

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
PPGEC

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS QUICKBIRD PARA A
ATUALIZAÇÃO
DO MAPEAMENTO URBANO: APLICAÇÕES E RESTRIÇÕES EM
DIFERENTES NÍVEIS DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA

Dissertação de Mestrado submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, para obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil.

DIEGO RANGEL ALMADA DE OLIVEIRA

Florianópolis, outubro de 2009

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS QUICKBIRD PARA A
ATUALIZAÇÃO
DO MAPEAMENTO URBANO: APLICAÇÕES E RESTRIÇÕES EM
DIFERENTES NÍVEIS DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA

DIEGO RANGEL ALMADA DE OLIVEIRA

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Prof.^a. Janaide Cavalcante Rocha - Coordenadora do PPGEC



Prof. Dr. Carlos Loch – Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA

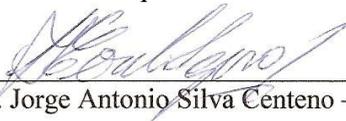


Prof. Dr. Carlos Loch – ECV/UFSC



Prof. Dr. Jucilei Cordini – ECV/UFSC

Prof. Dr. Francisco Henrique de Oliveira – UDESC



Prof. Dr.-Ing. Jorge Antonio Silva Centeno – UFPR

*Aos meus pais, pelo apoio
incondicional em todos os
momentos da minha vida.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me guiar e permitir a conclusão dessa nova etapa da minha vida.

Aos meus pais Hugo e Aparecida pelo apoio incondicional e confiança depositada em todos os momentos decisivos.

À minha irmã Viviane por toda ajuda indispensável na minha vida pessoal e acadêmica.

Ao meu irmão Júnior por todo seu companheirismo.

À Bianca pela paciência e cumplicidade dos últimos anos.

Ao professor Carlos Loch, pela orientação, amizade e apoio à pesquisa realizada, disponibilizando através do LabFSG toda a estrutura necessária para o desenvolvimento dos trabalhos.

Aos amigos Maicon e Edésio, pelo companheirismo, parceria e indispensável apoio dado. Vocês fazem parte deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelo acolhimento e por ter possibilitado o desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos conquistados através do LabFSG e do PPGEC, pela troca de experiências e ajuda durante todo o curso.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro concedido.

Sumário

1	<i>Introdução</i>	1
1.1	<i>Introdução</i>	1
1.2	<i>Objetivos</i>	4
1.2.1	Objetivos Gerais _____	4
1.2.2	Objetivos Específicos _____	4
1.3	<i>Justificativa</i>	5
1.4	<i>Trabalhos Relacionados ao Tema</i>	7
1.5	<i>Estruturação da Pesquisa</i>	9
2	<i>Revisão de Literatura</i>	10
2.1	<i>Sistemas Sensores</i>	10
2.1.1	Resolução Espacial _____	11
2.1.2	Resolução Radiométrica _____	13
2.1.3	Resolução Espectral _____	14
2.1.4	Resolução Temporal _____	14
2.1.5	Imageadores CCD _____	15
2.2	<i>Sistema Quickbird</i>	16
2.3	<i>Distorções Geométricas</i>	18
2.3.1	Curvatura Terrestre _____	19
2.3.2	Distorção Panorâmica _____	20
2.3.3	Rotação da Terra _____	21
2.3.4	Instabilidade da Plataforma – Atitude e Altitude _____	22
2.4	<i>Processamento Digital das Imagens</i>	23
2.4.1	Fusão – Transformação IHS _____	24
2.5	<i>Correção Geométrica</i>	25
2.6	<i>Ortorectificação</i>	29
2.6.1	Pontos de Controle _____	31
2.6.2	Modelo Digital do Terreno – MDT _____	32
2.6.3	Funções Polinomiais Racionais _____	33
2.7	<i>Precisão e Acurácia</i>	36
2.7.1	Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC _____	38

2.8	<i>Cartografia e Planejamento Urbano</i>	39
2.9	<i>O Cadastro Técnico Multifinalitário e as novas técnicas de mapeamento</i>	41
3	<i>Materiais e Métodos</i>	46
3.1	<i>Área de Estudo</i>	46
3.2	<i>Materiais Utilizados</i>	49
3.2.1	Dados de Sensoriamento Remoto _____	49
3.2.2	Dados Cartográficos _____	50
3.2.3	Equipamentos _____	50
3.2.4	Softwares Aplicativos _____	50
3.3	<i>Descrição das etapas do estudo</i>	51
3.4	<i>Pré-Processamento</i>	51
3.4.1	Escolha dos pontos de controle e checagem _____	52
3.4.2	Coleta de dados em campo - Pontos GPS _____	54
3.4.3	Edição da base altimétrica _____	56
3.4.4	Conversão entre Sistemas de Referência _____	56
3.4.5	Geração do MDT _____	60
3.5	<i>Processamento da Imagem</i>	64
3.5.1	Escolha das Bandas de trabalho _____	64
3.5.2	Fusão das bandas _____	65
3.5.3	Operações de contraste _____	67
3.6	<i>Correção geométrica</i>	68
3.6.1	Transformação Polinomial Simples –	
	Georreferenciamento _____	69
3.6.2	Ortorectificação _____	74
4	<i>Resultados</i>	78
4.1	<i>Avaliação da qualidade posicional das imagens</i>	78
4.1.1	Avaliação das imagens em relação ao número de pontos de controle _____	85
4.1.2	Avaliação: ortorectificação versus georreferenciamento	89
4.2	<i>Avaliação da aplicação das imagens à Cartografia</i>	93
4.2.1	Técnicas de extração de informações _____	93
4.2.2	Tipos de elementos fotoidentificáveis _____	100
4.2.3	Restrições do processamento da imagem _____	105

4.2.4	Restrições da imagem para a produção e atualização de mapas em escalas grandes	108
4.2.5	Campo de aplicação das imagens orbitais de alta resolução à Cartografia	110
5	Conclusões	116
6	Bibliografia Básica	119

Lista de Figuras

Figura 1: Resolução espacial definida pelo campo instantâneo de visada, o IFOV.....	12
Figura 2: Linha de escaneamento <i>pushbroom</i> com o IFOV determinando o tamanho do pixel.....	16
Figura 3: Tamanho do pixel no chão dependendo do angulo local τ com o nadir.	20
Figura 4: Efeitos da rotação da Terra sobre a geometria de uma linha de imagem digitalizada.	21
Figura 5: Efeitos das distorções não-sistemáticas em imagens orbitais. Adaptada: Crosta (1992).....	23
Figura 6: Princípio de transformação IHS.	25
Figura 7: Erro posicional causado pela variação do relevo e pela inclinação do sensor.....	30
Figura 8: Fluxograma dos procedimentos realizados.	46
Figura 9: Localização da área de estudo no município de Florianópolis.	47
Figura 10: Imagem Quickbird – Parte do distrito do Campeche.	47
Figura 11: Visualização “sul-norte” do modelo tridimensional, formado pela sobreposição da imagem Quickbird ao MDT da área estudada, abrangendo parte do distrito do Campeche.....	48
Figura 12: Visualização “norte-sul” do modelo tridimensional, formado pela sobreposição da imagem Quickbird ao MDT da área estudada. ...	49
Figura 13: Ponto de controle escolhido na imagem e registro fotográfico do momento da coleta.	55
Figura 14: Distribuição dos pontos de controle e checagem coletados em campo através de receptor GPS.....	55
Figura 15: Ponto GPS em WGS84 sobreposto a base cartográfica em SAD69.	57
Figura 16: Comparação da transformação entre sistemas: a) Base 1:2.000 em WGS84, transformada a partir dos parâmetros IBGE, com o	

lançamento do ponto coletado em WGS84. b) Base 1:2.000 em WGS84, transformada a partir dos parâmetros que melhor se adequaram ao trabalho, com o lançamento do ponto coletado em WGS84.	59
Figura 17: Abrangência da base altimétrica sobre a imagem Quickbird.	60
Figura 18: Recorte da sobreposição da base altimétrica à imagem Quickbird situada na região do morro do Campeche.	61
Figura 19: Parte da base altimétrica na região do morro do Campeche.	62
Figura 20: Modelo digital do terreno no formato TIN gerado a partir da hipsometria da base 1:2.000 mostrada na figura 21.	62
Figura 21: Modelo digital do terreno no formato <i>raster</i> , gerado a partir do arquivo TIN.	63
Figura 22: Fluxograma da edição da base altimétrica e geração do MDT.	64
Figura 23: Comparação da resolução espacial de uma composição colorida das três bandas do visível com a imagem gerada na banda pancromática.	65
Figura 24: Composição gerada a partir da fusão IHS da banda pancromática com as bandas do visível.	66
Figura 25: Parte da composição gerada a partir da fusão IHS contendo algumas áreas com radiometria distorcida.	66
Figura 26: Comparação entre as imagens reamostradas por dois filtros: a) Imagem bruta, sem a aplicação de filtros; b) Imagem após aplicação de um filtro gaussiano; c) Imagem após aplicação de um filtro linear. .	68
Figura 27: Coleta em campo de um dos pontos de controle com receptor GPS e sua localização na imagem.	70
Figura 28: Distribuição dos 5 pontos de controle do georreferenciamento inicial da imagem.	71
Figura 29: Distribuição dos 8 pontos de controle do georreferenciamento final da imagem.	73
Figura 30: Distribuição dos 5 pontos de controle da ortoretificação inicial da imagem.	75

Figura 31: Distribuição dos 8 pontos de controle escolhidos para a ortoretificação da imagem, localização de um dos pontos na imagem em escala maior e registro fotográfico no momento de seu cadastro com receptor GPS.	76
Figura 32: a) Base sobreposta a imagem bruta. b) Base sobreposta à imagem após o processamento de ortoretificação.....	78
Figura 33: Gráfico de dispersão dos pontos de checagem na imagem georreferenciada com 5 pontos de controle.	86
Figura 34: Gráfico de dispersão dos pontos de checagem na imagem georreferenciada com 8 pontos de controle.	87
Figura 35: Gráfico de dispersão dos pontos de checagem na imagem ortoretificada com 5 pontos de controle.....	88
Figura 36: Gráfico de dispersão dos pontos de checagem na imagem ortoretificada com 8 pontos de controle.....	88
Figura 37: Gráfico comparativo dos resultados do georreferenciamento em relação a ortoretificação.	90
Figura 38: Sobreposição da base 1:2.000 à imagem ortoretificada em área com maior altitude.....	91
Figura 39: Sobreposição da base 1:2.000 à imagem georreferenciada em um trecho de altitude em torno dos 200 m.	92
Figura 40: Imagem antes e depois da aplicação do aumento linear de contraste.	96
Figura 41: a) Composição colorida com distorção na radiometria, prejudicando o delineamento dos limites da edificação. b) Banda pancromática da mesma área livre da distorção causada pela transformação IHS.	97
Figura 42: Maior nível de reflectância dificultando a identificação de feições.	98
Figura 43: Composição colorida após aplicação do filtro gaussiano...	98
Figura 44: Edificação escondida por entre a vegetação traz dificuldades na sua delimitação.....	99
Figura 45: Sistema viário facilmente identificável na imagem.....	101

- Figura 46:** A delimitação das quadras também é facilitada em áreas com urbanização bem definida..... 102
- Figura 47:** Muros (lateral direita do imóvel) têm melhor definição nas imagens, no entanto, grades e cercas (frente) ficam mal definidas na imagem, tornando a vetorização mais complexa..... 103
- Figura 48:** Edificações facilmente identificáveis na composição gerada após o processamento..... 104
- Figura 49:** Parte da Lagoinha Pequena delimitada facilmente devido a boa distinção entre a resposta espectral da água e do solo..... 105
- Figura 50:** Parte da área de estudo cadastrada por levantamento aerofotogramétrico em outubro de 2001..... 111
- Figura 51:** Sobreposição da imagem Quickbird ao levantamento aerofotogramétrico..... 112
- Figura 52:** Sobreposição da imagem Quickbird à base cartográfica após a atualização dos novos elementos..... 113

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características do Sistema QuickBird.....	18
Tabela 2: Erros, suas definições e probabilidades.	37
Tabela 3: Metadados da Imagem.	49
Tabela 4: Localização da cena.	50
Tabela 5: Parâmetros de transformação de SAD69 para WGS84 utilizados pelo software Arcgis.....	58
Tabela 6: Erro Planimétrico e RMS calculados nos 5 pontos de controle da imagem georreferenciada.	79
Tabela 7: Erro Planimétrico nos pontos de checagem no georreferenciamento com 5 pontos de controle.	80
Tabela 8: Erro Planimétrico calculado dos pontos de 8 pontos de controle da imagem georreferenciada.	81
Tabela 9: Erro Planimétrico nos pontos de checagem no georreferenciamento com 8 pontos de controle.	81
Tabela 10: Erro Planimétrico calculado para ortoretificação com 5 pontos de controle.	82
Tabela 11: Erro Planimétrico nos pontos de checagem na ortoretificação com 8 pontos de controle.	83
Tabela 12: Erro Planimétrico calculado para ortoretificação com 8 pontos de controle.	84
Tabela 13: Erro Planimétrico nos pontos de checagem na ortoretificação com 8 pontos de controle.	84

Lista de Siglas

2D - Bidimensional

3D – Tridimensional

ACP – Análise das Componentes Principais

CCD – *Charge Coupled Device*

CTM – Cadastro Técnico Multifinalitário

DWG – *Drawing Format*

GCP – *Ground Control Point*

GPS – *Global Positioning System*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFOV – *Instantaneous Field Of View*

IHS – *Intensity , Hue, Saturation*

IPUF – Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis

LabFSG – Laboratório de Fotogrametria Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento

LIDAR – *Laser Detection And Ranging*

MDT – Modelo Digital do Terreno

MS – Multiespectral

PAN – Pancromática

PC – Ponto de controle

PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica

RFM – *Rational Function Model*

RGB – *Red, Green, Blue*

RMS – *Root Mean Square*

RPC – *Rational Polynomial Coeficients*

SAD 69 – *South American Datum 69*

SHP – *Shapefile*

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SIT – Sistemas de Informação Territorial

TIFF - *Tagged Image File Format*

TIN – *Triangular Irregular Network*

WGS 84 – *World Geodetic System 84*

δ – Desvio Padrão

δ^2 – Variância

Resumo

A aplicação das imagens orbitais de alta resolução ao mapeamento vem se intensificando nos últimos anos. No entanto, a utilização sem critérios dessas imagens pode gerar produtos sem a qualidade e confiabilidade esperadas para o mapeamento urbano. O presente estudo avalia a aplicação de uma imagem do Sistema Quickbird à Cartografia Urbana, em uma área com relevo pouco acidentado, considerando-se quatro cenários de correção geométrica e a capacidade de extração de informações para a geração de cartas em escalas maiores que 1:10.000. Os dois primeiros cenários analisam a aplicação da Transformação Polinomial 2D, com diferentes quantidades de pontos de controle. Os dois cenários seguintes analisam a aplicação das Funções Polinomiais Racionais 3D, utilizando-se as mesmas quantidades de pontos de controle das correções bidimensionais. Do ponto de vista geométrico, as imagens corrigidas bidimensionalmente atenderam à escala de 1:5.000, enquadradas pelo PEC como de classe B, independentemente do número de pontos de controle utilizados. Já as imagens ortoretificadas foram enquadradas na classe A para a escala de 1:4.000, independentemente do número de pontos de controle. Quanto à extração de informações, foram analisadas as diversas limitações da imagem, como resolução espacial, distorções radiométricas, respostas espectrais similares, encobrimento de alvos pela vegetação, sombras etc.

Abstract

The application of high-resolution imagery for the mapping has been intensifying over the years. However, the using without criteria of these images can generate products without the quality and reliability expected to the urban maps. This study aims to evaluate the application of an image of Quickbird System to the Urban Cartography, in an area with little rugged relief, considering four different scenarios of geometric correction and the ability to extraction of information to generate maps at scales greater than 1:10.000. The first two scenarios examine the application of Polynomial Transform 2D, with different amounts of control points. The two following scenarios examine the application of Rational Polynomial Functions 3D, using the same amounts of control points implemented in the first two sets of correction. With regard to geometry, the images corrected with the two-dimensional model attended the scale of 1:5.000, placed by the PEC in the B class, independently of the number of control points used. The orthorectified images were placed in Class A for the scale of 1:4000, independently of the number of control points. Considering the extraction of information, it was analyzed the various limitations of the image, such as spatial resolution, radiometric distortions, similar spectral responses, masking targets by vegetation, shadows etc.

1 Introdução

1.1 Introdução

O desenvolvimento da Cartografia Nacional tem encontrado sérios obstáculos nos últimos anos. A falta de investimentos dos setores públicos na implantação e atualização da Cartografia brasileira é uma realidade, principalmente no mapeamento em escalas grandes.

A necessidade de planejamento urbano e da gestão do território exige dos governos o conhecimento detalhado da área sob seu gerenciamento. A Cartografia é fundamental para esse processo, não se pode conhecer o território sem uma Cartografia em escala adequada, confiável e atualizada.

A falta de atualização do mapeamento cadastral gera grandes ônus aos gestores públicos. Isto porque sem dados cartográficos de qualidade, não se pode conhecer e planejar bem o território. O uso dessas informações é de suma importância para se visualizar tendências e se traçar planos.

A Cartografia Cadastral, nesse processo de conhecimento do território, talvez seja a parte mais importante para a municipalidade, tanto para o sistema fiscal e tributário, quanto para o sistema de gestão paisagística e ambiental do município. Por ser mais complexa e detalhada, a Cartografia Cadastral deve ser elaborada em escalas maiores que 1:5.000, trazendo uma maior exigência quanto à precisão das feições mapeadas.

O mapeamento em escalas cadastrais é feito, tradicionalmente, através da aplicação das técnicas de Fotogrametria e de Topografia. A utilização dessas técnicas é muitas vezes impossibilitada devido aos maiores investimentos para sua implantação. No entanto, há de se atentar à falta de avaliações coerentes que considerem a relação custo/benefício de tais técnicas. Também não se pode descartar o estudo de outras tecnologias, como a de Sensoriamento Remoto, como forma de apoio à atualização do mapeamento em diversas escalas.

Com o surgimento dos sensores de alta resolução na última década, a possibilidade de utilização desses produtos para a Cartografia foi expandida. Conhecendo-se bem as características e restrições de cada imagem, é possível aplicá-las na atualização e até na elaboração de cartas em escalas menores que 1:10.000.

Porém, há ainda grandes dificuldades na aplicação dessa nova tecnologia ao mapeamento urbano em escalas maiores que 1:10.000. Isso se deve à falta de tratamento adequado para esses dados e, principalmente, à restrição relacionada às características dessas imagens. Assim, diversos estudos têm sido desenvolvidos objetivando melhorar as aplicações urbanas do sensoriamento remoto.

Em teoria, as imagens orbitais têm como ponto positivo a periodicidade dos dados, a qual permite novas aquisições com grande frequência e a um custo relativamente baixo. Blaschke, Glasser e Lang (2007) salientam que muitas das taxas de repetição de dados são mais teóricas do que práticas, pois além das frequentes programações concorrentes do sensor, precisam ser considerados os ângulos de incidência de imageamento, extremamente divergentes. Além disso,

deve-se atentar para o tratamento desses dados, pois as distorções geradas pelo ângulo de incidência da tomada são de difícil correção na medida em que este é aumentado.

As Imagens orbitais são geradas com uma série de distorções que devem ser corrigidas antes de possíveis aplicações cartográficas. Dentre estas distorções está a causada pelas variações do relevo, que deprecia a precisão posicional dessas imagens.

Diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos com objetivo de corrigir geometricamente imagens orbitais. Estes modelos podem desconsiderar a variação do relevo, como as funções polinomiais 2D, ou levá-la em conta, como as funções polinomiais racionais 3D, com a geração de ortoimagens.

De forma geral, a ortoretificação de imagens orbitais de alta resolução é premissa básica no processo de correção geométrica. No entanto, na falta de dados altimétricos, a aplicação de modelos bidimensionais, como o georreferenciamento, não pode ser descartada, principalmente em áreas com relevo suave.

Além das correções geométricas, deve-se avaliar também a aplicação das imagens à Cartografia, e isto se deve às restrições existentes em suas características. Dentre as principais, está a resolução espacial, grande limitadora do uso dessas imagens para os produtos em escalas maiores que 1:10.000.

Diante disso, é necessário ressaltar as diversas aplicações das imagens de alta resolução espacial diante da Cartografia, sem deixar de mencionar suas limitações e restrições, principalmente à Cartografia Urbana.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Busca-se avaliar a qualidade posicional de parte de uma cena do Sistema Quickbird, utilizando-se de diferentes níveis e métodos de correção geométrica, e a sua aplicação à atualização do mapeamento urbano.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar os resultados da aplicação de dois modelos de correção, Função Polinomial 2D e Funções Polinomiais Racionais 3D, em uma área com o relevo pouco acidentado;
- b) Avaliar os efeitos da quantidade de pontos de controle na correção geométrica em cada modelo;
- c) Avaliar as aplicações das imagens processadas diante das exigências da Cartografia, definidas através do Decreto 89.817 de 20 junho de 1984;
- d) Verificar as limitações das imagens em termos de processamento e extração de informações topográficas dos diversos elementos urbanos, como sistema viário, limites fundiários, edificações, hidrografia e vegetação;
- e) Demonstrar a aplicação das imagens à Cartografia, através da geração de produtos em escalas compatíveis com as precisões obtidas nas correções;

- f) Relacionar esses produtos, em termos de qualidade, periodicidade de dados e aplicações para a Cartografia, visando ao planejamento urbano e a outras aplicações compatíveis.

1.3 Justificativa

O uso de fotografias aéreas convencionais ainda é a forma mais eficiente para o mapeamento de grandes áreas urbanas. No entanto, há situações em que o custo para a obtenção de dados fotogramétricos restringe a sua aplicação nas atualizações cartográficas. Além disso, é necessária a avaliação de outras fontes de dados que possam contribuir para o desenvolvimento da Cartografia em escalas maiores.

Levando-se em conta a deficiência de grande parte dos municípios brasileiros no que diz respeito à Cartografia em escalas maiores, a utilização de imagens orbitais de alta resolução pode ser uma alternativa econômica na atualização de produtos cartográficos. As imagens orbitais têm como principais vantagens a periodicidade no fornecimento de dados. Quanto ao custo, deve-se antes avaliar as diversas variáveis, tais como área estudada, objetivos e aplicação do produto final. Dessa forma pode-se traçar um paralelo com outras tecnologias tradicionais de mapeamento e definir a sua aplicabilidade.

A utilização indiscriminada das imagens orbitais de alta resolução para o mapeamento, seja ele topográfico ou temático, traz uma importante motivação para o desenvolvimento de estudos que avaliem a aplicação dessas imagens para a Cartografia. A geração de dados sem confiabilidade e imprecisos pode trazer muitos problemas para o usuário

desses produtos, seja no cruzamento, na extração ou na manipulação de informações.

O grande desafio da Cartografia está no aproveitamento das diversas técnicas de mapeamento, gerando um conjunto abrangente de fontes de dados, e no seu gerenciamento de forma adequada, através dos sistemas de informação geográfica. Com isso, pode-se aproveitar ao máximo as informações geradas por cada sistema de aquisição de dados, fortalecendo a rede de conhecimento do território através do mapeamento em diversas escalas e a partir de diversas fontes de dados.

A utilização de imagens orbitais para a atualização e elaboração de novos produtos cartográficos ainda tem muitas restrições. Isto se deve, primeiramente, à sua limitada resolução espacial em relação às fotografias aéreas convencionais, além de outras restrições. Neubert e Meinel (2007), por sua vez, salientam que a influência atmosférica também pode trazer problemas, como os causados por nuvens ou sombras, visto que o usuário é obrigado a aceitar até 20% de cobertura de nuvens.

Outro fator limitante da aplicação dessas imagens à Cartografia é a indefinição quanto aos tipos de correção geométrica a serem utilizados. Diversas técnicas de correção geométrica têm sido amplamente estudadas, dentre elas os modelos matemáticos tridimensionais, como a função polinomial racional 3D.

Deve-se atentar ainda para as características da área estudada. Regiões com o relevo mais acidentado oneram um processamento mais refinado, utilizando-se um MDT (Modelo Digital do Terreno) de melhor qualidade. Por outro lado, regiões com relevo relativamente plano

tendem a facilitar o processamento da imagem, exigindo dados altimétricos menos precisos.

Assim, busca-se analisar diferentes cenários de correção, em relação à modelagem matemática e ao número de pontos de controle. Além disso, é válido o estudo da capacidade de extração de informações dessas imagens para a atualização ou até mesmo geração de novos produtos cartográficos, avaliando as diversas possibilidades e limitações das imagens orbitais de alta resolução.

Devido às muitas variáveis envolvidas no processo de correção de imagens orbitais de alta resolução, estudos que visem à sua aplicação à Cartografia em escalas maiores são de suma importância para o aperfeiçoamento da qualidade dos produtos gerados

1.4 Trabalhos Relacionados ao Tema

Silva (2005) avaliou a qualidade geométrica de imagens IKONOS ortorretificadas pelo modelo RPC e definiu a maior escala de mapeamento adequada ao trabalho com essas ortoimagens. A partir dos MDT's gerados de diferentes bases cartográficas digitais, foram geradas as ortoimagens. Os resultados das avaliações das ortoimagens geradas com os MDT's obtidos a partir das bases 1:2.000 e 1:10.000 mostram que os maiores erros ficam próximos a 2,5 m e, considerando o PEC, as ortoimagens geradas seriam classificadas como documentos cartográficos da classe A para a escala 1:5.000, pois pelo menos 90% dos pontos apresentam erros menores do que 2,5 m. Verifica-se também que não houve melhora significativa na qualidade das ortoimagens

obtidas quando, para a geração do MDT, utilizou-se uma base na escala 1:2.000 ao invés de uma outra na escala 1:10.000.

Abreu (2005) executou a monorrestituição de imagens QuickBird para obtenção de dados de vias, divisas territoriais e edificações em um espaço urbano. Os dados monorrestituídos da imagem Quickbird foram avaliados de acordo com o padrão de exatidão cartográfica para a escala 1:5.000. Por fim, concluiu-se que a metodologia aplicada atendeu ao mapeamento planimétrico de vias, edificações e divisas na escala de 1:5.000.

O professor Dr.-Ing. Karsten Jacobsen, da Universidade de Hannover, publicou diversos trabalhos avaliando as aplicações de imagens de alta-resolução espacial, inclusive as geradas pelo sistema Quickbird. Jacobsen e Büyüksalih (2004) concluíram que a acurácia geométrica não é o principal fator limitante da escala de um mapa gerado a partir de imagem Quickbird. Na realidade, esta limitação está na extração das informações contidas nestas imagens.

Jacobsen (2003) cita que é possível trabalhar com imagens Quickbird na geração de ortoimagens na escala de 1:5.000. Este mesmo autor cita ainda que a maior limitação geométrica para a produção de ortoimagens não está na estabilidade geométrica das imagens, e sim na qualidade do modelo digital de elevação utilizado no processamento. Segundo Jacobsen e Büyüksalih (2004), a extração de informações contidas nestas imagens também é limitada, sobretudo na possibilidade de identificação de alguns objetos. Na elaboração mapa na escala de 1:5.000 nem todos os objetos de interesse podem ser mapeados.

1.5 Estruturação da Pesquisa

A pesquisa proposta está estruturada em cinco capítulos de forma a facilitar a compreensão pelo leitor e a encadear uma seqüência de raciocínio lógico, propícia à leitura e aos estudos que a utilizem.

O capítulo 1 abrange o conteúdo introdutório da dissertação, contendo a introdução, a justificativa, os objetivos e a estruturação da pesquisa.

A Revisão de literatura está exposta no capítulo 2, definindo os principais conceitos inerentes à proposta de estudo. O capítulo dispõe sobre os conceitos básicos relacionados aos sistemas sensores, distorções existentes nas imagens orbitais, técnicas de manipulação das imagens, dentre processamento e correção geométrica, além de conceitos relativos à Cartografia, ao Planejamento, ao Cadastro Técnico Multifinalitário e às novas técnicas de mapeamento.

O capítulo 3 demonstra os métodos utilizados no processamento das imagens nos quatro cenários de correção propostos, expondo a modelagem matemática e a quantidade de pontos de controle e checagem utilizados nos experimentos

No capítulo 4 são demonstrados os resultados obtidos na correção geométrica, expondo a estatística das análises e as limitações relativas a extração de informações e a aplicações das imagens estudadas para a Cartografia urbana.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho com as considerações finais e recomendações.

2 Revisão de Literatura

2.1 Sistemas Sensores

Por muito tempo, as fotografias aéreas convencionais foram fonte primária de dados para o mapeamento topográfico de grandes áreas. Com o constante desenvolvimento dos sistemas sensores, as imagens orbitais vêm se firmando no mercado de dados cartográficos, fornecendo produtos com resoluções cada vez melhores.

Segundo Novo (2008), os sistemas sensores imageadores têm como característica básica a produção de uma imagem bidimensional da radiância, emitância ou retroespalhamento do terreno e, portanto, são aptos a produzir informações espaciais.

Os sistemas sensores imageadores podem ser ainda classificados em função do processo utilizado na formação da imagem. Os sistemas de quadro (*framing systems*) adquirem a imagem da cena em sua totalidade num mesmo instante. Nos sistemas de varredura (*scanning systems*), a imagem da cena é formada pela aquisição seqüencial de imagens elementares do terreno ou “elementos de resolução”, também chamados “pixels”. Os sistemas de varredura podem ser mecânicos, ou seja, a imagem é formada pela oscilação de um espelho ao longo da direção perpendicular ao deslocamento da plataforma, ou eletrônica, a partir de uma matriz linear de detectores, cuja projeção no solo é uma linha formada por tantos *pixels* quantos forem os detectores. Estes sistemas são chamados também de sistemas de varredura eletrônica, pois a imagem é construída linha a linha, de

acordo com o deslocamento da plataforma. Em inglês, esses sistemas são chamados de *pushbroom*. (NOVO, 2008)

Lançado em setembro de 1999, o satélite Ikonos abriu uma nova era de sensores disponíveis comercialmente, conhecidos como de alta resolução espacial, com o tamanho do pixel de 1 metro. Outros sucessores, como o QuickBird-1, OrbView-3, EROS-A1, e FORMOSAT-2, estão oferecendo imagens de alta resolução de 0,62 a 2 metros. Em um futuro próximo, o número de satélites de alta resolução vai crescer com o CARTOSAT-2, KOMPSAT-2, EROS-B e o Pleiades, gerando imagens de 0,7 até 1 metro de resolução espacial. Com a resolução espacial de 0,5 metro, estarão disponíveis imagens dos sensores WorldView-1, World View-2 e OrbView-5 (TAO et al., 2006).

2.1.1 Resolução Espacial

De acordo com Crosta (1993), a maneira mais comum para determinar a resolução espacial de um sensor é pelo seu campo instantâneo de visada ou IFOV (*Instantaneous Field Of View*). Este campo é determinado pelas propriedades geométricas do sistema sensor, e define a área do terreno imageado ‘vista’ pelo instrumento sensor de uma dada altitude e a um dado momento.

Mather (2004) ressalta que a medida mais comumente utilizada para representar a resolução espacial é o IFOV. Este é definido como a área no solo que, em teoria, é vista pelo instrumento de uma determinada altitude e em determinado instante de tempo. O IFOV pode ser medido através de duas maneiras, como o ângulo α ou, de forma equivalente, como a distância XY no terreno para uma dada altura do

sensor. Na figura 1, a seção transversal (XY) representa na verdade o diâmetro do círculo.

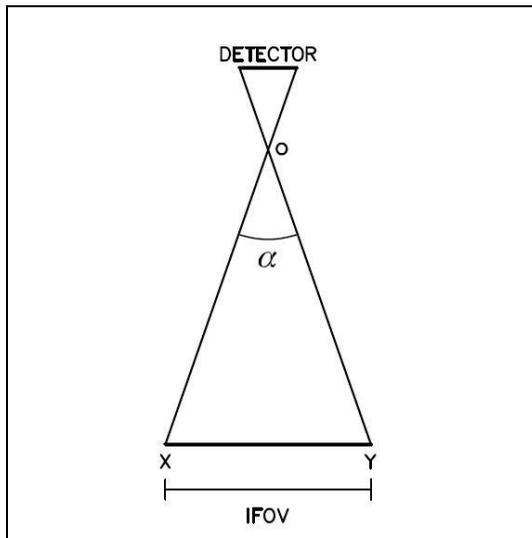


Figura 1: Resolução espacial definida pelo campo instantâneo de visada, o IFOV.

A restrição relacionada à resolução espacial das imagens de dado sensor pode ser considerada das mais importantes, pois é o primeiro parâmetro limitador da escala de um produto gerado a partir dessas imagens. Moreira (2005) salienta que os erros introduzidos no mapa devido à resolução do sensor são de difícil controle porque fogem de qualquer esforço do fotointérprete no sentido de minimizá-los.

Topan, Büyüksalih e Jacobsen (2006) citam que mapas topográficos devem ter uma acurácia de aproximadamente 0,25 mm na escala do mapa. Em teoria, uma imagem de resolução espacial de 1 m poderia gerar uma carta na escala máxima de 1:4000. Mas é evidente

que a restrição relacionada à resolução espacial não é a única determinante da escala dos produtos derivados de imagens orbitais.

2.1.2 Resolução Radiométrica

Segundo Mather (2004), a Resolução radiométrica refere-se ao número de níveis digitais utilizados para armazenar os dados coletados pelo sensor. Em geral, quanto maior o número de níveis, maior a quantidade de informações armazenadas pelo sensor. O número de níveis é geralmente expresso em termos do número de dígitos binários (bits) necessários para armazenar o número máximo de níveis digitais. Assim, para um nível dois de representação (preto/branco), o número de bits por pixel exigido é 1 (que define dois estados - 0 e 1), enquanto que para 4, 16, 64, 256 e 2048 níveis, o número de bits requerido é de 2, 4, 6, 8 e 11, respectivamente.

Dessa forma, a extração de informações de uma imagem é potencializada de acordo com o aumento da resolução radiométrica, conseguindo-se discriminar de forma mais refinada as variações radiométricas de uma mesma feição.

Segundo Jacobsen (2003b), a qualidade radiométrica das imagens espaciais é, normalmente, melhor do que as fotografias aéreas tradicionais. De acordo com Jacobsen (2005), os sensores orbitais CCD's (Charge Coupled Device) mais modernos, como o Quickbird, têm uma resolução radiométrica de 11 bits, correspondendo a 2048 níveis de cinza.

2.1.3 Resolução Espectral

Mather (2004) refere-se ao termo resolução espectral como a largura das bandas espectrais medidas em micrometros (μm) ou nanômetros (nm). A posição no espectro, largura e número de bandas espectrais determinam o grau com que alvos individuais (espécies vegetais, culturas, tipos de rocha, etc.) podem ser discriminados nas imagens multiespectrais.

Para Jensen (2005), resolução espectral é o número e a dimensão (tamanho) dos intervalos de comprimentos de onda específicos (bandas ou canais) no espectro eletromagnético que um dado sensor remoto é sensível. Quanto maior o número de bandas e menor a largura do intervalo, maior é a resolução espectral do sensor.

2.1.4 Resolução Temporal

Outra importante propriedade de um sistema de sensoriamento remoto é a sua resolução temporal, isto é, o período de tempo entre sucessivas datas de aquisição de imagens de um determinado ponto. Este tempo de revisita pode ser medido em minutos, se o satélite for geoestacionário, ou em dias ou semanas, se o satélite se desloca em órbita ao redor da superfície terrestre (MATHER, 2004).

Sensores remotos que têm a habilidade de registrar uma mesma cena em intervalos de tempo relativamente curtos geram uma série de dados com boa resolução temporal. Em contraste, sistemas que só podem gerar imagens de uma determinada região em grandes intervalos produzem dados com uma resolução temporal ruim (CAMPBELL, 2002).

2.1.5 Imageadores CCD

O CCD (*Charge Coupled Device*) é um conjunto de vários detectores, que utiliza a microeletrônica e o silício como material básico, acoplados a um circuito integrado. Esses imageadores operam na faixa espectral entre 400 e 1.100 nm (MOREIRA, 2005).

De acordo com Jensen (2005), uma matriz linear de detectores registra a quantidade de luz refletida ou transmitida através da área imageada ao longo da matriz e executa a digitalização. A matriz linear avança na direção de movimento da plataforma, e outra linha de dados é digitalizada. Cada detector representa um pixel, definindo a resolução espacial da imagem.

A relação entre as linhas CCD's, bem como o seu alinhamento geométrico, tem que ser verificada após o lançamento. A grande aceleração pode mudar a posição exata das linhas CCD's no sensor. Além disso, a locação dos CCD's das imagens multiespectrais tem que ser conhecida em relação ao conjunto CCD's pancromático. Uma calibração é possível por meio de pontos de controle e sobreposição de cenas (JACOBSEN, 2006).

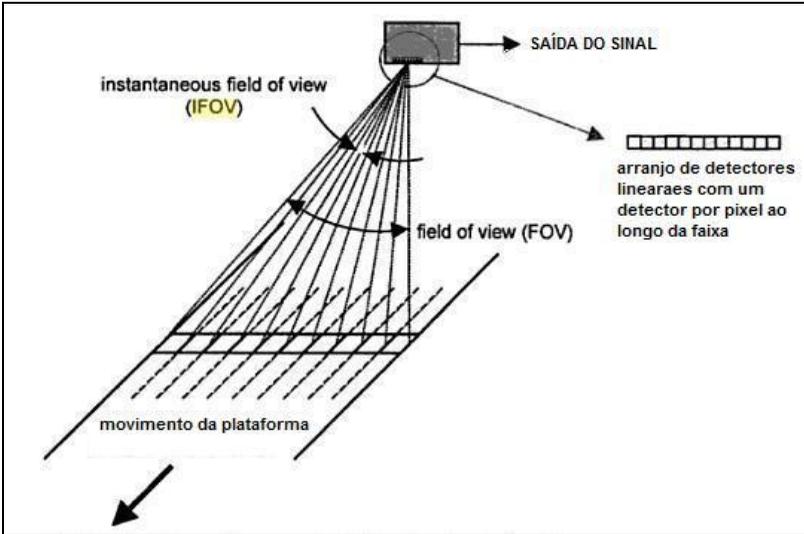


Figura 2: Linha de escaneamento *pushbroom* com o IFOV determinando o tamanho do pixel. Adaptada: Richards e Jia (2006)

2.2 Sistema Quickbird

O sistema Quickbird foi lançado em outubro de 2001 pela empresa americana Digital Globe, proprietária e responsável por sua operação. Este sistema é capaz de produzir imagens pancromáticas com resolução espacial de 0,61 a 0,72 m, além de imagens multiespectrais com resolução espacial de 2,44 a 2,88 m, dependendo do ângulo de inclinação do sensor (que varia até 25° fora do nadir). O sensor pode ser inclinado para produzir estéreo imagens, garantindo uma capacidade de revisita de um a três dias e meio. As imagens são disponibilizadas no modo *basic* (correção sistemática), *standard* (geometricamente corrigida para um sistema de projeção), além das formas ortoretificadas (MATHER, 2005).

O satélite possui sensores do tipo CCD (*Charge Coupled Device*), que realizam varredura eletrônica em fileira linear (*pushbroom linear array*) flexíveis para visadas fora do nadir de até 25° ao longo do terreno imageado, permitindo uma cobertura mais freqüente do terreno e a aquisição de imagens com estereoscopia (PINHEIRO, 2003).

Segundo Jacobsen (2003a), a imagem básica é uma fusão das linhas de sensores individuais CCD's corrigidas. Isto corresponde à geometria formada por diferentes linhas CCD's, com 27.552 elementos sem distorção geométrica.

A Digital Globe disponibiliza imagens nas formas PAN (pancromática), MS (multiespectral) e uma imagem denominada "*Pan-sharpened*" que possui 0,70 m de resolução, uma composição colorida natural (vermelho, verde e azul) ou infravermelho (vermelho, verde e infravermelho-próximo). As imagens PAN e MS são adquiridas com 11 bits, podendo ser entregues em 8 bits ou 16 bits (KUX; PINHEIRO, 2005). A tabela 1 mostra as características básicas do Sistema Quickbird.

Tabela 1: **Características do Sistema QuickBird.**

Data de lançamento	18 de Outubro de 2001	
Altitude de órbita	450 Km	
Inclinação da órbita	97,2 graus, em sincronismo com o sol	
Velocidade	7,1 Km/segundo	
Horário de cruzamento no Equador	10h30min	
Tempo de revisita	1 a 3,5 dias dependendo da latitude	
Largura de imageamento	16,5 Km no nadir	
Acurácia nominal	23 metros na horizontal (CE90%)	
Resolução radiométrica	11 bits	
Resolução espacial	Pan: 0,61 m (nadir) até 0,72 m (25° fora do nadir) MS: 2,44 m (nadir) até 2,88 m (25° fora do nadir)	
Bandas	Pancromática	450 - 900 mm
	Azul	450 - 520 mm
	Verde	520 - 600 mm
	Vermelho	630 - 690 mm
	Infravermelho próximo	760 - 900 mm

Adaptada: Digital Globe (2006)

2.3 Distorções Geométricas

Dados gravados por sensores presentes nos satélites e aeronaves podem conter erros na geometria e nos valores medidos de brilho dos pixels. Estes últimos são definidos como erros radiométricos e podem ser causados pelos instrumentos utilizados para registrar os dados, pela dependência dos comprimentos de onda da radiação solar e por efeitos da atmosfera. Porém, os erros na geometria da imagem podem surgir de muitas fontes. (RICHARDS; JIA, 2006).

Novo (2008) salienta que existem mais fontes de distorções geométricas em imagens de sensoriamento remoto do que as de distorções radiométricas. As principais fontes de erro geométrico são: a) curvatura terrestre; b) distorção panorâmica; c) rotação da terra; d) Instabilidade da plataforma. Além das distorções citadas, outra distorção que muito afeta as imagens de sensores orbitais de alta-resolução é a causada pelo relevo, que será citada adiante no item 2.6.

De acordo com Toutin (2004), as fontes de distorção podem ser agrupadas em duas grandes categorias: o Observador ou sistema de aquisição (plataforma, sensor de imageamento e outros instrumentos de medição, como giroscópio, sensores estelares, etc.); e o Observado (atmosfera e Terra).

2.3.1 Curvatura Terrestre

A baixa altitude dos sistemas sensores aéreos, que geram produtos com uma estreita faixa de imageamento, faz com que essas imagens não sejam afetadas pela curvatura da Terra. Da mesma forma, imagens geradas por sistemas orbitais com campo de visão estreito também não são afetadas, novamente por causa da estreita faixa imageada por esses sensores (RICHARDS; JIA, 2006).

Dessa forma, das distorções citadas nessa revisão, a causada pela curvatura terrestre pode ser desconsiderada em imagens Quickbird. Isto se deve à pequena extensão da faixa de varredura desse sensor, 16,5 Km, podendo-se negligenciar os erros pela curvatura.

2.3.2 Distorção Panorâmica

As distorções panorâmicas são causadas pela variação do tamanho do *pixel* ao longo da linha de varredura em direção às extremidades da faixa imageada. Esta distorção é causada porque o campo instantâneo de visada do sensor é constante ao longo da linha de varredura, o que faz com que o tamanho do *pixel* aumente com o aumento da distância ao ponto nadir (NOVO, 2008).

Pelo fato de o sensor ser móvel, a taxa de repetição de imageamento pode ser reduzida a três dias, porém isto ocasiona problemas de visada inclinada e uma diminuição na resolução espacial da imagem (NEUBERT; MEINEL, 2007).

De acordo com Jacobsen (2002), o tamanho do pixel em imagens com visão inclinada, como Quickbird, depende do ângulo de inclinação em relação ao nadir. Segundo o mesmo autor, o tamanho do pixel a um ângulo de visada de 45° é duas vezes maior que o tamanho do pixel no nadir.

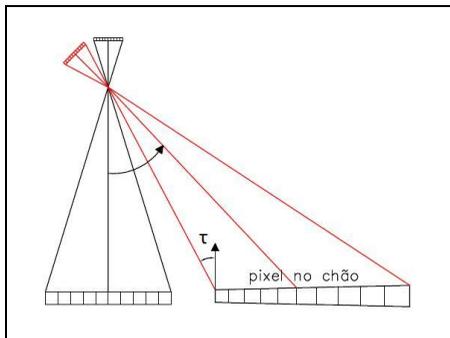


Figura 3: Tamanho do pixel no chão dependendo do angulo local τ com o nadir.

Adaptada: Jacobsen (2003a)

2.3.3 Rotação da Terra

Segundo Jensen (2005), sistemas sensores percorrem a sua órbita a partir do norte para o sul em modo descendente. Enquanto isso, a terra gira sobre seu eixo de oeste para leste, fazendo uma revolução completa a cada 24 horas. Essa interação entre o caminho percorrido pelo sistema orbital e a rotação da Terra sobre seu eixo distorce a geometria das imagens recolhidas. Durante o tempo de aquisição das linhas de varredura, a matriz resultante faz com que um ponto imageado no fim da cena encontre-se posicionado a oeste de um ponto imageado no início da cena.

Para Richards e Jia (2006), durante a aquisição da cena, a rotação da Terra de oeste para o leste faz com que um ponto imageado no final da aquisição fique avançado para oeste. Então, se as linhas de dados gravados da imagem fossem organizadas para exibição em forma de grade, as linhas seriam deslocadas erroneamente para leste em termos de representação do terreno, como mostra a Figura 4.

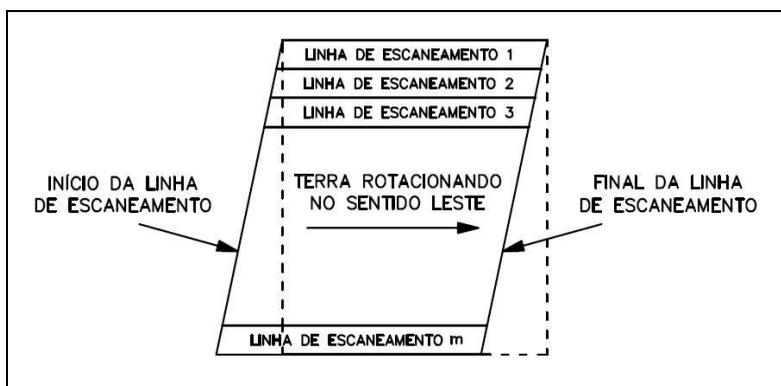


Figura 4: Efeitos da rotação da Terra sobre a geometria de uma linha de imagem digitalizada.

2.3.4 Instabilidade da Plataforma – Atitude e Altitude

A instabilidade da plataforma pode ser separada em cinco componentes, que atuam de forma conjunta e de maneira não uniforme, produzindo distorções. Estas componentes são: variação na altitude, na velocidade e nos três eixos de rotação do satélite, conhecidos por “roll”, “pitch” e “yaw” (CROSTA, 1992).

Se o sensor remoto muda gradualmente sua altitude ao longo da uma direção de vôo, então haverá uma mudança na escala da imagem. Nas situações em que a plataforma do sensor mantém a sua altitude constante, esta pode girar aleatoriamente em torno dos três eixos distintos de rotação. *Roll* é o eixo materializado pela direção da órbita do sensor, sua variação gera compressão e/ou expansão da imagem na direção perpendicular à linha tomada das imagens. Da mesma forma, se a plataforma variar um ângulo ϕ sobre o *Pitch* (eixo perpendicular à linha de tomada das imagens), a imagem será comprimida e/ou expandida na direção da órbita do sensor. Se a variação ocorrer no eixo *Yaw* (eixo vertical), a imagem sofrerá uma rotação em relação à linha de tomada das imagens (JENSEN, 2005).

De acordo com Richards e Jia (2006), se houver variação de velocidade da plataforma, haverá uma distorção na escala ao longo da direção de movimento da plataforma. As distorções citadas nos itens 2.3.3 e 2.3.4 estão representadas na Figura 5.

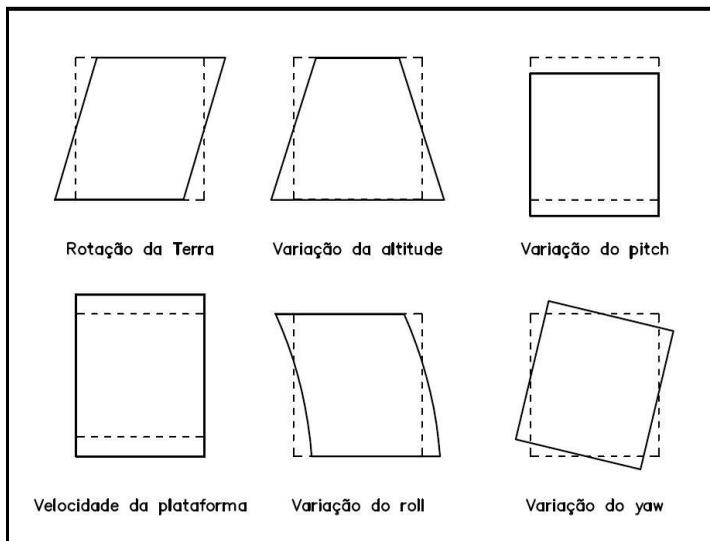


Figura 5: Efeitos das distorções não-sistemáticas em imagens orbitais.

Adaptada: Crosta (1992)

2.4 Processamento Digital das Imagens

No contexto da análise digital de dados de sensoriamento remoto, o processamento refere-se àquelas operações que são preliminares à análise principal. De acordo com Campbell (2002), os processamentos mais típicos podem incluir: pré-processamento radiométrico para corrigir os valores digitais dos efeitos da nebulosidade atmosférica e o pré-processamento geométrico para registrar a imagem a um mapa ou com outra imagem.

Com o advento das imagens de alta resolução espacial, as técnicas fotogramétricas têm sido cada vez mais utilizadas na correção geométrica e no processamento de imagens orbitais. Além das formas de

registro citadas anteriormente, pode-se ainda, registrar a imagem a partir da implantação de pontos de controle com o uso de sistemas de posicionamento global.

Outra forma de melhorar a qualidade dos produtos é a combinação de imagens de menor resolução espacial com imagens de melhor resolução espacial. Para isso, vários métodos podem ser utilizados, como a Análise das Componentes Principais (ACP), a adição de bandas e a transformação IHS, descrita no item 2.4.1.

2.4.1 Fusão – Transformação IHS

Uma das técnicas de realce disponíveis é a conversão de cores do espaço RGB (o brilho das bandas individuais do vermelho, verde e azul) para o espaço IHS (*Intensity, Hue, Saturation*), ou seja, Intensidade, Matiz e Saturação. No sistema IHS, a Intensidade descreve o brilho, o Matiz descreve a cor em termos de seu comprimento de onda e a Saturação é a quantidade de cor presente, ou seja, a distinção entre o vermelho e o cor-de-rosa (NOVO, 2008).

Esses atributos podem ser analisados e manipulados individualmente, ao contrário do sistema RGB, onde eles são intrinsecamente interligados. Eles descrevem a formação de cores de uma maneira muito mais próxima àquela pela qual o sistema visual humano as percebe (CROSTA, 1992).

Segundo Novo (2008) a transformação IHS tornou-se um dos métodos mais utilizados de fusão de imagens, seja do mesmo sensor, com a finalidade de melhorar a resolução espacial, seja para fundir imagens de diferentes sensores.

Inicialmente, a transformação isola as informações espectrais contidas em três bandas em dois canais, o do Matiz e da Saturação. Dessa forma, o brilho da cena é separado no campo de Intensidade. Então este é substituído por outra banda com melhor resolução espacial. Para concluir, transforma-se do espaço IHS para RGB, gerando-se assim a imagem fundida. A Figura 6 mostra o esquema com as fases da transformação IHS.

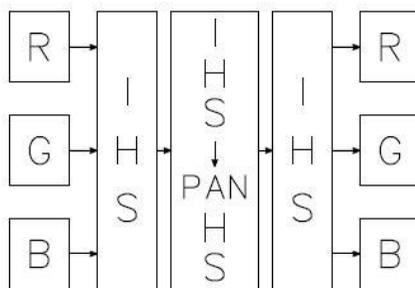


Figura 6: Princípio de transformação IHS.

A fusão IHS é de suma importância no processo de mapeamento a partir de imagens, como as geradas pelo sistema Quickbird, isto porque a resolução espacial máxima dessas imagens é conseguida no modo pancromático. Com esta fusão, pode-se combinar a riqueza espectral das bandas do espectro visível com a resolução espacial do modo pancromático.

2.5 Correção Geométrica

Todas as distorções geométricas requerem modelos matemáticos para se executar as devidas correções na imagem: ou por

modelos empíricos 2D/3D (tal como polinômio 2D/3D ou funções racionais 3D) ou com modelos rigorosos 2D/3D físico-determinísticos. Com os modelos físicos 2D/3D, que refletem a realidade da geometria de visada (plataforma, sensor, Terra e, às vezes, sistema de projeção cartográfica), a correção geométrica pode ser executada passo a passo, com uma função matemática para cada distorção; ou simultaneamente, com uma função matemática combinada. A solução passo a passo é geralmente aplicada na estação receptora, quando os distribuidores de imagem vendem produtos já processados, enquanto que os usuários finais geralmente usam e preferem a solução combinada (TOUTIN, 2004).

Toutin (2004) ressalta que modelos empíricos 2D/3D podem ser usados quando os parâmetros dos sistemas de aquisição ou o modelo físico do sensor não são disponíveis. Estes modelos são baseados em diferentes funções matemáticas, como as representadas a seguir:

1) Funções polinomiais 2D:

$$P_{2D}(XY) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} X^i Y^j \quad (1)$$

2) Funções polinomiais 3D:

$$P_{3D}(XYZ) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X^i Y^j Z^k \quad (2)$$

3) Funções racionais 3D:

$$R_{3D}(XYZ) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p b_{ijk} X^i Y^j Z^k} \quad (3)$$

onde: X, Y e Z são as coordenadas no espaço objeto;

i, j, k são incrementos inteiros e

m, n e p são valores inteiros, geralmente compreendidos entre 0 e 3,

com m+n (ou m+n+p) sendo a ordem das funções polinomiais, geralmente três.

De acordo com Toutin (2004), as funções polinomiais 2D, como a solução mais simples, foram utilizadas até a década de 80, principalmente em imagens cujas distorções sistemáticas, excluindo o relevo, já eram corrigidas pelos fornecedores da imagem.

Este tipo de georreferenciamento é limitado a resultados grosseiros. Isto se deve ao fato de se negligenciar a influência do modelo do sensor e, especialmente, das informações do relevo; embora que para algumas aplicações a precisão possa ser suficiente. Por exemplo, em um local com o mínimo de variação no relevo este modelo pode resultar em um georreferenciamento de qualidade aceitável (WILLNEFF; POON, 2006).

De acordo com Willneff e Poon (2006), a limitação deste método é bastante evidente, pois a influência do relevo do terreno e o modelo do sensor não são considerados. Localmente, em áreas predominantemente

planas, o georreferenciamento pode ser suficiente para algumas aplicações.

Para a implantação de uma transformação polinomial 2D de primeira ordem necessita-se de um número mínimo de 3 pontos de controle, a fim de se obter 6 parâmetros de transformação aplicados entre os planos de projeção. De acordo com o aumento no número de pontos de controle pode-se trabalhar com polinômios de maior ordem. Para um polinômio de grau 2 necessita-se de 7 pontos de controle. Em um polinômio de grau 3 necessita-se de um total de 11 pontos.

$$\text{Polinômio de 1ª ordem: } x' = a_0 + a_1x + a_2y \quad (4)$$

$$y' = d_0 + d_1x + d_2y \quad (5)$$

$$\text{Polinômio de 2ª ordem: } x' = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \quad (6)$$

$$y' = y_0 + y_1x + y_2y + y_3xy + y_4x^2 + y_5y^2 \quad (7)$$

Polinômio de 3ª ordem:

$$x' = c_0 + c_1x + c_2y + c_3xy + c_4x^2 + c_5y^2 + c_6x^2y + c_7xy^2 + c_8x^3 + c_9y^3 \quad (8)$$

$$y' = h_0 + h_1x + h_2y + h_3xy + h_4x^2 + h_5y^2 + h_6x^2y + h_7xy^2 + h_8x^3 + h_9y^3 \quad (9)$$

onde: x' e y' representam as coordenadas na imagem não corrigida gerada pelo sistema de matriz das coordenadas georreferenciadas (x, y) .

As funções polinomiais 3D são uma extensão das funções polinomiais 2D, adicionando-se termos relacionados com a terceira dimensão do terreno. Estas são aplicáveis para pequenas imagens, necessitando de muitos pontos de controle, regularmente distribuídos e localizados corretamente na imagem, pois sua formulação é muito sensível a erros. A sua utilização deve ser

limitada a pequenas imagens ou para correção sistemática de imagens, onde todas as distorções, exceto o relevo, são pré-corrigidas (TOUTIN, 2004).

Para se ter êxito nas correções de imagens orbitais de alta resolução, é fundamental a aplicação de um método confiável para ortoretificar esses dados. Segundo Boccardo et al. (2004), a correção geométrica de imagens orbitais de alta-resolução pode ser feita usando duas aproximações diferentes: os modelos rigorosos ou a modelagem não-paramétrica. Estes modelos são melhor explicados no item 2.6.3.

2.6 Ortoretificação

A ortoprojeção de imagens de satélites é um procedimento usado para representar, em um plano prefixado, a correta projeção ortogonal da área delimitada pelo sensor durante a aquisição. Este produto é obtido pela projeção ortogonal de cada pixel da imagem da área sobre um plano cartográfico, de tal modo que a representação original em perspectiva (uma perspectiva cilíndrica deformada, no caso de aquisição *pushbroom*) é transformada metricamente equivalente em uma imagem corrigida (BOCCARDO et al., 2004). A Figura 7 mostra os efeitos do relevo na geração de uma imagem orbital, onde se pode observar o erro de projeção em áreas com altitudes diferentes do plano de referência.

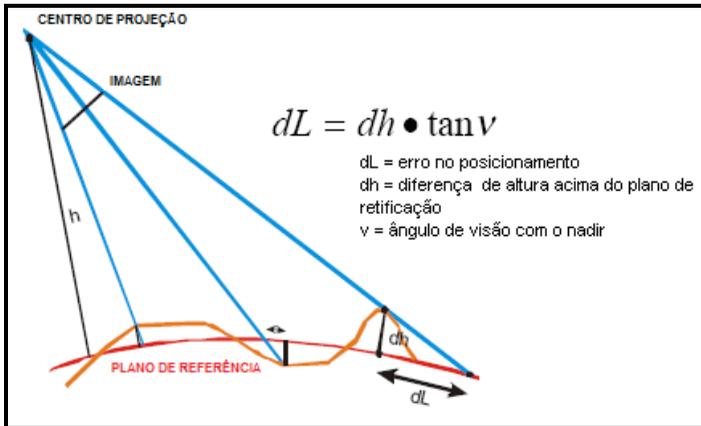


Figura 7: Erro posicional causado pela variação do relevo e pela inclinação do sensor. Adaptada: Jacobsen (2002)

A fotogrametria clássica é baseada na extração de MDT (modelo digital do terreno) a partir do processamento de um estereopar, seguido pela ortoretificação de uma das duas imagens; também é possível a utilização de um MDT pré-existente, com qualidade compatível à escala do produto final, e com a introdução de alguns pontos de controle (VOLPE, 2003).

De acordo com Passini e Jacobsen (2006), a precisão dos parâmetros de orientação da imagem e o modelo digital do terreno são de suma importância para a prosperidade de um projeto de ortoretificação. O número e a distribuição dos pontos de controle em conjunto com o modelo de orientação são de fundamental importância para a precisão dos parâmetros de orientação.

2.6.1 Pontos de Controle

Segundo Andrade (1998), a finalidade primordial, mas não única, dos pontos de controle é a materialização do referencial com o qual se deseja trabalhar.

O número de pontos de controle depende de diferentes condições: do método de coleta, do tipo de sensor e sua resolução, do tamanho da imagem, do modelo geométrico, da área estudada, da definição e precisão dos pontos de controle, além da exatidão esperada para a correção (TOUTIN, 2004). No processamento de imagens de alta resolução espacial, os pontos geralmente são coletados e processados através de sistemas de posicionamento global - como o GPS - seguindo os critérios de precisão exigidos para a correção da imagem, precisão esta da ordem dos centímetros.

Richards e Jia (2006) salientam que a regra geral é que deve haver uma distribuição dos pontos de controle nas bordas da imagem a ser corrigida, além de pontos espalhados sobre o corpo da imagem. Esse espalhamento dos pontos de controle deve ser uniforme ao longo da imagem.

As coordenadas dos pontos de controle podem ser obtidas na imagem, interativamente em tela ou automaticamente, usando pontos de controle gravados na base de dados da imagem e ferramentas de correlação (TOUTIN, 2004). De forma ideal podem-se identificar os pontos de controle com o auxílio de inteligência artificial, mas com a interação e a avaliação do profissional, garantindo a qualidade e a correta distribuição dos pontos de controle na imagem.

No processo de ortorectificação, o nível mais alto de precisão só pode ser alcançado com pontos de controle e, além destes, com pontos de checagem independentes para confirmar o processo de correção. Fica claro que a precisão na determinação das coordenadas dos pontos de controle deve ser suficiente, porém a precisão na sua definição nas imagens também é fundamental. Na escolha dos pontos de controle é freqüente o uso de pontos em quinas, como os cantos de construções ou cantos de outros objetos (JACOBSEN; BÜYÜKSALIH; TOPAN, 2005). Além desses, interseções de vias, elementos circulares e geométricos facilmente identificáveis também podem ser usados como pontos de controle. De maneira geral, estes pontos devem ser facilmente identificáveis em campo e na imagem, com contraste entre feições suficiente para sua inserção na imagem.

2.6.2 Modelo Digital do Terreno – MDT

De acordo com Li, Zhu e Gold (2005), um modelo digital do terreno (MDT) é um modelo matemático (ou digital) da superfície do terreno. O MDT emprega uma ou mais funções matemáticas para representar a superfície, conforme métodos específicos baseados em dados de medições de pontos fixos do terreno. Estas funções matemáticas usualmente referem-se a funções de interpolação.

As formas de aquisição dos pontos de amostragem da superfície podem ser feitas de várias maneiras, como a partir de levantamento topográfico; levantamento geodésico através de sistema de posicionamento global; através de fotogrametria e de imagens orbitais, com a geração de pares estereoscópicos; e mais recentemente, através de

dados Laser gerados pelos sistemas LIDAR (*Laser Detection And Ranging*).

2.6.3 Funções Polinomiais Racionais

Segundo Cheng, Toutin e Zhang (2003), vários métodos de correção geométrica 3D podem ser usados para corrigir os dados, entre eles: a função polinomial racional 3D obtida a partir dos GCP's do usuário; a função polinomial racional 3D obtida com os dados do sensor; e o método 3D rigoroso (físico).

Um modelo do sensor descreve a relação geométrica entre o espaço objeto e o espaço imagem. O modelo relaciona a coordenada do objeto 3D a uma coordenada 2D da imagem. Os dois modelos geométricos da imagem amplamente usados são o modelo físico do sensor e o modelo genérico do sensor. O modelo físico do sensor é usado para representar o processo de imageamento físico, fazendo o uso de informações de posição e orientação do sensor (HU; TAO; CROITURU, 2004).

O modelo rigoroso permite uma descrição tridimensional precisa e a ortoretificação da imagem. Yamakawa e Fraser (2004) explica que o acesso ao modelo da câmera e aos dados das efemérides da órbita é indispensável para uma aplicação próspera dos modelos rigorosos.

As funções racionais relacionam o espaço objeto ao o espaço imagem e vice-versa. A vantagem do uso das funções racionais está na independência do sensor, o que significa que o usuário não precisa saber de todos os dados da câmera, internos e externos. As funções racionais

são computadas utilizando-se de informações internas e externas do modelo de sensor (XU, 2004).

De acordo com Volpe (2003), um modelo genérico do sensor materializa a relação que existe entre as coordenadas tridimensionais de um objeto, e as coordenadas correspondentes na imagem em um formato matemático genérico. Segundo Boccardo et al. (2004), a função racional é o modelo não-paramétrico mais comumente usado e que é implantado em quase todos os softwares utilizados para o processamento de imagens de satélite.

De acordo com Cheng et al. (2003), o modelo de função polinomial racional 3D baseado nos pontos de controle computa a função polinomial racional desconhecida a partir de uma série de pontos de controle. Conforme Silva (2005), os coeficientes da função polinomial racional são normalmente determinados pelo método dos mínimos quadrados. Considerando os polinômios da função como sendo do 3º grau, seria necessária para a solução determinística, a disponibilidade de 40 pontos de controle para obtenção de 80 coeficientes. Para uma superabundância, levando a resultados mais confiáveis, seria necessário um número ainda maior de pontos, sem comentar que estes deveriam ser bem distribuídos na imagem. A precisão deste método depende da área estudada, do número e da precisão dos GCP's. Essa solução é conhecida como dependente do terreno.

A solução independente do terreno é viável quando é conhecido o modelo físico do sensor e pode ser descrita detalhadamente da seguinte forma: uma grade bidimensional de pontos é estabelecida sobre toda a extensão do espaço imagem. Uma grade tridimensional

correspondente no espaço objeto é gerada com várias camadas (quatro ou mais para o caso de polinômios de 3ª ordem) de pontos “fatiando” todo o intervalo de elevação. Para cada camada de elevação Z específica, as coordenadas horizontais (X, Y) são calculadas a partir de um ponto de coordenadas (linha, coluna) do espaço imagem utilizando-se o modelo físico do sensor. Então essas coordenadas estabelecidas (espaço imagem) e calculadas (espaço objeto) são utilizadas para se estimar os coeficientes do *RFM*, utilizando-se uma solução pelo método dos mínimos quadrados (SILVA, 2005). Levando-se em conta que o modelo físico do sensor não é fornecido pelas empresas que comercializam as imagens, pode-se considerar o Modelo Funcional Racional como um substituto para a aplicação deste método.

A modelagem matemática do Modelo Funcional Racional (RFM) pode ser representada pelas seguintes equações:

$$r_n = \frac{p1(X_n, Y_n, Z_n)}{p2(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} b_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \quad (10)$$

$$c_n = \frac{p3(X_n, Y_n, Z_n)}{p4(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} c_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} d_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \quad (11)$$

onde: (r_n, c_n) são as linhas e colunas normalizadas dos pixels no espaço imagem.

(X_n, Y_n, Z_n) são valores das coordenadas normalizadas no espaço do terreno.

Os coeficientes polinomiais a_{ijk} , b_{ijk} , c_{ijk} , d_{ijk} são chamados de Coeficientes Racionais Funcionais (RFC).

De acordo com Xu (2004), o RFM foi adotado pela Space Imaging e Digital Globe na comercialização de suas imagens de alta resolução. Este modelo do sensor, definido por 78 coeficientes polinomiais racionais (RPCs), é um modelo alternativo que permite aos usuários realizar o processamento na ausência do modelo físico do sensor. Os RPCs, como fonte alternativa de informações do modelo físico do sensor, são fornecidos pelas empresas comerciantes ao usuário final para processamentos fotogramétricos, tais como ortorectificação, estéreo-restituição, etc.

2.7 Precisão e Acurácia

De acordo com Gemael (1994), a precisão é indicada pela variância estimada δ^2 ou, em termos mais ‘cartográficos’, pelo erro médio quadrático $RMS = \sqrt{\delta^2}$. Em se tratando de variável n-dimensional, a precisão será estimada pelo traço da matriz variância-covariância.

A medida de precisão deve, portanto, ser uma medida de espalhamento. A curva de Gauss, também denominada de Curva Normal, por representar uma distribuição estatística normal, oferece o parâmetro de medida do grau de espalhamento de uma variável em relação a sua média (ANDRADE, 1998).

O termo acurácia é definido pelo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa como sendo a exatidão de uma operação. Pela Norma Técnica de Georreferenciamento de Imóveis Rurais do INCRA, o

conceito de acurácia de um levantamento é entendida como sendo o ‘grau de aproximação de uma grandeza de seu valor verdadeiro’.

De acordo com Andrade (1998), a exatidão é atingida com a eliminação dos erros sistemáticos. Estes podem ter origem nos instrumentos de medição; nas técnicas de medição; e nos modelos matemáticos.

Segundo Gemael (1994), o termo ‘precisão’ está vinculado apenas a efeitos *aleatórios* (à dispersão das observações) enquanto ‘acurácia’ vincula-se a ambos, efeitos *aleatórios* e *sistemáticos*. O mesmo autor explica que a precisão liga-se à ‘repetibilidade’ de medidas sucessivas feitas em condições semelhantes, pelo mesmo observador, sobre a mesma quantidade física; isto é, ao menor ou maior grau de ‘concordância’ de tais medidas repetidas.

A tabela 2 mostra os diferentes tipos de erros adotados. Todos estão relacionados ao desvio padrão.

Tabela 2: Erros, suas definições e probabilidades.

ERRO	DEFINIÇÃO	PROBABILIDADE
Padrão	$\pm 1\delta$	68,27%
Provável	$\pm 0,6745\delta$	50,00%
Médio	$\pm 0,7979\delta$	57,51%
EPEM (PEC)	$\pm 1,6449\delta$	90,00%
3 D.P.	$\pm 3\delta$	99,73%

Adaptada: Andrade (1998)

2.7.1 Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC

O Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional e define a classificação de uma carta quanto a exatidão. Este decreto estabelece em seu artigo 8º os critérios relativos à exatidão de uma carta:

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

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

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

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

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

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

O artigo 9º trata da classificação das cartas conforme ao padrão de exatidão:

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

a) *Classe A*

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

b) *Classe B*

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

c) *Classe C*

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

2.8 Cartografia e Planejamento Urbano

Hoje, o planejamento é procedimento inicial de toda e qualquer atividade urbanística, sem ele não há como prevenir o caos urbano. Sem planejamento, a administração pública dificilmente adotará decisões e programas apropriados à satisfação de suas finalidades (SANT'ANA, 2006).

Dessa forma, pode-se compreender mais do que nunca, a importância atual dada ao planejamento. A dinâmica das cidades, cada

vez mais complexa, exige um bom planejamento e uma correta gestão do território por parte de seus administradores.

Costa et al. (2006) salienta que o Estatuto das Cidades delega aos municípios a tarefa de cumprir a função social para as cidades e da propriedade urbana, oferecendo para as cidades um conjunto inovador de instrumentos de intervenção sobre seus territórios, além de uma nova concepção de planejamento e gestão urbana.

De acordo com Loch e Erba (2007), a gestão do território requer o acompanhamento sistemático da dinâmica dos fenômenos que interferem no espaço físico rural ou urbano e exige mapas da área de interesse (em escala compatível à análise que se pretende executar), elaborados em diferentes épocas, de maneira que os gestores visualizem o presente e entendam, através da análise, as mudanças temporais.

Segundo Costa et. al. (2006), a elaboração de uma base cartográfica atualizada é peça fundamental para a administração municipal, pois dela derivam informações úteis para a tributação e gerência dos serviços e do uso do solo. No entanto, a situação dos dados cartográficos dos municípios é, em sua grande parte, precária; muitos desses dados estão desatualizados ou mesmo inexistentes.

Com relação ao planejamento, a concretização se dá através do plano diretor, definido como o instrumento básico da política de desenvolvimento e de expansão urbana. Na elaboração do Plano Diretor, a Cartografia é fundamental para a compreensão da realidade, com diferentes mapas e em variadas escalas.

Os mapas são importantes recursos para facilitar a leitura da realidade local, pois ajudam a visualizar as informações reunidas nas

leituras técnica e comunitária, e localizá-las no território (BRASIL, 2004). Dessa forma, uma Cartografia confiável e atualizada potencializa a extração e análise de dados durante a leitura técnica.

Para alimentar e consolidar a leitura comunitária é importante que o público encontre as informações sistematizadas na leitura técnica, construídas em linguagem acessível à maioria; essas informações são importantes para orientar as discussões, no sentido de estabelecer uma compreensão geral do município. Dentre os aspectos que todos devem conhecer destacam-se, por exemplo, a distribuição dos equipamentos públicos e de infra-estrutura existentes na cidade; a relação entre terras disponíveis para habitação e possibilidade de acesso a elas (para diferentes faixas de renda); localização e caracterização das áreas mais importantes (ou mais ameaçadas) para preservação ambiental e cultural, dentre outros (BRASIL, 2004).

Uma Cartografia atualizada pode gerar as informações importantes para o diagnóstico do ambiente em estudo, otimizando o levantamento de dados a serem utilizados na elaboração de políticas de planejamento e gestão do território.

2.9 O Cadastro Técnico Multifinalitário e as novas técnicas de mapeamento

A origem do cadastro no Brasil concentra-se no chamado Cadastro Econômico, uma vez que objetivava apenas a tributação. Conhecendo-se a forma e as dimensões do imóvel pode-se assim calcular o valor do imposto territorial devido. E na prática, a maioria dos

órgãos governamentais ainda baseia-se nesse objetivo para implantação e gerenciamento dos seus sistemas cadastrais.

O desenvolvimento das tecnologias de medição gerou novas ferramentas de aquisição, manipulação e armazenamento de dados espaciais. Isto possibilitou ao Cadastro Geométrico, formado pelos dados Cartográficos e Alfanuméricos, um aumento no nível de qualidade das informações. Assim, novas concepções cadastrais foram se firmando, como o Cadastro Jurídico, composto pelos dados legais referentes à parcela e que funciona como um importante complemento para o registro dos bens imóveis.

Com a rápida expansão urbana, a necessidade de organização do espaço é fundamental para seus órgãos gestores. Nessa linha, é cada vez mais importante o chamado Cadastro Fiscal. Erba et al. (2005) salienta que o cadastro é fiscal, pois cumpre com seu papel de polícia territorial, fiscalizando, através dos seus funcionários, para que a propriedade cumpra sua função social.

Ao longo dos últimos anos, o desenvolvimento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) trouxe para os gestores públicos uma poderosa ferramenta de geração, armazenamento e manipulação de dados cadastrais. Os SIG's, quando utilizados para gerenciar dados cadastrais, recebem o nome de Sistemas de Informação Territorial – SIT.

Segundo Loch e Erba (2007), entre as funções principais do SIT encontram-se as de integrar dados espaciais, censitários e de cadastro, de imagens de satélite, redes de pontos e modelos numéricos do terreno; utilizar uma base única de dados; cruzar informações através de

algoritmos para gerar mapeamentos temáticos; consultar recuperar, visualizar e permitir saídas gráficas.

Os sistemas de mapeamento computadorizados e os Sistemas de Informação Geográfica tendem a reduzir a importância do mapa físico em favor de bases de dados digitais. Estes últimos são muito mais flexíveis para os diferentes tipos de usuários em um ambiente multifinalitário (FIG, 1995).

Dentro dessa concepção, o cadastro vem se refinando ao longo dos anos, expandindo seu potencial através das novas técnicas de mapeamento digital e dos Sistemas de Informação Geográfica, cada vez mais poderosos e eficientes. Porém, vale ressaltar que as diversas técnicas de mapeamento existentes possuem também diferentes precisões e aplicações à Cartografia. Segundo Loch (2005), o conteúdo e a precisão métrica dos dados geográficos são dependentes da coleta de dados, sendo assim uma atividade de grande importância desde o planejamento e a estruturação de um SIG.

Para a FIG – Federação Internacional dos Geômetras, em sua Declaração sobre Cadastro (Statement on the cadastre), os levantamentos cadastrais são realizados normalmente através dos métodos de levantamento de campo, que vão desde o simples uso de trenas até os mais sofisticados, com o uso de equipamentos de medição eletrônica de ângulos e distâncias (Estações Totais), proporcionando maiores precisões.

Levantamentos cadastrais também podem ser realizados por meio da fotogrametria. Produtos como ortofotomapas podem ser usados para reduzir os custos de mapeamento em áreas especiais (FIG, 1995).

Isto possibilita ao gestor público ampliar o conhecimento sobre o território, facilitando a elaboração de ações de intervenção e planejamento.

Fica claro que a aplicação dos dados cartográficos dentro do cadastro é peça fundamental para o sucesso de um CTM, daí a importância de avaliações coerentes a respeito das tecnologias de levantamento de dados cartográficos. As técnicas de topografia e fotogrametria se consolidaram como as principais fontes de dados para escalas maiores que 1:2.000. Quanto à aplicação de uma ou outra técnica, cabe ao usuário definir a mais economicamente viável, de acordo com a extensão do mapeamento.

Outra importante tecnologia desenvolvida nos últimos anos foi a de posicionamento via satélites. Com o avanço desta tecnologia, a aplicação das técnicas geodésicas se tornou indispensável para o meio cadastral, seja na utilização direta para o mapeamento ou como apoio às outras técnicas, como topografia, fotogrametria ou de sensoriamento remoto.

Segundo Loch e Erba (2007), a geração e/ou a atualização da Cartografia cadastral que historicamente se realizava somente por métodos topográficos, pode ser realizada atualmente a partir de fotografias ou de imagens sendo necessário, porém, levar em conta seus diferentes graus de confiabilidade. Assim, a aplicação dessas imagens é cada vez maior dentro mapeamento urbano em escalas maiores.

Loch e Erba (2007) ressaltam que nos casos em que a escala de trabalho ou as necessidades de um determinado projeto não requeiram maiores precisões e perante a ausência de Cartografia precisa ou a

limitações orçamentárias para elaborar Cartografia de base de precisão (por métodos fotogramétricos ou topográficos), as imagens de satélite de alta resolução são alternativas cada vez mais válidas para a geração de produtos cartográficos temáticos e cadastrais, urbanos e rurais.

3 Materiais e Métodos

Os procedimentos utilizados nesta pesquisa são visualizados sob a forma de um fluxograma, representado na Figura 8.

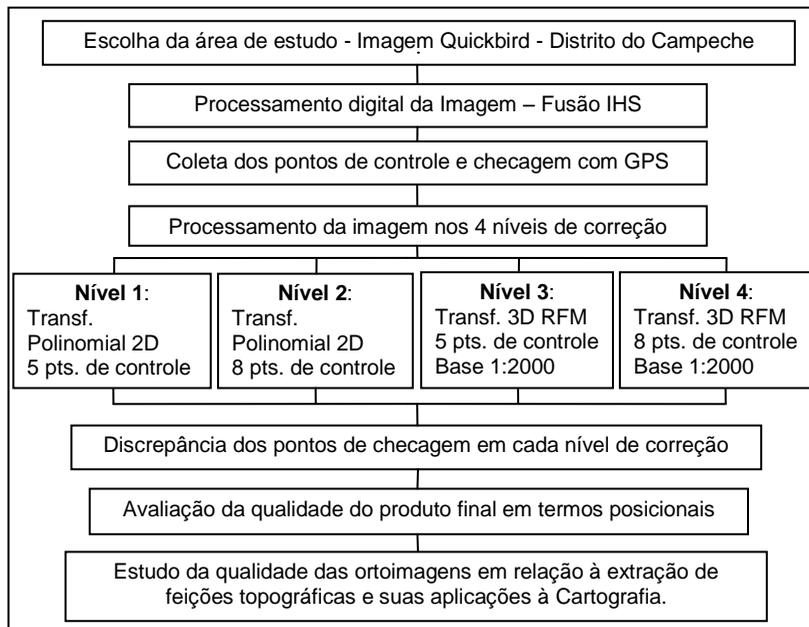


Figura 8: Fluxograma dos procedimentos realizados.

3.1 Área de Estudo

A área escolhida para o desenvolvimento dos trabalhos está situada no distrito do Campeche, no município de Florianópolis/SC. Trata-se de uma área com relevo pouco acidentado, mas com alguns acidentes geográficos - como o morro do Campeche -, importantes para a elaboração da presente pesquisa. Utilizou-se nos estudos parte da cena Quickbird adquirida em junho de 2003.

a) Delimitação da área

Foi definida para o estudo - parte da cena Quickbird - abrangendo a área urbana com aproximadamente 8,5 km², pertencente ao distrito do Campeche. A escolha de tal área deu-se tanto à viabilidade no acesso aos dados necessários para as correções, quanto por atender aos objetivos de estudo propostos para essa dissertação.

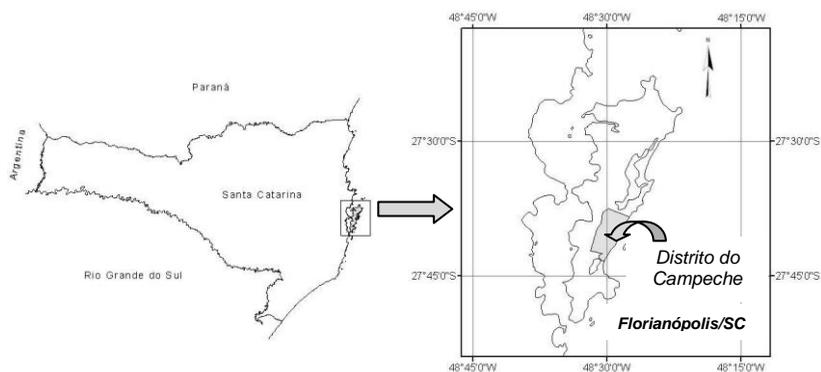


Figura 9: Localização da área de estudo no município de Florianópolis.

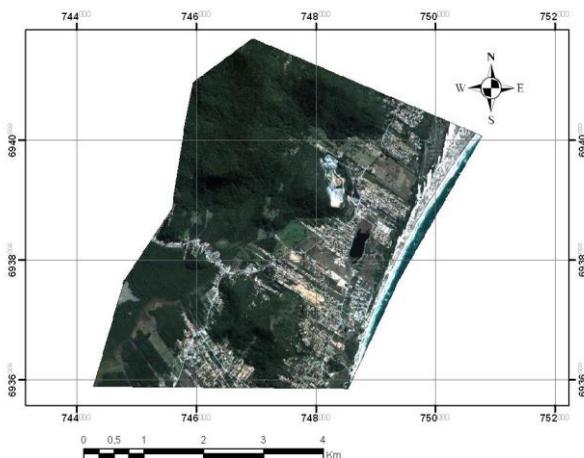


Figura 10: Imagem Quickbird – Parte do distrito do Campeche.

As Figuras 11 e 12 mostram a sobreposição da imagem Quickbird ao modelo digital do terreno, gerado a partir da base cartográfica digital da área. As imagens objetivam demonstrar as características geomorfológicas, onde se pode perceber a predominância de um relevo pouco acidentado, principalmente na área urbanizada. Os trechos acidentados referem-se a áreas não estudadas diretamente por não serem urbanizadas. A Figura 11 mostra uma perspectiva com o ponto de vista do sul para o norte da imagem. Já na Figura 12, pode-se observar a predominância do relevo pouco acidentado, visualizando-se do norte para o sul a imagem da área sobreposta ao modelo 3D.



Figura 11: Visualização “sul-norte” do modelo tridimensional, formado pela sobreposição da imagem Quickbird ao MDT da área estudada, abrangendo parte do distrito do Campeche.

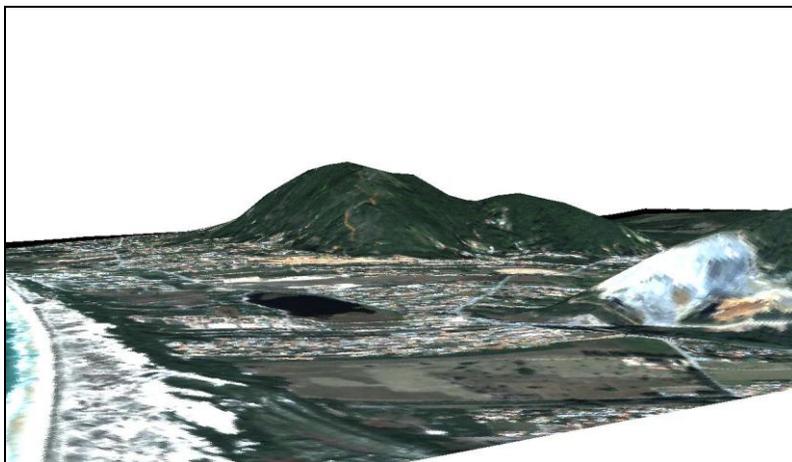


Figura 12: Visualização “norte-sul” do modelo tridimensional, formado pela sobreposição da imagem Quickbird ao MDT da área estudada.

3.2 Materiais Utilizados

3.2.1 Dados de Sensoriamento Remoto

Parte de uma cena Quickbird, acompanhada do arquivo com coeficientes polinomiais com as características descritas nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Metadados da Imagem.

Bandas	1, 2, 3, 4 e pancromática
Resolução Espacial	Pancromática: 0,64
ID da cena	1010010002037B04
Data da aquisição	24/06/2003
OFF-NADIR	11°

Fonte: Digital Globe (Arquive Search)

Tabela 4: Localização da cena.

Vértice	Latitude	Longitude
Sudoeste	-27.8093	-48.5329
Noroeste	-27.6491	-48.5329
Nordeste	-27.6491	-48.3552
Sudoeste	-27.8093	-48.3552
Centro da cena	-27.7292	-48.4439

Fonte: Digital Globe (Archive Search)

3.2.2 Dados Cartográficos

- a. Base cartográfica digital na escala 1:2.000 datada de 2002, executada pela empresa Aeroconsult e fornecida pelo IPUF (Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis).

3.2.3 Equipamentos

- a. Receptor GPS Trimble PRO-XR de 1 frequência, pertencente ao LabFSG da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.2.4 Softwares Aplicativos

- a. Pathfinder Office 3.00: utilizado para o processamento e correção de dados GPS.
- b. AutoCAD Map 2004: utilizado para a edição da base cartográfica.
- c. ArcGIS 9.2: utilizado para a geração do MDT.

- d. ENVI 4.2: utilizado para as etapas de pré-processamento, georreferenciamento e ortorectificação da imagem.
- e. SPRING 5.0.1: utilizado nos procedimentos de segmentação da imagem.

3.3 Descrição das etapas do estudo

Para o desenvolvimento dos trabalhos foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- a. Escolha dos pontos de controle e de checagem.
- b. Coleta dos dados em campo.
- c. Edição da base cartográfica.
- d. Compatibilização entre os sistemas de referência dos dados.
- e. Geração do MDT.
- f. Fusão das bandas multiespectrais com a banda pancromática (IHS).
- g. Operações de contraste nas imagens.
- h. Processamento – Funções Racionais 3D / Transformação Polinomial 2D.
- i. Avaliação da qualidade geométrica das imagens processadas.
- j. Avaliação da aplicação das imagens à Cartografia.
- k. Análise e conclusões.

3.4 Pré-Processamento

A presente etapa envolve as operações preliminares ao processamento da imagem. Essas operações são de fundamental

importância para o sucesso do estudo e estão descritas nos itens seguintes.

3.4.1 Escolha dos pontos de controle e checagem

Para a escolha dos pontos de controle utilizou-se como critério inicial a distribuição uniforme ao longo de toda a área de estudo. Escolhidas as regiões prioritárias, passou-se à definição das melhores feições fotoidentificáveis em cada uma dessas.

Devido à grande possibilidade de descarte de pontos, buscou-se coletar um número maior de pontos de controle para se ter redundância de dados e assim melhorar a qualidade do processamento. No total foram coletados 24 pontos, entre controle e checagem, com receptor GPS de 1 frequência.

a. Pontos de controle geométrico

Na metodologia proposta inicialmente, buscou-se trabalhar com diferentes cenários em relação ao número de pontos de controle. O primeiro cenário previa a implantação de pontos de controle com densidade média de 1 ponto/Km². Em uma segunda situação, foi proposto trabalhar com uma densidade de 1 ponto a cada 2 Km². Porém, a definição em relação a quantidade de pontos de controle se deu durante a etapa de processamento.

Durante os testes de processamento verificou-se que um número demasiado de pontos de controle seria desnecessário para os objetivos, trazendo pouca melhora nos resultados do processamento. Assim, optou-se pela escolha de dois cenários com um número menor de pontos

de controle. Em uma primeira situação estabeleceu-se a utilização de 5 pontos de controle, 4 destes abrangendo regiões próximas às extremidades da área e 1 próximo à região central da imagem. Em um segundo cenário foram utilizados 8 pontos de controle seguindo os mesmos princípios definidos anteriormente, como a distribuição uniforme e buscando-se cobrir os vazios nas extremidades e regiões centrais da imagem. Essa metodologia foi definida tanto para a transformação bidimensional (georreferenciamento) quanto para a tridimensional (ortoretificação).

Bias (2003) considerou que a escolha de uma densidade média de 1 ponto a cada 2 Km² é suficiente para atender às necessidades do ajuste a ser realizado na ortoretificação. Ishikauwa (2001) utilizou em seu estudo um número de 36 pontos de controle para uma área aproximada de 64 km², o que daria uma densidade média 1 ponto a cada 1,8 km².

Nas duas situações definidas para o presente estudo as densidades aproximadas para os pontos de controle são de 1 ponto a cada 2 km² com a utilização de 5 pontos de controle e de 1,6 pontos a cada 2 km² com a utilização de 8 pontos de controle.

b. Pontos de checagem

Para a certificação das correções propostas, buscou-se coletar um maior número de pontos objetivando avaliar a qualidade geométrica das modelagens aplicadas. Os critérios de distribuição foram os mesmos citados no item anterior. Vale ressaltar que estes pontos não foram utilizados nos modelos de correção geométrica das imagens.

3.4.2 Coleta de dados em campo - Pontos GPS

Após a escolha dos pontos de controle e checagem na imagem e na base cartográfica existente, a coleta de informações foi feita através da técnica de posicionamento GPS (Global Positioning System). Com o emprego de um receptor TRIMBLE de 1 frequência, os pontos foram coletados utilizando como padrão para a coleta cerca de 300 posições por ponto, em um intervalo de 5 segundos entre cada posição, cerca de 25 minutos para cada ponto. A linha de base máxima entre a estação de referência e os pontos coletados é de cerca de 10 km. Esses pontos foram pós-processados, obtendo-se desvios variando de 10 a 30 cm. Devido aos objetivos propostos para esta pesquisa, considerou-se que a precisão fornecida por esse método de levantamento foi suficiente para o desenvolvimento dos trabalhos.

Para cada ponto coletado foi feito também um registro fotográfico da local levantado. Esse registro tem como objetivo auxiliar o fotointérprete no momento da inserção dos pontos na imagem. A Figura 13 mostra a identificação do ponto de controle selecionado na imagem através do software ENVI e a foto do ponto no momento da coleta com receptor GPS.

Já na Figura 14, pode-se observar que a distribuição dos pontos de checagem e controle ficou concentrada em apenas uma região da cena. Isso porque essa é a área abrangida pela base planialtimétrica fornecida pelo IPUF, como será visto no item 3.4.5.



Figura 13: Ponto de controle escolhido na imagem e registro fotográfico do momento da coleta.

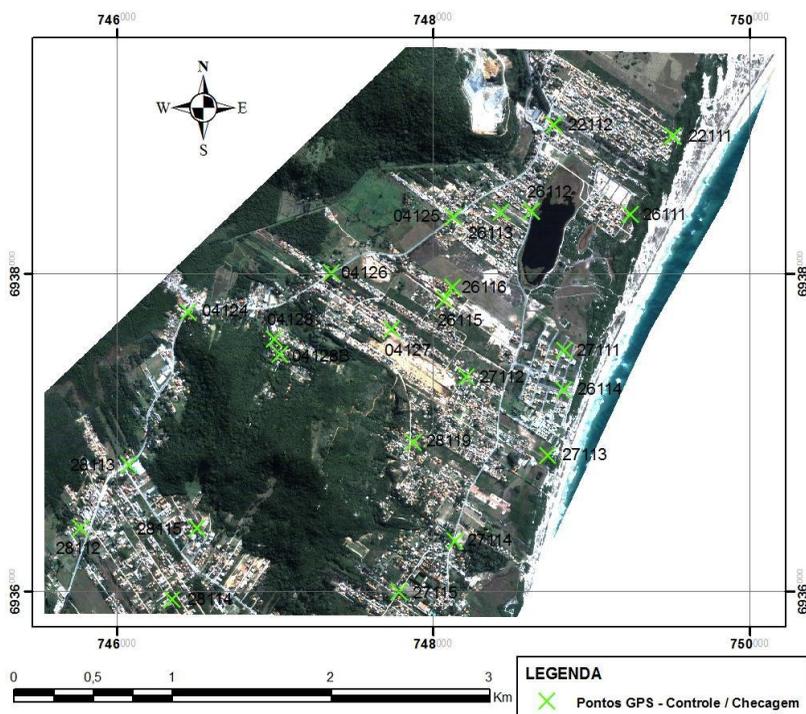


Figura 14: Distribuição dos pontos de controle e checagem coletados em campo através de receptor GPS.

3.4.3 Edição da base altimétrica

Antes da geração do MDT da área de estudo, foi necessária a edição da base cartográfica. A base utilizada foi a fornecida pelo IPUF, na escala 1:2.000 e com equidistância de 1 metro entre as curvas de nível. No entanto, o arquivo bruto encontra-se sem as propriedades de elevação nas curvas de nível. Assim, o primeiro passo foi a inserção, curva a curva, dos dados de elevação. Esses procedimentos iniciais foram elaborados no AutoCAD Map 2004.

A etapa seguinte consistiu na conversão do arquivo editado em formato *dwg* (*drawing*) para *shp* (*shapefile*). Para esta tarefa, utilizou-se a ferramenta de exportação do AutoCAD Map 2004. No procedimento de exportação foi necessário selecionar os atributos da base a ser exportada, neste caso os dados de elevação das curvas de nível.

3.4.4 Conversão entre Sistemas de Referência

Um procedimento importante na elaboração de qualquer projeto cartográfico é a compatibilização dos dados em um mesmo sistema de referência, que deve ser único para toda base de dados. O sistema WGS84 foi o sistema escolhido para a manipulação de todos os dados. Como a base cartográfica utilizada para a geração do MDT encontrava-se em SAD69, foi necessário transformar os sistemas, convertendo a restituição para o WGS84. A Figura 15 mostra um ponto coletado com receptor GPS em WGS84 em relação ao seu homólogo na base cartográfica ainda referenciada ao sistema SAD69.

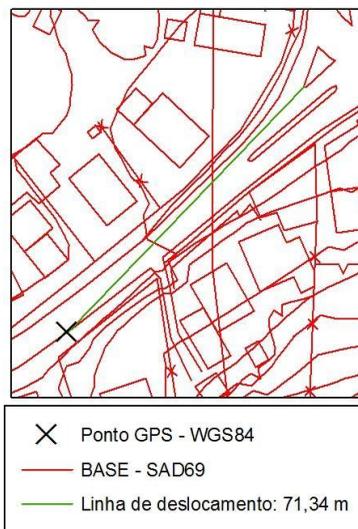


Figura 15: Ponto GPS em WGS84 sobreposto a base cartográfica em SAD69.

Com os dados exportados para *shapefile* utilizou-se o sistema Arccatalog para fazer a edição das propriedades do sistema de referência desses dados. Para a transformação entre sistemas foi utilizado o software Arcgis.

De acordo com a resolução nº 23, DE 21 DE FEVEREIRO DE 1989 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, os parâmetros de transformação oficiais de SAD69 para WGS84 no Brasil são os seguintes:

$$\Delta X = - 66,87 \text{ m} \pm 0,43 \text{ m}$$

$$\Delta Y = + 4,37 \text{ m} \pm 0,44 \text{ m}$$

$$\Delta Z = - 38,52 \text{ m} \pm 0,40 \text{ m}$$

No entanto, o software fornece 14 opções de transformação, dentre elas a que contém os parâmetros oficiais definidos pelo IBGE, conforme pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros de transformação de SAD69 para WGS84 utilizados pelo software Arcgis.

Nome	dx	dy	dz
SAD_1969_To_WGS_1984_1	-57	1	-41
SAD_1969_To_WGS_1984_2	-62	-1	-37
SAD_1969_To_WGS_1984_3	-61	2	-48
SAD_1969_To_WGS_1984_4	-60	-2	-41
SAD_1969_To_WGS_1984_5	-75	-1	-44
SAD_1969_To_WGS_1984_6	-44	6	-36
SAD_1969_To_WGS_1984_7	-48	3	-44
SAD_1969_To_WGS_1984_8	-47	26	-42
SAD_1969_To_WGS_1984_9	-53	3	-47
SAD_1969_To_WGS_1984_10	-61	2	-33
SAD_1969_To_WGS_1984_11	-58	0	-44
SAD_1969_To_WGS_1984_12	-45	12	-33
SAD_1969_To_WGS_1984_13	-45	8	-33
SAD_1969_To_WGS_1984_14	-66,87	4,37	-38,52

Adaptado: ESRI Suport Center

Para a escolha dos parâmetros foram feitos testes, comparando os pontos GPS processados em WGS84 com os dados vetoriais da base já convertida de SAD69 para WGS84. Feito isso, verificou-se que a modelagem matemática melhor adequada aos pontos coletados em campo foi a que contém os seguintes parâmetros:

$$\Delta X = - 62,00 \text{ m}$$

$$\Delta Y = - 1,00 \text{ m}$$

$$\Delta Z = - 37,00 \text{ m}$$

A Figura 16 mostra duas situações verificadas durante os testes de conversão da base. O primeiro caso (item a) mostra o ponto GPS em WGS84 sobreposto à base transformada para WGS84 utilizando os parâmetros do IBGE, onde pode ser observada a posição do ponto

coletado em relação ao seu homólogo na base. A segunda situação (figura 16 b) mostra o mesmo ponto GPS sobreposto a base em WGS, transformada a partir dos parâmetros que melhor se adequaram à conversão. Neste cenário verifica-se que a base transformada adequou-se melhor ao ponto GPS, visto sua posição em relação ao seu homólogo na base.

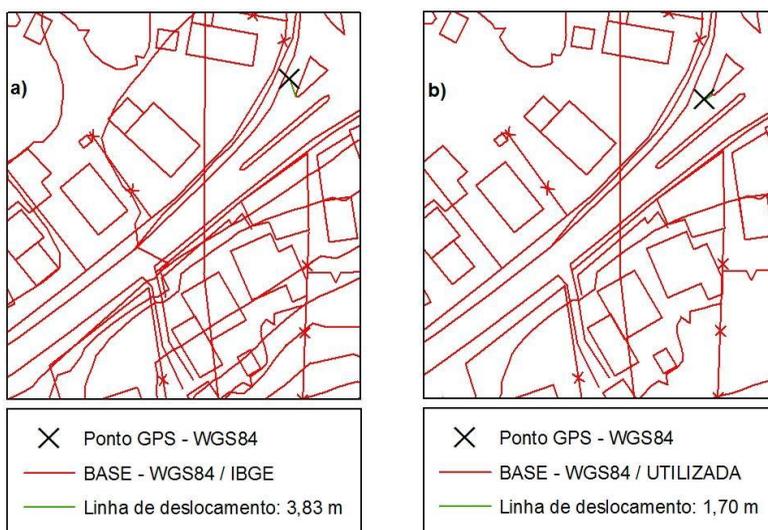


Figura 16: Comparação da transformação entre sistemas: a) Base 1:2.000 em WGS84, transformada a partir dos parâmetros IBGE, com o lançamento do ponto coletado em WGS84. b) Base 1:2.000 em WGS84, transformada a partir dos parâmetros que melhor se adequaram ao trabalho, com o lançamento do ponto coletado em WGS84.

Feita a edição e a conversão de sistemas da base altimétrica, passou-se à etapa de geração do MDT da área de estudo.

3.4.5 Geração do MDT

Como pode ser visto na Figura 17, a base fornecida não contempla toda região da imagem. Portanto, buscou-se limitar a área de estudo e os pontos GPS dentro da região abrangida pela base, evitando-se assim outras fontes de distorção para os dados ortoretificados.

A base cartográfica possui 1 metro de equidistância entre as curvas de nível e, para este estudo, foi considerada isenta de erros. No entanto, previamente a qualquer estudo envolvendo a retificação de imagens, as fontes de dados altimétricos devem ser certificadas antes de sua utilização, resguardando assim a qualidade da correção.

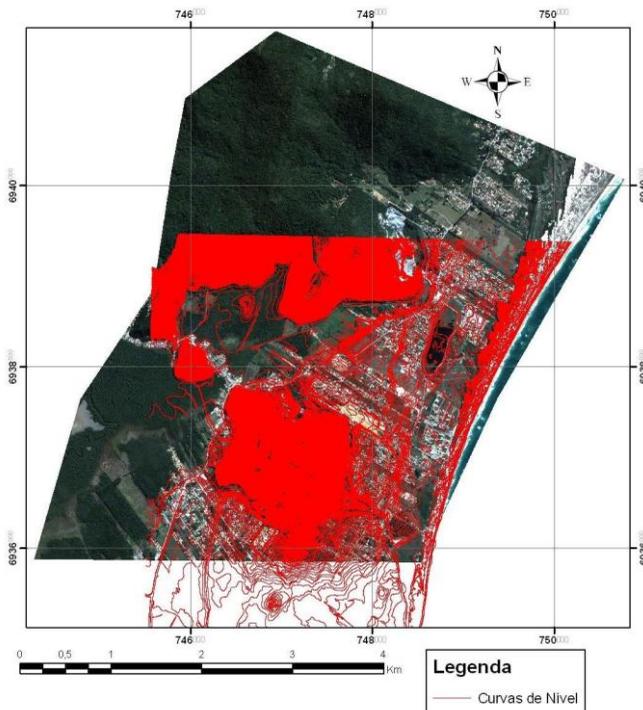


Figura 17: Abrangência da base altimétrica sobre a imagem Quickbird.

É perceptível na Figura 17, a maior concentração de curvas de nível em algumas áreas da imagem, mostrando trechos com maior variação na altimetria. No entanto, estas se referem a áreas sem qualquer urbanização, por isso não foram consideradas no processo de correção. A Figura 18 mostra um recorte da Figura 17 em escala maior. A imagem mostra a existência de mata nas áreas de maior variação altimétrica.

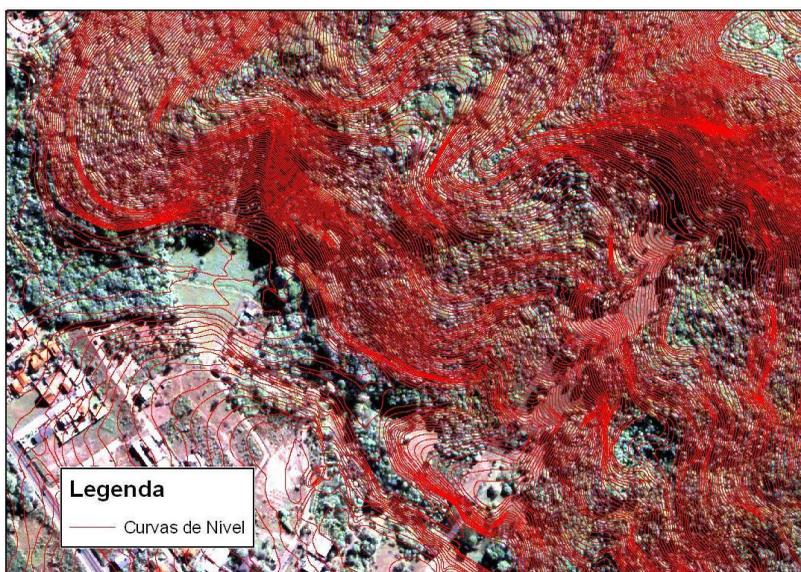


Figura 18: Recorte da sobreposição da base altimétrica à imagem Quickbird situada na região do morro do Campeche.

A Figura 19 mostra um recorte da base planialtimétrica 1:2.000 utilizada como referência para a geração do MDT com o lançamento dos diversos elementos mapeados. No centro da imagem, percebe-se a grande concentração de curvas de nível indicando a existência de um relevo mais acidentado, que corresponde à região do chamado Morro do Campeche.

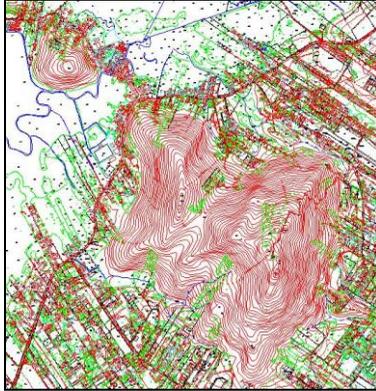


Figura 19: Parte da base altimétrica na região do morro do Campeche.

Para o desenvolvimento da etapa de geração do MDT utilizou-se o software Arcgis 9.2 para processar o arquivo altimétrico da base. Inicialmente, gerou-se uma malha triangular a partir dos dados hipsométricos da base importada, obtendo-se assim o modelo digital do terreno em formato TIN (*Triangular Irregular Network*), como pode ser visto na Figura 20.

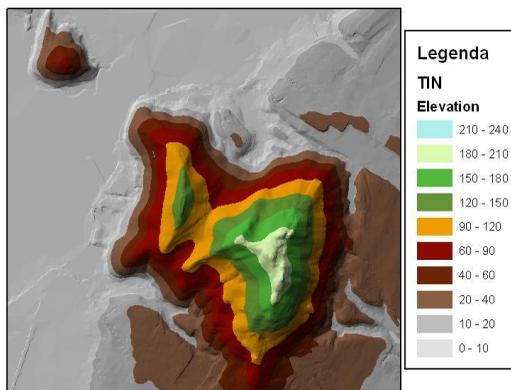


Figura 20: Modelo digital do terreno no formato TIN gerado a partir da hipsometria da base 1:2.000 mostrada na figura 21.

Com o TIN gerado, a próxima etapa foi a conversão das informações altimétricas contidas no MDT para o formato *raster*. A resolução espacial escolhida para o MDT final foi de 0,6 m, mesma resolução da banda pancromática e da imagem fusionada. Ao final da geração do MDT, o arquivo foi convertido para o formato TIFF ainda no software Arcgis.

A Figura 21 mostra a imagem gerada a partir do modelo TIN indicado na Figura 20, este é o formato de dados utilizado no processo ortoretificação das imagens orbitais. Na figura 20, o MDT gerado a partir da base contém todas as informações altimétricas convertidas em valores dos pixels, com variações de cota em torno dos 220 metros. Os pixels mais claros representam áreas de maior altitude e os pixels mais escuros representam as áreas de menor altitude no terreno.

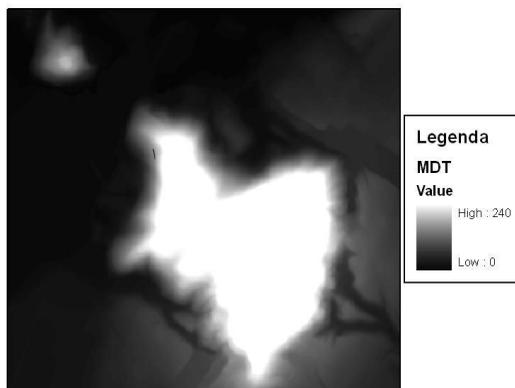


Figura 21: Modelo digital do terreno no formato *raster*, gerado a partir do arquivo TIN.

A figura 22 mostra o fluxograma de todo o processo que vai desde a edição da base altimétrica até a geração do MDT no formato de imagem. Dentre os problemas encontrados ao longo desse processo, a

edição dos dados altimétricos (inserção de cotas) foi a que despendeu maior tempo de trabalho, isso porque as curvas foram editadas de forma predominantemente manual, executadas curva a curva. Quanto ao tempo computacional, a geração do MDT em formato TIN e a sua conversão para o formato TIFF foram as fases que exigiram maior tempo de processamento; podendo ser um grande problema em situações onde o usuário necessite processar grandes áreas e não disponha de uma máquina com grande poder computacional.



Figura 22: Fluxograma da edição da base altimétrica e geração do MDT.

Após o desenvolvimento das etapas descritas neste item, passou-se a utilizar o software ENVI 4.2 para os demais processamentos, descritos nos próximos tópicos.

3.5 Processamento da Imagem

3.5.1 Escolha das Bandas de trabalho

Antes das etapas de processamento e correção, foi necessária a definição das bandas a serem utilizadas no processamento e na extração de informações. Inicialmente, as bandas escolhidas foram 3(R), 2(G), 1(B). Essa opção de combinação das bandas se deve as operações

preliminares de processamento, com a qual a combinação das bandas do visível em cores reais proporciona uma maior percepção da realidade na escolha dos pontos de controle, operações de contraste, etc.

3.5.2 Fusão das bandas

As imagens geradas pelo sensor Quickbird possuem a resolução espacial no modo multiespectral de 2,44m. Para explorar a resolução máxima da imagem, modo pan, executou-se a fusão dessas bandas. A Figura 23 mostra a composição colorida com as bandas multiespectrais 3(R) 2(G) 1(B) e a banda pancromática da mesma área. Pode-se perceber pela figura a grande riqueza de informações espaciais da banda pancromática em relação à composição colorida.

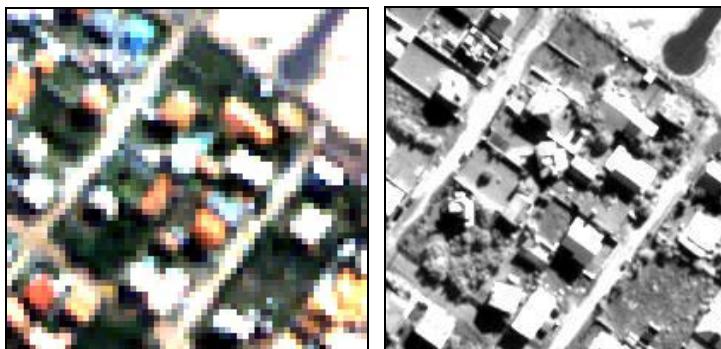


Figura 23: Comparação da resolução espacial de uma composição colorida das três bandas do visível com a imagem gerada na banda pancromática.

Através da transformação IHS (*Intensity, Hue, Saturation*), consegue-se obter toda a qualidade espectral da composição colorida com a resolução espacial da banda pancromática. A fusão de bandas é

de fundamental importância para potencializar a extração de informações da imagem. A Figura 24 mostra a composição gerada a partir da fusão. Esta composição tem como característica principal a junção da maior resolução espacial da banda pancromática com a qualidade espectral das bandas multiespectrais em apenas uma imagem.



Figura 24: Composição gerada a partir da fusão IHS da banda pancromática com as bandas do visível.

Como ponto negativo do processo, a transformação IHS gerou distorções radiométricas em uma série de feições da composição. Na nova imagem, algumas feições adjacentes, como telhados e piso de concreto, foram geradas com “manchas” entre uma e outra feição, como pode ser visto na Figura 25.



Figura 25: Parte da composição gerada a partir da fusão IHS contendo algumas áreas com radiometria distorcida.

Além do processamento IHS, outros processamentos podem ser efetuados durante os trabalhos, objetivando potencializar a extração de informações da imagem. Entre estes estão as operações de contraste, alterações na radiometria da imagem, etc.

Para a execução das fases de processamento da imagem utilizou-se o software ENVI 4.2. Este foi escolhido por sua interface amigável com o usuário e por conter todas as ferramentas necessárias para os procedimentos de georreferenciamento e ortorectificação da imagem.

3.5.3 Operações de contraste

Antes do desenvolvimento das etapas de correção da imagem bruta é necessária a execução das operações de contraste. Estas têm como objetivo a melhora na qualidade visual da imagem. Uma imagem com pouca qualidade visual dificulta todo o processo que vai desde a escolha dos pontos de controle até a etapa de extração de informações da imagem corrigida. Nesse sentido foram executados diversos testes com o intuito de melhorar a qualidade das imagens.

As características urbanas da área de estudo, formada por uma grande rede de ruas sem calçamento e com diversas áreas em solo exposto, trazem muitas dificuldades ao fotointérprete. Isto porque o comportamento espectral desses elementos, em situações com grande luminosidade, gera um alto grau de reflectância nas imagens geradas. Assim, a distinção de áreas cobertas e de áreas em solo exposto é dificultada, sendo necessária a aplicação de filtros que realcem as diferenças espectrais de cada alvo.

Foram testados diversos filtros, entre estes um filtro gaussiano, que trabalha uma média ponderada na reamostragem do pixel, e um filtro linear 0-255, que manipula o histograma da imagem realçando o contraste entre as feições. O resultado da aplicação desses filtros foi bastante satisfatório na discriminação de alvos como telhados e vegetação ao longo de toda a imagem. A Figura 26 realça bem o resultado obtido na aplicação dos filtros; a partir dos itens da figura percebe-se que as bordas da edificação só podem ser definidas após a aplicação de um dos filtros citados.

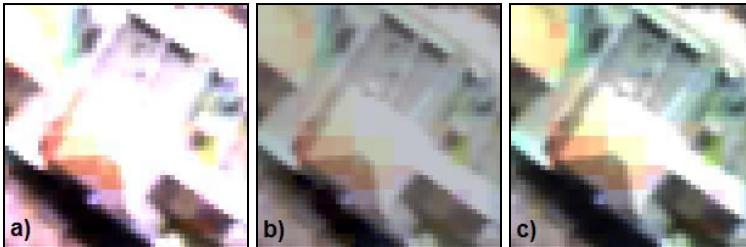


Figura 26: Comparação entre as imagens reamostradas por dois filtros: a) Imagem bruta, sem a aplicação de filtros; b) Imagem após aplicação de um filtro gaussiano; c) Imagem após aplicação de um filtro linear.

Apesar da aplicação dos filtros, fica claro que a resolução da imagem, aliada a estas distorções espectrais, prejudica o processo de interpretação da imagem, principalmente no que diz respeito à delimitação de edificações e muros.

3.6 Correção geométrica

Foi proposto por este trabalho expor diferentes cenários para a metodologia empregada na correção geométrica da imagem. Por se

tratar de uma área com um relevo majoritariamente plano, buscou-se traçar um paralelo entre uma transformação 2D (georreferenciamento) e uma transformação 3D (ortoretificação), utilizando diferentes quantidades de pontos de controle para cada uma das duas correções.

3.6.1 Transformação Polinomial Simples – Georreferenciamento

A transformação polinomial simples ou georreferenciamento da imagem é o processo de correção que desconsidera as variações na altimetria do terreno. Em imagens com maior resolução espacial essa modelagem se restringe às áreas onde o relevo é pouco acidentado.

Devido ao relevo da área estudada ser predominantemente plano, busca-se com este estudo traçar um paralelo entre a correção bidimensional e a correção tridimensional. Dessa maneira, objetiva-se visualizar de forma clara o comportamento de cada modelagem em áreas com altimetria suave. O processo de georreferenciamento da imagem estudada foi desenvolvido através do *software* ENVI.

Em um procedimento inicial, fez-se a escolha das feições na imagem definidoras dos pontos levantados através da técnica GPS. Escolhido o ponto na imagem, foram inseridas as coordenadas correspondentes no sistema definido para o trabalho. A figura 27 mostra a foto do momento da coleta do ponto GPS e a sua inserção na imagem, caracterizando este como um dos pontos de controle utilizados na correção.



Figura 27: Coleta em campo de um dos pontos de controle com receptor GPS e sua localização na imagem.

Para o desenvolvimento da etapa de seleção dos pontos de controle foram necessários diversos testes até a escolha dos pontos definitivos. A escolha dos pontos de controle se dá de forma interativa entre o usuário e o *software*. De acordo com a escolha dos pontos, o *software* calcula o RMS, que deve ser refinado pelo usuário até a obtenção de um resultado satisfatório.

A escolha dos pontos de controle teve como critério principal a distribuição destes nas extremidades da imagem, além de pontos nas regiões com maior variação no relevo. Por se tratar de uma região relativamente plana, a variação na altimetria dos pontos foi de aproximadamente 15 metros.

Nesse estudo buscou-se também avaliar a qualidade do processamento da imagem quanto ao número de pontos de controle utilizados. Assim, foram testados diferentes cenários, com a variação do número de pontos de controle. Essa diretriz foi estabelecida tanto para o georreferenciamento quanto para a ortoretificação da imagem.

Inicialmente, utilizaram-se 5 pontos de controle com distribuição uniforme ao longo da imagem. Como critério de análise, observou-se o menor RMS do conjunto de pontos inseridos na imagem gerado pelo software. Após obtenção de um RMS reduzido, *0,21 pixels*, finalizou-se o primeiro cenário de processamento, com 5 pontos de controle. A Figura 28 mostra a distribuição dos 5 pontos de controle utilizados no primeiro cenário de georreferenciamento da imagem.

O grau do polinômio é dependente do número de pontos de controle utilizados na correção. No caso da utilização de 5 pontos de controle, pôde-se aplicar um polinômio de 1ª ordem.

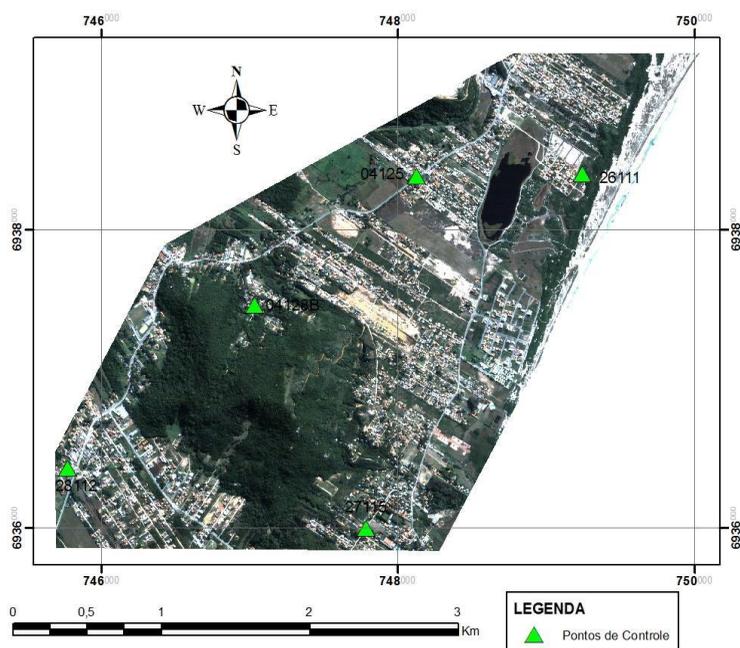


Figura 28: Distribuição dos 5 pontos de controle do georreferenciamento inicial da imagem.

Definida a quantidade inicial de pontos de controle para o primeiro processamento, passou-se ao testes para refinamento da correção com o aumento do número de pontos de controle. A partir desses 5 pontos iniciais, o número de pontos foi aumentado de forma gradativa, ponto a ponto. Para cada quantidade de pontos escolhidos desenvolveu-se todo o processamento de correção, verificando-se também o grau de melhora posicional de cada imagem corrigida.

Ao longo dos processamentos, pôde-se verificar a redução no grau de melhora posicional à medida que se aumentou o número de pontos de controle, tendendo à estabilidade com a quantidade de 8 pontos de controle. Este fato justifica a escolha dos dois cenários em relação ao número de pontos de controle, 5 e 8 pontos para cada método de correção. A avaliação dos resultados desses cenários de processamento é exposta no capítulo 4.

A escolha dos 8 pontos de controle para o segundo cenário de georreferenciamento também seguiu os princípios de distribuição uniforme ao longo da imagem. Neste cenário os pontos foram distribuídos ao longo das bordas da área estudada, além de um ponto central, como pode ser visto na Figura 34.

O RMS gerado pelo software com a escolha desses pontos foi de *2,08 pixels*. Isso se deve ao maior número de pontos locados na imagem, dificultando a obtenção de um menor RMS. Com a utilização de 8 pontos de controle foi possível utilizar no modelo um polinômio de 2ª ordem.

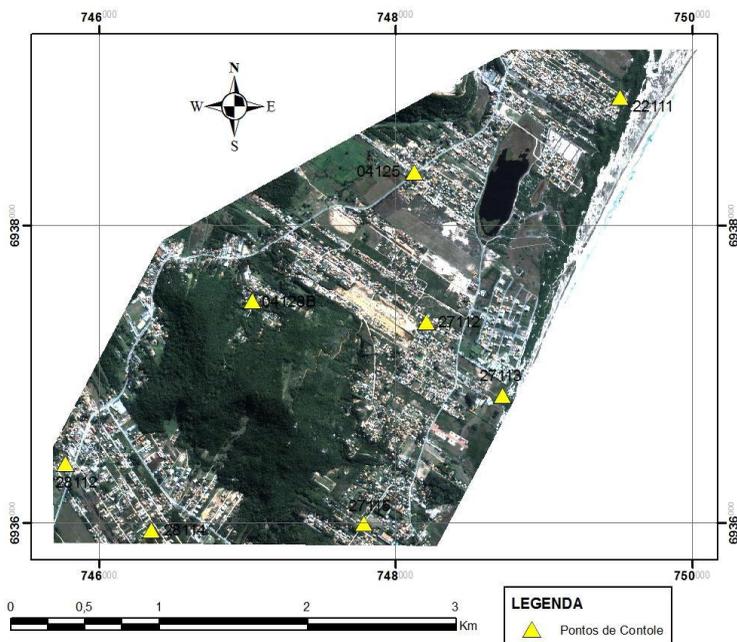


Figura 29: Distribuição dos 8 pontos de controle do georeferenciamento final da imagem.

Quanto ao método de reamostragem dos pixels, foi escolhido o chamado “método do vizinho mais próximo”. Segundo Crosta (1992), embora a aparência estética do “método do vizinho mais próximo” não seja a melhor, este é o método que mais “preserva” o valor do pixel original, uma vez que não envolve nenhuma média. Os métodos de interpolação bilinear e convolução cúbica geram uma imagem mais suave, funcionando como um filtro de passa-baixa; o que não seria interessante para os objetivos deste trabalho.

3.6.2 Ortoretificação

O objetivo do processo de ortoretificação é transformar uma imagem em perspectiva central para a perspectiva ortogonal. Para isso, além de um modelo digital do terreno confiável, necessita-se também das informações referentes à orientação do sensor, através do seu modelo físico. As empresas que comercializam essas imagens de satélite não fornecem esse modelo. No entanto, estas empresas disponibilizam os Coeficientes Polinomiais Racionais (RPC), utilizados para a ortocorreção das imagens através de uma modelagem independente do terreno.

Para desenvolver o processo de ortoretificação da imagem utilizou-se o *software* ENVI. Este traz a opção de processamento de imagens Quickbird com a utilização dos coeficientes polinomiais racionais e dos pontos de controle.

O primeiro passo no processo de ortoretificação é a inserção das coordenadas dos pontos de controle e seleção da feição correspondente na imagem. Essa é uma etapa interativa onde o operador escolhe e refina o posicionamento dos pontos de controle na imagem. Através da visualização do RMS calculado com a escolha dos pontos de controle é possível alterar a posição dos PC's na imagem, com a opção de ativar ou não os já escolhidos.

Como exposto no item 3.6.1, foram criados dois cenários de correção para cada modelo matemático utilizado (transformação polinomial simples e as funções polinomiais racionais) no que diz respeito ao número de pontos de controle. Para cada um destes cenários trabalhou-se com quantidades equivalentes de pontos de controle em

cada transformação. A criação de situações similares em cada processamento é importante, pois permite traçar um paralelo entre uma e outra modelagem matemática. A avaliação dos resultados desses cenários de processamento é exposta no Capítulo 4.

Inicialmente, fez-se a escolha dos 5 pontos de controle para a primeira aplicação do modelo de ortoretificação. Nesta seleção foram utilizados os mesmos critérios para a escolha dos pontos de controle definidos no item 3.6.1, e sua distribuição pode ser vista na figura 37. Os pontos foram distribuídos ao longo das extremidades da imagem abrangidas pela área estudada, gerando um RMS nulo.

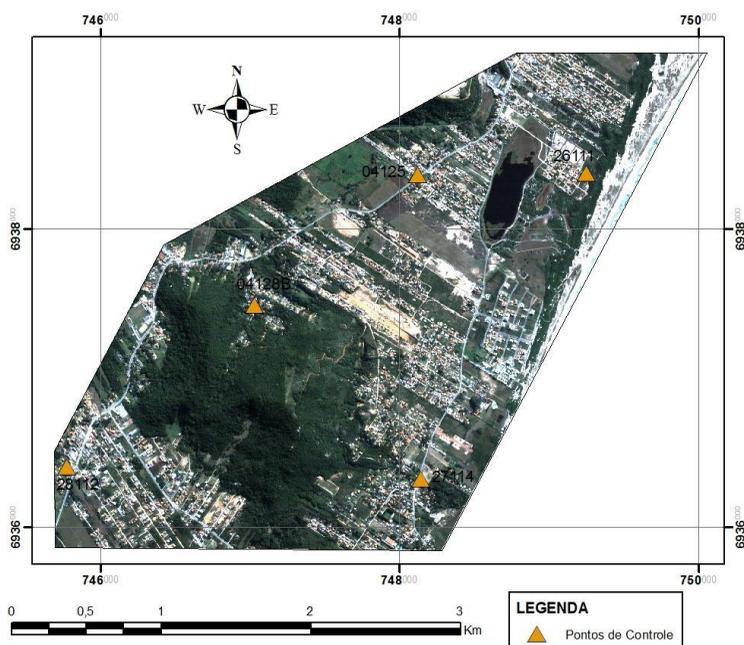


Figura 30: Distribuição dos 5 pontos de controle da ortoretificação inicial da imagem.

Para o segundo procedimento de ortorectificação foram utilizados 8 pontos de controle, distribuídos uniformemente ao longo das extremidades da área estudada na imagem. A seleção desses pontos na imagem gerou um RMS de 2,2 *pixels*. Este valor se justifica pelo maior número de pontos de controle, propagando assim os erros na sua distribuição. A figura 38 mostra a distribuição dos pontos de controle na imagem a ser ortoretificada com a implantação de 8 pontos. A figura mostra também a localização do ponto em escala maior na imagem e a foto do momento da coleta de um dos pontos com receptor GPS.

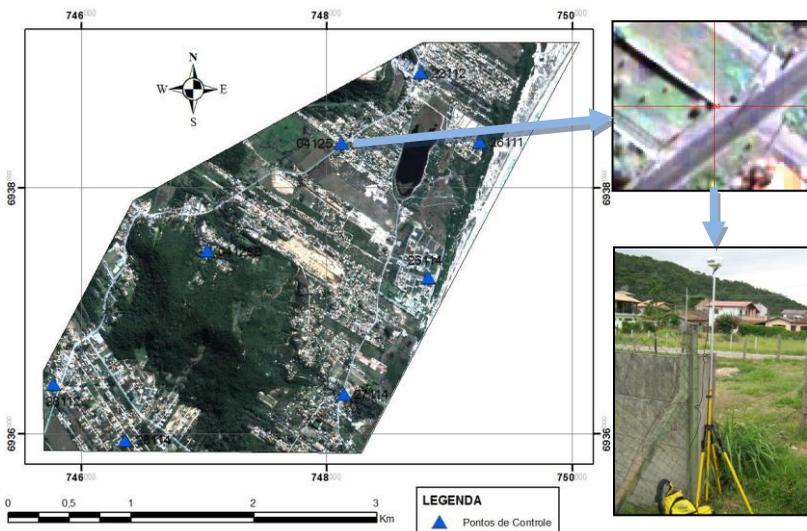


Figura 31: Distribuição dos 8 pontos de controle escolhidos para a ortoretificação da imagem, localização de um dos pontos na imagem em escala maior e registro fotográfico no momento de seu cadastro com receptor GPS.

Após a inserção dos pontos de controle faz-se a escolha da imagem a ser corrigida. E em seguida seleciona-se o arquivo com

coeficientes polinomiais utilizados nesse processo. Na última janela antes do processamento são requeridas informações básicas para o processo de ortorectificação.

Dentre as informações básicas requeridas antes do fim do processamento da imagem, está a escolha do método de reamostragem dos pixels. O método escolhido nas imagens processadas foi o mesmo utilizado para a metodologia de georreferenciamento, o “Método do Vizinho mais Próximo”, por atender melhor às exigências do reproprocessamento da imagem no que diz respeito à não-suavização das feições, importantes no processo de vetorização da imagem.

Foi selecionado também o MDT da área estudada, gerado a partir da base 1:2.000. Como citado no item 3.4.5, esse MDT tem resolução espacial de 0,60 m, a mesma da imagem fusionada.

4 Resultados

4.1 Avaliação da qualidade posicional das imagens

Após o processamento da imagem nos 4 cenários propostos, passou-se a execução da etapa de certificação das correções, avaliando-se as imagens processadas em termos posicionais. A Figura 32 mostra a base cartográfica sobreposta à imagem antes do processamento e após a ortocorreção. Percebe-se que após a correção, as feições encontram-se visualmente concordantes.



Figura 32: a) Base sobreposta a imagem bruta. b) Base sobreposta à imagem após o processamento de ortoretificação.

Para o desenvolvimento desta atividade, utilizou-se dos 24 pontos de controle e checagem coletados em campo. Estes foram coletados objetivando uma distribuição homogênea ao longo da imagem, sempre utilizando como critério, a escolha dos pontos de melhor identificação na imagem.

Para a certificação dos dados corrigidos foram utilizados os pontos de checagem, distribuídos ao longo de toda a imagem corrigida.

Com estes pontos, pôde-se mensurar a qualidade da correção, calculando-se o erro posicional de determinado ponto na imagem em relação ao seu homólogo coletado em campo.

Em uma primeira análise, foram coletadas as coordenadas correspondentes dos pontos de controle em cada uma das 4 imagens corrigidas. Assim, pôde-se calcular o erro planimétrico entre as coordenadas dos pontos determinados por GPS e os pontos coletados na imagem, em cada uma das correções. A Tabela 6 mostra o erro planimétrico em cada um dos 5 pontos de controle na imagem georreferenciada em relação aos seus homólogos coletados através de GPS, além do RMS calculado.

Tabela 6: Erro Planimétrico e RMS calculados nos 5 pontos de controle da imagem georreferenciada.

PONTO	N	E	ΔN (m)	ΔE (m)	ERRO (m)
26111	6938370,8	749248,0	-0,8	0,0	0,8
27115	6935998,4	747788,2	0,0	-0,6	0,6
28112	6936400,6	745777,3	0,4	-0,2	0,5
4125	6938357,6	748132,4	0,3	-0,8	0,9
4128B	6937490,5	747039,4	-0,5	-1,8	1,8
		MÉDIA	-0,1	-0,7	0,9
		RMS	0,5	0,7	0,5
				RMS	0,9 pixels

A Tabela 7 mostra o erro planimétrico verificado nos pontos de checagem na imagem georreferenciada com 5 pontos de controle, além do RMS calculado.

Tabela 7: Erro Planimétrico nos pontos de checagem no georreferenciamento com 5 pontos de controle.

PONTO	N	E	ΔN (m)	ΔE (m)	ERRO (m)
22111	6938860,2	749516,9	1,6	0,7	1,8
22112	6938935,5	748766,9	1,1	0,2	1,1
26112	6938394,9	748626,1	-2,2	0,2	2,2
26113	6938385,7	748431,4	-0,7	-0,6	0,9
26114	6937273,6	748831,1	-5,1	-1,2	5,2
26115	6937837,3	748076,8	-0,8	-1,2	1,5
26116	6937912,4	748128,4	0,5	-0,6	0,8
27111	6937521,5	748834,9	-3,7	-1,1	3,9
27112	6937352,3	748212,7	-0,8	-1,0	1,3
27113	6936861,4	748728,6	-5,7	-1,1	5,8
27114	6936324,2	748142,6	-3,9	-0,2	3,9
28113	6936798,8	746080,7	-1,6	0,6	1,7
28114	6935951,3	746355,5	2,1	1,3	2,5
28115	6936397,0	746513,4	3,2	0,5	3,2
28119	6936937,2	747882,0	3,1	-1,4	3,4
4124	6937762,1	746454,3	-3,9	-0,8	4,0
4126	6938009,0	747360,4	-3,0	-0,7	3,1
4127	6937648,7	747741,0	1,0	-0,7	1,3
4128	6937588,5	746998,3	-0,7	0,0	0,7
MÉDIA			-1,0	-0,4	2,5
RMS			2,7	0,8	1,5

Considerando o Padrão de Exatidão Cartográfica, definido pelo Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984, a imagem georreferenciadas com 5 pontos de controle atende aos critérios definidos para cartas na escala de 1:5.000 enquadradas na classe B.

Quanto ao segundo nível de correção, georreferenciamento com a utilização de 8 pontos de controle, a Tabela 8 mostra o erro planimétrico dos pontos de controle em relação aos homólogos rastreados com equipamento GPS, além do RMS calculado.

Tabela 8: Erro Planimétrico calculado dos pontos de 8 pontos de controle da imagem georreferenciada.

PONTO	N	E	ΔN (m)	ΔE (m)	ERRO (m)
2211b	6938862,6	749517,5	-1,3	0,3	1,3
22112	6938936,6	748766,9	0,0	0,3	0,3
27112	6937352,1	748212,6	-0,6	-0,9	1,1
27115	6935997,6	747788,3	0,7	-0,7	1,0
28112	6936401,7	745777,7	-0,7	-0,6	0,9
28114	6935952,0	746355,2	1,4	1,6	2,1
4125	6938358,0	748131,9	-0,1	-0,4	0,4
4128B	6937489,4	747038,8	0,6	-1,1	1,2
MÉDIA			0,0	-0,2	1,0
RMS			0,9	0,9	0,6
				RMS	1 pixel

A Tabela 9 mostra o erro planimétrico nos pontos de checagem, além do RMS calculado na imagem georreferenciada com 8 pontos de controle.

Tabela 9: Erro Planimétrico nos pontos de checagem no georreferenciamento com 8 pontos de controle.

PONTO	N	E	ΔN (m)	ΔE (m)	ERRO (m)
22111	6938862,6	749517,5	-0,7	0,1	0,7
26111	6938371,9	749247,7	-1,8	0,2	1,8
26112	6938395,0	748626,0	-2,3	0,3	2,4
26113	6938385,7	748431,4	-0,8	-0,6	1,0
26114	6937273,9	748829,9	-5,3	-0,1	5,3
26115	6937836,5	748076,2	0,1	-0,7	0,7
26116	6937912,4	748127,9	0,5	-0,1	0,5
27111	6937520,6	748835,0	-2,9	-1,2	3,1
27113	6936859,6	748727,8	-4,0	-0,3	4,0
27114	6936323,4	748142,2	-3,0	0,1	3,0
28113	6936799,2	746080,7	-2,0	0,6	2,1
28115	6936397,1	746514,0	3,2	-0,1	3,2
28119	6936936,7	747882,4	3,6	-1,8	4,0
4124	6937761,8	746453,2	-3,5	0,3	3,5
4126	6938008,6	747360,0	-2,7	-0,3	2,7
4127	6937648,3	747740,7	1,5	-0,4	1,5
4128	6937587,7	746998,3	0,1	0,0	0,1
MÉDIA			-1,2	-0,2	2,3
RMS			2,5	0,6	1,5

Considerando o Padrão de Exatidão Cartográfica, a imagem georreferenciada com 8 pontos de controle atende aos critérios definidos para cartas na escala de 1:5.000 enquadradas na classe B.

Quanto ao terceiro nível de correção, ortoretificação da imagem com a utilização de 5 pontos de controle, a Tabela 10 mostra o erro planimétrico dos pontos de controle em relação aos pontos rastreados com equipamento GPS.

Tabela 10: Erro Planimétrico calculado para ortoretificação com 5 pontos de controle.

PONTO	N	E	ΔN (m)	ΔE (m)	ERRO (m)
26111	6938370,9	749247,5	-0,8	0,4	0,9
27114	6936320,6	748142,0	-0,3	0,3	0,4
28112	6936401,9	745777,4	-0,8	-0,3	0,9
4125	6938358,2	748130,9	-0,4	0,7	0,7
4128B	6937490,6	747037,1	-0,6	0,5	0,8
MÉDIA			-0,6	0,3	0,8
RMS			0,3	0,4	0,2
RMS					0,3 pixels

A Tabela 11 mostra o erro planimétrico nos pontos de checagem e o RMS calculado na imagem ortoretificada com 5 pontos de controle.

Tabela 11: Erro Planimétrico nos pontos de checagem na ortoretificação com 8 pontos de controle.

PONTO	N	E	ΔN (m)	ΔE (m)	ERRO (m)
22111	6938862,9	749517,7	-1,0	-0,1	1,0
22112	6938937,4	748767,0	-0,8	0,2	0,9
26112	6938393,3	748625,7	-0,6	0,6	0,9
26113	6938385,4	748430,4	-0,4	0,4	0,6
26114	6937269,7	748830,2	-1,2	-0,4	1,3
26115	6937836,9	748075,1	-0,4	0,5	0,6
26116	6937912,8	748127,0	0,1	0,8	0,8
27111	6937517,6	748834,2	0,1	-0,4	0,4
27112	6937352,0	748211,9	-0,5	-0,2	0,5
27113	6936856,2	748727,7	-0,5	-0,2	0,6
27115	6935997,4	747787,9	0,9	-0,3	0,9
28113	6936796,8	746079,6	0,4	1,7	1,8
28114	6935952,3	746355,2	1,2	1,6	2,0
28115	6936399,6	746512,8	0,7	1,1	1,3
28119	6936940,1	747881,2	0,1	-0,5	0,5
4124	6937759,1	746452,4	-0,9	1,1	1,4
4126	6938006,8	747359,0	-0,8	0,7	1,1
4127	6937649,9	747739,8	-0,1	0,5	0,5
4128	6937587,5	746997,1	0,3	1,2	1,2
		MÉDIA	-0,2	0,4	1,0
		RMS	0,7	0,7	0,4

Considerando o Padrão de Exatidão Cartográfica, definido pelo Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984, a imagem ortoretificada com 5 pontos de controle atende aos critérios definidos para cartas na escala de 1:5.000 enquadradas na classe A.

Quanto ao quarto nível de correção, ortoretificação da imagem com a utilização de 8 pontos de controle, a Tabela 12 mostra o erro planimétrico dos pontos de controle em relação aos seus homólogos rastreados com equipamento GPS.

Tabela 12: Erro Planimétrico calculado para ortoretificação com 8 pontos de controle.

PONTO	N	E	ΔN (m)	ΔE (m)	ERRO (m)
22112	6938937,6	748766,7	-1,0	0,5	1,1
26111	6938369,4	749247,2	0,7	0,8	1,0
26114	6937269,7	748829,8	-1,2	0,1	1,2
27114	6936319,5	748142,3	0,8	0,1	0,8
28112	6936401,3	745777,4	-0,2	-0,2	0,3
28114	6935952,6	746355,4	0,8	1,4	1,6
4125	6938358,5	748131,2	-0,6	0,3	0,7
4128B	6937490,1	747037,5	-0,2	0,1	0,2
MÉDIA			-0,1	0,4	0,9
RMS			0,8	0,5	0,5
				RMS	0,8 pixels

A Tabela 13 mostra o erro planimétrico nos pontos de checagem na imagem ortoretificada com 8 pontos de controle, além do RMS calculado.

Tabela 13: Erro Planimétrico nos pontos de checagem na ortoretificação com 8 pontos de controle.

PONTO	N	E	ΔN (m)	ΔE (m)	ERRO (m)
22111	6938862,1	749517,9	-0,3	-0,3	0,4
26112	6938393,1	748625,6	-0,4	0,7	0,8
26113	6938385,2	748430,6	-0,2	0,3	0,3
26115	6937836,5	748075,4	0,0	0,1	0,1
26116	6937912,7	748127,5	0,2	0,3	0,4
27111	6937517,2	748834,2	0,6	-0,4	0,7
27112	6937351,2	748212,0	0,3	-0,3	0,5
27113	6936855,1	748726,9	0,6	0,6	0,8
27115	6935996,8	747787,5	1,5	0,1	1,5
28113	6936796,9	746079,8	0,3	1,6	1,6
28115	6936399,4	746513,3	0,9	0,5	1,0
28119	6936940,0	747880,3	0,2	0,4	0,4
4124	6937759,2	746452,8	-1,0	0,7	1,2
4126	6938007,1	747359,4	-1,2	0,3	1,2
4127	6937649,6	747739,8	0,1	0,5	0,5
4128	6937588,7	746997,7	-0,9	0,6	1,1
MÉDIA			0,1	0,3	0,8
RMS			0,7	0,5	0,5

Considerando o Padrão de Exatidão Cartográfica, definido pelo Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984, a imagem ortoretificada com 8 pontos de controle atende aos critérios definidos para cartas na escala de 1:5.000 enquadradas na classe A.

4.1.1 Avaliação das imagens em relação ao número de pontos de controle

Um dos objetivos do presente trabalho é a avaliação da correção geométrica da imagem em diferentes níveis de processamento, como no caso do número de pontos controle. Ao efetuar o processamento das imagens buscou-se a distribuição homogênea desses pontos ao longo da área de estudo, objetivando manter a coerente relação entre a definição dos pontos na imagem e o RMS gerado por esta escolha. Em um cenário inicial, foi feito o processamento da imagem com a implantação de 5 pontos de controle, com posterior aumento gradativo do número de pontos.

Ao longo dos testes percebeu-se uma sensível melhora nos resultados do processamento com o aumento dos pontos de controle. À medida que o número de pontos de controle aumenta, a melhora na correção tende a estabilidade. Optou-se então pela comparação de duas situações definidas. Na primeira foi fixado em 5 o número dos pontos de controle. Em uma segunda situação fixou-se em 8 pontos de controle para a correção da imagem. A utilização de um maior número de pontos foi descartada devido à discreta melhora dos dados processados, à medida que se aumentaram os pontos de controle. A Figura 33 mostra o gráfico de dispersão com o erro observado para os pontos de checagem na imagem georreferenciada com 5 pontos de controle.

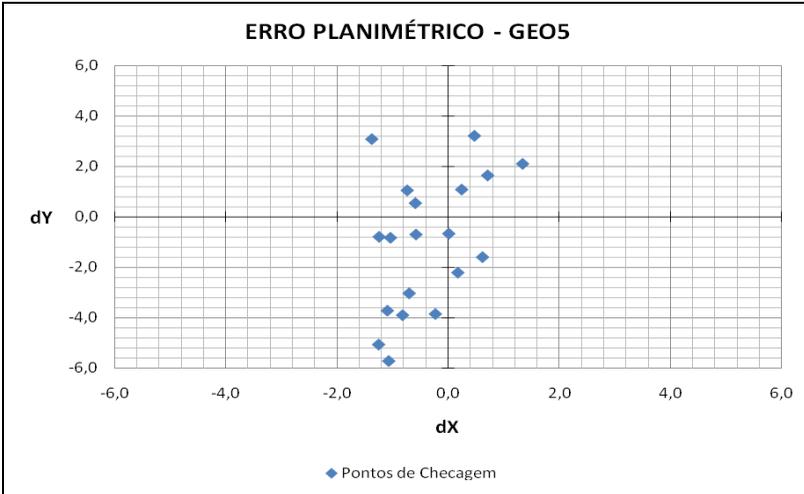


Figura 33: Gráfico de dispersão dos pontos de checagem na imagem georreferenciada com 5 pontos de controle.

Com o aumento no número de pontos de controle observou-se uma melhora na qualidade posicional da imagem georreferenciada. Nas duas imagens georreferenciadas observou-se uma maior dispersão nas coordenadas ao longo do eixo N. A figura 34 mostra o gráfico de dispersão dos pontos de checagem na imagem georreferenciada com 8 pontos de controle.

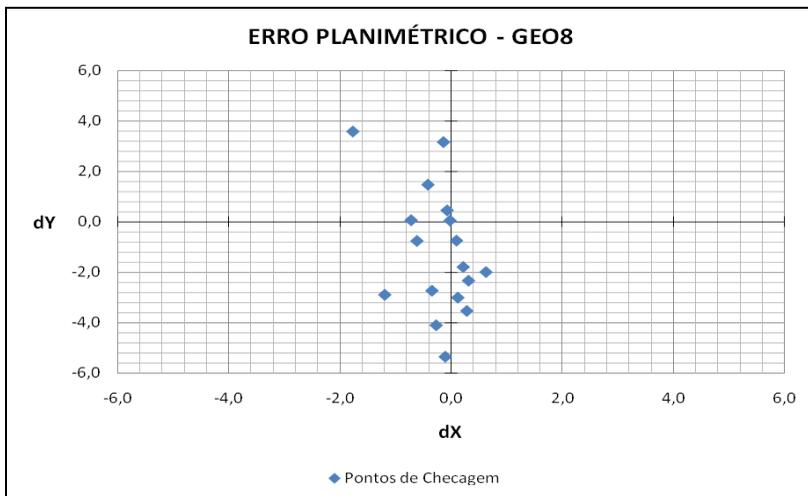


Figura 34: Gráfico de dispersão dos pontos de checagem na imagem georreferenciada com 8 pontos de controle.

Conforme mostrado nas Tabelas 7 e 8, pode-se verificar que as médias do erro planimétrico dos pontos de checagem nas imagens georreferenciadas foram de 2,5 m para a imagem processada com 5 pontos de controle e 2,3 m para a imagem processada com 8 pontos de controle. Verificou-se também um erro máximo de 5,8 m e 5,3 m para um ponto isolado em cada nível de processamento.

Nas imagens ortoretificadas, os resultados mostraram estabilidade em relação dispersão dos pontos de checagem nos dois eixos de coordenadas N e E. Com o aumento dos pontos de controle houve uma gradativa melhora no resultado dos processamentos. Devido à ortoretificação, essas imagens apresentaram erro em dimensões bem menores em relação aos das imagens georreferenciadas. As figuras 35 e 36 mostram os gráficos de dispersão dos pontos de checagem nas

imagens ortoretificadas com a utilização de 5 e 8 pontos de controle, respectivamente.

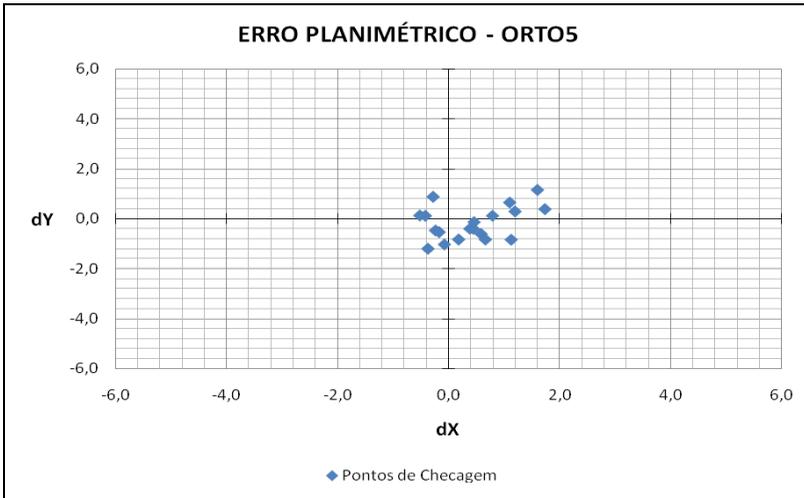


Figura 35: Gráfico de dispersão dos pontos de checagem na imagem ortoretificada com 5 pontos de controle.

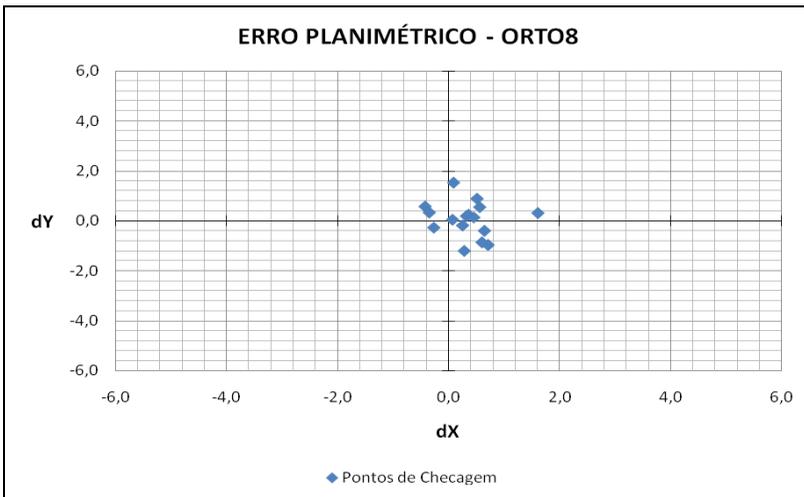


Figura 36: Gráfico de dispersão dos pontos de checagem na imagem ortoretificada com 8 pontos de controle.

No caso das imagens ortoretificadas pode-se perceber através das Tabelas 11 e 13 que as médias de erro planimétrico nos pontos de checagem nos dois processamentos foram de 1,0 m para imagem com 5 pontos de controle e de 0,8 m para a imagem com 8 pontos de controle. Neste caso, verificou-se um erro máximo em um ponto isolado de 2,0 m na imagem ortoretificada com 5 pontos de controle. Na imagem ortoretificada com 8 pontos de controle o erro máximo para um ponto isolado foi de 1,6 m.

4.1.2 Avaliação: ortoretificação versus georreferenciamento

Outra importante análise feita em relação aos resultados está na comparação da eficiência das duas modelagens utilizadas nos processamentos, transformação polinomial simples e a função polinomial racional. Em dois cenários utilizou-se do simples georreferenciamento da imagem, ou seja, apenas as informações planimétricas foram consideradas para a correção da imagem. Isso se justificou devido prevalência de relevo pouco acidentado da área estudada. Nos dois cenários seguintes, o relevo foi considerado através da ortocorreção da imagem pelo método das funções polinomiais racionais.

É perceptível nas Tabelas 7, 9, 11 e 13 que os resultados obtidos nos dois níveis de ortoretificação da imagem foram mais satisfatórios que os resultados obtidos com o georreferenciamento das imagens, independentemente do número de pontos de controle utilizados para a correção. Esta situação fica demonstrada no gráfico da Figura 37, que compara o erro planimétrico dos pontos de checagem nas duas

modelagens. Na figura, a representação em azul refere-se ao erro planimétrico dos pontos coletados na imagem ortoretificada com a utilização de 8 pontos de controle. Já a representação gráfica em vermelho mostra o erro planimétrico dos pontos coletados na imagem apenas georreferenciada, utilizando-se de 8 pontos de controle.

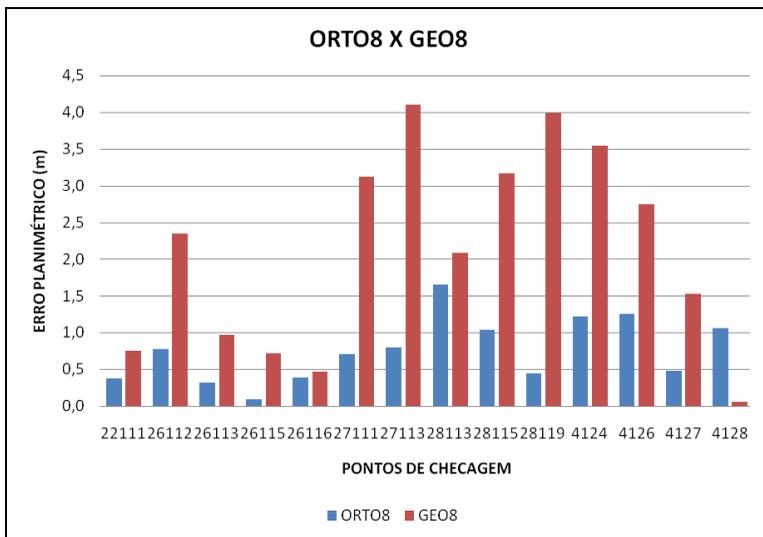


Figura 37: Gráfico comparativo dos resultados do georreferenciamento em relação a ortoretificação.

Os resultados obtidos deixam claras as limitações que cada um destes métodos tem em relação a aplicação dessas imagens à Cartografia Urbana. Percebe-se que o erro médio dos pontos de checagem na imagem ortoretificada com 8 pontos de controle é de 0,8m, enquanto na imagem apenas georreferenciada o erro médio foi de 1,9m. Considerando-se o PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica), definido pelo Decreto N. 89.817 de 20 de junho de 1984, pode-se considerar que os 4 procedimentos de correção estão enquadrados dentro da Classe A

para escalas de 1:5.000 ou menores. Esta afirmação é válida tanto para as imagens ortoretificadas quanto para as imagens georreferenciadas.

Vale ressaltar que a qualidade posicional alcançada na transformação 2D das imagens é devida ao relevo da região estudada ser predominantemente suave. Pôde-se constatar ainda pelas análises, que a qualidade posicional das imagens apenas georreferenciadas são bem inferiores às imagens ortoretificadas. Além disso, é perceptível nas poucas áreas com maior variação altimétrica que o erro da imagem não ortoretificada é muito superior ao encontrados nos trechos planos da imagem, como pode ser visto nas Figuras 38 e 39.

A Figura 38 mostra a sobreposição da base cartográfica à imagem ortoretificada com os dados altimétricos da base. Pode-se verificar nesta figura a sobreposição exata de uma torre e da estrada de acesso ao ponto mais alto do Morro do Campeche à imagem.

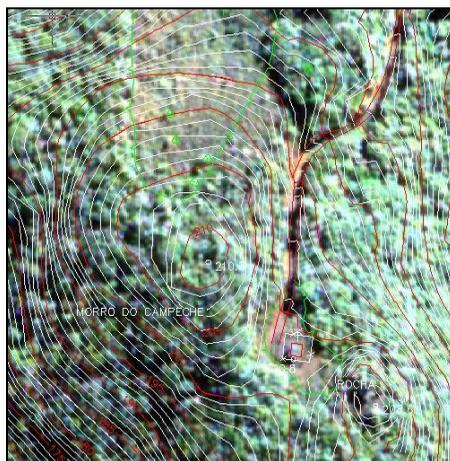


Figura 38: Sobreposição da base 1:2.000 à imagem ortoretificada em área com maior altitude.

Já na Figura 39, a sobreposição da restituição aerofotogramétrica à imagem georreferenciada mostra um grande deslocamento desta mesma torre e da estrada de acesso em relação à base, cerca de 50 metros. Isto se justifica pelo fato de a referida área se encontrar cerca de 200 m acima da altitude média do terreno, plano de referência para a correção. Assim, pode-se observar a fragilidade do modelo bidimensional em áreas com relevo acidentado, restringindo-se apenas para aplicação em áreas planas.

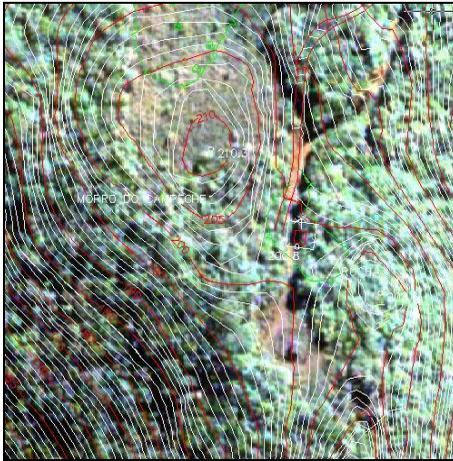


Figura 39: Sobreposição da base 1:2.000 à imagem georreferenciada em um trecho de altitude em torno dos 200 m.

Há de se atentar que a aplicação indiscriminada das técnicas de correção bidimensional pode prejudicar a aplicação de imagens orbitais de alta resolução à Cartografia. A qualidade posicional alcançada em áreas com maiores variações no relevo eliminam o uso cartográfico dessas imagens em escalas maiores, como é o caso do exemplo dado. Um erro de 50 metros tornaria a aplicação da imagem restrita a escalas

muito pequenas, o que inviabilizaria sua aplicação para o mapeamento urbano de áreas mais acidentadas.

4.2 Avaliação da aplicação das imagens à Cartografia

Com a correção geométrica da imagem finalizada observou-se que ambos os métodos de processamento utilizados forneceram resultados satisfatórios do ponto de vista da escala a ser utilizada, podendo-se trabalhar na escala 1:5.000 ou menor. Nesse sentido, passou-se então ao estudo dos procedimentos de extração de informações da imagem corrigida.

Ficou claro ao longo dos trabalhos que as dificuldades no reconhecimento de feições em uma imagem orbital de alta resolução são muitas, seja pela sua resolução espacial ou por outros fatores como problemas na resposta espectral de determinados alvos, ocultação destes pela vegetação, alta refletância, baixos níveis de contraste, etc.

Buscou-se então obter mecanismos com o objetivo de facilitar a extração de dados dessa imagem corrigida. Os softwares comerciais possuem diversas ferramentas que possibilitam o melhor aproveitamento dos dados fornecidos por uma imagem orbital. Essas ferramentas podem servir para aplicação de contraste, segmentação da imagem, aplicação de filtros para melhorar a qualidade visual das feições, etc.

4.2.1 Técnicas de extração de informações

Das técnicas de extração de informações, destacaram-se para o processamento de imagens de alta resolução as seguintes:

a. Segmentação

Durante o processo de pesquisa das técnicas de extração de informações dessas imagens observou-se o grande desenvolvimento das modelagens orientadas a objetos. Técnica esta que tem sido vastamente utilizada nos procedimentos de classificação de imagens orbitais, principalmente nas de maior resolução espacial.

Após diversos testes envolvendo a imagem estudada observou-se que, independente do nível de segmentação, essa técnica pouco atende aos objetivos propostos sem um refinamento dessa modelagem. Isto porque falta ainda nos softwares comerciais uma modelagem eficaz para a conversão dessas informações segmentadas na vetorização de alvos como edificações, divisas, etc.

Nesse sentido, vê-se como um campo promissor na área de pesquisa, estudos que visem ao refinamento das modelagens orientadas ao objeto. Com o aparecimento de novas técnicas há como tendência o aumento do grau de automatização na extração de dados de Sensores Remotos.

b. Vetorização

A forma tradicional de extração de informações cartográficas em imagens de alta resolução espacial é através da vetorização direta executada pelo fotointérprete, exigindo deste grande aptidão para a diferenciação de feições e alvos. No entanto, mesmo o fotointérprete mais experiente necessita da aplicação de outras ferramentas de apoio, visando a dar eficiência ao processo e a melhorar à qualidade dos produtos gerados.

Diversas ferramentas estão ao alcance do usuário no processo de vetorização de imagens. Dentre estas estão as ferramentas de ampliação de contraste, os filtros de suavização e de realce de bordas, etc.

No presente trabalho foram encontradas diversas dificuldades no procedimento de vetorização, algumas causadas pelas características próprias da imagem e outras causadas por características peculiares da área de estudo, conforme apresentado nos itens seguintes:

b.1 Resolução espacial

A primeira restrição imposta ao fotointérprete refere-se à resolução espacial da imagem. Esta define o limite máximo para a extração de informações de determinado alvo, restrição esta que não pode ser melhorada através das ferramentas citadas.

b.2 Baixo nível de contraste

A imagem pode apresentar um baixo nível de contraste, o que prejudica a discriminação de feições que podem estar imperceptíveis na imagem bruta. No estudo aqui descrito utilizou-se de uma ferramenta de manipulação de histograma do software ENVI, aplicando-se um aumento linear de contraste da imagem, o que resultou numa melhora da qualidade visual da imagem. A Figura 40 mostra a imagem antes da aplicação aumento linear de contraste e após a sua aplicação. A manipulação de histograma facilitou a distinção de determinadas feições. Nas imagens pode-se perceber a melhora na discriminação do telhado em relação ao solo exposto.



Figura 40: Imagem antes e depois da aplicação do aumento linear de contraste.

b.3 Distorções radiométricas

Além da restrição relacionada à resolução espacial, as imagens orbitais trazem em determinados setores ruídos radiométricos, causados por falhas na obtenção da imagem, ou mesmo por causa da reamostragem dos pixels durante o processamento dos dados, como na transformação IHS por exemplo. A reamostragem dos pixels pode gerar falsas feições, que tendem a confundir o fotointérprete.

No presente trabalho foram detectadas distorções na radiometria em diversos setores da imagem, principalmente em áreas próximas de edificações, prejudicando a identificação de seus limites na composição colorida. Como alternativa, pode-se vetorizar estas áreas diretamente sobre a banda pancromática, livre deste tipo de distorção. A figura 41 mostra a parte com distorções na composição colorida após a aplicação da transformação IHS e a mesma área na banda pancromática, livre de qualquer distorção.

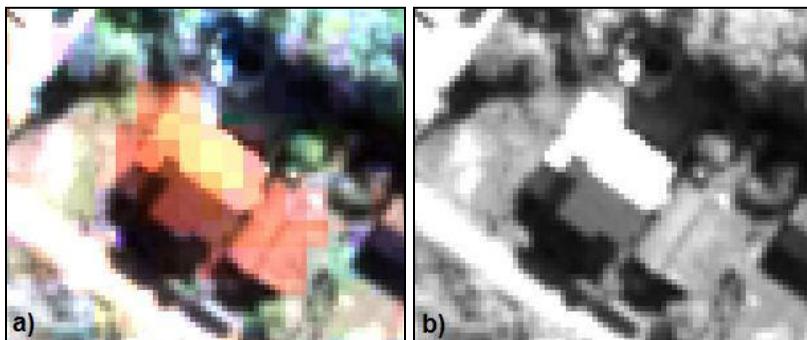


Figura 41: a) Composição colorida com distorção na radiometria, prejudicando o delineamento dos limites da edificação. b) Banda pancromática da mesma área livre da distorção causada pela transformação IHS.

Além da distorção citada neste item, outras anormalidades podem ser detectadas durante o processamento dos dados. Nesses outros casos, o uso de filtros ou interpoladores pode ser satisfatório. No entanto, neste estudo não foram detectadas outras distorções.

b.4 Reflectância

Um grande problema na interpretação de imagens orbitais ocorre quando há um alto grau de reflectância nos alvos. Esse fenômeno ocorre devido a uma combinação de fatores naturais como a resposta espectral característica dos alvos dentro da área imageada (telhados, revestimento viário, etc.) e a luminosidade solar, que em grande incidência potencializa os efeitos refletivos dos alvos. A Figura 42 ilustra esse problema, onde o sistema viário, o revestimento do terreno e o telhado da edificação sofrem grande reflectância, sendo necessária a aplicação de filtros e ferramentas de contraste para facilitar a interpretação da imagem.



Figura 42: Maior nível de reflectância dificultando a identificação de feições.

Com a manipulação adequada do histograma da imagem consegue-se reduzir os efeitos da reflectância. No presente caso, foi utilizada ferramenta do software ENVI que aplica um aumento gaussiano de contraste. Segundo Crosta (1993), a vantagem desta técnica está no realce das informações contidas nas extremidades do histograma. Assim, há um aumento no contraste em áreas com alta reflectância. Como pode ser visto na Figura 43, a aplicação do filtro gaussiano aumenta o contraste entre feições com maior reflectância, melhorando a diferenciação entre estas no momento da interpretação.



Figura 43: Composição colorida após aplicação do filtro gaussiano.

b.5 Vegetação

A cobertura vegetal também pode prejudicar a interpretação de imagens. Em áreas muito arborizadas diversos alvos ficam encobertos pela vegetação, induzindo o fotointérprete ao erro na vetorização ou mesmo à omissão desta feição. No centro da Figura 44 pode-se observar parte de um telhado, porém este se encontra parcialmente encoberto pela vegetação, prejudicando sua delimitação.

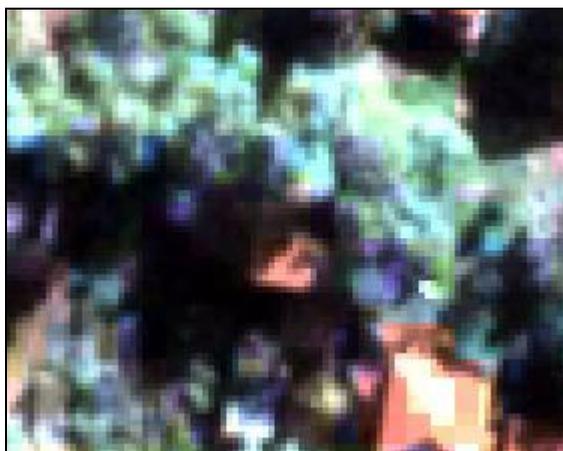


Figura 44: Edificação escondida por entre a vegetação traz dificuldades na sua delimitação.

b.6 Condições climáticas

Imagens tomadas em dias com grande incidência de nuvens prejudicam em muito a interpretação das imagens. As nuvens podem encobrir alvos de grande porte inteiros, impossibilitando qualquer outro tipo de solução para o fotointérprete.

Diante disso, é necessário que a escolha da imagem atenda ao critério da cobertura máxima de nuvens em 20%. Mesmo com o

atendimento a esse critério, o usuário é obrigado a aceitar a imagem com cobertura até este limite, a qual pode conter áreas de importância completamente encobertas por nuvens ou sombras.

b.7 Inclinação da imagem

Do ponto de vista da vetorização, a inclinação da imagem gera problemas como o deslocamento da projeção das partes mais altas de edifícios e quaisquer outras elevações, gerando sombras e encobrindo áreas adjacentes. Esta distorção também impede o uso de qualquer outro tipo de ferramenta para a solução do problema.

No presente caso, a inclinação da imagem não prejudicou a vetorização, visto que a área é predominantemente plana e sem grande verticalização das edificações.

4.2.2 Tipos de elementos fotoidentificáveis

Na etapa de vetorização, o grande desafio foi a interpretação dos diversos elementos necessários para o mapeamento. Como citado no item 4.2.1, muitos são os fatores que prejudicam a interpretação visual de uma imagem, como a resolução espacial, distorções radiométricas, cobertura vegetal, condições climáticas, etc. Elementos como cercas, muros de pequeno porte ou mesmo edificações são muitas vezes omitidos no momento da fotointerpretação devido à interferência desses fatores.

No presente trabalho buscou-se avaliar também a limitação das imagens orbitais de alta resolução para identificação de diversos elementos mapeáveis, como pode ser visto nos itens seguintes.

a. Sistema viário

A elaboração de um mapa viário é talvez uma das maiores aplicações das imagens orbitais de alta resolução espacial. A rede viária é de fácil identificação geométrica devido ao seu contexto, sendo facilmente vetorizada em escalas maiores, trazendo resultados satisfatórios.



Figura 45: Sistema viário facilmente identificável na imagem.

b. Quadra

Os limites de quadras também são de fácil visualização em uma imagem Quickbird. Porém em algumas situações, a definição do real limite da quadra pode ser dificultada devido a sua não materialização, em áreas onde há maior arborização e quando há um maior grau de verticalização das edificações.



Figura 46: A delimitação das quadras também é facilitada em áreas com urbanização bem definida.

Quanto aos elementos definidos no interior de quadra, podem-se destacar:

b.1 Divisas

A identificação de divisas é dificultada nessas imagens. Elementos como cercas, grades e muretas são de difícil interpretação. Isto é causado pela resolução espacial, que limita a identificação de feições com menores dimensões, gerando baixo contraste com as feições adjacentes. Além disso, as divisas muitas vezes são encobertas pela vegetação, o que dificulta ainda mais a delimitação dos lotes.



Figura 47: Muros (lateral direita do imóvel) têm melhor definição nas imagens, no entanto, grades e cercas (frente) ficam mal definidas na imagem, tornando a vetorização mais complexa.

b.2 Edificações

Em grande parte dos casos, as edificações são de fácil visualização para o fotointérprete. A projeção de sombras facilita a identificação desses alvos e ao mesmo tempo dificulta sua real delimitação. A restrição na vetorização de edificações surge na delimitação dos lados e dos vértices quando estas possuem formas não padronizadas, gerando dúvida e imprecisão no processo interpretação.

Em áreas como a da Figura 47, sem grandes aglomerados, sem muitas quinas e com poucos obstáculos (como a vegetação), as edificações podem ser discriminadas pelo fotointérprete, limitando-se à identificação das unidades e suas dimensões aproximadas. Por outro lado, em áreas formadas por aglomerados de casas a interpretação das feições se torna muito difícil.



Figura 48: Edificações facilmente identificáveis na composição gerada após o processamento.

c. Elementos Naturais

Em relação aos elementos naturais, podem-se destacar a vegetação e os cursos d'água, como pode ser visto adiante:

c.1 Vegetação

As imagens orbitais de alta resolução espacial são uma potencial fonte de dados para estimativa de padrões de vegetação, seja através da vetorização feita diretamente em tela pelo fotointérprete, ou através da implantação de algoritmos de análise voltada ao objeto, como a segmentação.

Na definição de classes de uso do solo, pode se discriminar facilmente, dentre os elementos de vegetação, mata densa, vegetação rasteira, áreas de culturas e solo exposto. Nesse sentido, as ações de monitoramento ambiental de áreas de proteção e, mesmo de modo geral, das atividades antrópicas no meio ambiente, podem ser apoiadas nas imagens orbitais de alta resolução. Uma das principais vantagens de seu

uso está na periodicidade do fornecimento de dados, possibilitando a atualização constante das informações e a geração de séries temporais, de suma importância para as ações de monitoramento.

c.2 Corpos d'água

Corpos d'água de maior porte são facilmente identificados em imagens de alta resolução. Apenas em algumas situações como nos cursos de pequeno porte, circundados por vegetação densa, é que há uma maior dificuldade na sua interpretação. A resposta espectral da água nas imagens orbitais facilita a sua distinção em relação às outras feições, como pode ser visto na Figura 49.

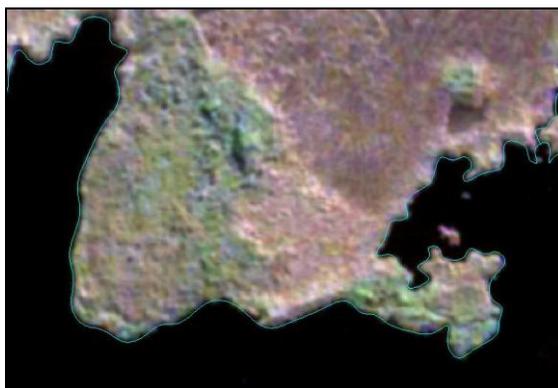


Figura 49: Parte da Lagoinha Pequena delimitada facilmente devido a boa distinção entre a resposta espectral da água e do solo.

4.2.3 Restrições do processamento da imagem

Ao longo dos anos, as imagens orbitais de alta resolução espacial vêm se firmando dentro do setor cartográfico. O constante desenvolvimento dos sistemas sensores sinaliza o aumento do potencial

das imagens orbitais para a atualização cartográfica e para o monitoramento, tanto em meio rural quanto em meio urbano. O contínuo investimento nessa tecnologia traz como resultado o rápido desenvolvimento da qualidade desses produtos, principalmente no que diz respeito à resolução espacial das imagens. Com isso, a capacidade extrativa dessas imagens é cada vez maior, ampliando seu campo de aplicação.

No entanto, as distorções introduzidas por diversas fontes, internas ou externas aos sistemas de sensores, trazem a necessidade da correção dos dados gerados. Além disso, a ampliação constante na qualidade das imagens orbitais exige cada vez mais do usuário um maior refinamento dos métodos de correção. Dessa forma, é de suma importância que, antes de qualquer aplicação de imagens orbitais à Cartografia, o usuário disponha das ferramentas e dados necessários para a retificação dessas imagens.

Inicialmente, o usuário deve ter um número suficiente de pontos de controle para o georreferenciamento da imagem. Com um número mínimo de 4 pontos de controle, à medida em que se aumentam esses pontos, melhor é o resultado da correção geométrica. Verificou-se uma tendência à estabilidade posicional das imagens corrigidas, à medida que se aumentaram os pontos de controle.

Cabe ressaltar que as variações no relevo e as dimensões da área estudada tendem a influenciar na quantidade de pontos de controle necessários para a correção geométrica de imagens orbitais, principalmente nas modelagens bidimensionais. No presente caso, houve uma tendência à estabilidade da qualidade dos dados corrigidos

nas duas modelagens estudadas. Isto se deve a predominância de um relevo pouco acidentado da área estudada.

Além dos pontos de controle, é necessário também coletar pontos de checagem geométrica. Esses pontos objetivam certificar o processamento dos dados. Vale salientar que o número de pontos coletados deve ser sempre maior do que o planejado. Isto porque se deve considerar o descarte de pontos durante o processamento.

Outra importante etapa no processamento de imagens orbitais é a ortoretificação, que elimina as distorções geradas pela imagem em perspectiva central e pelo relevo da área estudada. Por necessitar de um modelo altimétrico de qualidade da área estudada, este é um dos grandes desafios do usuário que muitas vezes não dispõe de qualquer modelo digital do terreno. O ideal é que se tenha um MDT obtido a partir de mapeamentos topográficos ou fotogramétricos em escalas maiores que 1:10.000. Porém, o uso de outras referências altimétricas não pode ser descartado, mesmo que em escalas menores.

Devido à peculiaridade das áreas e dados estudados, o usuário deve fazer sempre o uso do bom senso antes da escolha da metodologia para o processamento. A princípio é necessário que o usuário tenha pleno domínio das técnicas de processamento digital de imagens, o que evita custos desnecessários e reduz a possibilidade de uso indevido dos dados. Da mesma forma que a falta de dados, o excesso destes aumenta custos e torna ineficiente o uso da tecnologia de sensoriamento remoto para aplicações cartográficas. Outro ponto importante é a escolha do sistema sensor, visto que o usuário deve ter pleno conhecimento das

características das imagens geradas por este, objetivando avaliar suas possíveis aplicações e limitações.

No presente estudo, a área imageada tem relevo predominantemente plano, o que facilitou o processamento. Os resultados do georreferenciamento sem a ortocorreção da imagem mostraram-se satisfatórios, apesar de claramente inferiores aos métodos de ortoretificação efetuados em dois cenários. Quanto aos pontos de controle, pôde-se perceber que de acordo com o aumento na quantidade destes, há também melhora na qualidade do processamento. Porém, essa melhora na qualidade pode ser considerada tímida em relação à quantidade de pontos, como pode ser visto nos resultados apresentados neste estudo.

Vale salientar que os resultados variam de acordo com as características da área estudada, da tomada da cena, da qualidade dos dados auxiliares e da experiência do usuário. Estudos avaliando o comportamento dessas imagens em outras situações são de suma importância para a Cartografia. Assim poder-se-ão verificar outras aplicações e limitações dessas imagens à Cartografia.

4.2.4 Restrições da imagem para a produção e atualização de mapas em escalas grandes

Como citado no início deste trabalho, a restrição mais comum relacionada a uma imagem orbital refere-se à sua resolução espacial. Esse é o primeiro fator limitante para a definição da escala de um produto gerado pela imagem, levando em consideração os princípios da precisão gráfica. Em uma situação ideal em que não fossem

considerados outros erros e levando-se em conta uma precisão gráfica de 0,25 mm na escala do mapa, uma cena Quickbird se restringiria a uma escala máxima de 1:2.500. Porém, outros fatores devem ser considerados, como por exemplo, o grau de acurácia na correção geométrica e o potencial de extração de informações destas imagens.

Quanto à geometria da imagem, esta depende das técnicas, dos dados utilizados no seu processamento e da própria topologia da região estudada. O relevo da área é de suma importância; áreas muito acidentadas geram maiores distorções na imagem, dificultando a sua correção. Por outro lado, em áreas com relevo pouco acidentado, como a estudada neste trabalho, é possível se chegar a resultados satisfatórios sem a necessidade de um processamento tão refinado.

Outra questão fundamental para a utilização de dados do sistema Quickbird é quanto à possibilidade de extração de informações. Mesmo após a fusão da imagem, a vetorização é dificultada não só pela sua resolução espacial como também por outros fatores, como distorções radiométricas, comportamento espectral de alvos, sombras, alta reflectância etc. Dessa forma, muitas feições são omitidas, como cercas e muretas, prejudicando a identificação de divisas. Mesmo edificações ficam despercebidas dependendo das características locais e ambientais na tomada da cena.

Devido as suas restrições, as imagens de alta resolução espacial ainda são muito limitadas para aplicação direta na produção de mapas em escalas maiores. No entanto, devido à periodicidade no fornecimento dos dados, esses sistemas podem ser utilizados com sucesso em outros

segmentos da Cartografia, como no monitoramento urbano e mesmo no apoio a atualização cadastral.

4.2.5 Campo de aplicação das imagens orbitais de alta resolução à Cartografia

As geotecnologias estão cada vez mais presentes nas atividades de diversos setores da sociedade, que vão desde o uso estratégico em grandes empresas até a utilização de um simples GPS para automóveis. No que diz respeito à Cartografia urbana, o déficit de dados é uma realidade na maioria dos municípios do país. Com o advento dos sistemas orbitais de alta resolução espacial, surgiu uma nova ferramenta de aquisição de dados com grande aplicação para a Cartografia.

As imagens de alta resolução espacial ainda têm um grande limitador do seu uso para a Cartografia. Por melhor que seja o processamento da imagem, com o uso de dados planimétricos e altimétricos confiáveis, o resultado sempre ficará limitado à capacidade interpretativa oferecida pela imagem.

Conforme mostrado no item 4.1, os resultados obtidos no presente estudo permitem ao usuário trabalhar com uma escala de 1:5.000 nos produtos derivados das imagens corrigidas nos 4 cenários de processamento estudados. Porém, em áreas com relevo predominantemente acidentado e com dados altimétricos imprecisos, a limitação quanto à precisão pode ser maior.

Do ponto de vista do mapeamento cadastral, a própria resolução espacial da imagem restringe a escala dos seus produtos derivados, não

atendendo a este tipo de levantamento. Erba et al. (2005) ressalta que, apesar dos avanços produzidos nos últimos anos, as imagens de satélite ainda não são apropriadas para a atualização de bases cartográficas cadastrais, servindo, porém, para a identificação de construções não declaradas e identificação de novos loteamentos e assentamentos irregulares. A Figura 51 mostra parte da base 1:2.000 área de estudo levantada em outubro de 2001.



Figura 50: Parte da área de estudo cadastrada por levantamento aerofotogramétrico em outubro de 2001.

Percebe-se na sobreposição mostrada na Figura 52 a desatualização da restituição aerofotogramétrica de outubro 2001 em relação imagem de junho de 2003. Na imagem pode ser facilmente identificada a existência de novas vias, que indicam a presença de um novo loteamento, além de algumas edificações, em um prazo menor que 2 anos.



Figura 51: Sobreposição da imagem Quickbird ao levantamento aerofotogramétrico.

Essas imagens podem servir como uma importante fonte de dados para a atualização de mapas em escalas maiores, desde que se limite o novo mapa à precisão fornecida pela imagem. Nesse contexto, a atualização de bases cadastrais fica limitada a uma escala de trabalho menor que a original da base, dependendo também da capacidade extrativa da imagem e do resultado da correção, que varia de acordo com cada trabalho.

A Figura 53 mostra a base cartográfica com a vetorização de novos elementos gerada a partir da imagem Quickbird. Pode-se observar a atualização do sistema viário em duas regiões da imagem, sendo que em um deles há a implantação de um novo loteamento. A identificação

de novas áreas urbanizadas é uma das vantagens das imagens orbitais de alta resolução, devido à constante possibilidade de aquisição de dados.



Figura 52: Sobreposição da imagem Quickbird à base cartográfica após a atualização dos novos elementos.

Como apoio ao cadastro técnico, essas imagens permitem um pré-estudo da área a ser cadastrada, possibilitando o estabelecimento dos dados primários de cada imóvel (possível área da propriedade, área edificada, etc.).

Outro campo de constante aplicação das imagens orbitais é na atualização do mapeamento viário e hidrográfico. Com os dados fornecidos pela imagem, é possível mapear o sistema viário com grande eficiência, seja ele de vias urbanas ou de rodovias. O levantamento da rede hidrográfica também pode ser feito de forma direta com imagens de alta resolução espacial. Muitas vezes, o difícil acesso à rede hidrográfica dificulta a utilização dos métodos tradicionais de levantamento em

campo. Assim, as imagens são também uma excelente opção para o mapeamento hidrográfico, tanto em termos de eficiência quanto em termos de custo.

Com a evolução das metodologias de planejamento urbano, que têm ações cada vez mais pontuais e direcionadas para o local, o conhecimento do espaço urbano é de fundamental importância para seu planejador. A possibilidade de aquisição constante de dados permite ao usuário trabalhar com séries históricas das imagens. Dessa forma é possível identificar tendências de expansão e traçar planos para as atuações futuras.

Além do apoio à atualização cadastral e ao planejamento, o monitoramento urbano é hoje uma grande ferramenta para seus gestores. Com a periodicidade nas aquisições de dados de sistemas sensores orbitais, os setores cadastrais têm um maior controle da expansão urbana. Isto permite a detecção de loteamentos irregulares, invasões e novas áreas passíveis de intervenção. Além do monitoramento urbano, pode-se trabalhar também com o monitoramento ambiental com eficiência. Diversas ações antrópicas são facilmente identificáveis em uma imagem de alta-resolução, sendo uma poderosa aliada dos órgãos de fiscalização ambiental.

Como forma alternativa, municípios de pequeno porte e sem uma base cartográfica atualizada, ou mesmo existente, podem usufruir dessas informações a um custo razoável. Pelas imagens identificam-se facilmente o sistema viário, a hidrografia e a vegetação, restringindo-se apenas na identificação de certas edificações e de divisas pouco

definidas. Vale ressaltar que o mapeamento, seja qual for, deve seguir os critérios de precisão referentes à escala do produto final.

Outra importante aplicação de imagens orbitais está na aquisição de dados para Sistemas de Informação Geográfica, cada vez mais utilizados por diversos agentes públicos e privados. A necessidade de constante atualização dos dados presentes nos SIG's faz das imagens orbitais uma grande fonte de informações, a custos mais acessíveis que outras técnicas de mapeamento.

5 Conclusões

- a- Nos dois cenários estudados para o georreferenciamento, as imagens corrigidas atendem à escala de 1:5.000, adequadas à classe B, de acordo com os critérios estabelecidos pelo Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 que regulamenta o PEC.
- b- Nos dois cenários estudados para a ortoretificação, as imagens corrigidas atendem a escala de 1:4.000, adequadas à classe A, de acordo com os critérios estabelecidos pelo Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 que regulamenta o PEC.
- c- O aumento no número de pontos de controle tende a refinar os resultados. No entanto, a taxa de melhora na qualidade decresce com esse aumento de pontos, aproximando-se da estabilidade.
- d- O georreferenciamento em áreas predominantemente planas pode ser aplicado, de acordo com os objetivos do trabalho, alcançando escalas de até 1:5.000. No entanto, a combinação de fatores como a qualidade da coleta e do processamento dos pontos de controle, ângulo de inclinação da própria imagem e o bom senso do projetista na elaboração do projeto devem ser levados em conta para o sucesso da correção proposta.

- e- Deve-se tratar a questão do simples georreferenciamento de imagens de alta resolução com cautela. Variações no relevo tendem à geração de imagens com grandes distorções. Na única área analisada com elevação em torno dos 200 m de altura, o erro planimétrico ficou em torno de 45 m na correção bidimensional.
- f- A ortoretificação melhorou significativamente a qualidade dos dados, e se mostrou essencial em áreas com relevo acidentado, mesmo que suavemente.
- g- No presente caso a elevação do sensor não prejudicou o processamento. Talvez por se tratar de uma região predominantemente plana. Em outras situações, é válido o estudo do comportamento das correções relacionadas à inclinação do sensor. Esta pode trazer grandes distorções na reamostragem dos pixels nas regiões mais altas da área imageada. Com o aumento do ângulo de inclinação do sensor os erros posicionais tendem a aumentar de forma progressiva.
- h- Quanto à extração de informações, a imagem possibilita a extração com sucesso de feições como sistema viário, quadras, hidrografia, muros e vegetação. Porém, em áreas de aglomerados urbanos ou com grande verticalização, a extração de dados pode ser dificultada.
- i- No que tange as limitações da imagem, vale ressaltar a dificuldade na extração edificações. Dentre os principais fatores estão o formato e as dimensões da própria

edificação, alta reflectância e distorções radiométricas nos telhados e encobrimento pela vegetação.

- j- A indefinição das divisas de propriedades formadas por muretas, cercas, tela ou outros elementos de espessura e dimensões reduzidas é outra limitação das imagens. Isso se deve à própria resolução espacial da imagem, que restringe a extração de feições de pequeno porte ou com pouca espessura, prejudicando assim a delimitação de diversos imóveis.
- k- As imagens orbitais de alta resolução espacial podem ser aplicadas em diversas áreas da cartografia urbana, como no apoio ao cadastro técnico, no monitoramento ambiental e de expansão urbana, no mapeamento de sistemas viários e hidrográficos, na composição de SIG's etc. No entanto, há de atentar sempre para o tratamento dessas imagens, objetivando atender às necessidades de cada uma dessas aplicações.

6 Bibliografia Básica

ABREU, F. C. S. **Monorestituição de imagem de alta resolução Quickbird II apoiado no MDE obtido com dados do sistema Laser Scanner**. 2005. 64 f.. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ANDRADE, J. B. de. **Fotogrametria**. 1. Ed, Curitiba: SBEE, 1998. 258p.

BIAS, E. S. **Vantagens e limitações das imagens de alta resolução como suporte ao planejamento urbano: o exemplo de Sobradinho – Distrito Federal**. 2003. 280 f.. Tese (Doutorado em Análise da Informação espacial), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

BLASCHKE, T.; GLASSER, C.; LANG, S. Processamento de Imagens num Ambiente Integrado SIG / Sensoriamento Remoto – Tendências e Conseqüências. In. Blaschke, T., Kux, H. **Sensoriamento Remoto e SIG Avançados: novos sistemas sensores e métodos inovadores**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 11-18.

BOCCARDO, P. et al. **Orthorectification of high resolution satellite images**. In: ISPRS CONGRESS, 20., 2004, Istanbul, Turquia.

BRASIL. Decreto n. 89.817, de 20 de junho de 1984. **Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**.

BRASIL. Ministério das Cidades. In: Cadernos do Ministério das Cidades – 3 Planejamento Territorial Urbano e Política Fundiária. **Política de apoio à elaboração e revisão de planos diretores: uma**

outra visão de planejamento e de cidade. Brasília: Ministério das Cidades, 2004. p. 13-36. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/ministerio-das-cidades/biblioteca/cadernos-do-ministerio-das-cidades/>> Acesso: 25 de agosto de 2007.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to Remote Sensing.** 4. ed. New York: The Guilford Press, 2002. 654p.

CHENG, P.; TOUTIN, T.; ZHANG, Y. **QuickBird – Geometric Correction, Data Fusion, and Automatic DEM Extraction.** In: ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING, 24., 2003, Busan, Korea.

COSTA, A. M.; et. al. Contribuições do Cadastro Técnico Multifinalitário para a Gestão Municipal. In. Schenini, P. C.; Trento, D. N.; Campos, E. T. (Orgs.). **Planejamento, gestão e legislação territorial urbana: uma abordagem sustentável.** Florianópolis: FEPESE, Papa-Livro, 2006, 162p.

CROSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto.** 3. ed. Campinas: Unicamp, 1992. 170p.

Digital Globe, INC. **Quickbird imagery products: product guide.** Longmont, Digital Globe Inc., 2006. 77p.

Digital Globe. **Archive Search.** Disponível em: <<http://archivetool2.digitalglobe.com>> Acesso: 17 de setembro de 2008.

ERBA, D. A.; et. al. O Cadastro Territorial: passado, presente e futuro. In. Erba, D. A.; et. al. **Cadastro Técnico Multifinalitário como Instrumento de Política Fiscal e Urbana.** Rio de Janeiro: Ministério das Cidades, 2005. 144p.

ESRI Support Center. **Projection Engine: Supported Coordinate Systems and Geographic Transformations.** <em: <http://support.esri.com>> Acesso: 02 de junho de 2009.

FERREIRA, A. B. H. **Aurélio Século XXI: O Dicionário da Língua Portuguesa.** 3. ed. Rio de Janeiro: Positivo, 2004.

FIG – Federação Internacional dos Geômetras. **Declaração sobre Cadastro,** 1995. Disponível em: <http://www.fig.net/commission7/reports/cadastre/statement_on_cadastre.html> Acesso: 16 de Agosto de 2009.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações.** Curitiba: UFPR, 1994, 319p.

HU, Y.; TAO, V.; CROITURU, A. **Understanding the rational function model: methods and applications.** In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 20, 2004, Istanbul, Turquia. Disponível em <<http://www.isprs.org/congresses/istanbul2004/comm4/papers/423.pdf>> Acesso: 12 de junho de 2009.

IBGE. **Altera o Apêndice II da R.PR-22/83.** Resolução n. 23, de 21 de fevereiro de 1989.

IBGE. Primeira divisão de geociências do nordeste. **Introdução ao processamento digital de imagens.** Rio de Janeiro: IBGE, 2001. 94p.

INCRA. **Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais:** Aplicada à Lei 10.267, de 28 de agosto de 2001 e do Decreto 4.449, de 30 de outubro de 2002. 2003, 40p.

ISHIKAWA, M. I. **Potencialidades de uso de imagens IKONOS/GEO para aplicações em Áreas Urbanas**. 2001. 82 f.. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas), Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

JACOBSEN, K. **Comparison of High Resolution Mapping from Space**. In: INCA, 2002, Ahmedabad, India.

JACOBSEN, K. **Geometric Potential of IKONOS- and QuickBird-Images**. Photogrammetric Weeks, n. 3, pp 101-110, 9/2003a.

JACOBSEN, K. **Orthoimages and DEMs by QuickBird and IKONOS**. In: EARSeL Ghent 2003b, Remote Sensing in Transition, Millpress, ISBN 90-77017-71-2, 513 – 525.

JACOBSEN, K.; BÜYÜKSALIH, G. **Topographic Mapping From Space**. In: ISPRS CONGRESS, 20., 2004, Istanbul, Turquia.

JACOBSEN, K.; BÜYÜKSALIH, G.; TOPAN, H. **Geometric Models for the Orientation of High Resolution Optical Satellite Sensors**. In: IntArchPhRS. Band XXXVI 1/W3. Hannover, 2005, 6 S.

JACOBSEN, K. **High Resolution Satellite Imaging Systems-Overview**. In: IntArchPhRS, Hannover, 2005.

JACOBSEN, K. **Calibration of Imaging Satellite Sensors**. in: IntArchPhRS. Band XXXVI 1/ W41. Ankara, 2006, 7 S.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 3 ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005, 526p.

KUX, H. J. H; PINHEIRO, E. S. **Dados do satélite QUICKBIRD para o mapeamento do uso e cobertura da terra numa seção da Mata Atlântica no Estado do Rio Grande do Sul.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, Goiânia, 16-21 abril 2005, Anais, INPE, p. 4509-4516.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling: principles and methodology.** Florida: CRC Press, 2005, 323p.

LOCH, C. Cadastro Técnico Multifinalitário: Instrumento de Política Fiscal e Urbana. In: Erba, D; Oliveira, F. L. de; Lima Junior, P. N. (Orgs.). **Cadastro Multifinalitário como Instrumento de Política Fiscal e Urbana.** Rio de Janeiro. 2005, 144p.

LOCH, C.; ERBA D. G., **Cadastro Técnico Multifinalitário: rural e urbano.** Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Police, 2007, 142p.

MATHER, P. M. **Computer Processing of remotely-sensed images: an introduction.** 3 ed. Chichester: John Wiley & Sons. 2004. 324p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação.** 3. ed. Viçosa: UFV, 2005, 320p.

NEUBERT, M.; MEINEL, G. Análise de Dados do Satélite Ikonos Baseada em Segmentação – Utilização do Software de Análise de Dados e Cognition para Diferentes Áreas-Testes. In. Blashke, T., Kux, H. **Sensoriamento Remoto e SIG Avançados: novos sistemas sensores e métodos inovadores.** 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 108-117.

NOVO, E. M. L. DE MORAES. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações.** 3 ed. São Paulo: Blucher, 2008. 363p

PASSINI, R.; JACOBSEN, K. **Accuracy Investigation on Large Blocks of High Resolution Images**. In: IntArchPhRS, Paris, 2006.

PINHEIRO, E.S. **Avaliação de imagens QUICKBIRD na análise geográfica de um setor da Mata Atlântica do Rio Grande do Sul**. 2003. 165 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

RICHARDS, J.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: Introduction**. 4. ed. Berlin: Springer, 2006, 439p.

SANT'ANA, A. M. **Plano Diretor Municipal**. São Paulo: Liv. e Ed. Universitária de Direito, 2006, 272p.

SILVA, W. B. da. **Avaliação da Geometria de Imagens IKONOS Ortoretificadas Através das Transformações Polinomiais Racionais**. 2005. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Cartográfica), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

TAO, V.; JACOBSEN, K.; JENSEN, J.; SOHN, G. **Mapping from high-resolution satellite imagery**. In: PE&RS 72, 2006, v. 5, S. 529-530.

TOPAN, H.; BÜYÜKSALIH, G.; JACOBSEN, K. **Information Contents of ORBVIEW-3 for Topographic Mapping**: In: IntArchPhRS, Ankara, 2006.

TOPAN, H.; BÜYÜKSALIH, G.; JACOBSEN, K. **Information contents of High Resolution Satellite Images**. In: EARSeL 3D_REMOTE SENSING WORKSHOP, Porto, 2005.

TOUTIN, T. **Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods.** In: International Journal of Remote Sensing, v. 25, 10 Maio 2004, páginas 1893 – 1924.

VOLPE, F. **Geometrical Processing of Quickbird High Resolution Satellite Data.** In: ISPRS/EARSeL, Workshop “High Resolution Mapping from Space 2003”, 2003.

WILLNEFF, J.; POON, J. **Georeferencing from orthorectified and non-orthorectified high-resolution satellite imagery.** In: THE 13TH AUSTRALASIAN REMOTE SENSING AND PHOTOGRAMMETRY CONFERENCE, Canberra, 2006.

XU, Z. **The Rational Function Model in Photogrammetric Mapping: Methods and Accuracies.** 2004. 64 f. Master Thesis. North York, Ontario, Canada. Department of Earth Science, York University. Disponível em: <<http://www.geoict.yorku.ca/past-publications/past-publications-1>> Acesso: 11 de julho de 2009.

YAMAKAWA, T.; FRASER, S. C. **The Affine Projection Model for Sensor Orientation: Experiences with High-Resolution Satellite Imagery.** In: ISPRS CONGRESS, 20, 12-23 July 2004, Istanbul, Turquia.