; RAIVEL, J. P. C. Análise de pares estereoscópicos obtidos pelo CBERS-2 - Primeiros testes utilizando Fotogrametria digital. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. **Anais**..., São José dos Campos, SP: INPE, 2005. p. 999-1004.

MERCHANT, D. C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. **Technical Papers of the American Congress on Surveying and Mapping**, v. 1, p. 222-231, 1982.

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

MIRANDA, E. E. **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>. Acesso em: 29 out. de 2007.

MITISHITA, E. A.; SARAIVA, C. S. Modelos Matemáticos para fins de Monorestituição de Imagens de Alta Resolução Ikonos 2-geo. In: Simpósio Brasileiro de Geomática, 2002. **Anais**..., Presidente Prudente, 2002. p. 278-286.

MITISHITA, E. A.; SARAIVA, C. C. S.; MACHADO, A. L. Monorestituição de imagens do satélite de alta resolução Ikonos 2 (geo), utilizando-se da transformação DLT e modelo digital de terreno. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003, Belo Horizonte. **Anais**..., São José dos Campos, SP: INPE, 2003. p. 357-364.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 2ed. Viçosa: Editora UFV, 2003. 307p.

NOGUEIRA JÚNIOR, J. B. **Controle de Qualidade de Produtos Cartográficos. Uma proposta metodológica**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual do Estado de São Paulo-UNESP, Presidente Prudente.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto**: princípios e aplicações. 2ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1992. 308p.

OK, A. O.; TURKER, M. Comparison of different mathematical models on the accuracy of the orthorectification of ASTER imagery. In: XXth ISPRS Congress: Geo-imagery bridging continents, 2004, Istanbul, Turkey. **Proceedings**…, 2004.

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

POLI, D. Orientation of Satellite and Airborne Imagery from Multi-Line Pushbroom Sensors with a Rigorous Sensor Model. In: XXth ISPRS Congress: Geo-imagery bridging continents, 2004, Istanbul, Turkey. **Proceedings**…, 2004, p. 130-136.

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E.; CHAPIN, E. C.; MARTIN, J. M.; DAFFER, W.; HENSLEY, S. **An Assessment of the SRTM Topographic Products**. National Aeronautics and Space Administration-NASA, Jet Propulsion Laboratory-JPL. Sem data. 143p.

ROSADO, E. Q.; SÁEZ, A. C. Posibilidades Estereoscópicas de los Datos Espaciales. **Revista Internacional de Ciencia y Tecnologia de la Información Geográfica**, n. 5, p. 65-76, 2005.

SCALCO, J. C. **Orientação Semi-Automática de Imagens CBERS usando Rodovias como Controle de Campo**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual do Estado de São Paulo-UNESP, Presidente Prudente.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry**. The Ohio State University: Editora TerraScience, 1999, v. 1.

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

SILVA, A. J. F. M.; SILVA, M. V. D.; SANTINI, D. Mapeamento topográfico usando imagens IKONOS. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003, Belo Horizonte. **Anais**..., São José dos Campos, SP: INPE, 2003. p. 297-302.

STEFFEN, C. A; MORAES, E. C.; GAMA, F. F. Tutorial: Radiometria óptica espectral. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1996, Salvador. **Anais**... São Paulo, SP: INPE, 2005. 48p.

TOMMASELLI, A. M. G. **Interpretação de imagens:** notas de aula da disciplina de Interpretação de Imagens do Curso de Graduação em Engenharia Cartográficas da UNESP de Presidente Prudente, 2006.

TOUTIN, T. Comparasion of Stereo-Extracted DTM from Different High-Resolution Sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, and QuickBird. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 10, p.2121-2129, 2004.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry**: with applications in GIS. 3ed. U.S.A.: McGraw-Hill Book Company, 2000. 607p.

YANG, X. Accuracy of Rational Function Approximation in Photogrammetry. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. In: Annual Conference. **Proceedings**…, 2000.

ZANARDI, R. P. **Geração de MDT a partir de pares estereoscópicos do satélite CBERS-2 e controle de qualidade das informações altimétricas.** 2006. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto-CEPSRM, UFRGS, Porto Alegre, RS.

ANEXO I

Coordenadas UTM, SAD69 dos pontos de apoio e verificação utilizados

Ponto	Tipo	E (m)	N (m)	H_{IBGE} (m)
1	apoio	159244,313	7911426,506	888,43
2	apoio	170332,526	7868292,737	947,82
3	apoio	177884,995	7971183,653	698,39
4	apoio	191218,840	7928326,328	987,78
5	apoio	192210,292	7876396,012	876,19
6	apoio	200363,795	7890035,576	875,47
7	apoio	201662,892	7945225,375	796,66
8	apoio	210162,060	7861415,151	991,69
9	apoio	212751,673	7924158,164	925,48
10	apoio	220224,727	7962198,592	749,53
11	apoio	223743,390	7905734,677	1002,46
12	apoio	234175,115	7878466,472	1022,91
13	apoio	246774,155	7855120,605	1052,89
14	apoio	251362,410	7959172,252	852,85
15	apoio	261436,984	7868190,422	886,00
16	apoio	270723,005	7899228,765	912,56
17	apoio	168921,519	7958691,333	536,94
18	apoio	165819,370	7931569,539	939,00
19	apoio	176445,813	7904924,305	849,94
20	apoio	203748,212	7906021,157	957,08
21	apoio	250545,293	7903636,320	980,00
22	apoio	284335,365	7936898,699	1056,32
23	apoio	257773,862	7930679,914	810,18
24	apoio	149916,481	7873553,956	829,66
25	apoio	171517,860	7942040,730	642,98
26	apoio	225165,899	7940342,686	821,05
27	apoio	158347,020	7889951,930	865,45
28	verificação	159212,779	7896996,059	800,66
29	verificação	165101,811	7918048,059	727,82
30	verificação	166398,946	7900060,799	912,24
31	verificação	166476,654	7945781,370	926,69
32	verificação	170151,035	7970108,782	675,28
33	verificação	178885,582	7956327,621	639,07
34	verificação	185910,146	7917237,104	946,93
35	verificação	192623,182	7968455,183	713,07
36	verificação	193511,548	7920485,474	986,76
37	verificação	193677,444	7899435,504	925,73
38	verificação	209878,696	7914879,586	982,13
39	verificação	210127,323	7875785,831	992,74
40	verificação	216291,676	7887881,769	937,00
41	verificação	216470,687	7947154,721	824,52
42	verificação	221953,662	7922189,300	999,79
43	verificação	225937,002	7887788,943	942,85
44	verificação	229800,007	7920414,097	947,13
45	verificação	230573,645	7860689,779	1041,36

continuação

46	verificação	239471,138	7948865,000	841,36
47	verificação	244697,033	7874423,285	1012,89
48	verificação	247495,595	7930519,284	834,18
49	verificação	255721,053	7910424,665	1035,12
50	verificação	256973,833	7946376,980	853,91
51	verificação	268054,692	7951629,080	854,58
52	verificação	184151,122	7947296,559	728,32
53	verificação	174371,723	7882574,783	952,10
54	verificação	215281,417	7867053,544	996,17
55	verificação	180803,242	7916146,668	913,32
56	verificação	159753,632	7877187,503	888,68
57	verificação	196943,030	7864696,278	973,44
58	verificação	181152,790	7874470,473	955,66
59	verificação	247421,019	7860518,497	1033,89
60	verificação	255586,418	7853943,559	1063,39
61	verificação	178403,627	7928817,882	930,21
62	verificação	202569,690	7928167,182	1014,86
63	verificação	196105,276	7935715,303	971,22
64	verificação	221484,748	7935095,884	872,90
65	verificação	239244,497	7907609,798	1030,37
66	verificação	239008,657	7928136,183	868,70
67	verificação	235633,406	7919466,447	993,78
68	verificação	259443,990	7950991,512	833,51
69	verificação	227949,375	7939040,281	808,43
70	verificação	230740,805	7930216,571	879,44
71	verificação	211958,247	7936074,769	742,15
72	verificação	244975,382	7867288,908	1031,10
73	verificação	189520,499	7907825,790	926,72
74	verificação	207117,127	7899233,573	966,73
75	verificação	191093,772	7962672,017	710,86
76	verificação	186453,077	7893838,641	814,44
77	verificação	192344,922	7895455,699	889,94
78	verificação	196917,603	7878951,405	921,89
79	verificação	258863,643	7890757,725	914,92
80	verificação	247336,697	7889911,088	885,75
81	verificação	207934,739	7954155,855	727,38
82	verificação	266209,694	7872708,110	923,00
83	verificação	214187,913	7903115,988	988,93