

PATRICIA DE CASTRO PEDRO

**ORTORETIFICAÇÃO DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO IKONOS E
QUICKBIRD UTILIZANDO O MODELO APM (*AFFINE PROJECTION MODEL*)**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof.º Dr.º Alzir Felipe A. Buffara

Co-Orientador: Prof.º Dr.º Edson A. Mitishita

CURITIBA
2005

AGRADECIMENTOS

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, por todo o recurso institucional disponibilizado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq financiador do Projeto de Pesquisa – Obtenção de Informações Espaciais da superfície terrestre a partir de Par Estereoscópico de Imagens de Alta Resolução, referente a utilização da imagem do Par estereoscópico IKONOS.

Aos Orientadores Prof. Dr. Alzir Felipe. B. Antunes e Prof. Dr. Edson A. Mitishita pela orientação, sugestões e apoio.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

À empresa Intersat Imagens de Satélite pela doação da imagem *Quickbird Standard*.

A empresa Aeroimagem pela doação da base cartográfica digital, em especial ao Engenheiro Roberto Preoski.

À Engesat Imagens de Satélite, pelo apoio, em especial a Laurent Martin e a engenheira Jaqueline Cavalli.

Ao professor Dr. Sílvio Rogério C. de Freitas e aos membros do colegiado do ano de 2004, pelo apoio.

Aos colegas Flavia F. Markus, Geraldo Landovski, Maria Madalena dos Santos, Tatyana Fraga, pelo apoio, incentivo e amizade.

Aos meus familiares, minha primeira e segunda família, que me apoiaram e foram fundamentais para a finalização deste trabalho. E em especial ao meu marido pela paciência, incentivo, carinho e sobretudo motivação.

Aos colegas do curso de pós-graduação, em especial à Álvaro M. Machado pela implementação do modelo APM.

A DEUS por permitir que o meu caminho esteja cercado de pessoas maravilhosas.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo Geral.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. JUSTIFICATIVA.....	4
4. ÁREA DE ESTUDO.....	5
5. MATERIAIS.....	6
5.1- Imagens Orbitais de Alta Resolução	6
5.2- Dados Complementares.....	7
5.3 Recursos Computacionais.....	8
6. REVISÃO DA LITERATURA : ESTADO DA ARTE.....	9
6.1 Sistemas Sensores	9
6.2. Distorções Geométricas	12
6.2.1. Erro devido à rotação da Terra.....	13
6.2.2. Erro devido à distorção panorâmica	14
6. 2.3 Erros devido à curvatura da terra.....	16
6.2.4 Distorções devido a variações da altitude da plataforma.....	16
6.3 Correção Geométrica.....	19
6.3.1 Pontos de Controle.....	21
6.4 Processamento de Imagens Digitais	22
6.4.1. Fusão	22
6.5 Ortorectificação	24
6.6 Modelos Matemáticos	27
6.6.1 Modelo Polinomial Racional.....	28
6.6.2 Affine Projection Model – APM	30
6.7 Precisão, Acurácia	31
6.8 Modelo Digital do Terreno – MDT ou Digital Terrain Model – DTM.....	33
6.8.1 Triangulação.....	34
6.8.2 Grade Regular.....	35
7. METODOLOGIA	38
7.1. Escolha das áreas de estudo	38
7.2. Processamento Digital das Imagens	41
7.2.1 Imagem Quickbird.....	41
7.2.1 Imagem IKONOS	41
7.3 Geração do MDT das áreas de estudo	42
7.4 Pontos de controle	44
7.5 Coleta dos pontos de checagem	47
7.6 Geração das ortoimagens com modelo APM.....	49
7.7 Geração de ortoimagens utilizando o modelo polinomial racional.....	51
7.8 Avaliação das ortoimagens geradas	52
8. RESULTADOS.....	53
8.1 Transformação APM na imagem Quickbird.....	53
8.1.1 Parâmetros da Transformação	53
8.1.2 Dados Estatísticos da Transformação para os Pontos de Controle e Pontos de Checagem	54
8.2 Transformação APM na imagem IKONOS.....	59
8.2.1 Parâmetros da Transformação.....	59

8.2.2 Dados Estatísticos da Transformação para os Pontos de Controle e Pontos de Checagem	60
8.3 Transformação RPC	66
8.4 Avaliação da qualidade posicional das ortoimagens geradas	67
8.4.1 Ortoimagens Quickbird utilizando o modelo APM.....	67
8.4.2 Ortoimagens IKONOS utilizando o modelo APM.....	72
8.4.3 Ortoimagens Quickbird geradas com o modelo RPC.....	77
8.4.4 Ortoimagens IKONOS geradas com o modelo RPC.....	80
8.5 Ortoimagens geradas	85
8.5.1 Ortoimagens Quickbird.....	85
8.5.2 Ortoimagens IKONOS.....	85
8.6 Análise dos Resultados.....	86
9. CONCLUSÕES	88
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA..	5
FIGURA 2 – BASE CARTOGRÁFICA DIGITAL DE PARTE DA ÁREA URBANA INVESTIGADA.....	7
FIGURA 3 – ILUSTRAÇÃO DO SENSOR DE LINHA DO TIPO WHISKBROOM	10
FONTE: ADAPTADO DE CHEN (1985, P.22).	10
FIGURA 4 – ILUSTRAÇÃO DO SENSOR DE LINHA TIPO PUSHBROOM	11
FIGURA 5 – ILUSTRAÇÃO DO EFEITO DA ROTAÇÃO DA TERRA NO TEMPO DE AQUISIÇÃO DA IMAGEM.a)IMAGEM ORGANIZADA EM UMA GRADE.b)RECUO DE LINHAS SUCESSIVAS PARA OESTE, DEVIDO AO MOVIMENTO DE ROTAÇÃO DA TERRA DURANTE O TEMPO DE AQUISIÇÃO DA IMAGEM	14
FIGURA 6 – ILUSTRAÇÃO DA DISTORÇÃO PANORÂMICA.....	15
FIGURA 7 – ILUSTRAÇÃO DAS DISTORÇÕES DEVIDO ÀS VARIAÇÕES DA ALTITUDE, ATITUDE E VELOCIDADE DA PLATAFORMA	17
FIGURA 8 – ILUSTRAÇÃO DOS ÂNGULOS E <i>YAW, PITH E ROLL</i> NA TRAJETÓRIA DO IMAGEAMENTO	18
FIGURA 9 – PRINCÍPIO DA TRANSFORMAÇÃO IHS.....	23
FIGURA 10 – PRINCÍPIO DA GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS	25
FIGURA 11 – a)BOA ACURÁCIA(MEDIDA PRÓXIMO AO VALOR REAL) E BOA PRECISÃO	32
b)BAIXA ACURÁCIA, BOA PRECISÃO	32
FIGURA 12 - ETAPAS PARA O PROCESSO DE MODELAGEM MATEMÁTICA DE SUPERFÍCIES	33
FIGURA 13 - CRITÉRIO DO CIRCUNCÍRCULO PARA GERAÇÃO DA TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY. a)T1 E T2 SÃO TRIÂNGULOS DE DELAUNAY.b)T1 E T2 NÃO SÃO TRIÂNGULOS DE DELAUNAY	35
FONTE: ADAPTADO DE WWW.DPL.INPE.BR/GILBERTO/TUTORIAIS/GIS_AMBIENTE/4MNT.PDF	35
FIGURA 14 – FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS REALIZADOS	38
FIGURA 15 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO NA IMAGEM QUICKBIRD	40
FIGURA 16 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO NA IMAGEM IKONOS	40
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO DO MDT DAS IMAGENS QUICKBIRD E IKONOS, ÁREAS 1 E 2.....	43
FIGURA 18 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE IMAGEM QUICKBIRD, ÁREA 1	45
FIGURA 19 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE IMAGEM QUICKBIRD, ÁREA 2	45
FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE IMAGEM IKONOS, ÁREA 1	46
FIGURA 21 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE IMAGEM IKONOS, ÁREA 2	46
FIGURA 22 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CHECAGEM IMAGEM QUICKBIRD ÁREA 1	47
FIGURA 23 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CHECAGEM IMAGEM QUICKBIRD, ÁREA 2	47
FIGURA 24 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CHECAGEM IMAGEM IKONOS ÁREA 1	48

FIGURA 25 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CHECAGEM IMAGEM IKONOS ÁREA 2	48
FIGURA 26 – ESTRUTURAÇÃO DO PROGRAMA (ADAPTADO DO PROGRAMA ORTORETIFICA).....	49
FIGURA 27 – ESQUEMA DO PROCESSO DE ORTORETIFICAÇÃO NO PROGRAMA ENVI 4.0.....	51
FIGURA 28– VETORES DOS RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES PARA OS PONTOS DE CONTROLE ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD.....	56
FIGURA 29 – VETORES DOS RESÍDUOS PARA OS PONTOS DE CONTROLE ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD	58
FIGURA 30 – VETORES DOS RESÍDUOS PARA OS PONTOS DE CONTROLE SELECIONADOS ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS	62
FIGURA 31 – VETORES DOS RESÍDUOS PARA OS PONTOS DE CONTROLE ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS	65
FIGURA 32– DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD,	68
FIGURA 33 – DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD,	70
FIGURA 34 – VETORES RESULTANTES DA DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS.....	73
FIGURA 35– VETORES RESULTANTES DA DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS.....	75
FIGURA 36 – VETORES DA DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD.	78
FIGURA 37– VETORES DA DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD	80
FIGURA 38– VETORES DA DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS	82
FIGURA 39– VETORES DA DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA IMAGEM IKONOS	6
TABELA 2 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA IMAGEM QUICKBIRD	6
TABELA 3 – DADOS DA BASE CARTOGRÁFICA	7
TABELA 4 - EQUAÇÕES DO MÉTODO PARAMÉTRICO	50
TABELA 5– PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO APM PARA ÁREA 1 - IMAGEM QUICKBIRD	53
TABELA 6– PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO APM PARA ÁREA 2 - IMAGEM QUICKBIRD	54
TABELA 7– RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE (GCP’S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 1 - IMAGEM QUICKBIRD	55
TABELA 8 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CHECAGEM(CP’S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 1 - IMAGEM QUICKBIRD	57
TABELA 9 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE(GCP’S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 2 - IMAGEM QUICKBIRD	57
TABELA 10 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CHECAGEM(CP’S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 2 - IMAGEM QUICKBIRD	58
TABELA 11 – PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO APM PARA ÁREA 1 - IMAGEM IKONOS	59
TABELA 12– PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO APM PARA ÁREA 2 - IMAGEM IKONOS	60
TABELA 13– RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE(GCP’S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 1 - IMAGEM IKONOS	61
TABELA 14 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CHECAGEM (CP’S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 1 - IMAGEM IKONOS	63
TABELA 15– RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE(GCP’S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 2 - IMAGEM IKONOS	64
TABELA 16 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CHECAGEM(CP’S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 2 - IMAGEM IKONOS	65
TABELA 17– DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO APM COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD	67
TABELA 18– DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD	68
TABELA 19 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD	69
TABELA 20– DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO APM COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD	70
TABELA 21 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD	71
TABELA 22 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD	71

TABELA 23– DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO APM COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS	72
TABELA 24 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS	73
TABELA 25 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS	74
TABELA 26– DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO APM COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS	75
TABELA 27 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS	76
TABELA 28 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS	77
TABELA 29- DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO RPC COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD	78
TABELA 30- DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO RPC COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD	79
TABELA 31- DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO RPC COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS	81
TABELA 32 - DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO RPC COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS.....	83
TABELA 33 - RESUMO DOS RESULTADOS.....	86

RESUMO

Nos últimos anos tem-se pesquisado vastamente sobre a precisão absoluta das imagens de satélite, o aprimoramento de métodos e técnicas de extração de informações, sobretudo com propostas de novos modelos matemáticos para processamentos como a ortoretificação e composição 3D de imagens de alta resolução. Nesta pesquisa são realizados testes com imagens IKONOS (*Stereo Par*) e Quickbird (*Standard*) de Araucária, região metropolitana de Curitiba. Duas áreas piloto com relevo e distribuição urbana diferentes, foram selecionadas para a investigação. Ortoimagens destas regiões de estudo foram geradas utilizando-se o modelo matemático APM (*Affine Projection Model*) e o modelo Racional Funcional. Os resultados são comparados e analisados, para testar a hipótese de que o modelo APM pode ser usado para a ortoretificação de imagens sendo a qualidade posicional satisfatória.

ABSTRACT

In the last years, it has been researching a lot about the absolute precision of the satellite images, the improvement of methods and techniques of extraction of information, mainly with proposals of new mathematical models for processing as the ortho-rectification and 3D composition of high resolution images. In this research, tests are accomplished with images IKONOS (Stereo Par) and Quickbird (Standard) of Araucaria, a city placed in metropolitan area of Curitiba city. Two pilot areas, with different relief and urban distribution, were selected for the investigation. Ortho-images of these study areas were generated, being used the mathematical model APM (Affine Projection Model) and the Functional Rational model. The results are compared and analyzed to test the hypothesis that the model APM can be used for the orthorectification of images, being considered satisfactory the quality of the position.

1. INTRODUÇÃO

As imagens de satélite de alta resolução, comercializadas para uso civil desde setembro de 1999, com o lançamento do satélite IKONOS II e em 2001 com o satélite Quickbird, proporcionaram aos usuários de imagens de satélite e fotogrametria possibilidades de aplicação bastante variadas.

As imagens de satélite assim como as fotografias aéreas sofrem com o deslocamento da imagem com relação ao relevo, o que conseqüentemente acarreta uma deteriorização da precisão posicional.

Nos últimos 15 anos vários modelos matemáticos têm sido formulados para extrair informações 3D e gerar ortoimagens de sensores remotos que utilizam sensores de linha CCD, especialmente SPOT, IRS-1 C/D e MOMS[...]. Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos usando o conhecimento de informações do sensor e modificando equações de colinearidade, em alguns casos incluindo parâmetros para modelagem de erros e orientação interior ou calibração em órbita, ou ainda incorporando informações orbitais, BALTSAVIAS *et al*, (2001, P. 79).

Utilizar modelos rigorosos requer o conhecimento dos dados das efemérides, dos dados de calibração do sensor, sua orientação externa e interna cuja propriedade pertence às empresas que comercializam as imagens de alta resolução, tais como *Space Imaging* e a *Digital Globe*.

A política de venda dessas empresas é distinta, a *Space Imaging* não fornece as informações necessárias para utilizar modelos rigorosos para nenhum dos produtos comercializados. No entanto, para a ortoretificação pelos usuários, em alguns produtos, são disponibilizados os coeficientes polinomiais racionais (RPC – *Rational Polynomial Coeffycient*) que através do Modelo Racional Funcional, implementados em vários programas comerciais, realiza a ortoretificação da imagem.

A *Digital Globe* fornece as informações de orientação do sensor, apenas para o produto *Basic*, para os demais produtos os coeficientes polinomiais racionais (RPC – *Rational Polynomial Coefficient*) são disponibilizados.

Vários estudos internacionais tem avaliado a qualidade posicional do modelo polinomial racional. A sua aplicação em imagens que não dispõe os coeficientes polinomiais, implica na coleta de muitos pontos de controle, variando de 40 a 100 pontos, BALTASAVIAS *et al*(2001) e TOUTIN (2001). Estudos recentes como HANLEY & FRASER (2004, p.1) relatam a introdução de uma variável no processo, que permite a ortoretificação com esse modelo utilizando um mínimo de um ou dois pontos de controle.

Os programas comerciais que disponibilizam as rotinas de ortoretificação de imagens de alta resolução, utilizam os modelos polinomiais racionais, em sua maioria, como é o caso do ENVI versão 4.0, além de modelos próprios desenvolvidos com base em características geométricas de imageamento do sensor, utilizando pontos de controle, sem a necessidade dos arquivos com os coeficientes polinomiais, tal é o caso do programa *PCI Geomatica*.

Outro modelo que vem sendo investigado é o modelo APM (*Affine Projection Model*), uma de suas vantagens sobre o modelo polinomial é a facilidade de implementação computacional. Estudos atuais relatam o desenvolvimento e aplicações deste modelo para a ortoretificação como em SHI & AHAKER (2003) e FRASER *et al* (2001) ou para a monorestituição como em MITISHITA & SARAIVA (2002).

O problema se consolida pois, os custos das imagens que possibilitam a ortoretificação pelo usuário, sejam com os polinômios racionais ou com as informações do satélite, é elevado. A proposta de mais modelos que permitam ao usuário a ortoretificação, com facilidade computacional e que sejam acessíveis, e ainda à avaliação dos modelos implementados nos programas comerciais, pode incentivar a maior utilização das imagens de alta resolução tanto nas ciências geodésicas como em áreas afins.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a qualidade posicional das ortoimagens oriundas dos sensores Quickbird e IKONOS, produtos *Standard* e *Stereo Par*, respectivamente, sobre um trecho de área urbana, fazendo uso do modelo APM numa análise comparativa com aquelas geradas com modelo Polinomial Racional.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Estabelecer a abrangência das áreas piloto nas imagens IKONOS e Quickbird, a fim de investigar as limitações do modelo;
- Avaliar o comportamento dos resíduos nas ortoimagens geradas com modelo APM e RPC, através de dados estatísticos;
- Comparar as ortoimagens geradas pelos dois modelos.

3. JUSTIFICATIVA

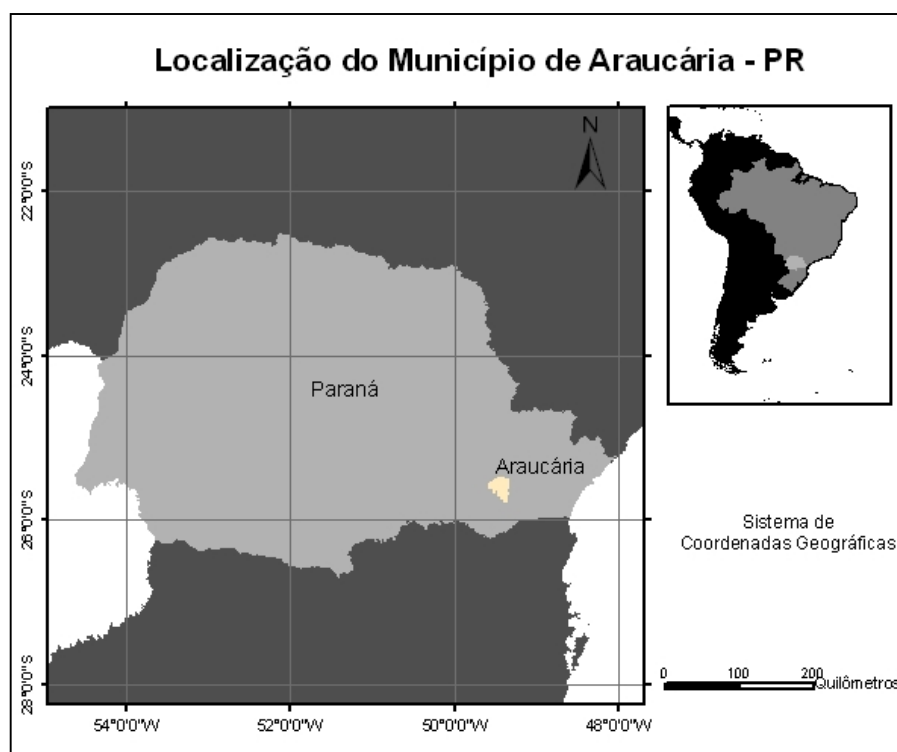
As imagens de satélite ainda possuem um custo elevado, principalmente os produtos ortoretificados. Os programas disponíveis no mercado que possuem rotinas destinadas a ortoretificação também inferem ao usuário um alto custo.

O estudo e a comparação do comportamento de modelos matemáticos, com facilidade de aplicação e implementação, como é o caso do modelo APM, com vistas a ortoretificação de imagens de alta resolução, e ainda o estabelecimento das limitações desse modelo, surgem como importante fonte instigadora para a formulação de alternativas aos usuários de imagens orbitais.

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na região metropolitana de Curitiba, Paraná, no município de Araucária, região de grande atividade industrial. A figura 1 apresenta o mapa de localização do município.

FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA



5. MATERIAIS

5.1- Imagens Orbitais de Alta Resolução

- Imagem IKONOS da região, adquirida pela UFPR através da empresa Engesat Imagens de Satélite, as especificações técnicas da imagem são descritas na tabela 1.

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA IMAGEM IKONOS

Nível de processamento	Correção geométrica padrão
Tipo de imagem	PAN/MSI em modo <i>pan-sharpaned</i>
Tipo de produto	Stereo par PSM – <i>Reference</i>
Método de interpolação	Convolução cúbica
Projeção	UTM
Datum	WGS 84
Fuso	22 Sul
Azimute Nominal	239,3661 °
Elevação Nominal	80,75264 °
Direção de varredura	<i>Reverse</i>
GSD- varredura transversal	0,84 metros
GSD – varredura longitudinal	0,84 metros
Data de aquisição	23 de Novembro de 2004 as 13:42 horas (tempo médio de <i>Greenwich</i>)
Porcentagem de nuvem	0%
Tamanho imagem	10024 x 10308 pixels, (linha, coluna)

Foi utilizada somente uma imagem do par estereoscópico.

- Imagem Quickbird, cedida pela empresa Intersat Imagens de Satélite, sendo as características da imagem descritas na tabela 2.

TABELA 2 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA IMAGEM QUICKBIRD

Nível de processamento	Correção geométrica padrão
Tipo de imagem	PAN/MSI
Tipo de produto	<i>Standard</i>
Método de interpolação	Convolução cúbica
Projeção	UTM
Datum	WGS 84
Fuso	22 Sul
Azimute Nominal	277,8 °
Elevação Nominal	77,30°
Direção de varredura	<i>Reverse</i>
GSD- varredura transversal	0,61 metros (pancromática); 2,43(multiespectral)
GSD – varredura longitudinal	0,61 metros (pancromática); 2,43(multiespectral)
Data de aquisição	31 de Janeiro de 2004 as 23:56 horas (tempo médio de <i>Greenwich</i>)
Porcentagem de nuvem	0%
Tamanho imagem	10586 x 12845 pixels, (linha, coluna)

5.2- Dados Complementares

A Base cartográfica digital, utilizada nesta pesquisa, foi cedida pela empresa Aeroimagem S.A., na escala 1: 2000.

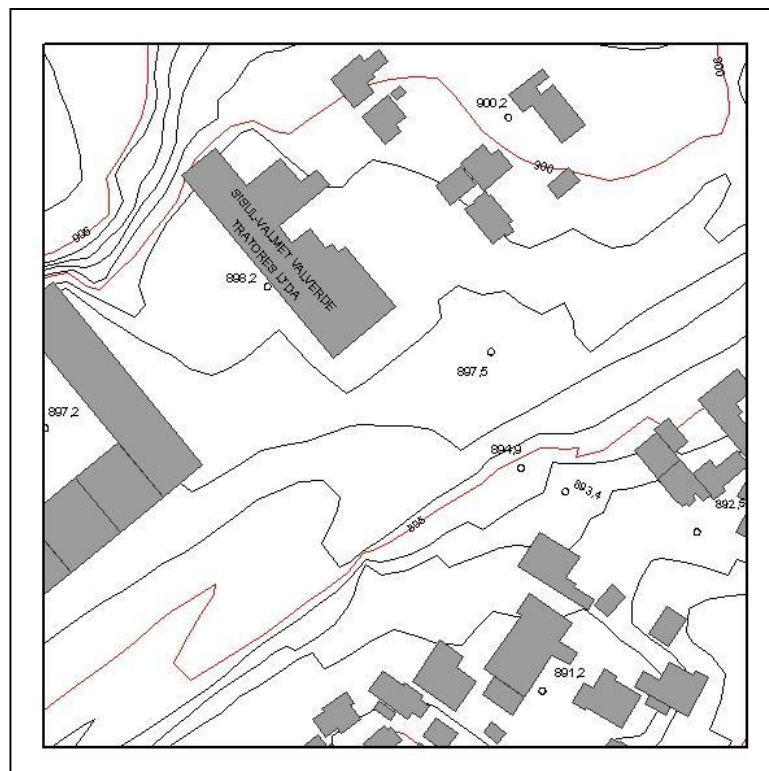
A base cartográfica foi elaborada em duas fases, com escala de vôo e datas diferentes, conforme a ocupação do solo. A tabela 3 apresenta os dados fotogramétricos para as duas regiões.

TABELA 3 – DADOS DA BASE CARTOGRÁFICA

	Dados da base rural	Dados base urbana
Data do vôo	Junho de 2000	Abril 1998
Escala do vôo	1:30.000	1:8.000
Escala do mapa	1:10.000	1:2000
Datum	SAD 69	SAD 69

Esta base cartográfica contém curvas de nível com equidistância de um metro, respectivas toponímias e pontos cotados (figura 2).

FIGURA 2 – BASE CARTOGRÁFICA DIGITAL DE PARTE DA ÁREA URBANA INVESTIGADA



5.3 Recursos Computacionais

-AMD Athlon 2600+, 512 Mbytes RAM, 120 Gbytes de HD;

-ArcGis 8.0 - versão para avaliação, utilizado pra elaboração do MDT, layout's, localização e coleta das coordenadas dos pontos controle e checagem;

-Envi 4.0 - utilizado para localização dos pontos de controle e checagem, processamento digital das imagens, ortoretificação utilizando o modelo polinomial racional;

-Ortoretifica.exe – adaptação do programa desenvolvido por Álvaro M. Machado em plataforma de programação Delphi 4.0, utilizado para a ortoretificação das imagens com o modelo APM.

6. REVISÃO DA LITERATURA : ESTADO DA ARTE

6.1 Sistemas Sensores

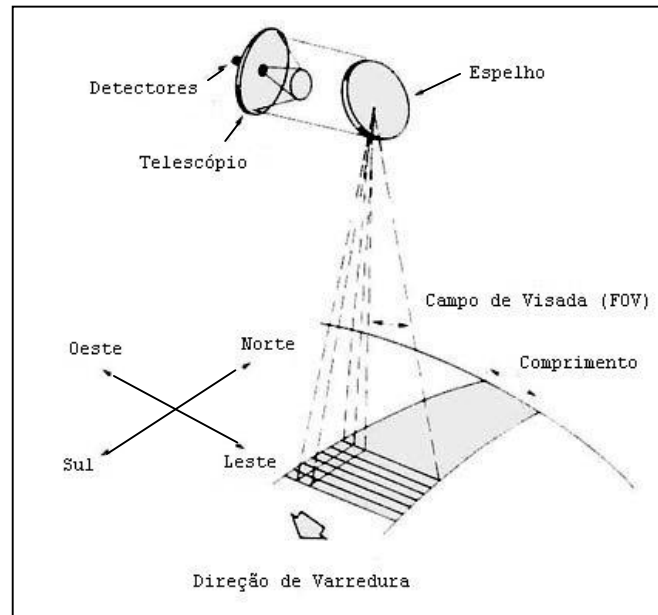
Os sensores de imageamento ou varredura são dispositivos construídos que registram a variação espacial do brilho de uma área num conjunto de dados em duas dimensões, GUPTA, (1991, p.61). Os sensores são compostos de sistemas ópticos, que filtram a energia emitida pelos objetos, por detectores, que detectam e produzem um sinal elétrico, que é quantizado em níveis, segundo a intensidade do sinal, onde esses níveis são chamados de DN's (*digital numbers*).

Os dados são então armazenados e enviados à estações de recepção em terra, usando comunicação via microondas. Em terra, os dados são reordenados em um conjunto de duas dimensões, e os DN's são descritos em tons de cinza, RICHARDS & JIA (1999, p.1).

Segundo CHEN (1985, p. 20), os sistemas imageadores diferem ainda quanto à forma do arranjo de sensores que registram a energia, podem ser imageadores de quadro e de varredura. O primeiro é caracterizado pela tomada da cena como um todo, isto é, um único arranjo bidimensional de sensores é sensibilizado de uma só vez, formando a imagem. O segundo é composto por um arranjo linear de sensores, dispostos em linha, realizando uma varredura para formar a imagem. Técnicas eletrônica e mecânica caracterizam este sistema de varredura e são classificados em *pushbroom* e *whiskbroom*, respectivamente.

No sistema imageador de varredura mecânica *whiskbroom* o campo de visão é mudado através da rotação mecânica do sistema sensor, por cada movimento angular do espelho na direção perpendicular a linha de vôo. Ou ainda, o espelho oscilante desvia o feixe incidente, registrando uma linha transversalmente a cada ciclo de movimento do espelho CHEN (1985, p.21), a figura 3 apresenta o esquema do sistema em questão.

FIGURA 3 – ILUSTRAÇÃO DO SENSOR DE LINHA DO TIPO WHISKBROOM

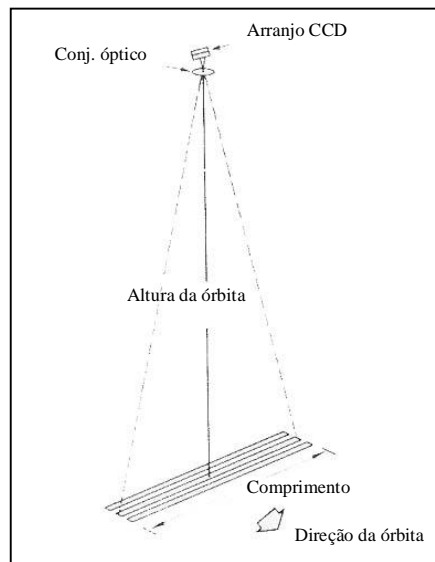


FONTE: ADAPTADO DE CHEN (1985, P.22).

Os sistemas de sensores *pushbroom* consistem num sistema óptico que possui um grande campo de visão e milhares de detectores para cada banda espectral, CHEN (1985, p.21).

A técnica dos varredores *pushbroom*, ilustrada na figura 4, segundo GUPTA (1991, p.63), consiste num conjunto CCD, ou arranjo de sensores, dispostos em linha, que é colocado no plano focal de um sistema de lentes. A radiação emitida pelo objeto é focada pelo sistema de lentes e dirigida ao arranjo CCD. Esta radiação é captada por um curto período e então registrada pelos detectores individualmente. Com o movimento da plataforma linha por linha é coletada.

FIGURA 4 – ILUSTRAÇÃO DO SENSOR DE LINHA TIPO PUSHBROOM



FONTE: ADAPTADO DE CHEN (1985, P.21),

Cada detector registra a radiação referente a cada elemento de resolução no terreno. A "abertura" de cada elemento detector é chamado de IFOV (*Instantaneous Field of View*). O IFOV em conjunto com a altura e velocidade da plataforma e ainda o período de registro da radiação determinam a resolução de cada elemento no terreno.

JENSEN (1996, p.3), define a resolução, como a medida da habilidade do sistema óptico de distinguir entre sinais espacialmente próximos e espectralmente similares. Desta definição pode-se derivar ainda, resolução espectral, resolução espacial, resolução temporal e resolução radiométrica.

A resolução espectral refere-se à quantidade de intervalos de comprimento de onda do espectro que o sensor é capaz de distinguir, ou seja, o número de bandas que um sensor possui. Como exemplo a resolução espectral do sensor Quickbird é de 4 bandas, multiespectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo) mais a banda pancromática, maiores detalhes no ANEXO 2.

O intervalo entre os comprimentos de onda, ou seja, o limite das bandas, pode ser grande, como é o caso da banda pancromática ou pequeno como das bandas multiespectrais.

A resolução espacial pode ser entendida como a dimensão em metros da projeção do IFOV no terreno. Então a resolução espacial depende da altura da plataforma e do campo de visão (FOV), que é a porção coletada pelo detector, e é comumente definida como a área unitária no terreno referente a um pixel, LILLESAND & KIEFER (1994, p.25).

De acordo com GUPTA (1991, p.74) a resolução temporal refere-se à frequência de imageamento de uma determinada área. Ou ainda, pode ser definida como o intervalo mínimo de tempo entre a aquisição de duas imagens consecutivas de uma mesma área.

A resolução radiométrica é relacionada à sensibilidade do sensor, ou detector, para diferenciar os níveis de intensidade do sinal registrado do fluxo de radiação refletido ou emitido pelo terreno. Em imagens digitais é a quantidade de bits utilizados para armazenar os dados referentes a um pixel. Exemplificando, para armazenar duas cores é preciso um bit, com dois bits a gama de cores aumenta, ao passo que para armazenar 256 níveis, geralmente utilizado nas imagens de sensoriamento remoto, são precisos oito bits, CHUVIECO (1990, p.94). Existem ainda, sensores com maior capacidade, quanto à resolução radiométrica, que armazenam os dados em 11 bits, como o sistema IKONOS II, permitindo distinguir entre 2048 níveis diferentes, maiores detalhes no ANEXO 1.

6.2. Distorções Geométricas

As distorções geométricas ocorridas nos dados de Sensoriamento Remoto podem ser agrupadas, segundo GUPTA (1991 p. 81), em:

- sistemáticas, que são oriundas da fabricação do sensor e da movimentação durante a aquisição dos dados. Muitas das distorções sistemáticas são removidas durante o pré-processamento. Como exemplo dos erros devido às distorções sistemáticas, tem-se a distorção panorâmica, variação da velocidade da plataforma e rotação da Terra;

- não sistemáticas, são resultado de variações ou perturbações na plataforma. Como exemplo têm-se as variações na altitude e na atitude do satélite.

Segundo BERNSTEIN¹ *apud in* JENSEN (1996, p.124), algumas distorções geométricas podem ser corrigidas analisando as características do sensor e as efemérides, é o caso das distorções geradas devido à velocidade não linear do espelho de varredura, distorções panorâmicas, distorções devido à perspectiva de imageamento como a curvatura terrestre. Os erros devido às distorções não sistemáticas, variação da altitude e atitude do satélite, podem ser corrigidas com o uso de pontos de controle.

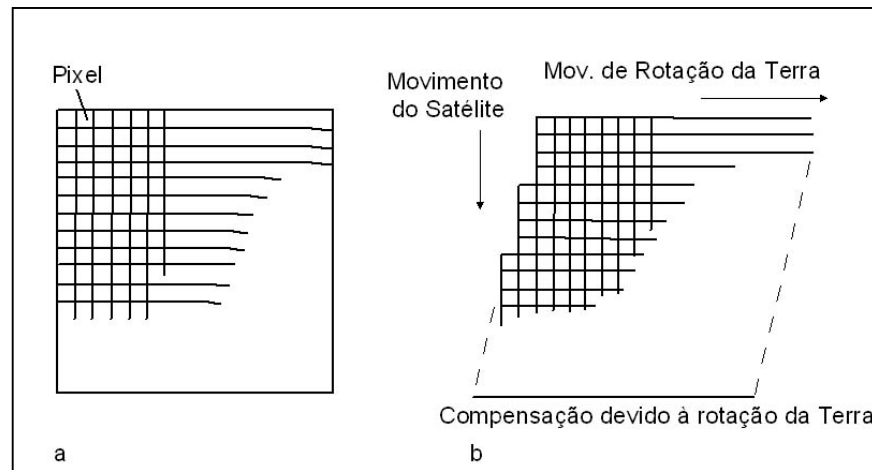
Os itens a seguir descrevem os erros devido às distorções sistemáticas e não sistemáticas.

6.2.1. Erro devido à rotação da Terra

De acordo com RICHARDS & JIA (1999, p. 49), um ponto imageado está deslocado para oeste devido ao movimento de rotação da Terra (de oeste para leste) no momento da aquisição da janela de imageamento. Caso as linhas imageadas estejam arranjadas em forma de grade pode-se perceber que estas terão deslocamentos para leste, em relação ao terreno que elas representam. Para uma correção da posição relativa do pixel no terreno, é necessário realizar uma compensação. Este deslocamento para oeste depende da velocidade relativa do satélite, da velocidade de rotação da Terra e do comprimento da janela de imageamento. A figura 5, ilustra este erro.

¹ BERNSTEIN, R., *Image Geometry and Rectification.*, Manual of Remote Sensing. Bethesda, Md. American Society of Photogrammetry, 1993. p.875-881

FIGURA 5 – ILUSTRAÇÃO DO EFEITO DA ROTAÇÃO DA TERRA NO TEMPO DE AQUISIÇÃO DA IMAGEM.a)IMAGEM ORGANIZADA EM UMA GRADE.b)RECUCO DE LINHAS SUCESSIVAS PARA OESTE, DEVIDO AO MOVIMENTO DE ROTAÇÃO DA TERRA DURANTE O TEMPO DE AQUISIÇÃO DA IMAGEM



FONTE: ADAPTADO DE RICHARDS & JIA (1999, P. 49),

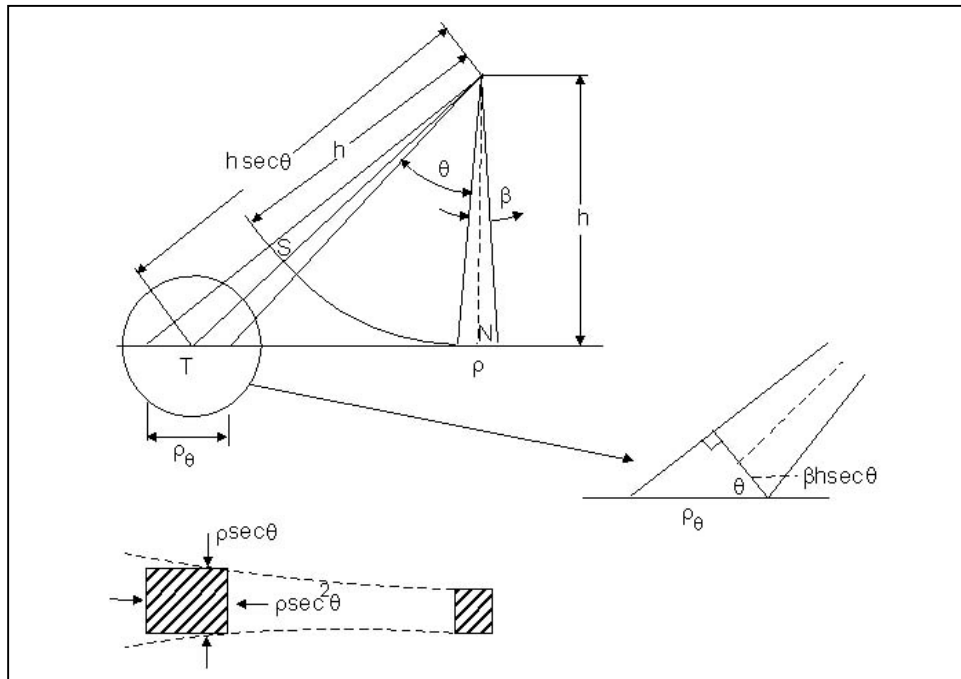
6.2.2. Erro devido à distorção panorâmica

Segundo RICHARDS & JIA (1999, p. 51), os sensores de varredura possuem o IFOV constante. Isso gera uma alteração do tamanho do pixel no terreno, ou seja, os pixels da extremidade apresentam-se maiores do que no nadir.

Observando a figura 6, se o IFOV é β e a dimensão do pixel no nadir é p , então a dimensão na direção de varredura do ângulo é dada por:

$$p_0 = \beta h \sec^2 \theta = p \sec^2 \theta \quad (1)$$

FIGURA 6 – ILUSTRAÇÃO DA DISTORÇÃO PANORÂMICA



FONTE: ADAPTADO DE RICHARDS & JIA (1999, P. 51).

A dimensão do pixel na linha transversal de varredura é dado por $\rho \sec^2 \theta$, onde θ é o ângulo de observação medido a partir da posição nadiral. Para pequenos valores de θ esses efeitos são negligenciáveis.

Comparando os satélites com relação ao ângulo θ , o Landsat 4 e 5 apresenta θ de aproximadamente $7,5^\circ$ resultando em $\rho_0=1,02\rho$. Por sua vez, o satélite NOAA apresenta um FOV igual a 80° , a distorção do tamanho do pixel na direção transversal de varredura é $\rho=1,70\rho$, ou seja, a região do terreno medida na extremidade da linha é 70% maior do que a medida no nadir. Com essa comparação pode-se concluir que esses erros afetam severamente os sensores que possuem um campo de visão maior.

No momento em que os dados são organizados para formar a imagem, todos os pixels são representados com o mesmo tamanho, havendo então uma compressão nos dados, uma vez que a área representada por esses pixels não possuem o mesmo tamanho no terreno. Essa distorção na direção transversal da trajetória é dado pela razão SN/TN que é igual a $\theta/\tan\theta$, RICHARDS & JIA (1999, p51).

6. 2.3 Erros devido à curvatura da terra

Os efeitos devido à curvatura terrestre são negligenciáveis para fotografias aéreas, devido à baixa altitude da aeronave, que assim cobre uma pequena porção do terreno RICHARDS & JIA (1999, p.53).

Desta forma satélites como o Landsat, Spot e IKONOS e Quickbird também possuem os erros oriundos deste efeito negligenciáveis, pois a dimensão linear da faixa de varredura é bastante estreita.

6.2.4 Distorções devido a variações da altitude da plataforma

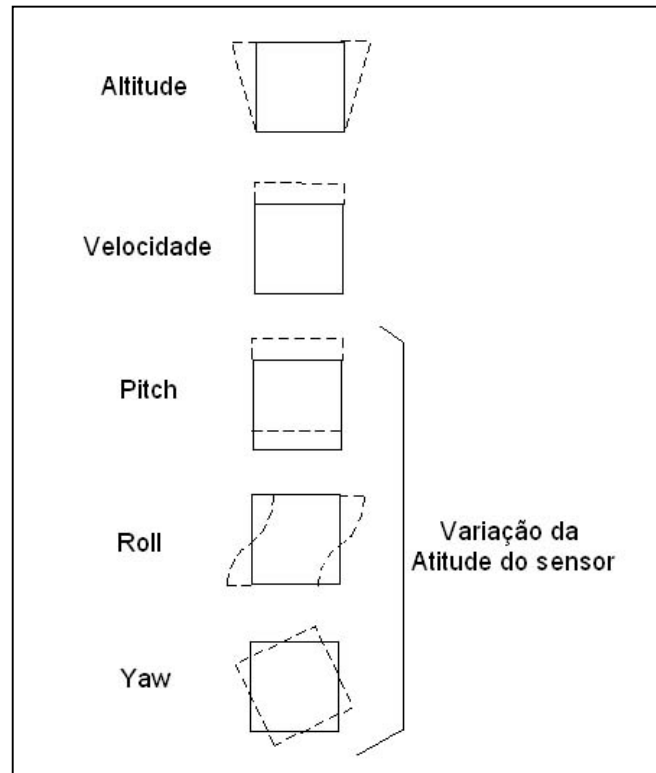
Segundo RICHARDS & JIA (1999, p.54) as variações na elevação ou altitude da plataforma acarretam uma mudança de escala, e com isso uma mudança no tamanho do pixel, que depende do IFOV e da altura da plataforma.

Similarmente a mudança de velocidade da plataforma acarretará uma mudança de escala na direção da trajetória. Isto é, a deformação do pixel ocorre na direção longitudinal de varredura.

A variação da atitude da plataforma representada pelos ângulos *yaw*, *pith* e *roll* infere rotação e deslocamentos longitudinal e transversal da varredura. Em geral, costuma-se nas estações em terra observar as efemérides dos satélites e analisar se há alguma variação, caso haja, correções são aplicadas antes do imageamento da área.

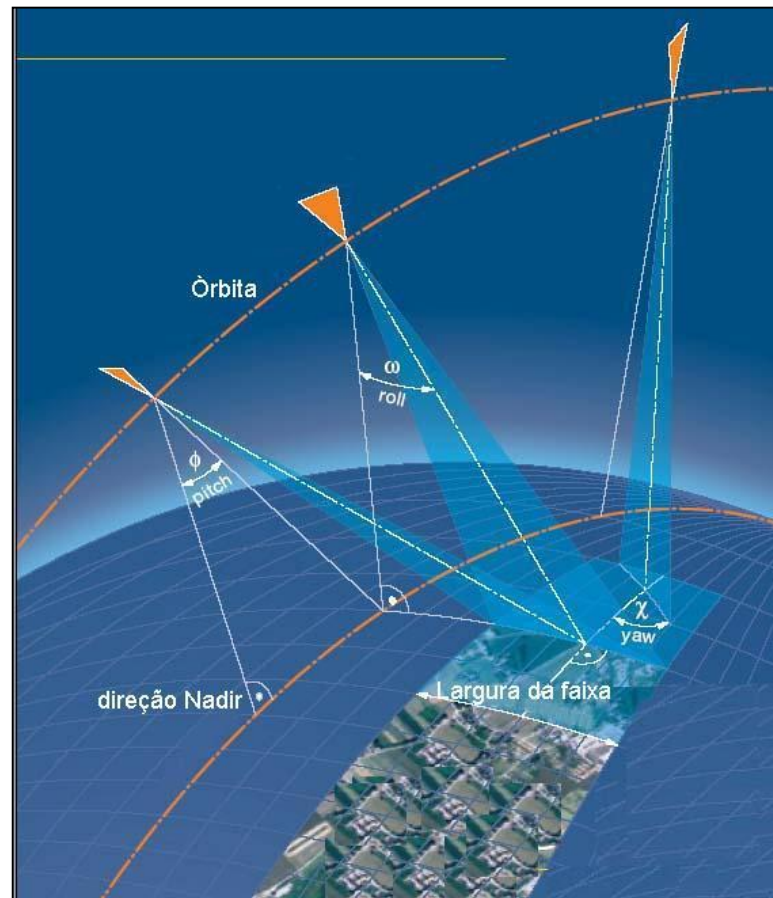
A figura 7 ilustra de forma conjunta às distorções devido às variações da altitude e atitude da plataforma, bem como a variação da velocidade. A figura 8 ilustra a posição dos ângulos *yaw*, *pith* e *roll* na trajetória de imageamento.

FIGURA 7 – ILUSTRAÇÃO DAS DISTORÇÕES DEVIDO ÀS VARIAÇÕES DA ALTITUDE, ATITUDE E VELOCIDADE DA PLATAFORMA



FONTE: ADAPTADO DE RICHARDS & JIA (1999, P 51).

FIGURA 8 – ILUSTRAÇÃO DOS ÂNGULOS E YAW, *PITCH* E *ROLL* NA TRAJETÓRIA DO
 IMAGEAMENTO



FONTE: ADAPTADO DE WWW.JOANNEUM.AT/DIB

Os erros descritos nos itens anteriores podem ocorrer em imagens de alta resolução, com exceção do erro devido a curvatura terrestre. Entretanto, os erros de maior impacto estão associados ao modo de varredura do sensor, em sensores capazes de oscilar o ângulo de visada, pois a velocidade de varredura pode ser alterada gerando resíduos de ordem sistemática. São os casos dos sensores de alta resolução, quando oscilam os espelhos para a coleta de imagens fora do Nadir, que são chamados de modos de imageamento *Reverse* e *Forward*, HANLEY & FRASER (2004, p. 1).

Segundo YAMAKAWA & FRASER (2004, p.3) variações dinâmicas no ângulo *pitch*, que representa a variação da atitude do sensor, devem ser observadas, pois geram uma reamostragem não uniforme na imagem. Acelerações freqüentes ou perturbações no sensor também interferem na correta coleta da imagem.

As imagens Quickbird são mais suscetíveis a esses tipos de erros devido a contínua reorientação do sensor durante a captura.

6.3 Correção Geométrica

De acordo com RICHARDS & JIA (1999, p. 56) existem duas técnicas de correção que podem ser usadas para vários tipos de distorção geométrica presentes em dados de imagens digitais. Um deles é o modelo natural da magnitude de algumas distorções e o uso desses modelos para estabelecer fórmulas de correção. Essa técnica é eficaz quando se conhece os tipos de distorção, como é o caso das causadas pela rotação da Terra. A segunda, depende de um estabelecimento matemático que relaciona o endereço dos pontos na imagem com os respectivos pontos no terreno, por meio de um mapa.

Essas funções matemáticas, geralmente estão sob a forma:

$$\begin{aligned} u &= f(x, y) \\ v &= g(x, y) \end{aligned} \tag{2}$$

Onde (x,y) são as coordenadas dos pontos no mapa e (u,v) o local desses pontos na imagem.

Geralmente essas funções não são conhecidas e utilizam-se polinômios para o relacionamento. Esse procedimento é chamado de correção geométrica.

De acordo com CHUVIECO (1990, p.254) para calcular qualquer função entre uma ou mais variáveis, é necessário contar previamente com uma série de observações comuns a todas elas. Estas observações são chamados de pontos de controle e o estabelecimento entre a imagem e o terreno é feito através de um ajustamento por mínimos quadrados.

Para que o ajuste entre a imagem e o mapa, ou terreno, seja correto, deve-se atender a três aspectos durante a seleção dos pontos, ao número, localização e distribuição, CHUVIECO (1990, p.255).

O número dos pontos de controle está relacionado ao número de parâmetros, ou incógnitas, da função utilizada para estabelecer a relação da imagem com terreno RICHARDS & JIA (1999, p.58). Em geral utiliza-se à superabundância de pontos de controle, a fim de otimizar a estimação dos parâmetros.

A influência do número de pontos de controle na estimação dos parâmetros e conseqüentemente no desempenho do modelo, bem como, a relação entre o modelo ou função matemática utilizada e os pontos de controle podem ser analisados em VOLPE (2003).

A escolha das feições é recomendada de forma geral, para pontos identificáveis tanto na imagem como no mapa, respeitando a relação de escala. As feições mais indicadas são cruzamento de vias, pontes, edificações entre outros, RICHARDS & JIA (1999, p.58).

Com respeito à distribuição dos pontos de controle, a premissa é única, a de que devem estar distribuídos em toda a extensão da área. Estudos como de BIAS (2002, p.2) procuram determinar e estabelecer uma distribuição ideal, destinada principalmente às imagens de alta resolução. No entanto, nenhuma regra foi estabelecida e avaliada com sucesso.

Com a introdução das imagens de sensoriamento remoto de alta resolução fez-se necessário à revisão das técnicas de correção geométrica. Bem como a utilização de modelos matemáticos diferentes dos habituais polinômios 2D, passando a utilização de modelos matemáticos generalizados ou rigorosos 3D e ainda, modelos derivados da fotogrametria digital BOCCARDO (2004, p. 1)

6.3.1 Pontos de Controle

Os pontos de controle segundo GUPTA (1991, p. 191) são feições identificáveis no terreno e na imagem que possuam coordenadas conhecidas em ambos referenciais. Esses pontos são também denominados de pontos de controle no terreno ou do inglês, *ground control points* – GCP. E podem ser obtidos por levantamentos geodésicos utilizando NAVSTAR GPS, coordenadas de pontos coletados em cartas topográficas, medições fotogramétricas e atualmente de dados *LIDAR (Light Detection And Ranging)*.

RICHARDS & JIA (1999, p. 698) comenta que os pontos de controle devem apresentar uma distribuição uniforme na imagem, com pontos dispostos no centro e bordas da imagem.

Os melhores pontos de controle possuem um bom contraste, e encontram-se nas interseções de retas, linhas suficientemente longas ou centros de gravidade de feições circulares, tal é o caso das interseções de vias. A precisão de uma ortoimagem pode ser estimada pela precisão dos pontos de controle, afirma BALTASAVIAS *et al* (2001, p.15).

A qualidade geométrica dos pontos de controle, expressa a discrepância entre as coordenadas reais do ponto e as obtidas após o ajustamento e podem ser calculadas de forma isolada para cada ponto, pela expressão abaixo.

$$\begin{aligned} d_x &= x' - x \\ d_y &= y' - y \end{aligned} ; \quad (3)$$

Sendo x',y' , os valores verdadeiros e x,y os valores previstos ou obtidos após o ajustamento. O valor do erro contido em cada ponto pode ser expresso através do erro quadrático dado por:

$$e = \sqrt{dx^2 + dy^2} ; \quad (4)$$

A qualidade com que o modelo utilizado consegue prever as coordenadas, leva em conta o erro cometido em cada ponto de controle, sendo denominado RMS (*Root Square Error*), dado pela expressão 5:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{N}} ; \quad (5)$$

Sendo N o número de pontos de controle.

A utilização de pontos de checagem, ou *check points*, os quais não participam do ajustamento do modelo, avaliam como este se adapta em regiões afastadas aos pontos de controle, BALTASAVIAS *et al*(2001, p.15).

6.4 Processamento de Imagens Digitais

6.4.1. Fusão

Em imagens digitais as informações estão associadas ao conteúdo de cada pixel, ou seja, as resoluções espacial, espectral e radiométrica. A possibilidade da melhora das informações das imagens digitais tornou-se bastante variada e foco de vários estudos, como em CHAVES & ANDERSON(1991, p.295) onde a fusão de dados de dois sensores diferentes foi estudada.

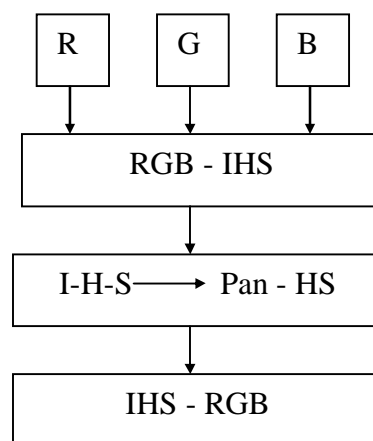
Com respeito à combinação de dados CHAVES & BOWEL (1988, p. 1699) afirma que a resolução espacial aparente de dados multiespectrais, e sua interpretabilidade pode ser melhorada combinando-os com dados de melhor resolução espacial, porém com baixa resolução espectral. A proposta descrita é vastamente realizada e atualmente existem vários métodos para tal procedimento, como a transformação de sistemas IHS e RGB, componentes principais, adição de bandas entre outros.

A transformação IHS se baseia no princípio de que a imagem intensidade se assemelha à imagem pancromática e através de procedimentos matemáticos uma substituição é estabelecida, conforme estudos realizados por CHAVES & ANDERSON (1991, p.295).

O sistema IHS, agrupamento das iniciais *Intensity*, *Hue*, e *Saturation* que significam intensidade, tonalidade ou matiz e saturação, respectivamente, é usado para a representação das cores e está intimamente ligado a percepção humana em descrever e associar as cores, HARRIS & MURRAY(1990, p.1632).

Segundo CHUVIECO (1990, p. 288), o tom ou matiz é proveniente da amplitude do comprimento de onda, onde se produz a máxima refletividade do objeto, ou seja, equivale à cor com que os olhos humanos vêem. A saturação refere-se ao grau de pureza, ou o grau de mistura com cores mais vivas, finalmente a intensidade, corresponde ao brilho, em função da porcentagem de energia incidente. A figura 9 mostra o princípio da transformação IHS.

FIGURA 9 – PRINCÍPIO DA TRANSFORMAÇÃO IHS



Vários programas comerciais de processamento de imagens de sensoriamento remoto, possuem esse método implementado, sendo necessário especificar somente as bandas RGB da imagem e a pancromática.

6.5 Ortoretificação

O termo retificação advém dos conhecimentos da fotogrametria, da metodologia de retificação de imagens que segundo ANDRADE (1998), é o processo de eliminação dos efeitos de inclinação da plataforma, representados pelos ângulos κ (Kappa), ω (Omega) e ϕ (fi), transformando as imagens em verticais.

Ortoretificar significa eliminar da foto as distorções introduzidas pela variação da atitude do sensor durante a tomada da imagem além de corrigir as distorções referentes à elevação do relevo LUGNANI (1987, p.85).

Segundo WOLF (1983, p. 330) uma ortofoto é uma fotografia onde a imagem dos objetos é visualizada em posições ortográficas, ou em projeção ortogonal, sendo geometricamente equivalente a um mapa, que representa os objetos por linhas e símbolos.

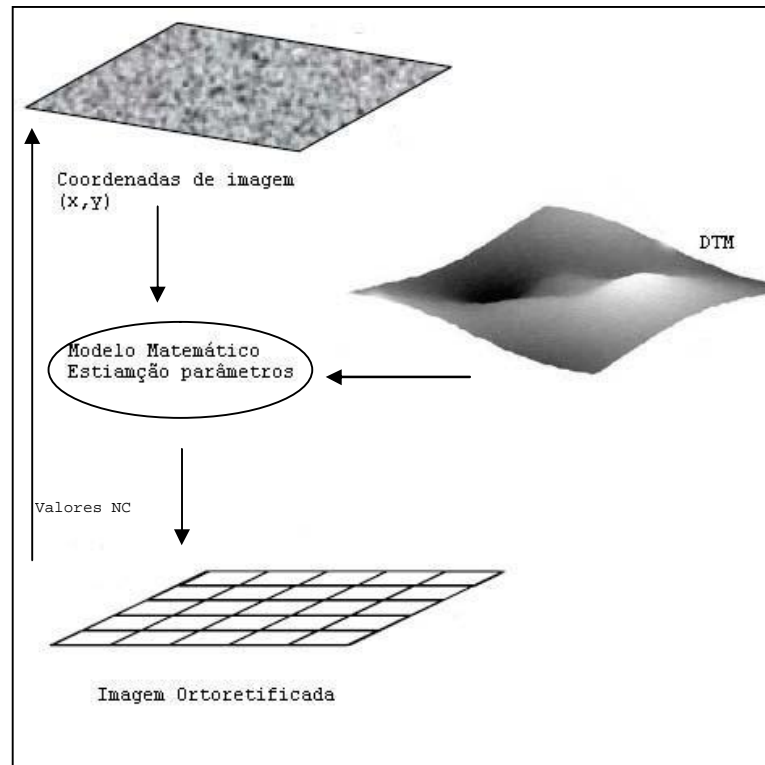
De forma análoga, as imagens de satélite também podem sofrer com as deformações com relação à inclinação do sensor e a variação da altitude, o procedimento para a eliminação dessas deformações, a fim de tornar a imagem isenta é chamado de ortoretificação, sendo que a imagem ortoretificada passa a ser denominada ortoimagem.

Segundo HATORI *et al* (2000, p.2), a ortoimagem é obtida a partir da ortoretificação, que consiste na correção da imagem devido às diversas distorções, especialmente as causadas pela posição do satélite, pela superfície física da Terra (relevo e curvatura) e pela projeção cartográfica.

Para a realização da ortoretificação das imagens é necessário um MNE (modelo numérico de elevação) ou MDT (modelo digital do terreno), sem o qual não seria possível a correção devido ao relevo VOLOTÃO (2001, p.4).

A figura 10, ilustra o princípio da geração de ortoimagens.

FIGURA 10 – PRINCÍPIO DA GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS



O termo “ortoimagem verdadeira” indica uma correção total das feições representadas na ortoimagem, ou seja, qualquer ponto da imagem deve estar corrigido. No entanto, sempre haverá detalhes de objetos que não estão mapeados corretamente, como árvores, carros e objetos pequenos. A duplicação da informação na imagem é denominada de oclusão AMHAR *et al* (1998, p.16).

Nesta pesquisa não será tratada a oclusão, conseqüentemente as ortoimagens geradas possuem informações duplicadas em áreas onde o relevo possui uma diferença de altitude mais acentuada.

BOCCARDO (2004, p.1), afirma que com o surgimento das imagens com resoluções espaciais superiores ao Landsat, como o Spot e IKONOS, pesquisas foram desenvolvidas utilizando modelos e técnicas já conhecidas e empregadas pela fotogrametria digital. Como nos estudos desenvolvidos por CHEN & LEE (1993, p. 655) para a geração rigorosa de ortofotos a partir de imagens Spot, onde

se utilizou como modelo matemático a equação da colinearidade modificada, estabelecendo uma metodologia que considerou o cálculo rigoroso da posição do pixel, conhecendo o tamanho do CCD e o tempo de amostragem para sua captura, por meio de ajustamento por blocos, *Bundle adjustment*, com o método indireto.

Com o lançamento de satélites com sensores de alta resolução, a pesquisa com respeito à consistência métrica e a ortoretificação tornaram-se cada vez mais latente, tanto a nível nacional ou internacional, haja vista o vasto campo de aplicações em que as ortoimagens podem ser empregadas. Contudo as principais aplicações das ortoimagens de alta resolução, de acordo com VOLPE (2003, p. 1) são:

- Atualização de mapas em regiões urbanas, escala de aplicação maior que 1:5.000 e atualização de mapas topográficos, escala de aplicação maior que 1:10.000;
- Planejamento, projeto e monitoramento de serviços ferroviários, tubulações de óleo e gás e obras de engenharia em geral;
- Monitoramento de parques urbanos, estudos de biodiversidade;
- Avaliação e manejo de florestas naturais e povoamentos florestais homogêneos;
- Arqueologia.

6.6 Modelos Matemáticos

A ortoretificação geométrica de imagens de satélite de alta resolução pode ser feita de dois modos diferentes: utilizando a modelagem rigorosa ou a modelagem não-paramétrica. Modelos rigorosos são baseados nas equações de colinearidade que são adaptadas para técnicas de aquisição do tipo *pushbroom*, usada por todos os satélites de alta resolução BOCCARDO (2004, p.1).

De acordo com YAMAKAWA & FRASER (2004, p.1), a determinação do modelo de orientação do sensor como suporte para as explorações fotogramétricas de imagens de satélite tem sido tópico de pesquisas durante duas décadas. A maioria das aproximações rigorosas, usam modelos baseados na equação de colinearidade e foram propostos e aplicados com sucesso em sistemas de imageamento de média resolução como SPOT, MOMS e IRS. Esses modelos descrevem a geometria rigorosa de varredura, utilizando dados conhecidos como a trajetória do satélite e dados de calibração do sensor. O modelo de câmera e os dados das efemérides do satélite também são essências a aplicação.

Devido à política de vendas das empresas que comercializam as imagens de alta resolução, que não fornecem os dados do modelo das câmeras e dados das efemérides do sensor para utilização dos modelos rigorosos, vários modelos alternativos tem sido vastamente pesquisados, tais modelos são definidos modelos generalizados ou não paramétricos YAMAKAWA & FRASER (2004, p.1).

Os modelos rigorosos também são designados em muitas pesquisas como modelo físico do sensor.

Os modelos de sensores físicos são mais rigorosos e requerem o conhecimento a respeito do sistema de imageamento e da geometria interna e externa. Os modelos generalizados, por outro lado, independem do tipo de plataforma e sensor e são vastamente utilizados em Sensoriamento Remoto, TAO *et al* (2000, p. 874).

6.6.1 Modelo Polinomial Racional

O modelo generalizado mais comumente utilizado é baseado nos polinômios racionais 3D, os quais na literatura são conhecidos como Modelo Funcional Racional (RFM – *Rational Function Model*), Coeficiente Polinomial Racional (RPC – *Rational Polynomial Coefficient*) e Coeficiente Funcional Racional (RFC – *Rational Function Coefficient*), segundo TAO (2000, p.1).

O modelo funcional racional (RFM) foi adotado pela *Space Imaging* e *Digital Globe* em seus produtos. Esse modelo de sensor é definido por 78 coeficientes polinomiais racionais (RCP's), é um modelo de sensor alternativo disponível a todos os usuários e permite o processamento fotogramétrico, substituindo os modelos rigorosos. Os RPC's são fornecidos pelos comerciantes das imagens, ao invés do modelo físico de sensor, para processamentos como ortoreificação e a reconstrução de estéreo pares, conforme XU (2004, p. 17).

O RFM relaciona as coordenadas objeto dos pontos (X,Y,Z) para as coordenadas de pixel da imagem (r,c) ou vice-versa. Para a transformação terreno-imagem, a razão dos polinômios deve ser definida na forma direta, é o que estabelece o OGC 1999a, *Open Geospatial Consortium*, XU (2004, p. 17).

As equações abaixo apresentam a formulação matemática do RFM.

$$r_n = \frac{p1(X_n, Y_n, Z_n)}{p2(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} b_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} ; \quad (6)$$

$$c_n = \frac{p3(X_n, Y_n, Z_n)}{p4(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} c_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} d_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} . \quad (7)$$

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 NIMA 2000 (*National Imagery and Mapping Agency*) a normalização, translação e escala é feita para minimizar a introdução de erros durante o processamento.

Os coeficientes racionais funcionais são geralmente polinômios de terceira ordem. Os arranjos dos termos do polinômio, ou número de termos, são diversificados. No entanto, a definição do NIMA é que tanto numerador como denominador possuam 20 termos cúbicos, sendo adotado pela *Space Imaging* e *Digital Globe*, como o número de termos ideal tornando-se uma espécie de padrão, segundo XU (2004, p. 19).

As razões dos termos de 1º ordem representam distorções causadas pela projeção óptica, enquanto as correções sobre a curvatura da Terra, refração atmosférica e distorções das lentes, podem ser modelados pelos termos de segunda ordem. Outras distorções mais complexas e desconhecidas com componentes de ordem maior podem ser absorvidos por termos de terceiro grau. Os coeficientes polinomiais também são chamados RPC (*Rational Polynomial Coefficients*) ou dados polinomiais racionais de câmera.

O termo modelo RPC, freqüentemente refere-se ao caso específico do RFM, na forma direta com polinômios de terceira ordem, e são usualmente resolvidos com a técnica do terreno-independente, afirma HU *et al* (2004), onde é relatada a técnica para solução do RFM.

6.6.2 Affine Projection Model – APM

De acordo com LUGNANI (1987, p. 108) o modelo matemático APM também conhecida como Equação de Projeção Paralela projeta o espaço 3D no plano 2D, é um caso particular da projeção central onde o centro de projeção foi deslocado para o infinito, podendo ser representada na forma matricial por:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_5 & a_6 & a_7 \\ a_9 & a_{10} & a_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_4 \\ a_8 \\ a_{12} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Onde:

x, y, z – são as coordenadas dos pontos no espaço imagem;

X, Y, Z - são as coordenadas dos pontos no espaço objeto;

$a_1 \dots a_{11}$ – são os elementos da matriz dos parâmetros de transformação;

Para a transformação Afim no espaço, a matriz dos parâmetros (a), não pode ser singular, pois as transformações Afim formam estrutura de grupo. No entanto para o caso de (a) ser singular (posto 2), a relação a seguir é verdadeira:

$$a_9X + a_{10}Y + a_{11}Z + a_{12} = 0 \quad (9)$$

Isto é, as três equações formadas da expressão 8 são linearmente independentes. Sendo que a equação 9 é a equação de um plano passando pela origem do sistema e admitindo que o plano passando pela origem seja o plano xy (plano= $z=0$) tem-se:

$$\begin{aligned} x &= a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4 \\ y &= a_5X + a_6Y + a_7Z + a_8 \quad ; \\ z &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Sendo $a_1 : a_2 : a_3 : a_4 \neq a_5 : a_6 : a_7 : a_8$, pois tem posto (2).

O modelo APM pode ser utilizado para imagens de alta resolução, pois segundo FRASER *et al* (2001), o sensor de linha CCD, deste satélite possui uma grande distância focal e um estreito campo de visada. Isso faz com que a imagem apresente projeção central no sentido de varredura do satélite (sentido y) e aproximação de uma projeção paralela no sentido do deslocamento do satélite (sentido em x). Com isso para efeito de cálculo pode-se considerar a projeção da imagem como uma projeção paralela, fazendo com que os parâmetros de orientação do satélite tornem-se constantes para uma pequena área imageada, assumindo também que é linear o movimento do satélite.

6.7 Precisão, Acurácia

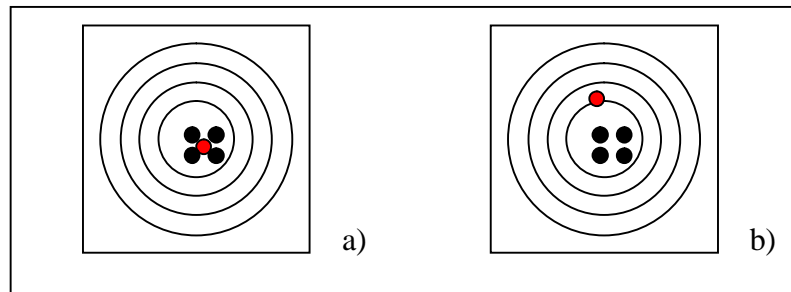
De acordo com GEMAEL (1994, p. 59) todas as observações acompanham erros de medida, que podem ser atribuídos a fatores como a falibilidade humana, imperfeição do equipamento e a influência das condições ambientais.

Os erros podem ser classificados em erros grosseiros, sistemáticos e acidentais. O primeiro é geralmente atribuído a desatenção do observador e é facilmente detectado. O segundo é produzido por causas conhecidas e podem ser evitados por técnicas especiais de observação ou eliminados a posteriori através de fórmulas conhecidas pela teoria. O terceiro é produzido por causas desconhecidas e pode se dar ora num sentido ora em outro, GEMAEL (1994, p.60).

Segundo GEMAEL (1994, p. 63) o termo precisão está vinculado apenas a efeitos aleatórios (à dispersão das observações) enquanto acurácia vincula-se a ambos, efeitos aleatórios e sistemáticos. A figura 11, ilustra a definição de precisão, mais aceita no meio científico.

FIGURA 11 – a)BOA ACURÁCIA(MEDIDA PRÓXIMO AO VALOR REAL) E BOA PRECISÃO

b)BAIXA ACURÁCIA, BOA PRECISÃO



Os termos precisão e acurácia, *precision* e *accuracy* respectivamente, em vários artigos científicos internacionais são usados com o mesmo significado, no entanto é importante defini-los pois nesta pesquisa são utilizados com significado distintos, de acordo com as definições expostas acima.

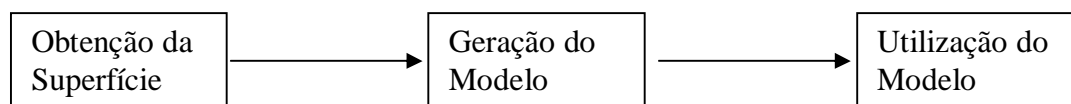
A qualidade posicional das ortoimagens geradas com a aplicação de modelos generalizados em estudos internacionais como HANLEY & FRASER (2004), BIAS (2004) entre outros, é avaliada mediante as observações dos valores do erro médio quadrático total e individual dos pontos de controle, bem como a análise dos resíduos do ajustamento.

6.8 Modelo Digital do Terreno – MDT ou Digital Terrain Model – DTM

De acordo com OSTMAN (1987, p.4) o termo genérico DTM, do inglês *Digital Terrain Model*, é definido como a representação da superfície topográfica por de meio de um conjunto de coordenadas, ou pontos amostrados, da superfície real e algoritmos capazes de reconstruir a partir destes a superfície real.

PETTINATI (1983, p. 01-03) apresenta três etapas envolvidas no processo de modelagem matemática de superfície, conforme é ilustrado na figura 12.

FIGURA 12 - ETAPAS PARA O PROCESSO DE MODELAGEM MATEMÁTICA DE SUPERFÍCIES



FONTE: ADAPTADO DE PETTINATI 1983, P.01-03.

A obtenção da superfície, ou seja, dos dados, pode ser de diversas formas, digitalização de cartas topográficas, perfilamento (bastante utilizado na fotogrametria), levantamento topográfico, levantamento geodésico através de rastreamento com NAVSATR GPS, através de dados de mapeamento pré-existente e mais recentemente através de dados Laser ou LIDAR (*Light Detection And Ranging*)

Neste último caso um MDE, Modelo Digital de Elevação, é gerado, pois os dados obtidos referem-se às elevações das feições do terreno.

Nesta pesquisa será usado o termo MDT, Modelo Digital de Terreno, gerado a partir das informações como curvas de nível e pontos cotados.

A elaboração do modelo matemático consiste no agrupamento dos dados que descrevem a superfície real, em unidades lógicas denominadas de estruturas de dados e na determinação de funções de interpolação, de forma que todo o conjunto simule de modo idealizado o comportamento da superfície original. São muitas as formas de elaboração dos modelos digitais. De forma geral, os pontos são interligados formando polígonos e posteriormente poliedros. Os vértices destes poliedros são os

pontos amostrados. Podem-se obter vários tipos de poliedros onde os mais utilizados são a triangulação e a malha regular.

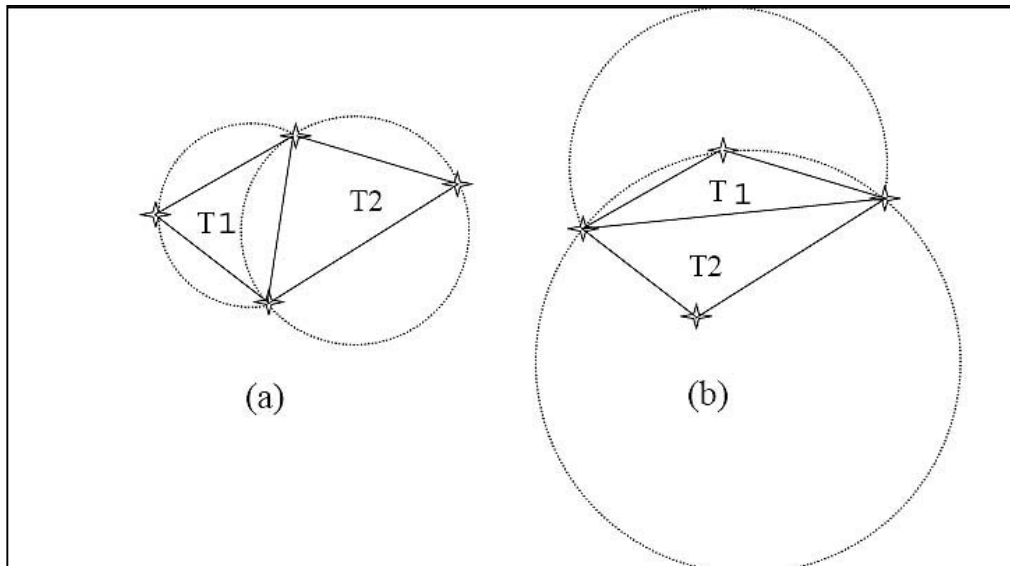
6.8.1 Triangulação

É um dos modelos digitais mais empregados. Sendo um poliedro com faces triangulares, onde os vértices dos triângulos são os pontos amostrados da superfície.

O procedimento da triangulação, segundo PETTINATI (1983, p. 02-05) consiste na união dos pontos amostrados dois a dois formando triângulos. Verificando-se que uma triangulação não é única buscam-se critérios de modo a torná-la única.

Segundo FELGUEIRAS (2001, p.16). uma metodologia bastante utilizada é a triangulação de Delaunay, que tem como critério o de maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Isto é equivalente a dizer que a malha final, deve conter triângulos o mais próximo possível de quadriláteros evitando-se a criação de triângulos muito afinados, ou seja, triângulos com ângulos muito agudos. Uma forma equivalente de se implementar a triangulação de Delaunay utiliza o critério do circuncírculo. Esse critério, esquematizado na figura 13, estabelece que a triangulação é de Delaunay se: O círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular não contém no seu interior nenhum ponto do conjunto das amostras além dos vértices do triângulo em questão.

FIGURA 13 - CRITÉRIO DO CIRCUNCÍRCULO PARA GERAÇÃO DA TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY. a) T1 E T2 SÃO TRIÂNGULOS DE DELAUNAY. b) T1 E T2 NÃO SÃO TRIÂNGULOS DE DELAUNAY



FONTE: ADAPATADO DE WWW.DPI.INPE.BR/GILBERTO/TUTORIAIS/GIS_AMBIENTE/4MNT.PDF

Esse tipo de modelo é melhor utilizado em regiões onde o relevo é montanhoso e necessita de representações mais densas.

6.8.2 Grade Regular

A grade regular é uma representação matricial onde cada elemento da matriz está associado a um valor numérico. Para a geração da grade é necessário estimar através de interpoladores, os valores para as células que não possuem medidas de elevação, considerando-se a vizinhança das medidas de elevação conhecidas WEIBER & HELLER (1991, p. 65).

O espaçamento da grade, ou a resolução em X e ou Y deve ser condizente com a precisão dos dados. Grades regulares muito densas em superfícies planas adicionam pouca informação, por outro lado em superfícies acidentadas podem ou não representar bem o terreno, no entanto, haverá um aumento no tempo de

processamento. Contudo, a análise com respeito a resolução da grade é de grande importância.

De acordo com BURROUGH (1986, p. 145) as funções de interpolação podem ser definidas como globais ou locais. A função global é dependente de todos os pontos amostrados, onde uma alteração num valor de entrada afeta toda a representação o mapa. As funções locais são definidas por pequenas porções dos mapas, sendo aplicadas sucessivamente até cobrir toda a área do mesmo. Uma alteração num valor de entrada afeta apenas o resultado de um subconjunto. Essas regiões podem ser definidas por raios de influência, ou por quantidades de amostras vizinhas.

Os interpoladores são funções que predizem ou estimam o valor da variável em estudo num ponto não amostrado.

O processo de geração de um modelo de grade compreende a construção de uma malha e a definição de interpoladores locais KOZCIAK *et al* (1999, p.20).

Os métodos mais comuns de interpolação local dispostos em softwares são:

- *Spline* – Segundo BURROUGH (1986, p. 151), são funções polinomiais ajustadas exatamente a um pequeno número de pontos;
- Médias móveis – são os modelos mais simples para a estimação das elevações, ou cotas, dos pontos de uma grade. Este método pode derivar-se em:
 - Vizinho mais próximo – Todos os valores são assumidos como iguais ao valor do vizinho mais próximo;
 - Média simples – o valor (Z) é estimado a partir da média de seus vizinhos.
 - Média ponderada - o valor (Z) é calculado a partir da média ponderada de seus vizinhos mais próximos. A ponderação mais utilizada é o inverso da distância do ponto da grade a amostra considerada;
- *Kriging* – É um método geoestatístico que leva em consideração as características espaciais de auto correlação de variáveis regionalizadas, que devem conter uma certa

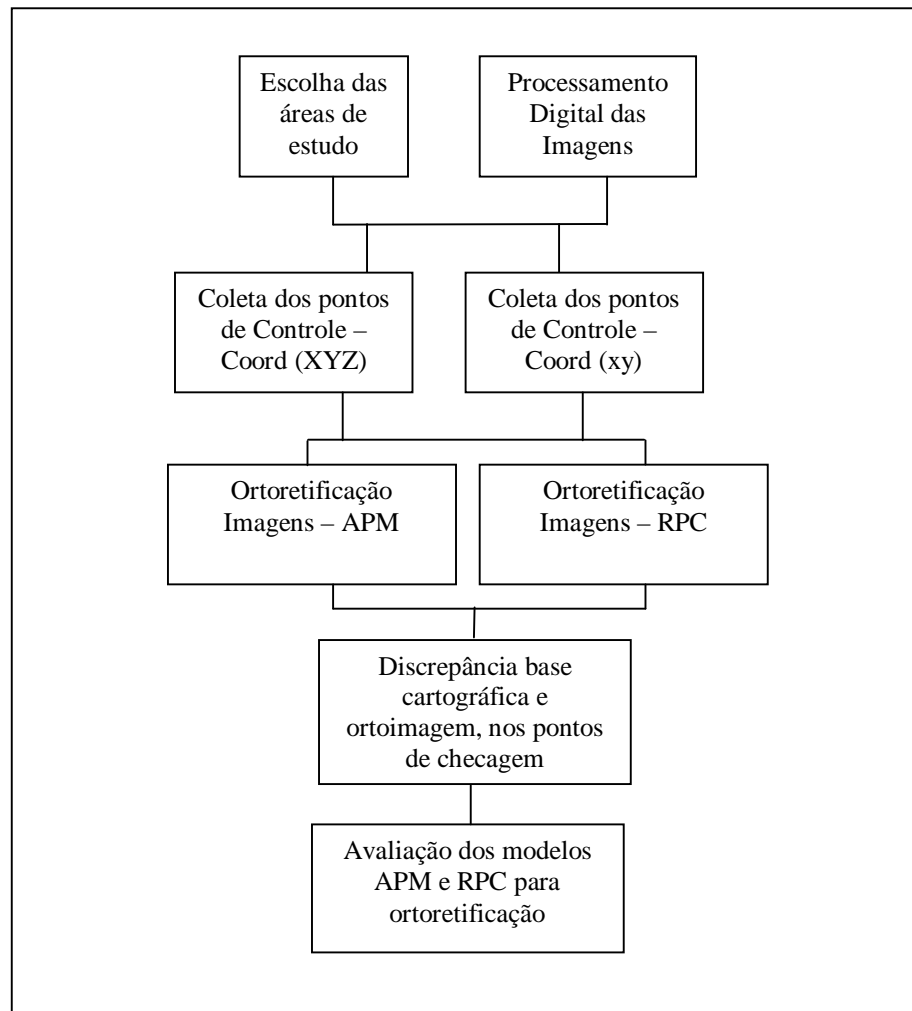
continuidade espacial, o que permite que os dados obtidos por amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimativa de pontos onde o valor da variável seja desconhecido. Utiliza distâncias ponderadas e médias móveis pelo qual os pesos adequados são obtidos por um variograma, sendo este representativo da média das diferenças ao quadrado dos valores irregularmente distribuídos de Z_i a intervalos de distâncias especificados. É necessário um sistema de equações em matrizes, no qual são usados os parâmetros variográficos, para a obtenção dos pesos a serem usados para o cálculo do valor do ponto a ser estimado/interpolado, LANDIM (2000, p. 4).

Nas pesquisas realizadas por SHI & AHAKER (2003) e CHEN & LEE (1993) ambos relatam que a precisão do MDT é de fundamental importância na ortoretificação de imagens.

7. METODOLOGIA

Os procedimentos utilizados para realizar esta pesquisa são visualizados sob a forma de um fluxograma, representado na figura 14.

FIGURA 14 – FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS REALIZADOS



7.1. Escolha das áreas de estudo

As condições impostas para a aplicação do modelo APM no processo de ortorectificação em imagens de alta resolução, como a aproximação de uma projeção paralela no sentido do deslocamento do satélite e a consideração do movimento linear do sensor, implicam diretamente no tamanho (linha, coluna) da

imagem a ser ortoretificada pelo modelo. Desta forma, para investigar o desempenho do modelo com relação ao tamanho e ao relacionamento linha coluna das imagens, quanto a absorção ou introdução de erros, foram estabelecidos valores de linha e coluna para as imagens Quickbird e IKONOS.

- Área 1 – 3500 colunas, 2500 linhas;
- Área 2 – 3000 colunas, 3000 linhas.

Portanto, têm-se duas áreas de estudo em cada imagem denominadas área 1 e área 2. Evidentemente a imagem IKONOS abrangerá uma área maior, devido a menor resolução espacial em relação à imagem Quickbird.

A localização das áreas sobre as imagens foi estabelecida sobretudo pela observação da abrangência da base cartográfica digital sobre as áreas de estudo, uma vez que entre a base e as imagens há seis anos de diferença entre suas realizações.

Outro fator limitante para a escolha do tamanho das áreas de estudo foi o tamanho da imagem em *bytes*. Diversos testes foram realizados com as imagens para tamanhos com número de linhas e colunas de 7000 a 10000, no entanto, o decêndio dos recursos computacionais como tempo de processamento, uso de memória e CPU, levaram a escolha dos tamanhos citados anteriormente.

O município de Araucária, na região metropolitana de Curitiba no Paraná, faz parte do Primeiro Planalto de acordo com a classificação de MAACK (1968) e possui formas topográficas mais suaves e uniformes, oscilando entre 850 a 950 metros. Sendo assim, as áreas de estudo possuem alguma diferença de altitude, possibilitando a investigação da aplicabilidade do modelo em regiões onde o relevo apresenta depressões suaves. As áreas 1 e 2 na imagem Quickbird apresentam diferença de altitude média de 46 e 65 metros, respectivamente. Enquanto as mesmas áreas 1 e 2 na imagem IKONOS apresentam 50 e 70 metros de diferença de altitude, respectivamente.

A localização das áreas de estudo, dentro das respectivas imagens IKONOS e Quickbird é ilustrada nas figuras 15 e 16.

FIGURA 15 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO NA IMAGEM QUICKBIRD

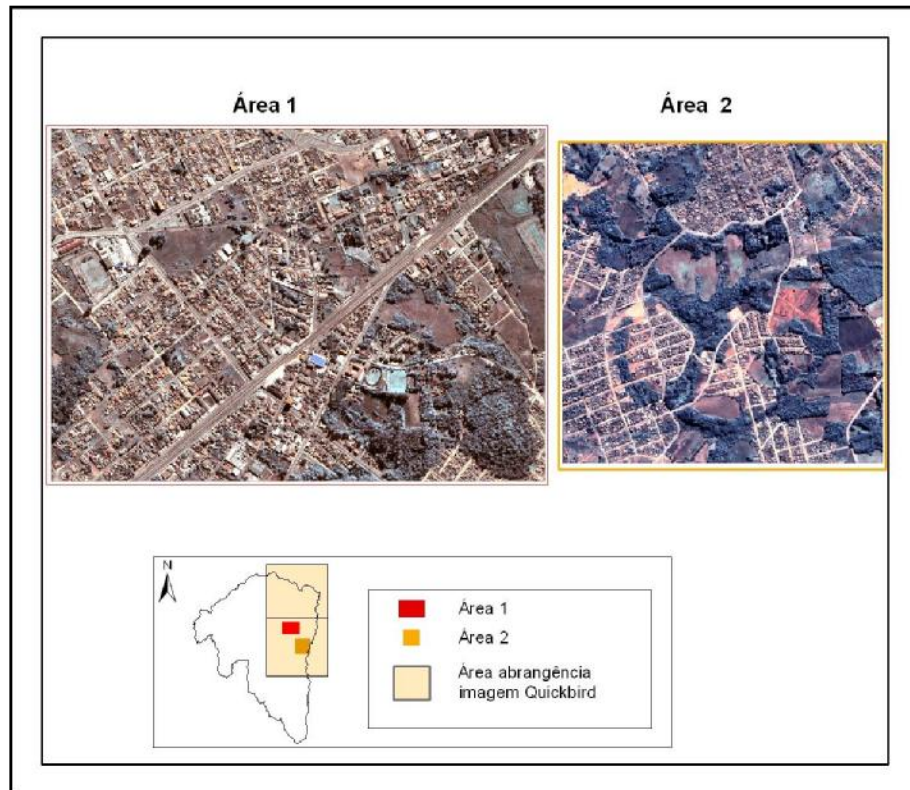
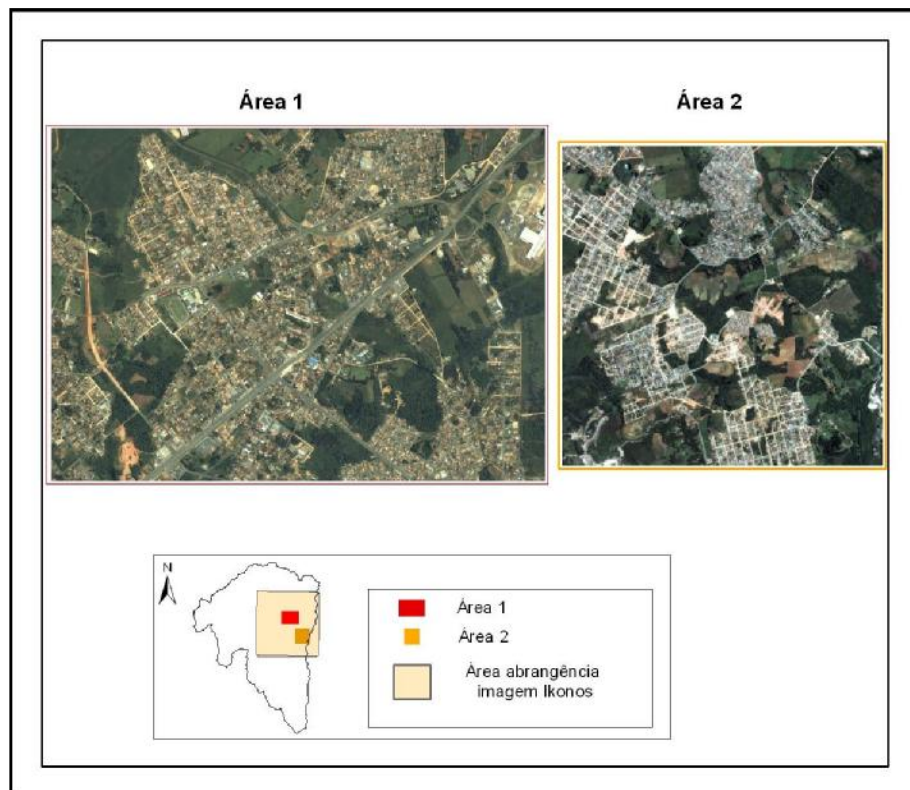


FIGURA 16 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO NA IMAGEM IKONOS



7.2. Processamento Digital das Imagens

7.2.1 Imagem Quickbird

A imagem Quickbird, produto *Standard* tipo PAN/MSI, onde as bandas pancromática e multiespectrais são armazenadas em arquivos distintos, foi submetida ao processo de fusão dos dados, a fim de obter uma imagem com resolução espectral das bandas multiespectrais e resolução espacial da banda pancromática. Depois de várias tentativas, a transformação IHS foi a técnica que apresentou melhor resultado.

A imagem pancromática teve seu histograma ajustado ao da imagem intensidade das componentes multiespectrais, para que as cores da imagem com a substituição das bandas quando voltada para o sistema RGB, não estivesse fora do limite de cores, formando uma imagem com falhas. A imagem após o processamento obteve uma qualidade visual satisfatória.

Como as áreas de estudo localizam-se em trechos urbanos, a evidência das bordas das edificações foi necessária para melhor identificação do alvo no instante da tomada dos pontos de controle e checagem. Sendo assim, um filtro passa -alta foi aplicado as imagens.

7.2.1 Imagem IKONOS

A imagem IKONOS, produto *Stereo Par Reference*, tipo PAN/MSI em modo *Pan-Sharpned*, onde a fusão dos dados das bandas multiespectral e pancromática foi realizada pela empresa que a comercializa e portanto, é um produto com quatro bandas referentes aos comprimentos de onda azul, verde, vermelho e infravermelho próximo com uma resolução espacial de 1 metro.

Foram selecionadas as bandas referentes aos comprimentos de onda do vermelho, verde e azul, de modo que a composição destas cores resultou em uma imagem onde seus elementos apresentaram cores próximas as naturais.

Em ambas as imagens foram aplicadas ajuste de histograma e realce de contraste após o recorte das áreas, para que as feições fossem melhor distinguidas.

7.3 Geração do MDT das áreas de estudo

O MDT da região das áreas de estudo, foi gerado utilizando-se o programa ArcGis 8.0 com auxílio do módulo *3D Analyst*.

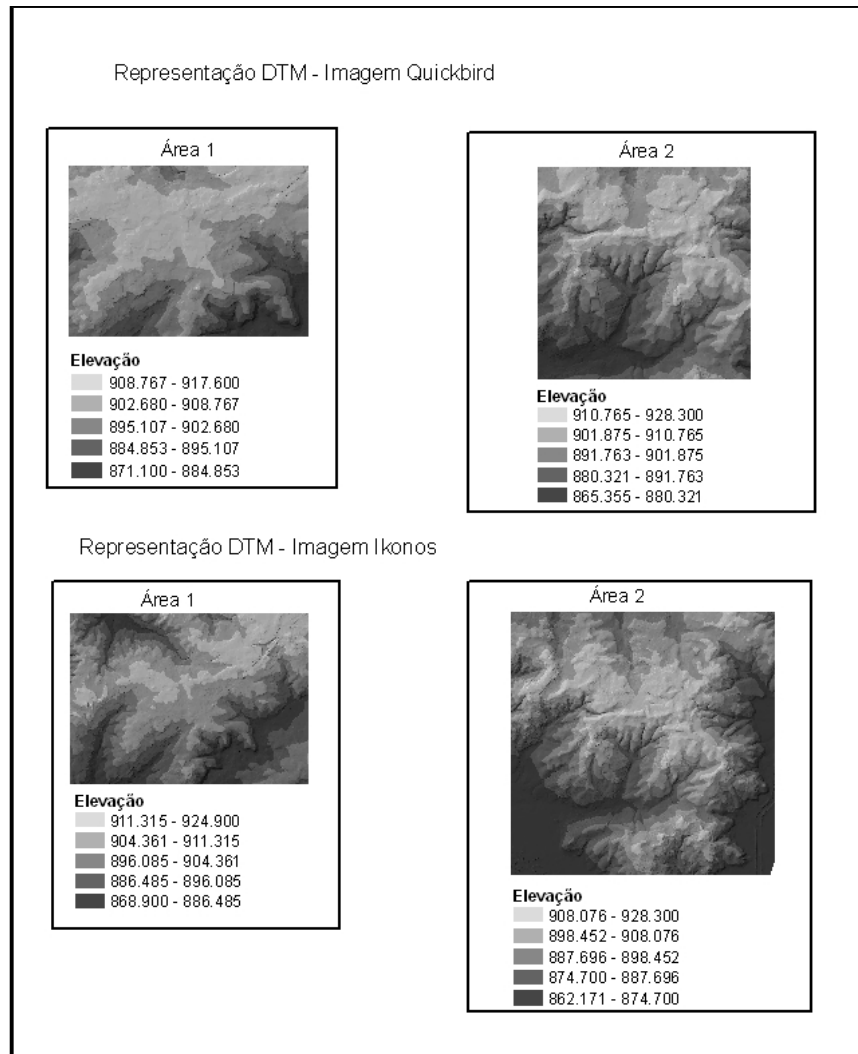
A representação do relevo através da geração da TIN foi escolhida devido a densidade das informações altimétricas disponíveis na base cartográfica, curvas de nível com equidistância de um metro, pontos cotados e edificações, em projeção UTM e datum SAD 69 além do tamanho reduzido das áreas de estudo. Preservando, desta forma, as características topográficas da região.

O programa Ortoretifica, utilizado para a geração das ortoimagens, identifica os dados de um MDT, desde que estes estejam dispostos em um arquivo com estrutura de uma grade regular. Sendo assim a TIN gerada, utilizando a superfície de ajuste linear, para cada área foi transformada em grades regulares.

As edificações não possuíam informação altimétrica, e foram utilizadas como feições de quebra, identificadas como *break lines*, a fim de tornar a superfície gerada mais verdadeira.

A figura 17, ilustra os MDTs gerados para as áreas 1 e 2 em ambas as imagens.

FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO DO MDT DAS IMAGENS QUICKBIRD E IKONOS, ÁREAS 1 E 2



7.4 Pontos de controle

O estabelecimento do número mínimo de pontos de controle está condicionado a resolução do sistema que descreve o relacionamento entre os pontos no terreno e os pontos na imagem, ou seja a resolução da expressão matemática. De acordo com método de ajustamento adotado, têm-se duas (2) equações a 8 (oito) parâmetros, desta forma são necessários quatro (4) pontos de controle para que o sistema de observações tenha solução única. No entanto, para otimizar a estimação dos parâmetros foram coletados 30 pontos, distribuídos uniformemente, de acordo com a correspondência entre a base cartográfica e a imagem.

Os pontos de controle foram escolhidos entre as feições com melhor identificação na imagem, constituindo exclusivamente de edificações bem definidas e sem indícios de sombreamento, com abrangência em toda a extensão da imagem.

As coordenadas de terreno (X,Y,Z) foram coletadas de forma automatizada, sobrepondo-se á base cartográfica digital e o MDT da região. O banco de dados gerado com as informações dos pontos de controle foi então exportado para o formato txt. Onde no programa Ortoretifica, o arquivo de texto com formato txt foi importado, com isso, não houve a necessidade da digitação dos dados pelo usuário.

O procedimento de coleta automatizada das coordenadas dos pontos minimiza a introdução de erros grosseiros no processo de tomada das informações.

As coordenadas de imagem (x,y), ou coluna, linha foram coletadas diretamente no programa ENVI 4.0.

As figuras 18, 19, 20 e 21 a seguir apresentam a distribuição dos pontos de controle para as áreas 1 e 2 nas imagens Quickbird e IKONOS.

FIGURA 18 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE IMAGEM QUICKBIRD, ÁREA 1



FIGURA 19 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE IMAGEM QUICKBIRD, ÁREA 2



FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE IMAGEM IKONOS, ÁREA 1



FIGURA 21 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE IMAGEM IKONOS, ÁREA 2



7.5 Coleta dos pontos de checagem

Os pontos de checagem foram coletados conforme o procedimento descrito para os pontos de controle. Buscou-se inserir pontos de checagem em áreas próximas e afastas aos pontos de controle, para testar a capacidade de modelagem.

As figuras 22, 23, 24 e 25 abaixo ilustram a distribuição dos pontos de checagem para as áreas 1 e 2 nas imagens Quickbird e IKONOS.

FIGURA 22 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CHECAGEM IMAGEM QUICKBIRD ÁREA 1



FIGURA 23 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CHECAGEM IMAGEM QUICKBIRD, ÁREA 2

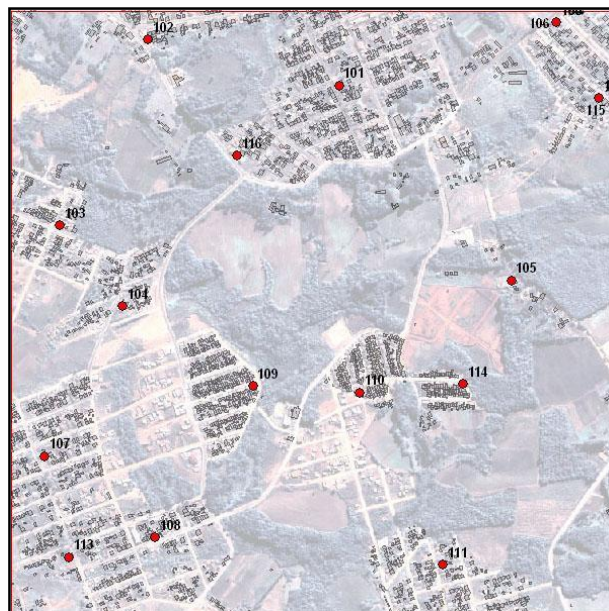


FIGURA 24 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CHECAGEM IMAGEM IKONOS ÁREA 1



FIGURA 25 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CHECAGEM IMAGEM IKONOS ÁREA 2



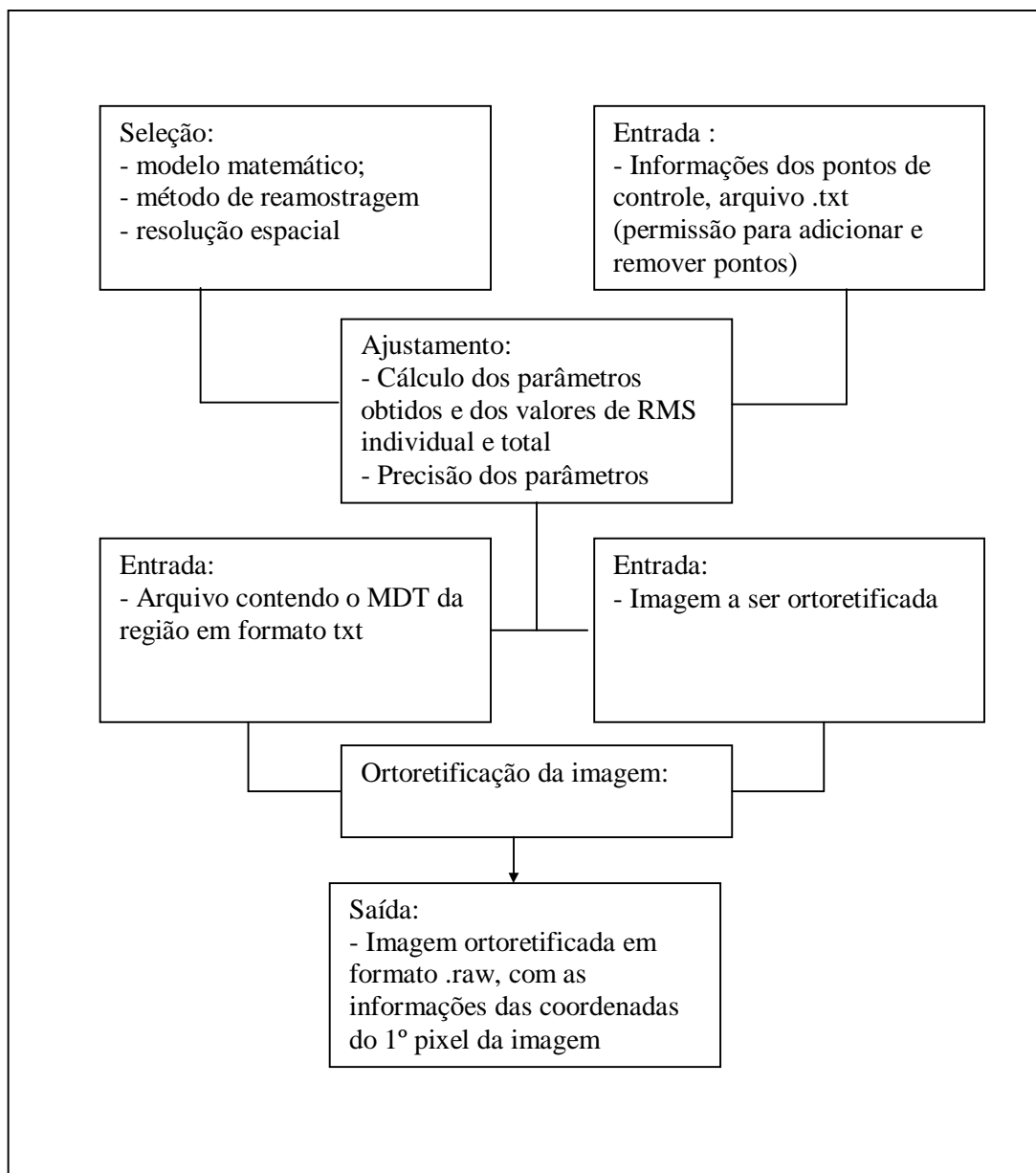
Cabe ressaltar aqui, que a função dos pontos de checagem é apenas estabelecer uma verificação do modelo proposto, sendo assim estes não fazem partes do ajustamento realizado.

7.6 Geração das ortoimagens com modelo APM

Foi elaborado em plataforma Delphi 4.0, ANEXO 4, um programa para geração das ortoimagens utilizando como modelo matemático o modelo APM.

A figura 26 ilustra a organização e estruturação dos dados para obtenção da ortoimagem.

FIGURA 26 – ESTRUTURAÇÃO DO PROGRAMA (ADAPTADO DO PROGRAMA ORTORETIFICA)



A expressão do modelo matemático utilizado foi apresentada no item 6.6.2.

O método de ajustamento utilizado foi o método paramétrico, pois os parâmetros ou incógnitas são independentes entre si, além disso estão ligadas a grandezas mensuráveis através de uma função, conforme apresentado por GEMAEL (1994, p. 116)

Desta forma, as equações utilizadas para a resolução por mínimos quadrados são descritas na tabela 4.

TABELA 4 - EQUAÇÕES DO MÉTODO PARAMÉTRICO

Modelo matemático	$La=F(Xa)$
Modelo matemático linearizado	$V = AX +L$
Equações normais	$A^T PAX +A^T PL=0$

La – Vetor das observações ajustadas; F(Xa) – Modelo matemático; V – Vetor dos resíduos; A – Matriz dos coeficientes; X – Vetor dos parâmetros; L – Vetor das observações; P – Matriz dos pesos.

A técnica de interpolação utilizada para estabelecer o valor da intensidade do pixel no processo de geração da imagem ortoretificada foi a bi-linear.

A aplicação do modelo APM, em imagens de satélite de alta resolução que utilizam sensor de varredura CCD, considera como projeção paralela no sentido de deslocamento do satélite devido ao pequeno ângulo de visada, sendo na verdade uma projeção central perspectiva. Essa simplificação é exposta com cautela por CHEN & LO (2001, p. 2) e SHI & AHAKER (2003, p.1360), sendo sugeridas alguns tipo de transformações aplicadas antes do processo de ortoreificação, como a correção devido ao deslocamento do relevo ou correção de altura, utilizando expressões que levam em consideração o azimute e a elevação do satélite, isto, a fim de minimizar os efeitos da simplificação para a aplicação do modelo.

Essas correções não foram aplicadas às imagens pois segundo YAMAKAWA & FRASER (2004. p.1) para sensores de alta resolução com direção de visada próximo ao Nadir ou com relevo considerado plano, a correção da imagem

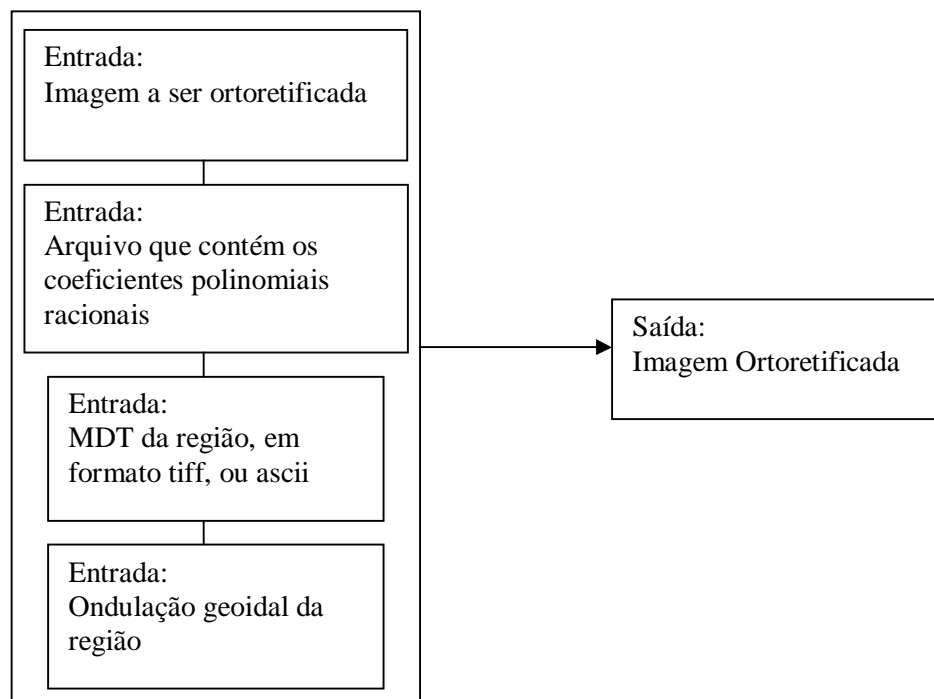
perspectiva-afim torna-se negligenciável. Da mesma forma para imagens coletadas no modo *Reverse* onde o sensor é fechado, mantendo a direção de vôo, sem a possibilidade de imperfeições devido ao deslocamento do relevo.

A imagem IKONOS e Quickbird foram coletadas em modo *Reverse*, conforme os dados dispostos nos arquivos *metadados*, ANEXO 3. Sendo assim, tais correções mencionadas, de altura e transformação perspectiva afim, não foram realizadas nas imagens utilizadas nesta pesquisa.

7.7 Geração de ortoimagens utilizando o modelo polinomial racional

O procedimento para geração das ortoimagens utilizando os modelos polinomiais racionais, no programa ENVI 4.0 é bastante simples, como mostra o diagrama da figura 27.

FIGURA 27 – ESQUEMA DO PROCESSO DE ORTORETIFICAÇÃO NO PROGRAMA ENVI 4.0



A determinação dos coeficientes polinomiais contidos nos arquivos *rpc.txt* e *rpb.txt* das imagens IKONOS e Quickbird, respectivamente, é feita pela empresa que as comercializam, utilizando a imagem em seu tamanho original. Pois, os coeficientes descrevem a geometria da imagem no instante em que foi coletada e

portanto estão associados a imagem completa. Sendo assim, não é possível efetuar recortes nas imagens antes do processo de ortoretificação. No programa comercial, o recorte da imagem acarreta em um erro do sistema impossibilitando a ortoretificação.

No caso da imagem Quickbird foi feita a ortoretificação das bandas multiespectrais e da banda pancromática e posteriormente efetuada a fusão dos dados pelo método da transformação IHS, seguindo o recorte das áreas 1 e 2 para análise.

Na imagem IKONOS foi feita a ortoretificação na imagem completa e posteriormente os recortes das áreas 1 e 2 foram efetuados.

O valor da ondulação geoidal da região foi obtido através do programa Mapgeo v. 1.0 do IBGE, que contém dados do mapa geoidal brasileiro, versão 1992.

7.8 Avaliação das ortoimagens geradas

Para avaliar a qualidade posicional das ortoimagens geradas pela ortoretificação com os modelos APM e polinomial racional, coordenadas dos pontos de checagem foram coletados nessas ortoimagens. A partir das quais, foi efetuado a diferença entre as coordenadas das ortoimagens e as coordenadas da base cartográfica digital, definida como verdade e isenta de erros. Dessa forma, foram gerados valores como o erro planimétrico nas dimensões norte leste, bem como valores estatísticos como a média amostral e o desvio padrão amostral, para uma análise da discrepância.

8. RESULTADOS

São apresentados neste item os resultados obtidos na geração das ortoimagens Quickbird e IKONOS das áreas de estudo aplicando os modelos APM e Polinomial Racional.

8.1 Transformação APM na imagem Quickbird

Os resultados obtidos através da metodologia proposta para as áreas de estudo 1 e 2 na imagem Quickbird são apresentadas a seguir.

8.1.1 Parâmetros da Transformação

Os pontos de controle, com as coordenadas de terreno (XYZ) e imagem (xy), foram inseridos no programa Ortoretifica, e através do ajustamento de observações pelo método dos mínimos quadrados, método paramétrico, os parâmetros da transformação APM foram obtidos. Sendo estes dispostos nas tabelas a seguir.

TABELA 5– PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO APM PARA ÁREA 1 - IMAGEM QUICKBIRD

	Parâmetros	Precisões
a ₁	1,6671	±0,0001
a ₂	0,0012	±0,0001
a ₃	-0,3466	±0,0124
a ₄	-1109272,7040	±1,5712
a ₅	0,0014	±0,0124
a ₆	-1,6664	±0,0139
a ₇	-0,0691	±0,0014
a ₈	11949363,0682	±1,7198

TABELA 6– PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO APM PARA ÁREA 2 - IMAGEM QUICKBIRD

	Parâmetros	Precisões
a ₁	1,6668	±0,0001
a ₂	-0,0001	±0,0001
a ₃	-0,3022	±0,0124
a ₄	-1109274,9539	±1,5745
a ₅	-0,0012	±0,0125
a ₆	-1,6669	±0,0138
a ₇	-0,0793	±0,0014
a ₈	11949373,9989	±1,8491

Os parâmetros a₁, a₂, a₃ correspondem à distorção na inclinação do sensor, a₅, a₆ e a₇ correspondem à rotação do sensor e a₄ e a₈, a translação e não uniformidade da escala, respectivamente.

Observa-se que os valores deveriam ser bastante próximos para as duas áreas em todos os parâmetros, uma vez que partem da mesma imagem, e portanto possuem a mesma direção de varredura e possíveis distorções. Nos parâmetros a₂ e a₅, observa-se uma diferença não só no valor, mas no sentido do parâmetro, passando de positivo a negativo.

8.1.2 Dados Estatísticos da Transformação para os Pontos de Controle e Pontos de Checagem

Foram coletados em média trinta pontos de controle, cobrindo toda a extensão das áreas de estudo, utilizando a base cartográfica digital na escala 1:2000, para a coleta das coordenadas de terreno e a imagem digital para as coordenadas de imagem. As feições escolhidas como alvo foram unicamente cantos de construções, com contraste satisfatório e ausência de sombras.

Os valores do erro médio quadrático RMS encontrados para as duas áreas de estudo correspondem a aproximadamente 0,7 metros. Para a imagem Quickbird esse valor equivale a um erro quadrático médio de um pixel.

O RMS total obtido com a utilização desses pontos foi significativamente alterado quando alguns pontos foram eliminados do ajustamento. A

eliminação do ponto de controle seguiu como critério o valor do RMS individual, assim como a relevância do ponto, de forma a evitar regiões com ausência de pontos de controle. Os pontos rejeitados no ajustamento foram descartados.

A tabela a seguir apresenta os valores dos resíduos e o RMS total e individual dos pontos de controle para a área 1.

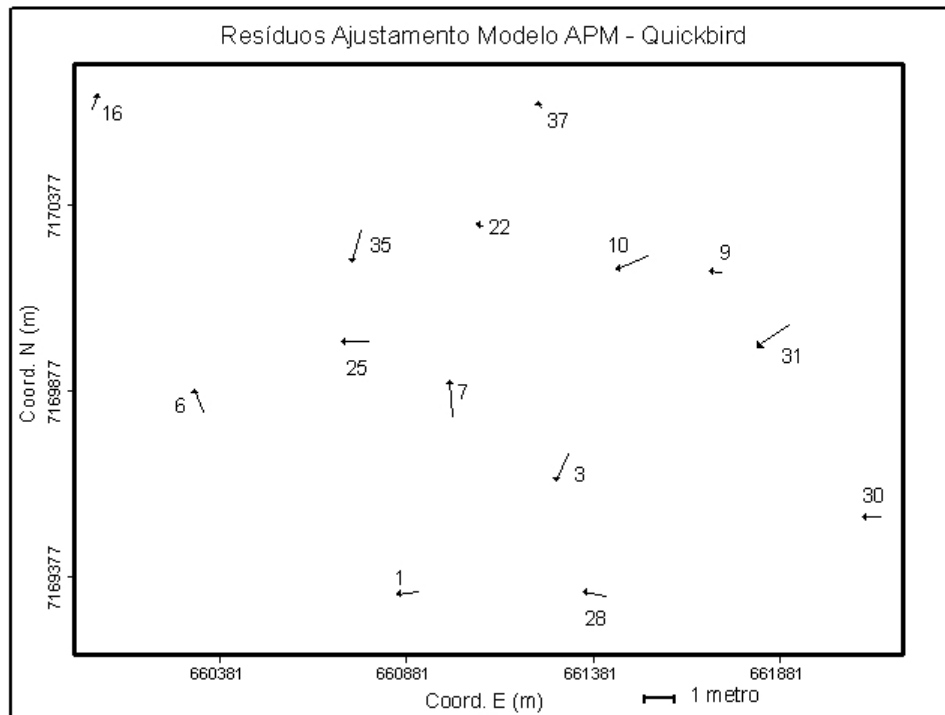
TABELA 7– RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE (GCP'S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 1 - IMAGEM QUICKBIRD

Observações			Ajustamento (pixel)		Resíduos (pixel)		
Ponto	x	y	x	y	Rx	Ry	Rr
1	1368	2397	1368,581	2397,054	0,581	0,054	0,584
3	2133	1768	2132,678	1767,246	-0,322	-0,754	0,820
6	462	1480	462,235	1479,382	0,235	-0,618	0,661
7	1618	1598	1617,899	1598,963	-0,101	0,963	0,968
9	2764	949	2764,336	948,931	0,336	-0,069	0,343
10	2347	942	2347,847	942,345	0,847	0,345	0,915
16	33	161	32,836	160,603	-0,164	-0,397	0,430
22	1724	739	1724,143	738,938	0,143	-0,062	0,156
25	1244	1264	1243,249	1263,963	-0,751	-0,037	0,752
28	2308	2407	2307,415	2407,134	-0,585	0,134	0,600
30	3459	2051	3459,467	2050,970	0,467	-0,030	0,468
31	3125	1194	3124,149	1193,417	-0,851	-0,583	1,032
35	1162	912	1162,253	912,860	0,253	0,860	0,896
37	2011	220	2010,913	220,145	-0,087	0,145	0,169
						RMS	0,686

A figura 28, apresenta os valores dos resíduos das observações obtidos no ajustamento com 14 pontos de controle.

FIGURA 28– VETORES DOS RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES PARA OS PONTOS DE CONTROLE

ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD



Os pontos de checagem obtiveram um valor para o RMS individual e geral acima do esperado, provavelmente devido à falta de pontos de controle em algumas regiões. É importante observar que estes pontos serviram apenas para verificar a qualidade do ajustamento, isto é, não fizeram parte do conjunto de pontos utilizados no ajustamento para determinação dos parâmetros da transformação e foram identificados por algoritmos acima de 100. A tabela 7 apresenta os valores dos resíduos e do RMS total e individual obtidos para os pontos de checagem na área 1.

TABELA 8 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CHECAGEM(CP'S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 1 - IMAGEM QUICKBIRD

CP's	Coords. Imagem		Coords. Calculadas (pixel)		Diferenças (pixel)		
	x	y	x	y	Rx	Ry	Rz
Ponto							
101	171	430	170,977	429,302	-0,023	-0,698	0,698
104	951	1174	950,686	1173,508	-0,314	-0,492	0,584
105	430	814	429,028	813,652	-0,972	-0,348	1,032
106	461	1961	460,051	1961,517	-0,949	0,517	1,081
107	28	2405	26,711	2404,022	-1,289	-0,978	1,618
108	1084	2203	1084,046	2201,561	0,046	-1,439	1,440
109	1662	2045	1662,295	2043,361	0,295	-1,639	1,666
110	1674	1081	1673,397	1079,462	-0,603	-1,538	1,652
111	1499	420	1500,19	418,797	1,190	-1,203	1,693
113	2322	512	2322,295	510,833	0,295	-1,167	1,204
115	1928	2237	1927,012	2236,231	-0,988	-0,769	1,252
116	2477	79	2476,814	77,115	-0,186	-1,885	1,894
117	3014	2446	3014,223	2446,347	0,223	0,347	0,413
118	2878	1082	2878,527	1081,501	0,527	-0,499	0,725
119	3145	276	3146,423	275,909	1,423	-0,091	1,425
120	1208	1822	1208,076	1822,218	0,076	0,218	0,231
						RMS	1,304

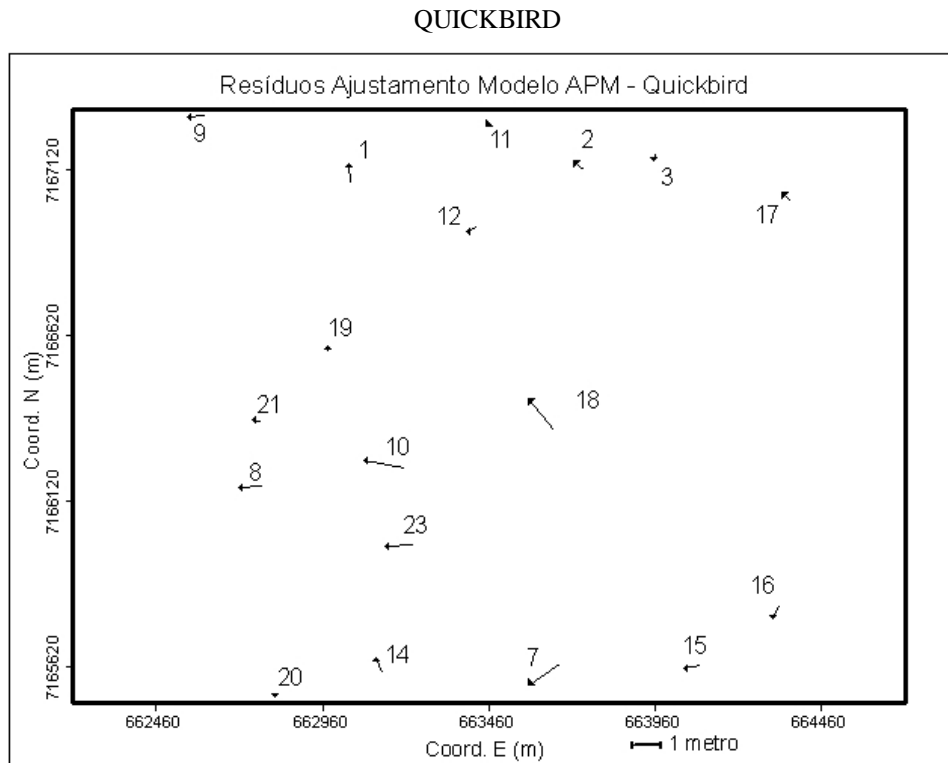
A tabela 9 apresenta os valores dos resíduos e o RMS total e individual para a área 2, dos pontos de controle.

TABELA 9 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE(GCP'S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 2 - IMAGEM QUICKBIRD

Ponto	Observações		Ajustamento (pixel)		Resíduos (pixel)		
	x	y	x	y	Rx	Ry	Rr
1	803	366	802,974	365,445	-0,026	0,555	0,555
2	1973	300	1972,672	300,253	-0,328	0,253	0,414
3	2322	254	2322,078	254,180	0,078	0,180	0,196
7	1862	2779	1861,08	2778,363	-0,920	-0,637	1,119
8	366	1890	365,302	1889,963	-0,698	-0,037	0,699
9	84	31	83,454	30,943	-0,546	-0,057	0,549
10	876	1759	877,246	1758,737	1,246	-0,263	1,274
11	1486	79	1486,128	79,109	0,128	0,109	0,168
12	1390	613	1390,292	613,148	0,292	0,148	0,327
14	976	2828	975,794	2828,470	-0,206	0,470	0,513
15	2480	2805	2480,477	2805,094	0,477	0,094	0,486
16	2953	2492	2952,823	2491,640	-0,177	-0,360	0,401
17	2968	413	2968,269	412,740	0,269	-0,260	0,374
18	1827	1609	1826,239	1609,975	-0,761	0,975	1,237
19	689	1187	689,004	1186,846	0,004	-0,154	0,154
20	435	2951	435,027	2951,102	0,027	0,102	0,106
21	316	1554	316,291	1553,959	0,291	-0,041	0,294
23	985	2190	985,851	2190,035	0,851	0,035	0,851
						RMS	0,664

A figura 29 apresenta os vetores dos resíduos das observações obtidos no ajustamento com os 18 pontos de controle.

FIGURA 29 – VETORES DOS RESÍDUOS PARA OS PONTOS DE CONTROLE ÁREA 2 – IMAGEM



A tabela 10 apresenta os valores dos resíduos e o RMS total e individual para os pontos de checagem da área 2.

TABELA 10 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CHECAGEM(CP'S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 2 - IMAGEM QUICKBIRD

Pontos	Observações		Ajustamento (pixel)		Diferenças (pixel)		
	x	Y	x	y	Rx	Ry	Rz
101	1607	363	1605,898	362,203	-1,102	-0,797	1,360
102	659	134	660,890	135,061	1,890	1,061	2,168
103	232	1062	229,559	1060,843	-2,441	-1,157	2,702
104	534	1462	533,284	1460,876	-0,716	-1,124	1,333
105	2461	1333	2456,414	1329,977	-1,586	-3,023	3,414
106	2685	53	2685,425	49,141	0,425	-3,859	3,882
107	155	2208	155,110	2209,110	0,110	1,110	1,116
108	705	2613	707,779	2613,818	2,779	0,818	2,897
109	1188	1862	1187,152	1860,195	-0,848	-1,805	1,995
110	1713	1892	1711,732	1892,284	-1,268	0,284	1,300
111	2125	2747	2123,901	2747,201	-1,099	0,201	1,117
113	281	2712	281,252	2713,540	0,252	1,540	1,561
114	2218	1848	2220,733	1847,275	2,733	-0,725	2,828
115	2898	427	2897,891	425,883	-0,109	-1,117	1,122
116	1101	713	1102,493	712,445	1,493	-0,555	1,592
						RMS	2,285

Observando-se as tabelas 7, 8, 9, 10, percebe-se que os valores referentes ao RMS total para os pontos de controle foram próximos para as duas áreas de estudo, bem como os valores do RMS individual. Os valores do RMS para os pontos de checagem apresentaram diferença significativa para as duas áreas, tanto para os valores individuais e totais, na área 2 foram encontrados os maiores valores, devido principalmente a falha na distribuição dos pontos de controle, onde em algumas regiões não foi possível fixá-los.

8.2 Transformação APM na imagem IKONOS

Os resultados obtidos através da metodologia proposta para as áreas de estudo 1 e 2 na imagem IKONOS são apresentadas a seguir.

8.2.1 Parâmetros da Transformação

Os pontos de controle, com as coordenadas de terreno(XYZ) e imagem (xy), foram inseridos no programa Ortoretifica, e através do ajustamento de observações pelo método dos mínimos quadrados, método paramétrico, os parâmetros da transformação APM foram obtidos. Sendo estes dispostos nas tabelas 11 e 12.

TABELA 11 – PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO APM PARA ÁREA 1 - IMAGEM IKONOS

	Parâmetros	Precisões
a ₁	1,0003	±0,0001
a ₂	-0,0012	±0,0001
a ₃	0,2089	±0,0153
a ₄	-650768,8626	±1,5124
a ₅	-0,0004	±0,0149
a ₆	-0,9996	±0,0178
a ₇	-0,1024	±0,0014
a ₈	7169218,3892	±1,8192

TABELA 12– PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO APM PARA ÁREA 2 - IMAGEM IKONOS

	Parâmetros	Precisões
a ₁	0,9999	±0,0001
a ₂	0,0004	±0,0001
a ₃	0,0996	±0,0119
a ₄	-650760,1153	±1,5645
a ₅	-0,0002	±0,0122
a ₆	-0,9992	±0,0124
a ₇	-0,1485	±0,0013
a ₈	7169210,3349	±1,8294

Os parâmetros a₁, a₂, a₃ correspondem à distorção na inclinação do sensor, a₅, a₆, a₇ correspondem à rotação do sensor e a₄ e a₈, a translação e não uniformidade da escala, respectivamente.

Observa-se que os valores encontrados são próximos para as duas áreas, com exceção dos parâmetros a₂, a₃ que correspondem a distorção na inclinação do sensor.

8.2.2 Dados Estatísticos da Transformação para os Pontos de Controle e Pontos de Checagem

Como a resolução espacial da imagem IKONOS em relação a Quickbird é menor, conseqüentemente a primeira abrange uma porção de área maior, Sendo assim, foi necessária a coleta de mais pontos de controle, além daqueles coletados na imagem Quickbird, a fim de cobrir a extensão de toda área de estudo. De forma análoga a imagem Quickbird, as feições escolhidas como alvo nos pontos de controle e checagem, foram unicamente cantos de construções, com contraste satisfatório e ausência de sombras.

Para garantir a uniformidade necessária à comparação do ajustamento do modelo APM às áreas, que diferiam apenas pelo tipo de sensor, utilizou-se a maioria dos pontos de controle no ajustamento das áreas de estudo na imagem Quickbird, pois alguns pontos apresentaram RMS muito elevado e foram rejeitados.

Os valores do erro médio quadrático RMS encontrado para as duas áreas de estudo correspondem a aproximadamente 0,6 metros e 0,7 metros. Para a imagem IKONOS esse valor equivale a um erro quadrático médio de 2/3 do pixel.

O RMS total obtido com a utilização desses pontos foi significativamente alterado quando alguns pontos foram eliminados do ajustamento. A eliminação do ponto de controle seguiu como critério o valor do RMS individual, assim como a relevância do ponto, de forma a evitar regiões com ausência de pontos de controle. Os pontos rejeitados no ajustamento foram descartados.

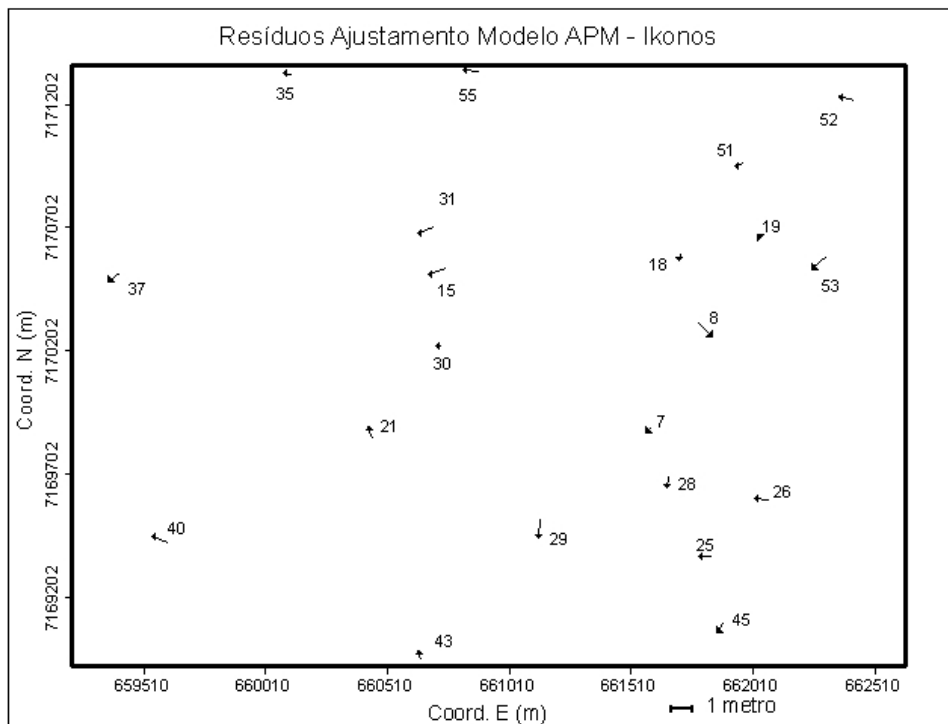
A tabela 13 apresenta os valores dos resíduos e o RMS total e individual dos pontos de controle para a área 1.

TABELA 13– RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE(GCP'S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 1 - IMAGEM IKONOS

Ponto	Observações		Ajustamento (pixel)		Resíduos (pixel)		
	X	y	x	y	Rx	Ry	Rr
7	2258	1569	2258,138	1569,144	0,138	0,144	0,2
8	2469	1123	2469,55	1122,448	0,55	-0,552	0,779
15	1362	929	1362,748	929,283	0,748	0,283	0,8
18	2393	869	2393,065	869,254	0,065	0,254	0,262
19	2716	768	2716,174	767,834	0,174	-0,166	0,241
21	1118	1549	1118,15	1548,539	0,15	-0,461	0,485
25	2464	2077	2464,603	2076,992	0,603	-0,008	0,603
26	2756	1847	2755,393	1847,092	-0,607	0,092	0,614
28	2339	1793	2339,047	1793,423	0,047	0,423	0,425
29	1814	1996	1814,104	1996,749	0,104	0,749	0,756
30	1557	1291	1556,738	1290,987	-0,262	-0,013	0,263
31	1318	762	1318,714	762,243	0,714	0,243	0,754
35	759	115	759,387	114,959	0,387	-0,041	0,39
37	100	920	99,483	919,611	-0,517	-0,389	0,647
40	295	2020	294,324	2020,273	-0,676	0,273	0,729
43	1410	2368	1410,115	2367,646	0,115	-0,354	0,372
45	2570	2347	2569,774	2346,628	-0,226	-0,372	0,435
51	2622	489	2622,38	489,137	0,38	0,137	0,404
52	3110	222	3109,385	222,191	-0,615	0,191	0,643
53	2996	855	2995,409	854,51	-0,591	-0,49	0,768
55	1572	103	1571,317	103,056	-0,683	0,056	0,685
						RMS	0,585

A figura 30 apresenta os vetores dos resíduos do ajustamento para os pontos de controle,

FIGURA 30 – VETORES DOS RESÍDUOS PARA OS PONTOS DE CONTROLE SELECIONADOS ÁREA 1
– IMAGEM IKONOS



Os pontos de checagem obtiveram um valor para o RMS individual e geral acima do esperado, provavelmente devido à falta de pontos de controle em algumas regiões. Assim como nas áreas da imagem Quickbird, os pontos de checagem serviram apenas para verificar a qualidade do ajustamento, isto é, não fizeram parte do conjunto de pontos utilizados no ajustamento para determinação dos parâmetros da transformação e foram identificados por algarismos acima de 100. A tabela 14 apresenta os valores dos resíduos e do RMS total e individual obtidos para os pontos de checagem.

TABELA 14 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CHECAGEM (CP'S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 1 - IMAGEM IKONOS

Cps	Observações		Ajustamento (pixel)		Diferenças (pixel)			
	Ponto	X	y	x	y	Rx	Ry	Rr
104	1291	1372	1292,014	1374,101	1,014	2,101	2,332	
106	996	1846	997,410	1847,208	1,410	1,208	1,857	
107	734	2112	735,047	2113,319	1,047	1,319	1,684	
108	1366	1992	1365,024	1992,099	-0,976	0,099	0,981	
110	1726	1318	1725,498	1317,375	-0,502	-0,625	0,802	
111	1620	920	1620,464	921,192	0,464	1,192	1,279	
113	2115	975	2114,000	975,899	-0,294	0,899	0,946	
115	1874	2012	1874,668	2011,896	0,668	-0,104	0,676	
116	2208	716	2206,930	715,654	-1,070	-0,346	1,125	
117	2519	2139	2518,037	2138,985	-0,963	-0,015	0,963	
118	2445	1319	2444,494	1318,748	-0,506	-0,252	0,566	
119	2610	834	2610,684	834,322	0,684	0,322	0,756	
120	1442	1763	1442,313	1763,940	0,313	0,940	0,990	
121	3266	1510	3265,076	1509,654	-0,924	-0,346	0,986	
122	2284	258	2282,192	257,539	-1,808	-0,461	1,865	
124	56	850	47,642	850,376	1,642	0,376	1,684	
125	88	1806	87,133	1805,861	-0,867	-0,139	0,878	
126	23	2419	24,147	2420,846	1,147	1,846	2,173	
128	1641	2382	1642,544	2381,986	1,544	-0,014	1,544	
129	2963	2184	2962,987	2184,512	-0,013	0,512	0,512	
130	2993	1794	2991,667	1795,211	-1,333	1,211	1,801	
131	2866	343	2866,400	342,124	0,400	-0,876	0,963	
132	3240	2451	3239,781	2451,387	-0,219	0,387	0,445	
133	1686	384	1684,04	383,246	-1,960	-0,754	2,100	
							RMS	1,392

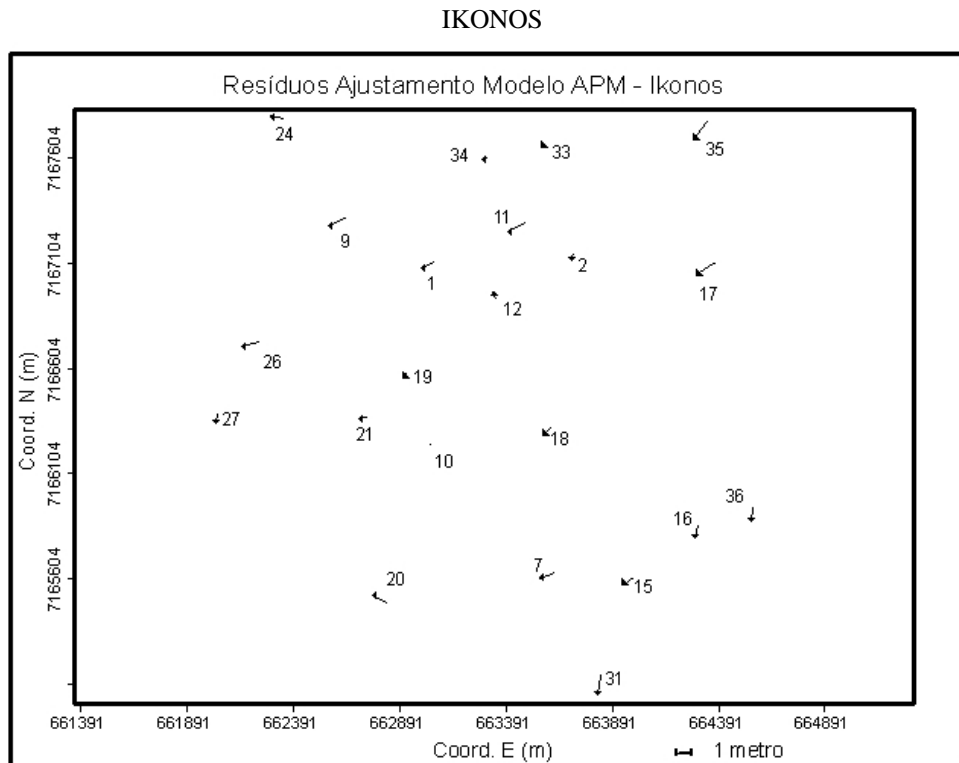
A tabela 15 apresenta os valores de RMS para a área 2, dos pontos de controle.

TABELA 15– RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE(GCP'S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 2 - IMAGEM IKONOS

Ponto	Observações		Ajustamento (pixel)		Resíduos (pixel)		
	X	y	x	y	Rx	Ry	Rr
1	1089	824	1089,626	824,314	0,626	0,314	0,700
7	1717	2274	1716,255	2273,762	-0,745	-0,238	0,782
10	1130	1661	1129,981	1660,941	-0,019	-0,059	0,062
11	1497	653	1497,825	653,468	0,825	0,468	0,948
15	2092	2289	2091,439	2288,661	-0,561	-0,339	0,656
16	2373	2101	2373,145	2101,513	0,145	0,513	0,533
17	2384	854	2384,918	854,586	0,918	0,586	1,089
18	1701	1572	1700,600	1571,570	-0,400	-0,430	0,587
21	793	1538	793,425	1538,060	0,425	0,060	0,429
9	655	624	655,783	624,413	0,783	0,413	0,885
12	1441	973	1440,849	973,342	-0,151	0,342	0,374
19	1021	1317	1020,828	1316,759	-0,172	-0,241	0,296
20	858	2378	858,680	2377,646	0,680	-0,354	0,766
2	1792	785	1792,125	785,281	0,125	0,281	0,307
24	444	121	443,394	121,140	-0,606	0,140	0,622
26	328	1176	327,195	1175,779	-0,805	-0,221	0,835
27	127	1524	126,902	1523,605	-0,098	-0,395	0,407
31	1913	2845	1913,179	2845,869	0,179	0,869	0,887
33	1675	234	1674,787	233,855	-0,213	-0,145	0,258
34	1402	302	1401,724	301,930	-0,276	-0,070	0,285
35	2431	131	2430,401	130,149	-0,599	-0,851	1,041
36	2643	1958	2642,939	1957,357	-0,061	-0,643	0,646
						RMS	0,684

A figura 31 apresenta os vetores dos resíduos do ajustamento das observações para os pontos de controle.

FIGURA 31 – VETORES DOS RESÍDUOS PARA OS PONTOS DE CONTROLE ÁREA 2 – IMAGEM



A tabela 16 apresenta os valores dos resíduos das observações e o RMS total e individual para os pontos de checagem da área 2.

TABELA 16 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO DOS PONTOS DE CHECAGEM(CP'S) DA TRANSFORMAÇÃO COM MODELO APM, ÁREA 2 - IMAGEM IKONOS

CPs Ponto	Observações		Ajustamento (pixel)		Resíduos (pixel)		
	x	y	x	y	Rx	Ry	Rz
101	1572	823	1571,317	822,590	-0,683	-0,410	0,797
102	1005	686	1005,024	685,961	0,024	-0,039	0,046
103	742	1244	740,647	1242,746	-1,353	-1,254	1,845
106	2217	638	2217,922	635,613	0,922	-2,387	2,559
107	694	1931	694,454	1931,512	0,454	0,512	0,684
110	1632	1741	1631,114	1741,031	-0,886	0,031	0,887
111	1878	2255	1877,381	2253,915	-0,619	-1,0185	1,249
113	763	2234	763,539	2236,255	0,539	2,255	2,318
114	1938	1715	1938,549	1713,447	0,549	-1,553	1,647
115	2343	862	2343,503	862,154	0,503	0,154	0,526
116	1269	1033	1269,52	1032,303	0,520	-0,697	0,870
117	444	121	443,395	121,140	-0,605	0,140	0,621
118	1433	167	1432,264	166,941	-0,736	-0,059	0,739
119	2554	111	2554,008	110,093	0,008	-0,907	0,907
120	85	1212	83,542	1210,854	-1,458	-1,146	1,854
121	1933	2453	1931,978	2451,916	-1,022	-1,084	1,490
122	2319	2845	2318,367	2842,222	-0,633	-2,778	2,849
123	2758	1959	2757,705	1957,552	-0,295	-1,448	1,477
						RMS	1,539

Observando-se as tabelas 13, 14, 15, 16, percebe-se que os maiores valores do RMS individual e total para os pontos de controle foram evidenciados na área 2, em regiões com falhas na distribuição dos pontos. Os pontos de checagem apresentaram valores próximos em relação ao RMS total.

8.3 Transformação RPC

O processo de ortoretificação de imagens de alta resolução no programa comercial é restrito, ou seja, os dados de entrada requeridos para ortoretificação são fornecidos e tem-se como saída a imagem ortoretificada, sem que o usuário tenha acesso aos parâmetros de transformação do modelo utilizado.

Os dados de entrada necessários são a imagem a ser ortoretificada, no tamanho original sem recortes, o arquivo contendo os coeficientes polinomiais, a ondulação geoidal da região e o modelo digital do terreno. A imagem ortoretificada, ou ortoimagem é disponibilizada assim que o processo é encerrado.

Por não se ter acesso ao procedimento de ajustamento bem como aos parâmetros da transformação, a forma disponível para avaliar a qualidade da ortoretificação realizada, é a comparação entre as coordenadas da base cartográfica digital, considerada neste trabalho como verdadeira e portanto isenta de erros, e as coordenadas da ortoimagem gerada.

8.4 Avaliação da qualidade posicional das ortoimagens geradas

8.4.1 Ortoimagens Quickbird utilizando o modelo APM

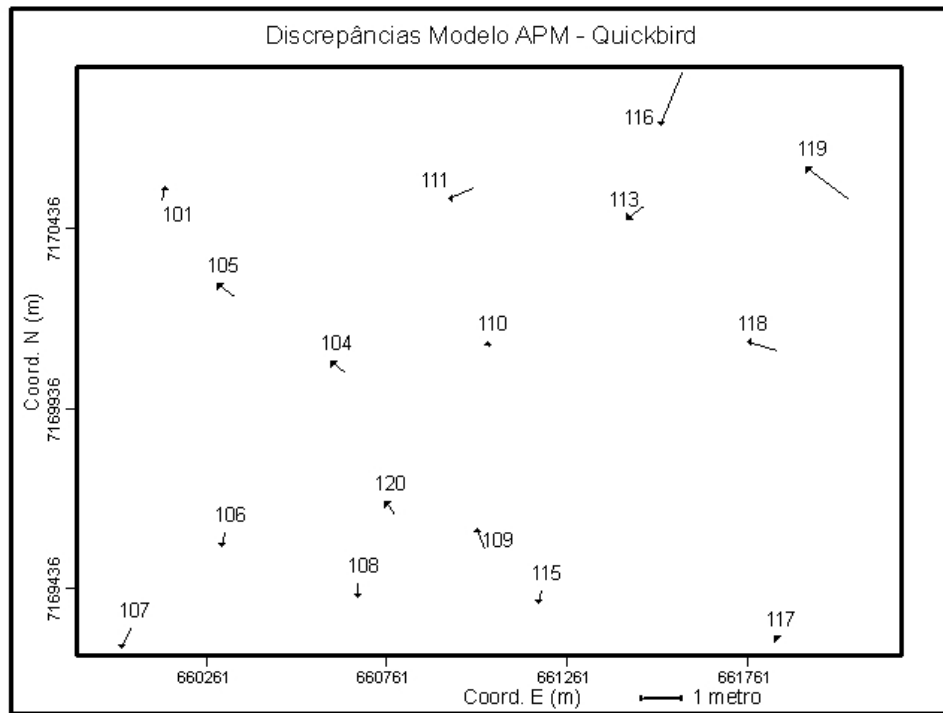
A avaliação das ortoimagens geradas com o modelo APM, através do programa Ortoretifica, foi estabelecida através da diferença entre as coordenadas dos pontos de checagem coletadas nas ortoimagens e na base cartográfica digital, que permitiram o estabelecimento dos valores estatísticos como a média, variância e desvio padrão.

A tabela 17 apresenta as diferenças entre as coordenadas da base cartográfica e da ortoimagem gerada com o modelo APM, para os pontos de checagem da área 1 para a imagem Quickbird. A figura 32 ilustra a diferença entre as coordenadas.

TABELA 17– DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO APM COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD

Ponto	Coords, Ortoimagens		Coords. Base Cart.		Diferença (m)	
	E	N	E	N	E	N
101	660136,488	7170511,907	660136,600	7170512,280	0,112	0,373
104	660604,488	7170066,107	660604,910	7170065,780	0,422	-0,327
105	660290,688	7170282,107	660291,200	7170281,740	0,512	-0,367
106	660310,488	7169593,307	660310,400	7169592,920	-0,088	-0,387
107	660049,488	7169328,107	660049,240	7169327,540	-0,248	-0,567
108	660681,288	7169449,907	660681,260	7169449,550	-0,028	-0,357
109	661031,088	7169543,507	661030,880	7169544,120	-0,208	0,613
110	661038,288	7170122,507	661038,340	7170122,340	0,052	-0,167
111	660933,288	7170518,507	660933,990	7170518,790	0,702	0,283
113	661427,088	7170463,307	661427,570	7170463,630	0,482	0,323
115	661188,888	7169428,907	661188,800	7169428,580	-0,088	-0,327
116	661519,488	7170722,507	661520,070	7170723,920	0,582	1,413
117	661836,288	7169303,507	661836,420	7169303,420	0,132	-0,087
118	661758,288	7170121,907	661759,150	7170121,650	0,862	-0,257
119	661921,488	7170605,507	661922,670	7170604,600	1,182	-0,907
120	660756,888	7169677,307	660757,140	7169676,940	0,252	-0,367

FIGURA 32– DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD,



Com as coordenadas Norte e Leste, dos pontos de checagem na ortoimagem gerada pelo modelo APM e na base cartográfica digital, gerou-se as diferenças entre as coordenadas, a respectiva média, variância e o desvio padrão para as direções Norte e Leste. As tabelas 18 e 19 apresentam os respectivos valores, bem como o erro planimétrico calculado para a ortoimagem.

TABELA 18– DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD

\bar{X}_E	0,290
\bar{X}_N	-0,070
S^2_E	0,168
S^2_N	0,308
S_E	0,410
S_N	0,555

\bar{X}_E , \bar{X}_N - valores da média aritmética para as direções leste e norte; S^2_E , S^2_N - valores da variância nas direções leste e norte; S_E , S_N - desvio-padrão para as direções leste e norte.

Analisando os dados apresentados na tabela 18, observa-se que o valor da média na direção Norte é bastante inferior a direção Este. Sendo os valores da

variância e desvio-padrão maiores para a direção Norte. Ou seja, os pontos nesta direção apresentaram uma maior variabilidade.

TABELA 19 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD

Ponto	Erro planimétrico (m)
101	0,389
104	0,534
105	0,630
106	0,397
107	0,619
108	0,358
109	0,647
110	0,175
111	0,757
113	0,580
115	0,339
116	1,528
117	0,158
118	0,899
119	1,490
120	0,445
\bar{x}	0,622
s^2	0,159
s	0,398

\bar{x} - média aritmética; s^2 - variância; s - desvio padrão

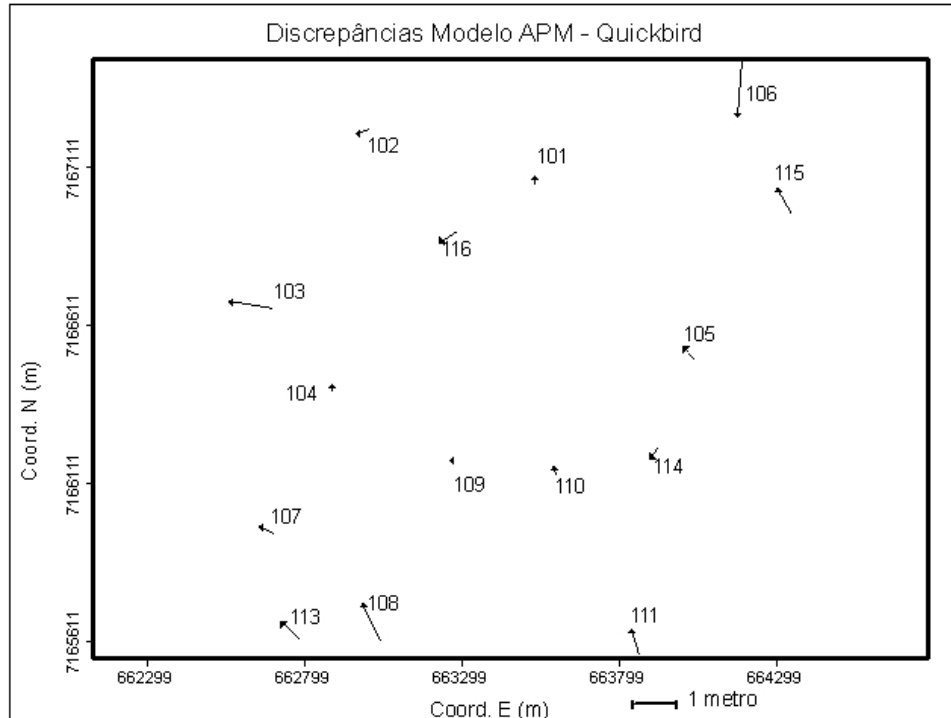
Observando-se a tabela acima, nota-se os pequenos valores para a média e desvio padrão do erro planimétrico na ortoimagem da área 1, menores ou próximos a 1 pixel da imagem.

A tabela 20 apresenta as diferenças entre as coordenadas da base cartográfica e da ortoimagem gerada com o modelo APM, para os pontos de checagem da área 2 para a imagem Quickbird. A figura 33 ilustra os vetores resultantes da diferença entre as coordenadas.

TABELA 20– DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO APM COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD

CP's	Coord. Ortoimagem		Coordenadas Base Cart.		Diferenças (m)	
	E	N	E	N	E	N
101	663525,229	7167080,338	663525,240	7167080,060	0,011	-0,278
102	662958,229	7167216,538	662958,680	7167216,660	0,451	0,122
103	662697,829	7166662,138	662696,410	7166662,370	-1,419	0,232
104	662882,029	7166421,538	662882,040	7166421,340	0,011	-0,198
105	664038,829	7166498,338	664038,440	7166498,770	-0,389	0,432
106	664172,029	7167265,738	664172,180	7167267,570	0,151	1,832
107	662650,429	7165973,938	662650,910	7165973,740	0,481	-0,198
108	662978,629	7165732,738	662979,210	7165731,550	0,581	-1,188
109	663269,629	7166182,738	663269,520	7166182,740	-0,109	0,002
110	663586,429	7166162,938	663586,550	7166162,640	0,121	-0,298
111	663833,029	7165650,538	663833,290	7165649,700	0,261	-0,838
113	662721,829	7165672,738	662722,400	7165672,160	0,571	-0,578
114	663893,029	7166188,738	663893,250	7166189,060	0,221	0,322
115	664298,029	7167042,538	664298,480	7167041,760	0,451	-0,778
116	663222,829	7166869,738	663223,410	7166870,120	0,581	0,382

FIGURA 33 – DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD,



Com as coordenadas Norte e Leste, dos pontos de checagem na ortofotografia gerada pelo modelo APM e na base cartográfica, gerou-se as diferenças entre as coordenadas, a respectiva média, variância e o desvio padrão para as direções

Norte e Leste. As tabelas 21 e 22 apresentam os respectivos valores, bem como o erro planimétrico calculado para a ortoimagem.

TABELA 21 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD

\bar{X}_E	0,132
\bar{X}_N	-0,069
S^2_E	0,265
S^2_N	0,506
S_E	0,515
S_N	0,712

\bar{X}_E , \bar{X}_N - valores da média aritmética para as direções leste e norte; S^2_E , S^2_N - valores da variância nas direções leste e norte; S_E , S_N - desvio-padrão para as direções leste e norte.

Analisando os dados estatísticos na tabela 21, observa-se a maior variabilidade dos dados na direção Norte, evidenciada pelos maiores valores da variância e do desvio padrão.

TABELA 22 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD

Ponto	Erro(planimétrico)
101	0,278
102	0,467
103	1,438
104	0,198
105	0,581
106	1,838
107	0,520
108	1,322
109	0,109
110	0,322
111	0,878
113	0,812
114	0,391
115	0,899
116	0,695
\bar{x}	0,717
s^2	0,245
s	0,495

\bar{x} - média aritmética; s^2 – variância; s – desvio padrão

Observando-se a tabela 22, notam-se os pequenos valores para a média e desvio padrão do erro planimétrico na ortoimagem da área 2, menores ou próximos a 1 pixel da imagem.

8.4.2 Ortoimagens IKONOS utilizando o modelo APM

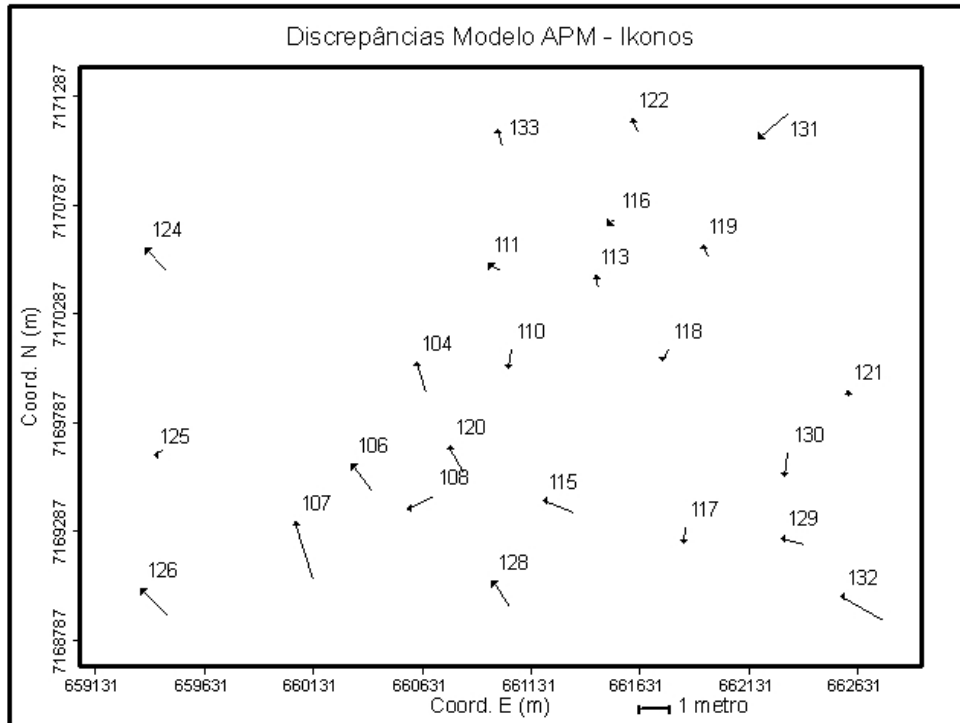
A avaliação das ortoimagens geradas com o modelo APM, através do programa Ortoretifica, foi estabelecida através da diferença entre as coordenadas dos pontos de checagem coletadas nas ortoimagens e na base cartográfica digital, que permitiram a o cálculo da valores estatísticos como a média, variância e desvio padrão.

A tabela 23 apresenta as diferenças entre as coordenadas da base cartográfica e da ortoimagem gerada com o modelo APM, para os pontos de checagem da área 1 para a imagem IKONOS. A figura 34 ilustra os vetores resultantes da diferença entre as coordenadas.

TABELA 23– DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO APM COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS

CP's	Coord. Ortoimagem		Coordenadas Base Cart.		Diferenças(m)	
	E	N	E	N	E	N
104	660604,439	7170067,158	660604,910	7170065,780	0,471	-1,378
106	660309,439	7169594,158	660310,400	7169592,920	0,961	-1,238
107	660048,439	7169330,158	660049,240	7169327,540	0,801	-2,618
108	660682,439	7169450,158	660681,260	7169449,550	-1,179	-0,608
110	661038,439	7170123,158	661038,340	7170122,340	-0,099	-0,818
111	660933,439	7170519,158	660933,990	7170518,790	0,551	-0,368
113	661427,439	7170464,158	661427,570	7170463,630	0,131	-0,528
115	661187,439	7169429,158	661188,800	7169428,580	1,361	-0,578
116	661520,439	7170724,158	661520,070	7170723,920	-0,369	-0,238
117	661836,439	7169304,158	661836,420	7169303,420	-0,019	-0,738
118	661759,439	7170122,158	661759,150	7170121,650	-0,289	-0,508
119	661922,439	7170605,158	661922,670	7170604,600	0,231	-0,558
120	660756,439	7169678,158	660757,140	7169676,940	0,701	-1,218
121	662582,439	7169932,158	662582,500	7169931,910	0,061	-0,248
122	661596,439	7171183,158	661596,660	7171182,550	0,221	-0,608
124	659362,439	7170592,158	659363,370	7170591,120	0,931	-1,038
125	659401,439	7169635,158	659401,860	7169635,370	0,421	0,212
126	659338,439	7169022,158	659339,680	7169020,950	1,241	-1,208
128	660954,439	7169059,158	660955,230	7169057,940	0,791	-1,218
129	662278,439	7169257,158	662279,520	7169256,870	1,081	-0,288
130	662308,439	7169647,158	662308,310	7169646,120	-0,129	-1,038
131	662176,439	7171095,158	662177,790	7171096,310	1,351	1,152
132	662550,439	7168989,158	662552,370	7168988,050	1,931	-1,108
133	660998,439	7171056,158	660998,250	7171056,920	-0,189	0,762

FIGURA 34 – VETORES RESULTANTES DA DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS.



Com as coordenadas Norte e Leste, dos pontos de checagem na ortoimagem gerada pelo modelo APM e na base cartográfica, gerou-se as diferenças entre as coordenadas, a respectiva média, variância e o desvio padrão para as direções Norte e Leste. As tabelas 24 e 25 apresentam os respectivos valores, bem como o erro planimétrico calculado para a ortoimagem.

TABELA 24 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS

\bar{X}_E	0,457
\bar{X}_N	-0,668
S^2_E	0,485
S^2_N	0,558
S_E	0,696
S_N	0,747

\bar{X}_E , \bar{X}_N - valores da média aritmética para as direções leste e norte; S^2_E , S^2_N - valores da variância nas direções leste e norte; S_E , S_N - desvio-padrão para as direções leste e norte.

Analisando os dados estatísticos na tabela 24, observa-se que os valores foram próximos para ambas direções, indicando variabilidade dos dados semelhantes nas direções Norte e Leste.

TABELA 25 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS

Ponto	Erro planimétrico (m)
104	1,456
106	1,567
107	2,738
108	1,327
110	0,824
111	0,663
113	0,544
115	1,479
116	0,439
117	0,738
118	0,584
119	0,604
120	1,405
121	0,255
122	0,647
124	1,394
125	0,471
126	1,732
128	1,452
129	1,119
130	1,046
131	1,775
132	2,226
133	0,785
\bar{x}	1,136
s^2	0,378
s	0,615

\bar{x} - média aritmética; s^2 - variância; s - desvio padrão

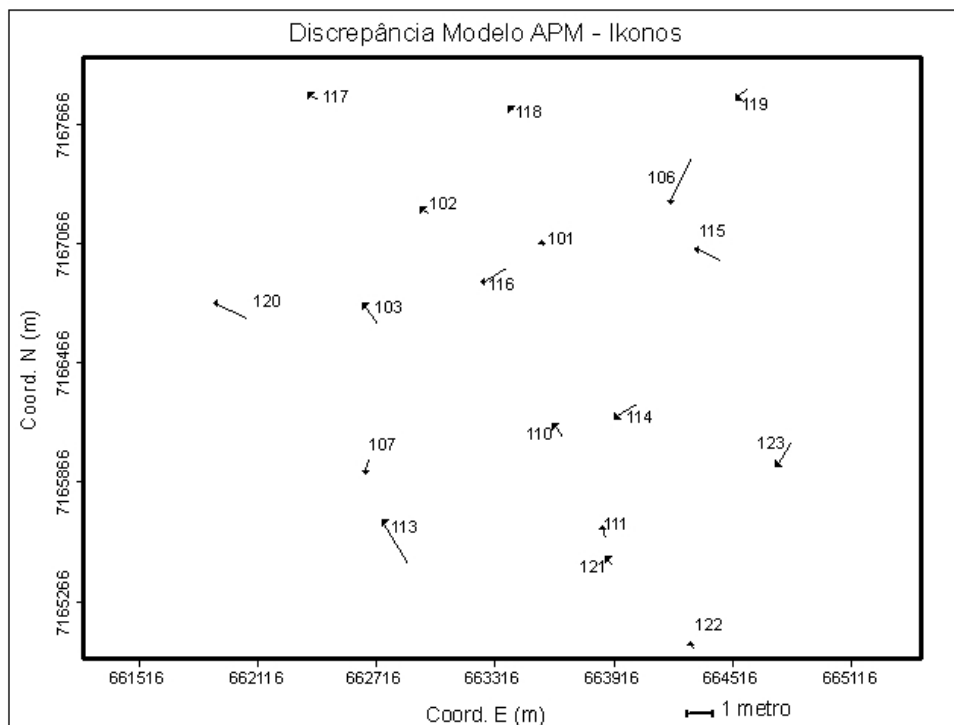
Observando-se a tabela 25, notam-se os pequenos valores para a média e desvio padrão do erro planimétrico na ortoimagem da área 1, próximos a 1 pixel da imagem ou menores, respectivamente.

A tabela 26 apresenta as diferenças entre as coordenadas da base cartográfica e da ortoimagem gerada com o modelo APM, para os pontos de checagem da área 2 para a imagem IKONOS. A figura 35 ilustra os vetores resultantes da diferença entre as coordenadas.

TABELA 26– DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO APM COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS

Ponto	Coordenadas ortomagem		Coordenadas Terreno		Diferenças (m)	
	E	N	E	N	E	N
101	663525,121	7167080,374	663525,240	7167080,060	0,119	-0,314
102	662959,121	7167216,374	662958,680	7167216,660	-0,441	0,286
103	662697,121	7166661,374	662696,410	7166662,370	-0,711	0,996
106	664171,121	7167265,374	664172,180	7167267,570	1,059	2,196
107	662651,121	7165974,374	662650,910	7165973,740	-0,211	-0,634
110	663586,121	7166163,374	663586,550	7166162,640	0,429	-0,734
111	663833,121	7165650,374	663833,290	7165649,700	0,169	-0,674
113	662721,121	7165674,374	662722,400	7165672,160	1,279	-2,214
114	663892,121	7166188,374	663893,250	7166189,060	1,129	0,686
115	664297,121	7167042,374	664298,480	7167041,760	1,359	-0,614
116	663222,121	7166869,374	663223,410	7166870,120	1,289	0,746
117	662399,121	7167784,374	662398,600	7167784,730	-0,521	0,356
118	663387,121	7167737,374	663386,820	7167737,570	-0,301	0,196
119	664507,121	7167792,374	664507,780	7167792,950	0,659	0,576
120	662040,121	7166692,374	662038,380	7166693,140	-1,741	0,766
121	663887,121	7165449,374	663886,770	7165449,750	-0,351	0,376
122	664275,121	7165062,374	664275,310	7165062,010	0,189	-0,364
123	664713,121	7165945,374	664713,860	7165946,530	0,739	1,156

FIGURA 35– VETORES RESULTANTES DA DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS



Com as coordenadas Norte e Leste, dos pontos de checagem na ortoimagem gerada pelo modelo APM e na base cartográfica, gerou-se as diferenças entre as coordenadas, a respectiva média, variância e o desvio padrão para as direções Norte e Leste. As tabelas 27 e 28 apresentam os respectivos valores, bem como o erro planimétrico calculado para a ortoimagem.

TABELA 27 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS

\bar{X}_E	0,230
\bar{X}_N	0,155
S^2_E	0,711
S^2_N	0,934
S_E	0,843
S_N	0,969

\bar{X}_E , \bar{X}_N - valores da média aritmética para as direções leste e norte; S^2_E , S^2_N - valores da variância nas direções leste e norte; S_E , S_N - desvio-padrão para as direções leste e norte.

Analisando os dados contidos na tabela 27, notam-se que os valores da média, variância e desvio padrão para ambas as direções Norte e Leste, foram mais elevados quando comparados a área 1 na imagem IKONOS. Pois os valores relativos aos dados estatísticos da transformação APM encontrados para esta área foram maiores.

TABELA 28 – DADOS ESTATÍSTICOS ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS

Ponto	Erro planimétrico (m)
101	0,336
102	0,526
103	1,224
106	2,438
107	0,668
110	0,850
111	0,695
113	2,557
114	1,321
115	1,491
116	1,489
117	0,631
118	0,359
119	0,875
120	1,902
121	0,514
122	0,410
123	1,372
\bar{x}	1,092
s^2	0,468
s	0,684

\bar{x} - média aritmética; s^2 – variância; s – desvio padrão

A média obtida é aproximadamente o valor da resolução espacial da imagem, acima do valor encontrado na área 1. Os valores da variância e desvio padrão encontrados foram bastante próximos aos valores encontrados para a área 1 na imagem IKONOS.

8.4.3 Ortoimagens Quickbird geradas com o modelo RPC

Com os coeficientes polinomiais, contidos no arquivo RPB.txt da imagem Quickbird, e o MDT da região, gerou-se a ortorectificação das áreas de estudo, através do processo descrito no item 7.7, utilizando-se o modelo RPC.

A qualidade da ortorectificação gerada com os polinômios racionais foi comparada com a base cartográfica, através do cálculo da diferença entre as coordenadas dos pontos de checagem, utilizados na transformação APM, nas ortorectificações e as coordenadas destes na base cartográfica digital na escala 1:2000. A tabela 29 apresenta os valores encontrados para as áreas 1 e 2, respectivamente.

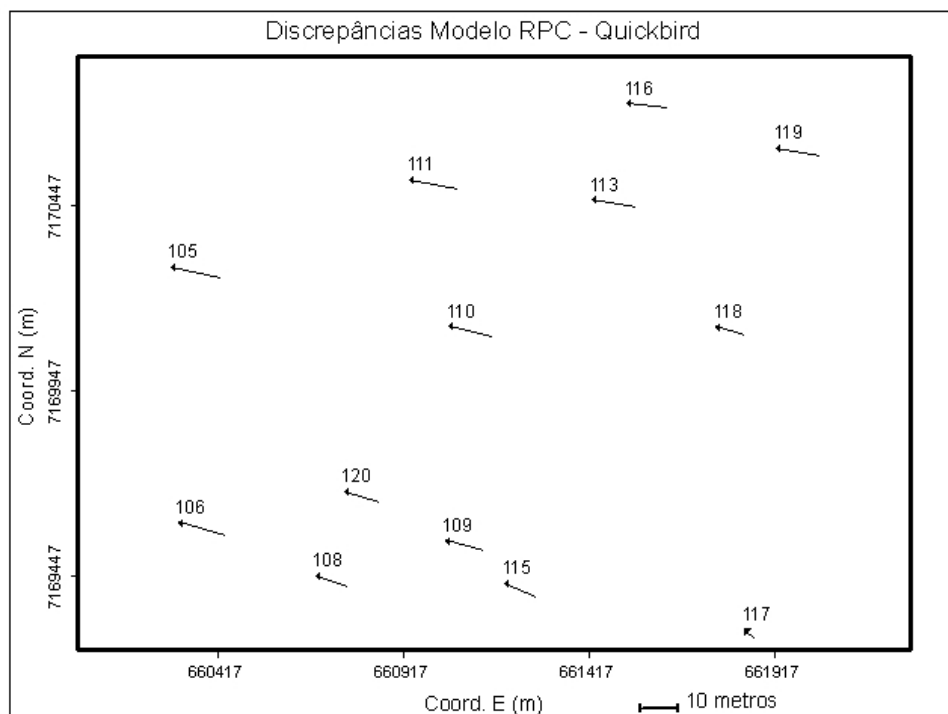
TABELA 29- DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO RPC COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD

Ponto	Coord. Ortoimagem		Coord. Base Cart.		E	N	Erro Plan. (m)
105	660277,863	7170284,763	660291,2	7170281,74	13,337	-3,023	13,675
106	660297,663	7169596,563	660310,4	7169592,92	12,737	-3,643	13,248
108	660672,663	7169452,563	660681,26	7169449,55	8,597	-3,013	9,110
109	661020,663	7169546,763	661030,88	7169544,12	10,217	-2,643	10,553
110	661026,663	7170125,163	661038,34	7170122,34	11,677	-2,823	12,013
111	660921,063	7170521,163	660933,99	7170518,79	12,927	-2,373	13,143
113	661416,063	7170465,363	661427,57	7170463,63	11,507	-1,733	11,637
115	661180,263	7169432,163	661188,8	7169428,58	8,537	-3,583	9,258
116	661509,063	7170725,163	661520,07	7170723,92	11,007	-1,243	11,077
117	661833,663	7169306,163	661836,42	7169303,42	2,757	-2,743	3,889
118	661751,463	7170123,963	661759,15	7170121,65	7,687	-2,313	8,027
119	661911,063	7170606,963	661922,67	7170604,6	11,607	-2,363	11,845
120	660747,663	7169679,963	660757,14	7169676,94	9,477	-3,023	9,947
						\bar{x}	10,571
						s^2	0,813
						s	0,901

\bar{x} - média aritmética; s^2 - variância; s - desvio padrão

Os pontos 101 e 107 não apresentaram identificação confiável, sendo portanto descartados da análise. A figura 36 apresenta os vetores resultante da diferença entre as coordenadas.

FIGURA 36 – VETORES DA DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHEGAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 1 – IMAGEM QUICKBIRD.



Analisando-se a figura 36 observa-se a tendência sistemática evidenciada pela direção e sentido de todos os vetores resultantes da diferença entre as coordenadas da ortoimagem e base cartográfica dos pontos de controle.

TABELA 30- DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO RPC COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD

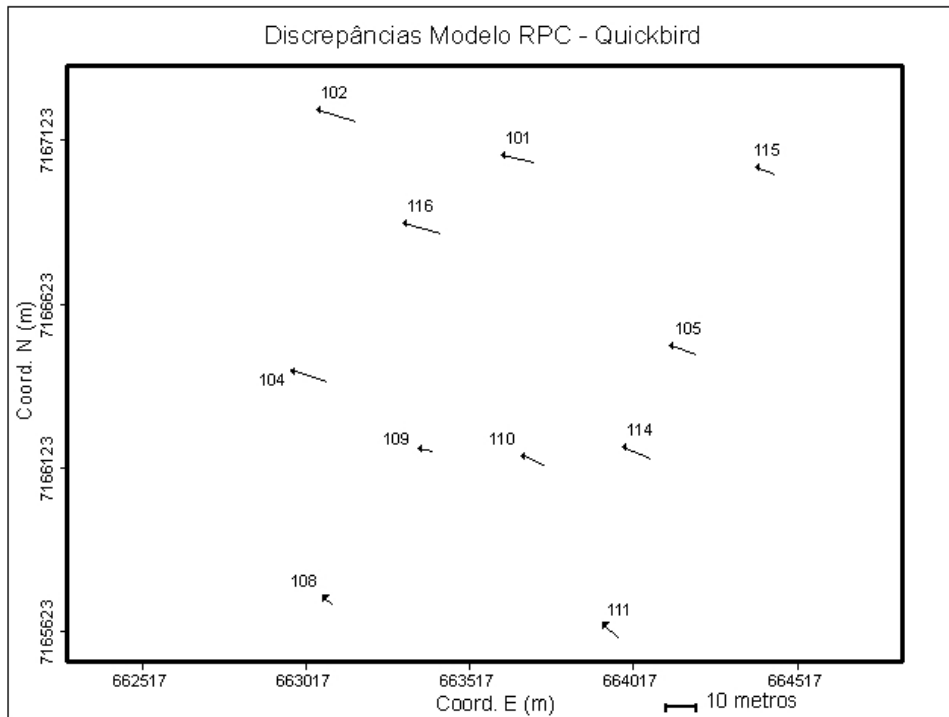
Ponto	Coord. Ortoimagem		Coord.Terreno		E	N	Erro Plan. (m)
101	663515,463	7167082,563	663525,240	7167080,060	9,777	-2,503	0,412
102	662946,663	7167220,563	662958,680	7167216,660	12,017	-3,903	0,575
104	662871,063	7166424,963	662882,040	7166421,340	10,977	-3,623	0,229
105	664030,263	7166501,763	664038,440	7166498,770	8,177	-2,993	0,023
108	662976,063	7165734,363	662979,210	7165731,550	3,147	-2,813	0,110
109	663264,663	7166183,763	663269,520	7166182,740	4,857	-1,023	4,502
110	663579,663	7166166,363	663586,550	7166162,640	6,887	-3,723	0,334
111	663828,063	7165654,563	663833,290	7165649,700	5,227	-4,863	2,952
114	663884,463	7166192,763	663893,250	7166189,060	8,787	-3,703	0,312
115	664292,463	7167044,163	664298,480	7167041,760	6,017	-2,403	0,550
116	663211,863	7166873,163	663223,410	7166870,120	11,547	-3,043	0,010
						\bar{x}	10,009
						s^2	0,910
						s	0,954

\bar{x} - média aritmética; s^2 - variância; s - desvio padrão

Nas tabelas 29 e 30, observa-se que os valores da média e desvio padrão foram maiores, em relação aos valores calculados para a ortoimagem gerada com o modelo APM, sobretudo na direção Leste. Conforme ilustra a figura 37, pode-se afirmar que houve uma falha na predição dos parâmetros pelo modelo polinomial racional e conseqüentemente a mesma foi evidenciada na tendenciosidade dos vetores dos resíduos.

De forma análoga a área 1, os pontos 103, 107,113, foram descartados da análise. A figura 37 apresenta os vetores das discrepâncias entre as coordenadas dos pontos de checagem na ortoimagem e na base cartográfica digital.

FIGURA 37– VETORES DA DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 2 – IMAGEM QUICKBIRD



Como na área 1, os vetores indicam a presença de perturbações sistemáticas na ortorectificação.

8.4.4 Ortoimagens IKONOS geradas com o modelo RPC

Com os coeficientes polinomiais, contidos no arquivo RPC.txt da imagem IKONOS, e o MDT da região, gerou-se a ortorectificação das áreas de estudo, através do processo descrito no item 7.7, utilizando-se o modelo RPC do programa.

A qualidade da ortorectificação gerada com os polinômios racionais foi comparada com a base cartográfica, através do cálculo da diferença entre as coordenadas dos pontos de checagem, utilizados na transformação APM, na ortorectificação e as coordenadas destes na base cartográfica. A tabela 31 apresenta os valores encontrados para as áreas 1 e 2, respectivamente.

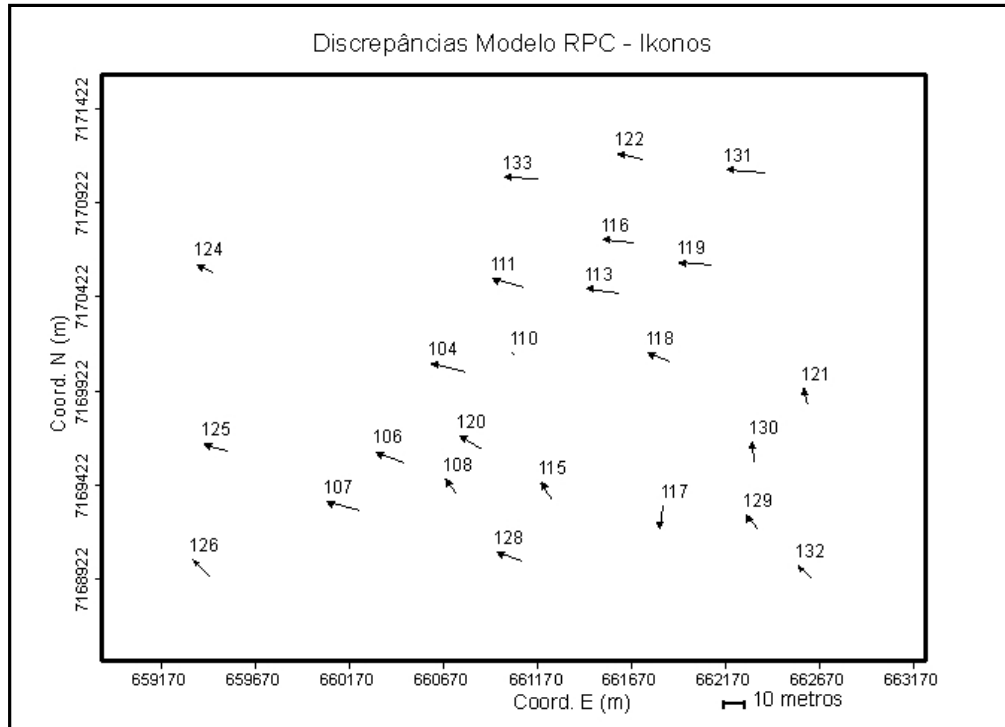
TABELA 31- DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO RPC COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS

	Coord. Ortoimagem		Coord. Base Cart.		E	N	Erro plan. (m)
104	660586,463	7170070,163	660604,910	7170065,780	18,447	-4,383	18,961
106	660295,463	7169598,163	660310,400	7169592,920	14,937	-5,243	15,830
107	660031,463	7169332,163	660049,240	7169327,540	17,777	-4,623	18,368
108	660675,463	7169457,163	660681,260	7169449,550	5,797	-7,613	9,569
110	661023,463	7170124,163	661038,340	7170122,340	14,877	-1,823	14,988
111	660917,463	7170523,163	660933,990	7170518,790	16,527	-4,373	17,096
113	661409,463	7170466,163	661427,570	7170463,630	18,107	-2,533	18,283
115	661182,463	7169437,163	661188,800	7169428,580	6,337	-8,583	10,669
116	661503,463	7170725,163	661520,070	7170723,920	16,607	-1,243	16,653
117	661838,463	7169315,163	661836,420	7169303,420	-2,043	-11,743	11,919
118	661747,463	7170126,163	661759,150	7170121,650	11,687	-4,513	12,528
119	661905,463	7170606,163	661922,670	7170604,600	17,207	-1,563	17,278
120	660745,463	7169684,163	660757,140	7169676,940	11,677	-7,223	13,730
121	662580,463	7169940,163	662582,500	7169931,910	2,037	-8,253	8,501
122	661583,463	7171185,163	661596,660	7171182,550	13,197	-2,613	13,453
124	659354,463	7170587,163	659363,370	7170591,120	8,907	3,957	9,746
125	659389,463	7169639,163	659401,860	7169635,370	12,397	-3,793	12,964
126	659330,463	7169030,163	659339,680	7169020,950	9,217	-9,213	13,032
128	660941,463	7169062,163	660955,230	7169057,940	13,767	-4,223	14,400
129	662273,463	7169264,163	662279,520	7169256,870	6,057	-7,293	9,480
130	662307,463	7169657,163	662308,310	7169646,120	0,847	-11,043	11,075
131	662157,463	7171095,163	662177,790	7171096,310	20,327	1,147	20,359
132	662544,463	7168995,163	662552,370	7168988,050	7,907	-7,113	10,636
133	660980,463	7171057,163	660998,250	7171056,920	17,787	-0,243	17,789
						\bar{x}	14,055
						s^2	11,536
						s	3,396

\bar{x} - média aritmética; s^2 – variância; s – desvio padrão

A figura 38 apresenta os vetores resultante da diferença entre as coordenadas.

FIGURA 38– VETORES DA DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 1 – IMAGEM IKONOS



Os vetores resultantes da diferença entre coordenadas da ortofoto e base cartográfica, apresentam uma tendência sistemática, identificada pela direção e sentido a que todos os pontos apresentam.

TABELA 32 - DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS OBTIDAS NA ORTOIMAGEM GERADA ATRAVÉS DO MODELO RPC COM AS COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA, ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS

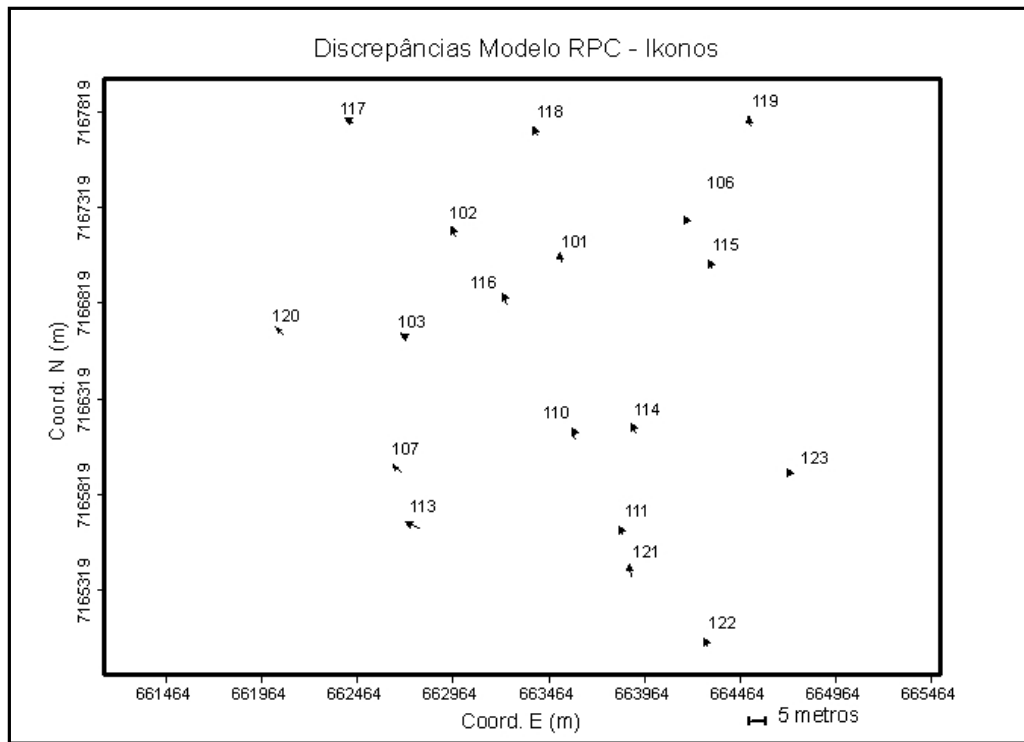
Ponto	Coord. Ortoimagem		Coord. Base Cart.		E	N	Erro Plan. (m)
101	663524,863	7167085,363	663525,240	7167080,060	0,377	-5,303	5,316
102	662956,863	7167222,363	662958,680	7167216,660	1,817	-5,703	5,985
103	662692,863	7166665,363	662696,410	7166662,370	3,547	-2,993	4,641
106	664169,863	7167270,363	664172,180	7167267,570	2,317	-2,793	3,629
107	662645,863	7165978,363	662650,910	7165973,740	5,047	-4,623	6,844
110	663584,863	7166168,363	663586,550	7166162,640	1,687	-5,723	5,966
111	663830,863	7165654,363	663833,290	7165649,700	2,427	-4,663	5,257
113	662714,863	7165675,363	662722,400	7165672,160	7,537	-3,203	8,189
114	663890,863	7166194,363	663893,250	7166189,060	2,387	-5,303	5,815
115	664296,863	7167046,363	664298,480	7167041,760	1,617	-4,603	4,879
116	663220,863	7166876,363	663223,410	7166870,120	2,547	-6,243	6,743
117	662393,863	7167788,363	662398,600	7167784,730	4,737	-3,633	5,970
118	663384,863	7167742,363	663386,820	7167737,570	1,957	-4,793	5,177
119	664506,863	7167798,363	664507,780	7167792,950	0,917	-5,413	5,490
120	662033,863	7166697,363	662038,380	7166693,140	4,517	-4,223	6,184
121	663885,863	7165456,363	663886,770	7165449,750	0,907	-6,613	6,675
122	664272,863	7165066,363	664275,310	7165062,010	2,447	-4,353	4,994
123	664711,863	7165950,363	664713,860	7165946,530	1,997	-3,833	4,322
						\bar{x}	5,671
						s^2	1,064
						s	1,031

\bar{x} - média aritmética; s^2 – variância; s – desvio padrão

Observa-se na tabela 32, que os valores encontrados para média, variância e desvio padrão são menores do que aqueles encontrados para a área 1 na imagem IKONOS e até mesmo para as áreas de estudo na imagem Quickbird.

A Figura 39 apresenta os vetores resultante da diferença entre as coordenadas.

FIGURA 39– VETORES DA DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS DOS PONTOS DE CHECAGEM COLETADAS NA BASE CARTOGRÁFICA E NA ORTOIMAGEM, ÁREA 2 – IMAGEM IKONOS



Novamente, a tendência sistemática dos vetores resultantes é observada para esta área de estudo.

8.5 Ortoimagens geradas

8.5.1 Ortoimagens Quickbird

A sobreposição do vetor contendo as edificações, extraído da base cartográfica digital as ortofotografias Quickbird, nas áreas 1 e 2, revelam que a modelagem APM atingiu resultados satisfatórios, assim como o método de amostragem bi-linear, escolhido para a construção da ortofotografia.

O afastamento das feições na ortofotografia do vetor ocorreram em regiões próximas aquelas onde os pontos de checagem apresentaram um maior valor nos resíduos, quando no processo de ajustamento. No entanto, esse afastamento foi proporcional ao valor indicado nos resíduos do ajustamento.

As ortofotografias das áreas 1 e 2 são apresentadas no ANEXO 5A e 5B.

8.5.2 Ortoimagens IKONOS

De forma análoga às ortofotografias Quickbird, a sobreposição do vetor contendo as edificações, extraído da base cartográfica digital as ortofotografias Quickbird, nas áreas 1 e 2, revelam que a modelagem APM atingiu resultados satisfatórios, assim como o método de amostragem bi-linear, escolhido para a construção da ortofotografia.

O afastamento das feições na ortofotografia do vetor ocorreram em regiões próximas aquelas onde os pontos de checagem apresentaram um maior valor nos resíduos, quando no processo de ajustamento. No entanto, esse afastamento foi proporcional ao valor indicado nos resíduos do ajustamento.

As ortofotografias das áreas 1 e 2 são apresentadas no ANEXO 5C e 5D.

8.6 Análise dos Resultados

TABELA 33 - RESUMO DOS RESULTADOS

		Ptos	Ptos	Resíduos	Erro
		Controle	Checagem	Ajust.	Plan.
Quickbird	Área 1	APM 14 (0,686 m)	16 (1,304 m)	Sem tendência	$\bar{x} = 0,622\text{m}$ $s = 0,398\text{ m}$
		RPC -	-	Tendência Leste	$\bar{x} = 10,57\text{m}$ $s = 0,90\text{ m}$
	Área 2	APM 18 (0,664 m)	15 (2,285 m)	Sem tendência	$\bar{x} = 0,717\text{m}$ $s = 0,495\text{ m}$
		RPC -	-	Tendência Leste	$\bar{x} = 10,09\text{m}$ $s = 0,954\text{ m}$
IKONOS	Área 1	APM 21 (0,585 m)	25 (1,392 m)	Sem tendência	$\bar{x} = 1,136\text{m}$ $s = 0,615\text{ m}$
		RPC -	-	Tendência Leste	$\bar{x} = 14,05\text{m}$ $s = 3,39\text{ m}$
	Área 2	APM 22 (0,684 m)	19 (1,539 m)	Sem tendência	$\bar{x} = 1,092\text{m}$ $s = 0,684\text{ m}$
		RPC -	-	Tendência Leste	$\bar{x} = 5,67\text{m}$ $s = 1,031\text{ m}$

Os resultados expostos no item anterior, referente a cada área de estudo, podem ser visualizados de forma resumida na tabela 33, a fim de tornar clara a análise dos mesmos, disposta a seguir.

As ortoimagens Quickbird das áreas 1 e 2, geradas com o modelo APM, apresentaram valores de erro médio quadrático RMS de mesma grandeza, 0,67 metros, o que corresponde a aproximadamente a resolução espacial da imagem. Os vetores dos resíduos do ajustamento, visualizados nas figuras 28 e 29, apresentam uma distribuição não tendenciosa dos vetores em relação à direção e sentido. Contudo, na região central da área 1, percebeu-se que seis pontos com maiores valores de resíduos localizavam-se próximos à região central da imagem. Confrontando-se os valores altimétricos destes pontos com os valores dos respectivos resíduos, não houve o estabelecimento de algum padrão de comportamento, ou seja, o acúmulo dos maiores valores dos resíduos na região central não tem relação com a altimetria da região.

Analisando os vetores resultantes das discrepâncias estabelecidas pela comparação das coordenadas da base cartográfica digital e das coordenadas nas ortoimagens, para os pontos de controle das áreas 1 e 2, figuras 30 e 31, observa-se que 81% e 60%, respectivamente, dos vetores apresentam direção próxima ao alinhamento de varredura transversal (*along-tracking*), com sentido para leste.

De forma análoga, as áreas 1 e 2 das ortoimagens IKONOS obtiveram valores do erro médio quadrático RMS de mesma grandeza, em torno de 1,11 metros, o que corresponde a aproximadamente a resolução espacial da imagem. Os vetores dos resíduos do ajustamento nos pontos de controle, figuras 32 e 33, indicaram uma distribuição não tendenciosa, referentes à direção e sentido. Analisando os vetores resultantes das discrepâncias estabelecidas pela comparação das coordenadas da base cartográfica digital e das coordenadas nas ortoimagens, para os pontos de controle das áreas 1 e 2, figuras 34 e 35, observa-se que 92% e 68 %, respectivamente, dos vetores apresentam direção próxima ao alinhamento de varredura transversal (*along-tracking*), com sentido para leste.

Analisando as figuras 36, 37, 38 e 39, os vetores resultantes da discrepância das coordenadas da base cartográfica e das coordenadas das ortoimagens Quickbird e IKONOS, geradas com o modelo polinomial racional, para os pontos de checagem nas áreas 1 e 2, apresentaram uma distribuição tendenciosa à direção próxima ao alinhamento de varredura transversal (*along-tracking*) e com sentido para leste. Erros residuais semelhantes foram encontrados em HANLEY & FRASER (2004) e CROITORU *et al* (2004), sendo sugestivamente atribuídos às perturbações na velocidade de varredura associados a distorções de primeira ordem na escala, e que o modelo matemático não foi capaz de eliminar.

As ortoimagens Quickbird e IKONOS analisadas sob o aspecto da qualidade posicional apresentaram precisão um pouco acima do valor correspondente a $\frac{1}{2}$ da resolução espacial da imagem, sendo semelhantes aos resultados encontrados em YAMAKAWA & FRASER (2004).

9. CONCLUSÕES

Baseando-se nas informações expostas nos itens anteriores as seguintes conclusões puderam ser formuladas:

- Os resultados obtidos para as imagens IKONOS e Quickbird utilizando-se os modelos APM e RPC para a ortoretificação, foram significativamente diferentes. Há identificação de uma tendência sistemática nas ortoimagens geradas com o modelo RPC aliado à baixa qualidade posicional encontrada, versus a precisão de aproximadamente um pixel da ortoimagem Quickbird; o valor de meio pixel da ortoimagem IKONOS, somado a ausência de tendências sistemáticas nos resíduos nas ortoimagens geradas com o modelo APM, destaca-o, neste caso, como uma transformação adequada à ortoretificação de imagens de alta resolução.
- As características do tipo de imagem, neste caso IKONOS Stereo Par e Quickbird *Standard*, ambas em modo de varredura *Reverse*, afetam o desempenho dos modelos, e conseqüentemente a qualidade posicional final obtida. Os produtos disponíveis no mercado são variados e estão agregados ao tipo de pré-processamento efetuado pelas empresas que as comercializam, então a análise do tipo de produto é fundamental para a correta interpretação do desempenho desses modelos para a ortoretificação.
- As áreas 1 possuem um número de linhas inferior ao número de colunas, e apresentaram maior porcentagem de vetores dos resíduos das discrepâncias com direção aproximada a direção de varredura transversal, para os pontos de checagem, sobretudo com relação à área 2 para as ortoimagens Quickbird e IKONOS. No entanto, a ocorrência desta direção, não pode ser considerada tendenciosa, mas pode estar ligada com o tamanho da área de estudo, ou seja a relação linha coluna. Pois, de acordo com a geometria de imageamento do satélite, a direção de varredura transversal está relacionada às linhas da imagem. E pode corresponder a um indício de que o modelo apresenta restrições quanto a esse

relacionamento. Neste caso, a aplicabilidade do modelo APM não foi afetada, analisando-se o tipo da imagem ou ao relacionamento do tamanho da imagem, no entanto, deve-se investigar e efetivamente comprovar a deficiência do modelo.

- Os resultados obtidos com modelo polinomial racional na ortoretificação das imagens Quickbird e IKONOS foram semelhantes aos encontrados em outros estudos, conforme descrito no item 8.6, sobretudo a tendenciosidade significativa dos vetores dos resíduos dos pontos de checagem.
- O modelo de transformação APM conseguiu modelar as deformações existentes nas imagens Quickbird e IKONOS, atingindo uma precisão em torno de 0,5 m a 0,7 m, para a ortoimagens, portanto pode atender as resoluções dispostas no decreto lei n.º89.817 de 19 de junho de 1984 para os fins a que se destina. No entanto, deve-se ter cautela quanto ao uso generalizado de ortoimagens geradas com o modelo APM, sem análise da geometria de imageamento e da precisão posicional, uma vez que o modelo ainda é objeto de estudo em muitas pesquisas.
- A imagem IKONOS apresentou melhor resultado quanto a qualidade posicional e visual, devido ao tipo de pré-processamento (*Pan-Sharpned*). O tipo de pré-processamento (dados fusionados ou apenas reamostrados) e as características de coleta da imagem (*Forward*, *Reverse* e *Nadir*) afetam o desempenho do modelo, obviamente estes pressupostos interferem tanto na qualidade visual dos dados quanto na qualidade posicional, pois estão intimamente ligados a formação das imagens.
- O DTM utilizado, para os modelos APM e RPC mostrou-se adequado, contudo, a utilização das alturas das edificações aumentaria a precisão obtida bem como, permitiriam o estudo e análise da oclusão nas ortoimagens geradas.
- As dificuldades encontradas nesta pesquisa estão relacionadas a coleta dos pontos de checagem e controle, devido as diferenças entre a base cartográfica digital na escala 1.2000 do ano de 1998 e as imagens Quickbird e IKONOS adquiridas em 2004. Além da falta de critérios e normas para a avaliação posicional dos produtos gerados com dados de sensoriamento remoto.

9.1 Recomendações

- Deve-se avaliar o comportamento do modelo APM para imagens com características de imageamento e pré-processamento diversos, em regiões de relevo montanhoso.
- Avaliar o uso do MDE, Modelo Digital de Elevação, em substituição ao MDT, a fim de investigar a influência das alturas no desempenho do tamanho e a geração de áreas de oclusão.
- Deve-se aumentar o tamanho das imagens utilizadas, a fim de investigar a relação do desempenho do modelo APM com relação ao tamanho das imagens, sem o comprometimento da precisão.
- Deve-se avaliar a utilização de outros modelos como a DLT, *Direct Linear Transform*, que é um caso particular dos modelos polinomiais racionais, para a ortoretificação de imagens de alta resolução, estabelecendo vantagens e desvantagens em relação a outros modelos que consideram a altura do relevo.
- Contudo, é necessária a realização de mais testes com imagens de diversos tipos, *Basic*, *Geo*, *Ortho*, dos sensores Quickbird e IKONOS, efetuando comparações e estabelecendo critérios para a utilização do modelo APM, a fim de que este possa ser consolidado cientificamente para ortoretificação de imagens de satélite.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMHAR, F.; JANSA, J.; RIES, C. **The generation of true orthophotos using a 3D building model in conjunction with a conventional DTM.** IAPRS. V. 32/4. Stuttgart, 1998. pp. 16-22.

ANDRADE, J.B. **Fotogrametria.** Curitiba, 258p. 1998.

BALTSAVIAS, E.; PATERAKI, M.; ZHANG, L. **Radiometric and geometric evaluation of IKONOS Geo Images and their use for 3D building modelling.** Proc. Joint ISPRS Workshop "High Resolution Mapping From Space 2001". Hannover, Germany, 79-21 September 2001.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information system for land resources assessment.** Oxford: Oxford University Press, 1986. 194p.

CHAVES, P.S.J.; ANDERSON, J.A. **Comparison of three different methods to merge multiresolution on multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol57. n.º 3. 1991. 295-303p.

CHAVES, P.S.J.; BOWEL, J.A. **Comparison of spectral information content of Landsat thematic mapper and SPOT for three diferent sites in Phoenix.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 54. n.º 12. 1988. 1699-1708p.

CHEN, L.; LEE, L. **Rigorous generation of digital orthophotos from SPOT images.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 59. n.º 5. May 1993. 655-661p.

CHEN, H.S. **Space Remote Sensing Systems an Introduction**. Academic Press. Inc. Orlando, Florida, 1985. 269p.

CHEN, L.; LO, C. **Generation of digital orthophotos from IKONOS geo images**. 22nd Conference on Remote sensing 5 -9 November 2001. Singapore. Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP). National University of Singapore: Singapore Institute of Surveyors and Valuers (SISV). Asian Association on Remote Sensing (AARS).

CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. RIALP S.A. Madrid. 1990. 451p.

CROITORU A.; HU Y.; XU Z.; WANG F.; LENSON P. **Single and stereo based 3d metrology from high-resolution imagery :methodologies and accuracies**. Internacional Archives of photogrammetry and Remote Sensing. Istambul. Vol. 20. 2004. 12-23p.

FRASER, C.S.; HANLEY, H.B.; YAMAKAWA T. **Sub-metre geopositioning with ikonos geo imagery**. Joint ISPRS Workshop “High Resolution Mapping From Space 2001”. Hannover, Germany, 79-21 September 2001.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações**. UFPR. Curitiba. 1994. 315p.

GERLACH, F. **Characteristics of space imaging’s one-meter resolution imagery products**. Internacional Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B1. Amsterdam 2000.

GUPTA, R. **Remote sensing geology**. Springer, Berlin Heidelberg, 1991. 356p.

HARRIS, J.R.; MURRAY, R. **IHS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 56. n.º 12. December 1990. 1631-1641p.

HATTORIS.; ONO, T.; FRASER, C. **Orientation of high-resolution satellite images based on affine projection**. Internacional Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam 2000.

JENSEN, J.R. **Introduction digital image processing : a remote sensing perspective**. 2ed. Saddle River, NJ: Prentice Hall. 1996. 316p.

KOZCIAK, S.; ROSTIROLLA, S.P.; FIORI, A.P. **Análise comparativa entre métodos de interpolação para construção de modelos numéricos do terreno**. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, Editora da UFPR. n,47. 1999. 19-30 p.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 3ed. USA. John Wiley & Sons, Inc 1994. 750p.

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

MAACK, R. **Geografia física do estado do Paraná**. Curitiba. 1968. 350p.

MITISHITA, E.; SARAIVA, C. **Modelos matemáticos para fins de monorestituição de imagens de alta resolução IKONOS 2 – GEO**. Anais do Simpósio Brasileiro de Geomática. Presidente Prudente – SP. 9-13 julho 2002.

OSTMAN, A. **Quality control and accuracy estimation of digital elevation models, in papers on digital elevation, image correlation and map maintenance.** Sweder. 1987. The Royal Institute of Technology – Department of Photogrammetry.

PETTINATI, F. **Modelamento digital e representação gráfica de superfícies.** São Paulo, 1983. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP.

RICHARDS, J.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: Introduction.** 3 ed. Springer, Berlin, 1999. 362p.

SHI, W.; AHAKER, A. **Analysis of terrain elevation effects on IKONOS imagery rectification accuracy by using non-rigorous models.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 69. n.º 12. December 2003.. 1359-1366 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Normas para apresentação de trabalhos.** Curitiba, 2000.

TAO, V. **Investigation of the Rational Function Model.** ASPRS. Washington D.C. Maio 2000. 22-26 p.

TAO, C.; MERCER, J.; SCHNICK, S.; ZHANG, Y. **Image rectification using a generic sensor model – Rational Function Model,** International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B3. Amsterdam 2000.

VOLOTÃO C. F. **Geração de ortoimagens para aplicações urbanas: desenvolvimento das equações e protótipo experimental.** Dissertação de mestrado. INPE. 2001. 76 p.

WEIBEL, R.; HELLER, M. **Digital terrain modelling**. Geographic information Systems. New York. Logman Scientific Technical, 1991. 649p.

WOLF, P.R. **Elements of photogrammetry**. 2ed. New York: MacGraw-Hill. 1983. 628 p.

ZHOU, G.;LI, R. **Accuracy evaluation of ground points from IKONOS high-resolution satellite imagery**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 6. n.º9. September 2000. 1103-1112p.

Documentos Consultados Online

BIAS, E. S. Análise de precisão e do custo das imagens de alta resolução IKONOS Ortokit para geração de mapas cartográficos. Disponível em: www.cartografia.org.br/xxi_cbc.htm. Acesso em 20 de outubro de 2004.

BOCCARDO, P.; MONDINO E.B.; TONOLO G.; LINGUA A. Orthorectification of High-Resolution Satellite Images. Disponível em www.isprs.org/istanbul2004/comm1/paper/6.pdf. Acesso em 20 de outubro de 2004.

DIGITAL GLOBE. www.digitalglobe.com. Acesso em 04 de agosto de 2004.

HANLEY, H.; FRASER, C, Sensor Orientation for High-Resolution satellite Imagery: Further Insights into Bias-compensated RPC's. Disponível em: www.isprs.org/istanbul2004/comm1/5.pdf. Acesso em 10 de outubro de 2004.

LANDIM, P.M.B. Introdução à confecção de Mapas pelo Software Surfer, Rio Claro: UNESP. 2002. Disponível em: www.re.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html. Acesso em 16 de Abril de 2004.

FELGUEIRAS, C.A. Modelagem numérica de terreno. Disponível em: www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/4mnt.pdf. Acesso em 7 Abril de 2004.

OPENGIS CONSORTIUM. 1999b. The OpenGIS Abstract Specification – topic 16 : Image Coordinate Transformation Services. Disponível em: <http://opengeospacial.org>. Acesso em 07 de novembro de 2004.

Pushbroom Imaging System. Disponível em: www.kodak.com/US/en/government/ias/heritage/IKONOS.shtml Acesso em 22 de março de 2004.

HU, Y.; TAO, V.; CROITORU, A. Understanding the Rational Function Model: Methods and Applications. www.isprs.org/istanbul2004/comm4/papers/423.pdf. Acesso em 07 de novembro de 2004.

Space Imaging Home Page. Disponível em: www.spaceimaging.com. Acesso em 10 Setembro de 2003.

Space Imaging. IKONOS Imagery products and product guide. Disponível em: www.spaceimaging.com. Acesso em 17 de março de 2004.

TOUTIN, T. Geometric Processing of IKONOS Geo Images with DEM. Disponível em: www.photogrammetry.ethz.ch/general/persons/jana/isprs/tut_mapup/isprs_tutorial_hannover2.pdf. Acesso em 15 de agosto de 2003.

VOLPE, F. Geometrical Processing of Quickbird High-Resolution Satellite Data. Disponível em: www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/2003/workshop/contents.htm. Acesso em 10 de agosto de 2004.

XU, J. Z. The Rational Function Model (RFM) in Photogrammetric Mapping: Method and Accuracy. www.geoict.net/resources/publications/final_report_jeff.pdf. Acesso em 07 de novembro de 2004.

YAMAKAWA, T.; FRASER, C. The Affine Projection Model for Sensor Orientation Experiences with High-Resolution Satellite Imagery. Disponível em: www.isprs.org/istanbul2004/comm1/papers/27.pdf. Acesso em 07 de novembro de 2004.

ANEXO 1
O satélite sensor IKONOS

1 O SATÉLITE KONOS II

Em 24 de setembro de 1999, foi lançado da base de Vandenberg na Califórnia (USA), o primeiro satélite comercial com resolução de um metro, denominado IKONOS II. Com uma vida operacional de sete anos, uma órbita sol síncrona, como a maioria dos satélites de sensoriamento remoto, e com uma inclinação da órbita com relação ao equador de $98,1^\circ$, uma altitude de 681 quilômetros, este sensor é capaz de coletar imagens posicionadas ao nadir como também *off* do nadir, isto é, com inclinação superior a 26° .

De acordo com GERLACH (2000, p.128), a altitude de 681 quilômetros, foi escolhida, para favorecer um padrão único de visitas diárias. Observações sobre um mesmo ponto podem ocorrer, na região do equador, com um ângulo de 10° de inclinação, em 11 dias e com 1° de inclinação em 140 dias.

O sistema da câmara foi construído por *Eastman Kodak Company* em *Rochester (New York - USA)*. Possui uma distância focal de 10 metros e três espelhos oscilantes que juntamente com arranjos lineares de sensores (CCD), que operam na faixa de comprimento de onda de 0,4 a $0,9 \mu\text{m}$, coletam imagens pancromáticas e multiespectrais com uma diferença de 0,5 segundos entre a captura de ambas.

A capacidade do satélite em coletar imagens transversais, isto é fora do nadir, pode aumentar o tempo de re-visita. De acordo com GERLACH (2000, p. 128), o aumento do ângulo de abertura, para captura de imagens transversais, acarreta em um aumento do tamanho do pixel. No entanto, segundo KODAK (2000, p. 1), a altitude do satélite garante com que imagens transversais mantenham um tamanho do pixel no terreno de no mínimo 1 metro.

O sistema do sensor IKONOS conta com três antenas GPS (*Global Posicion System*) e três rastreadores estelares digitais, que garantem e mantêm precisamente a posição e atitude da câmara. A plataforma foi construída

com rigidez suficiente para reduzir a vibração e contribuir para uma órbita mais estável, percorrendo o planeta em 98,3 minutos e cruzando o equador sempre as 10:30,.

O tamanho dos sensores pancromático e multiespectral é de 1,2 μ m e 4,8 μ m, respectivamente. Possui ainda 13 816 detectores em um arranjo linear de sensores o que defini um campo de visão de 11 quilômetros no nadir e 13 quilômetros *off nadir*. Com isso, tem-se uma resolução espacial de 0,82 e 3,26 para imagens pancromáticas e multiespectrais tomadas ao nadir, respectivamente.

A resolução radiométrica deste sensor é melhor do que a de outros sensores remotos, 11 bits e possui uma resolução temporal de 140 dias, no entanto esta resolução pode ser melhorada, uma vez que o satélite pode ser programado para efetuar visadas laterais, com isso a resolução temporal pode chegar a 1,5 dia para imagens no modo pancromático e 2,9 dias para o multiespectral. A figura abaixo ilustra o tempo de re-visita em função da latitude da área de interesse.

O sensor também pode ser programado para tomada de pares estereoscópicos, nas posições 26° para frente (*forward*), para o nadir e 26° pós-nadir (*Backward*). Com isso tem-se imagens convergentes, e conseqüentemente pares estereoscópicos com ângulo de convergência de 26° e 52°. Segundo PARKER¹ in ZHOU *et al* (2000, p. 1104), como o intervalo de coleta entre as tomadas é mínimo, as condições atmosféricas das áreas imageadas são bastante próximas, assegurando uma alta qualidade na coleção de imagens. A coleção de imagens estereoscópicas cobre uma faixa de 11 quilômetros.

A tabela 1, apresenta um resumo de todos os dados e características do sensor IKONOS.

¹ PARKER, J., 1997. The Advantages of In-Track Stereo Acquisition from High-Resolution Earth Resources Satellites. Proceedings of ACSM/ASPRS. Annual Convention & Exposition, 04-06 April, Seattle, Washington, 3:276-282

TABELA 1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA IKONOS II

Data de lançamento	24 de setembro de 1999
Vida Operacional	Superior a sete anos
Órbita	98,1°, sol síncrona
Velocidade da Órbita	7,5 quilômetros por segundos
Número de revoluções ao redor da Terra	14,7 em 24 horas
Tempo de uma revolução	98 minutos
Altitude	681 quilômetros
Resolução	Nadir: 0,82 metros – pancromática 3,2 metros - multiespectral 26° off nadir: 1,0 metro – pancromática 4,0 metros - multiespectral
Cobertura	11,3 quilômetros no nadir 13,8 metros – 26° off nadir
Tempo de cruzamento pelo Equador	Normalmente 10:30 a.m., tempo solar
Tempo de re-visita	Pancromática – 2,9 dias Multiespectral – 1,5 dia Para latitudes ao longo de 40°. Quanto maior a latitude menor o tempo de re-visita.
Comprimento das bandas espectrais	Pancromática 0.45 a 0.90 Multiespectral Azul 0.45 a 0.52μ Verde 0.51 a 0.60μ Vermelho 0.63 a 0.70μ Infra-vermelho próximo 0,76 a 0,85μ

FONTE: ADAPTADO DO SITE WWW.SPACE IMAGING.COM

A Space Imaging, empresa que comercializa as imagens, dispõe basicamente de seis opções de produtos, segundo GERLACH (2000, p. 135), que se diferenciam pelos níveis de correção empregados:

a – Carterra Geo – Disponível desde 3 de janeiro de 2000, possui uma acurácia de 50 metros CE 90 (i.e. possui uma acurácia posicional com um nível de certeza de 90%). As imagens são apenas referenciadas a um datum e uma projeção, sem qualquer correção ao devido à elevação do terreno.

b – Carterra Reference – As imagens são ortoretificadas, apresentando um erro de posicionamento padrão de aproximadamente 12 metros.

c – Carterra Map – As imagens são corrigidas através de reamostragem geométrica e possuem um desvio padrão de 6 metros.

d – Carterra Pro – As imagens apresentam um nível elaborado de ortoretificação, apresentando uma precisão de 5 metros.

e – Carterra Precision e Precision Plus – As imagens são ortoretificadas a partir de pontos de controle e através de modelos digitais de terreno e alcançam um erro de posicionamento de aproximadamente 1,9 metros e 0.9 metros para o Precision e Precision Plus respectivamente.

A tabela 2 mostra a precisão absoluta e o erro de posicionamento dos produtos Carterra:

TABELA 2 - PRECISÃO ABSOLUTA E ERRO DE POSICIONAMENTO

<i>Produtos Carterra</i>	<i>CE 90</i>	<i>RMS</i>
Geo	50 m	23.3 m
Reference	25.4m	11.8 m
Map	12.2m	5.7 m
Pro	10.2 m	4.8 m
Precision	4.1 m	1.9 m
Precision Plus	2.0 m	0.9 m

FONTE: ADAPTADA DE GERLACH (2000)

Estes produtos possuem um preço bastante variado sendo o Carterra Geo o produto mais acessível.

ANEXO 2
O satélite sensor Quickbird

1 SATÉLITE QUICKBIRD

O segundo satélite comercial a disponibilizar para venda imagens de alta resolução, foi lançado em 18 de outubro de 2001, pela empresa Digital Globe e recebeu o nome de Quickbird.

A *Digital Globe* oferece três níveis de processamento para o produtos do imageador Quickbird:

-*Basic*;

-*Standard*

- *Ortho*

O produto *Basic* apresenta menor nível de processamento, é indicado aos usuários que possuem capacidade e conhecimento na área de sensoriamento remoto e fotogrametria para a sua exploração. Este produto possui correções radiométrica e de sensor aplicados, (detector de geometria interna, distorção óptica, direção de varredura, variações na varredura) mas não é geometricamente corrigido e mapeado para uma projeção cartográfica. É distribuído juntamente com os chamados ISD (*Image Support Data*), que são uma coleção de arquivos que contém:

-*general image metadata*: informações que relatam a aquisição e processamento, qualidade da imagem, cobertura de nuvens, coordenadas das bordas da imagem, coleção de ângulos, tamanho do pixel, etc.

- *Attitude parameters*: amostragem média e estimativa da covariância da atitude da espaçonave, frequentemente computada a cada 0.020 segundos, começando nos últimos quatro segundos antes da coleta da imagem, e terminando quatro segundos depois do fim da coleta da imagem.

- *ephemeris parameters*: amostragem média e estimativa da covariância da posição da espaçonave, frequentemente computada a cada 0,020 segundos

começando nos quatro últimos segundos antes da coleta da imagem, e terminando nos últimos quatro segundos depois da coleta da imagem.

Câmera model: parâmetros de fotogrametria da modelagem virtual da câmera no imageamento e sistema óptico. Esse sistema de modelo da câmera com um único arranjo de detectores lineares e plano focal para cada banda espectral.

Usando esses arquivos, é possível realizar a ortorectificação utilizando os modelos rigorosos de sensores VOLPE (2003, p. 2).

O produto *Standard* tem o mesmo processamento radiométrico e de correções de sensores que o produto *Basic*, mas possui a correção geométrica e a atribuição de uma projeção cartográfica.

O produto *Ortho* é ortorectificado pela *Digital Globe*.

Na tabela 1 abaixo são apresentados as principais características das imagens Quickbird.

Tabela 1 - Características das imagens Quickbird

Altitude da órbita	450 km
Órbita	97,2 graus, sol síncrona
velocidade	7,1 km/segundo
Passagem sobre o Equador	10:30a.m., em sentido descendente
Tempo de uma revolução	93,5 minutos
Tempo de re-visita	1 a 3,5 dias dependendo da latitude
Cobertura	16.5km x 16.5 km no Nadir
Precisão métrica	23 metros(CE 90%)
Resolução	Banda pancromática: 61 cm (no nadir) a 72 cm (25° off Nadir) Banda multiespectral: 2.44 m (no nadir a 2.88m (25° off nadir)

bandas	Pancromática : 450 – 900nm Azul: 450 – 520 nm Verde: 520 – 600 nm Vermelho: 630 – 690nm Infravermelho próximo: 760 – 900 nm
--------	---

Fonte: Quickbird imagery products – Product Guide www.digitalglobe.com

A tabela 2 mostra a precisão absoluta e o erro de posicionamento dos produtos Quickbird.

TABELA 2 - PRECISÃO ABSOLUTA E O ERRO DE POSICIONAMENTO DOS PRODUTOS QUICKBIRD

Nível do produto	Processamento	Precisão absoluta	
		CE 90%	RMS
Basic	Correção do sensor	23 metros	14 metros
Standart	Georetificada	23 metros	14 metros
Ortho 1:25000	Ortoretificada	12.7 metros	7.7 metros
Ortho 1:12000	Ortoretificada	10.2 metros	6.2 metros
Custom Ortho	Ortoretificada	variável	variável

FONTES: QUICKBIRD IMAGERY PRODUCTS – PRODUCT GUIDE

ANEXO 3
Arquivos Metadados e RPC das imagens Quickbird e IKONOS

ANEXO 3A
Arquivo Metadados da imagem Quickbird

```
version = "P";
generationTime = 2004-07-27T22:06:21.000000Z;
productOrderId = "000000142610_01_P002";
imageDescriptor = "ORStandard2A";
bandId = "P";
panSharpenAlgorithm = "None";
numRows = 19284;
numColumns = 20460;
productLevel = "LV2A";
radiometricLevel = "Corrected";
radiometricEnhancement = "Off";
bitsPerPixel = 16;
compressionType = "None";
BEGIN_GROUP = BAND_P
  ULLon = -49.44548049;
  ULLat = -25.55958151;
  ULHAE = 911.00;
  URLon = -49.32332332;
  URLat = -25.55823312;
  URHAE = 911.00;
  LRLon = -49.32186532;
  LRLat = -25.66266743;
  LRHAE = 911.00;
  LLLon = -49.44412860;
  LLLat = -25.66402212;
  LLHAE = 911.00;
  absCalFactor = 4.656600e-02;
END_GROUP = BAND_P
outputFormat = "GeoTIFF";
BEGIN_GROUP = IMAGE_1
  satId = "QB02";
  CatId = "1010010003042B07";
  SceneID = "7";
  collectedRowGSD = 0.627;
  collectedColGSD = 0.647;
  meanCollectedGSD = 0.637;
  rowUncertainty = 48.85;
  colUncertainty = 77.76;
  sunAz = 31.9;
  sunEl = 34.0;
  satAz = 101.0;
  satEl = 78.8;
  inTrackViewAngle = -0.6;
  crossTrackViewAngle = 10.4;
  offNadirViewAngle = 10.4;
  cloudCover = 0.0;
  PNIIRS = 4.9;
  imageQuality = "Excellent";
  TDILevel = 18;
  positionKnowledgeSrc = "R";
  attitudeKnowledgeSrc = "R";
  revNumber = 14907;
END_GROUP = IMAGE_1
BEGIN_GROUP = MAP_PROJECTED_PRODUCT
```

```
  earliestAcqTime = 2004-06-
13T13:23:43.014546Z;
  latestAcqTime = 2004-06-
13T13:23:43.014546Z;
  datumName = "WE";
  semiMajorAxis = 6378137.0000;
  inverseFlattening = 298.257223563;
  datumOffset = (
    0.000,
    0.000,
    0.000 );
  mapProjName = "UTM";
  mapProjCode = 1;
  mapZone = 22;
  mapHemi = "S";
  mapProjParam = (
    0.000000000,
    0.000000000,
    0.000000000,
    0.000000000,
    0.000000000,
    0.000000000,
    0.000000000,
    0.000000000,
    0.000000000,
    0.000000000,
    0.000000000,
    0.000000000,
    0.000000000 );
  productUnits = "M";
  originX = 656160.30000223;
  originY = 7172174.10000178;
  orientationAngle = 0.0;
  resamplingKernel = "CC";
  colSpacing = 0.60;
  rowSpacing = 0.60;
  ULX = 656160.30000223;
  ULY = 7172174.10000178;
  ULH = 911.00;
  URX = 668435.70000378;
  URY = 7172174.10000181;
  URH = 911.00;
  LRX = 668435.70000383;
  LRY = 7160604.30000179;
  LRH = 911.00;
  LLX = 656160.30000225;
  LLY = 7160604.30000176;
  LLH = 911.00;
  DEMCorrection = "Base Elevation";
  terrainHae = 911.00;
  numGCP = 0;
END_GROUP = MAP_PROJECTED_PRODUCT
END;
```

ANEXO 3B
Arquivo RPB da imagem Quickbird

```

satId = "QB02";
bandId = "P";
SpecId = "RPC00B";
BEGIN_GROUP = IMAGE
    errBias = 33.39;
    errRand = 0.12;
    lineOffset = 9648;
    sampOffset = 10217;
    latOffset = -25.6112;
    longOffset = -49.3837;
    heightOffset = 911;
    lineScale = 9675;
    sampScale = 10395;
    latScale = 0.0529;
    longScale = 0.0619;
    heightScale = 500;
    lineNumCoef = (
        +4.918906E-04,
        +1.306113E-02,
        -1.009390E+00,
        -3.413729E-03,
        -3.586748E-06,
        +4.426750E-05,
        +3.631318E-04,
        +2.506215E-04,
        -2.467136E-04,
        -1.662593E-07,
        -3.168891E-06,
        +1.930313E-06,
        -4.327189E-07,
        -1.267483E-06,
        +1.208203E-06,
        +9.531518E-07,
        +4.258352E-07,
        -4.334557E-06,
        +6.813630E-07,
        -1.117299E-07);
    lineDenCoef = (
        +1.000000E+00,
        -1.254237E-05,
        +2.483277E-04,
        +3.668683E-04,
        -5.872396E-08,
        -2.169677E-06,
        +6.625416E-07,
        +2.361282E-07,
        +4.665196E-07,
        -7.482038E-07,
        -1.492322E-06,
        +1.989928E-06,
        -1.580348E-06,
        -2.170578E-06,
        +1.624344E-06,
        -1.152149E-06,
        +1.097777E-06,
        +2.867833E-06,
        +5.487036E-07,
        +3.416305E-07);
    sampNumCoef = (
        +1.178087E-03,
        +9.967314E-01,
        +1.145907E-02,
        -1.547479E-02,
        +2.073713E-04,
        +6.019674E-04,
        -3.867419E-04,
        -5.786840E-04,
        -1.361728E-05,
        -9.068167E-06,
        +1.031964E-06,
        +1.756593E-07,
        -2.766865E-07,
        +2.850406E-07,
        -4.150375E-07,
        -2.057943E-07,
        +6.357760E-08,
        +2.292748E-07,
        -2.718234E-07,
        +0.000000E+00);
    sampDenCoef = (
        +1.000000E+00,
        -5.909000E-04,
        -2.260181E-04,
        -5.775896E-04,
        +1.430637E-07,
        +2.627608E-07,
        -5.053875E-07,
        +4.321639E-07,
        +1.872402E-07,
        -6.182557E-07,
        +6.522511E-07,
        +6.172835E-07,
        +2.838416E-07,
        +4.860201E-07,
        +3.856229E-07,
        -2.090891E-07,
        -4.060052E-07,
        +6.086093E-07,
        -3.103496E-07,
        -2.273843E-07);
END_GROUP = IMAGE
END;

```

ANEXO 3C
Arquivo Metadados imagem IKONOS

=====
=====
Version Number: 1.2
=====
=====
Company Information
Address
Space Imaging
12076 Grant Street
Thornton, Colorado 80241
U.S.A.
Contact Information
On the Web:
<http://www.spaceimaging.com>
Customer Service Phone (U.S.A.):
1.800.232.9037
Customer Service Phone (World Wide):
301.552.0537
Customer Service Fax (World Wide):
301.552.3762
Customer Service Email:
info@spaceimaging.com
Customer Service Center hours of
operation:
Monday - Friday, 7:00am - 11:00pm Eastern Standard
Time
=====
=====
Product Order Metadata
Creation Date: 11/29/04
Product Work Order Number: 00093969
Product Order Number: 156631
Customer Project Name: Araucaria Stereo PSM
Ground Station ID: PGS
License Type: Single Organization
License Option 1: 1 Company / Corporation: engesat
Product Order Area (Geographic Coordinates)
Number of Coordinates: 4
Coordinate: 1
Latitude: -25.6339604500 degrees
Longitude: -49.4592328100 degrees
Coordinate: 2
Latitude: -25.5434878300 degrees
Longitude: -49.4576192300 degrees
Coordinate: 3
Latitude: -25.5424427300 degrees
Longitude: -49.3580068900 degrees
Coordinate: 4
Latitude: -25.6328260600 degrees
Longitude: -49.3566053900 degrees
Product Order Area (Map Coordinates in Map Units)
Coordinate: 1
Map X (Easting): 654961.41 meters
Map Y (Northing): 7173970.90 meters
Coordinate: 2
Map X (Easting): 664972.47 meters
Map Y (Northing): 7173966.69 meters
Coordinate: 3
Map X (Easting): 664989.25 meters
Map Y (Northing): 7163953.53 meters
Coordinate: 4
Map X (Easting): 654682.85 meters
Map Y (Northing): 7163951.79 meters
Sensor Type: Satellite
Sensor Name: IKONOS-2
Processing Level: Standard Geometrically Corrected
Image Type: PAN/MSI
Interpolation Method: Cubic Convolution
Multispectral Algorithm: Projective
Stereo: Mono
Mosaic: No
Map Projection: Universal Transverse Mercator
UTM Specific Parameters
Hemisphere: S

Zone Number: 22
Datum: WGS84
Product Order Pixel Size: 1.0000000000 meters
Product Order Map Units: meters
MTFC Applied: Yes
DRA Applied: Yes
Media: CD
Product Media Format: CD
File Format: GeoTIFF
TIFF Tiled: No
Bits per Pixel per Band: 11 bits per pixel
Multispectral Files: Separate Files
=====
=====
Source Image Metadata
Number of Source Images: 2
Source Image ID: 2004112313421880000011625390
Product Image ID: 000
Sensor: IKONOS-2
Acquired Nominal GSD
Cross Scan: 0.84 meters
Along Scan: 0.84 meters
Scan Azimuth: 179.98 degrees
Scan Direction: Reverse
Panchromatic TDI Mode: 13
Nominal Collection Azimuth: 239.3661 degrees
Nominal Collection Elevation: 80.75264 degrees
Sun Angle Azimuth: 79.5997 degrees
Sun Angle Elevation: 70.42205 degrees
Acquisition Date/Time: 2004-11-23 13:42 GMT
Percent Cloud Cover: 0

Source Image ID: 2004112313412890000011625389
Product Image ID: 001
Sensor: IKONOS-2
Acquired Nominal GSD
Cross Scan: 0.90 meters
Along Scan: 0.99 meters
Scan Azimuth: 179.98 degrees
Scan Direction: Reverse
Panchromatic TDI Mode: 13
Nominal Collection Azimuth: 357.1232 degrees
Nominal Collection Elevation: 65.14137 degrees
Sun Angle Azimuth: 79.7835 degrees
Sun Angle Elevation: 70.23682 degrees
Acquisition Date/Time: 2004-11-23 13:41 GMT
Percent Cloud Cover: 0
=====
=====
Product Space Metadata
Number of Image Components: 4
X Components: 1
Y Components: 2
Product MBR Geographic Coordinates
Number of Coordinates: 4
Coordinate: 1
Latitude: -25.5435169993 degrees
Longitude: -49.4603910136 degrees
Coordinate: 2
Latitude: -25.5424027848 degrees
Longitude: -49.3578344691 degrees
Coordinate: 3
Latitude: -25.6328768448 degrees
Longitude: -49.3565987163 degrees
Coordinate: 4
Latitude: -25.6339955668 degrees
Longitude: -49.4592323592 degrees
Product Map Coordinates (in Map Units)
UL Map X (Easting): 654682.85 meters
UL Map Y (Northing): 7173970.90 meters
Pixel Size X: 1.0000000000 meters
Pixel Size Y: 1.0000000000 meters
Product Order Map Units: meters
Columns: 10308 pixels

Rows: 10024 pixels
Reference Height: 907.9671630859 meters
=====

Product Component Metadata
Number of Components: 4
Component ID: 0000000
Product Image ID: 000
Component File Name: po_156631_red_0000000.tif
po_156631_grn_0000000.tif
po_156631_blu_0000000.tif
po_156631_nir_0000000.tif
Thumbnail File Name:
po_156631_rgb_0000000_ovr.jpg
Country Code: BR
Component Geographic Corner Coordinates
Number of Coordinates: 4
Coordinate: 1
Latitude: -25.5435027646 degrees
Longitude: -49.4590377495 degrees
Coordinate: 2
Latitude: -25.5424036775 degrees
Longitude: -49.3579140681 degrees
Coordinate: 3
Latitude: -25.5884667941 degrees
Longitude: -49.3572856825 degrees
Coordinate: 4
Latitude: -25.5895681441 degrees
Longitude: -49.4584480228 degrees
Component Map Coordinates (in Map Units)
UL Map X (Easting): 654818.85 meters
UL Map Y (Northing): 7173970.90 meters
Pixel Size X: 1.0000000000 meters
Pixel Size Y: 1.0000000000 meters
Product Order Map Units: meters
Columns: 10164 pixels
Rows: 5104 pixels
Percent Component Cloud Cover: 0

Component ID: 0000001
Product Image ID: 000
Component File Name: po_156631_red_0000001.tif
po_156631_grn_0000001.tif
po_156631_blu_0000001.tif
po_156631_nir_0000001.tif
Thumbnail File Name:
po_156631_rgb_0000001_ovr.jpg
Country Code: BR
Component Geographic Corner Coordinates
Number of Coordinates: 4
Coordinate: 1
Latitude: -25.5886887259 degrees
Longitude: -49.4598132489 degrees
Coordinate: 2
Latitude: -25.5875723736 degrees
Longitude: -49.3572282127 degrees
Coordinate: 3
Latitude: -25.6328408505 degrees
Longitude: -49.3566091680 degrees
Coordinate: 4
Latitude: -25.6339594586 degrees
Longitude: -49.4592328227 degrees
Component Map Coordinates (in Map Units)
UL Map X (Easting): 654682.85 meters
UL Map Y (Northing): 7168966.90 meters
Pixel Size X: 1.0000000000 meters
Pixel Size Y: 1.0000000000 meters
Product Order Map Units: meters
Columns: 10307 pixels
Rows: 5016 pixels

Percent Component Cloud Cover: 0

Component ID: 0010000
Product Image ID: 001
Component File Name: po_156631_red_0010000.tif
po_156631_grn_0010000.tif
po_156631_blu_0010000.tif
po_156631_nir_0010000.tif
Thumbnail File Name:
po_156631_rgb_0010000_ovr.jpg
Country Code: BR
Component Geographic Corner Coordinates
Number of Coordinates: 4
Coordinate: 1
Latitude: -25.5435027646 degrees
Longitude: -49.4590377495 degrees
Coordinate: 2
Latitude: -25.5424036775 degrees
Longitude: -49.3579140681 degrees
Coordinate: 3
Latitude: -25.5884667941 degrees
Longitude: -49.3572856825 degrees
Coordinate: 4
Latitude: -25.5895681441 degrees
Longitude: -49.4584480228 degrees
Component Map Coordinates (in Map Units)
UL Map X (Easting): 654818.85 meters
UL Map Y (Northing): 7173970.90 meters
Pixel Size X: 1.0000000000 meters
Pixel Size Y: 1.0000000000 meters
Product Order Map Units: meters
Columns: 10164 pixels
Rows: 5104 pixels
Percent Component Cloud Cover: 0

Component ID: 0010001
Product Image ID: 001
Component File Name: po_156631_red_0010001.tif
po_156631_grn_0010001.tif
po_156631_blu_0010001.tif
po_156631_nir_0010001.tif
Thumbnail File Name:
po_156631_rgb_0010001_ovr.jpg
Country Code: BR
Component Geographic Corner Coordinates
Number of Coordinates: 4
Coordinate: 1
Latitude: -25.5886887259 degrees
Longitude: -49.4598132489 degrees
Coordinate: 2
Latitude: -25.5875723736 degrees
Longitude: -49.3572282127 degrees
Coordinate: 3
Latitude: -25.6328408505 degrees
Longitude: -49.3566091680 degrees
Coordinate: 4
Latitude: -25.6339594586 degrees
Longitude: -49.4592328227 degrees
Component Map Coordinates (in Map Units)
UL Map X (Easting): 654682.85 meters
UL Map Y (Northing): 7168966.90 meters
Pixel Size X: 1.0000000000 meters
Pixel Size Y: 1.0000000000 meters
Product Order Map Units: meters
Columns: 10307 pixels
Rows: 5016 pixels
Percent Component Cloud Cover: 0

ANEXO 3D
Arquivo RPC da imagem IKONOS

LINE_OFF: +002552.00 pixels
SAMP_OFF: +005082.00 pixels
LAT_OFF: -25.56580000 degrees
LONG_OFF: -049.40360000 degrees
HEIGHT_OFF: +0908.000 meters
LINE_SCALE: +002552.00 pixels
SAMP_SCALE: +005082.00 pixels
LAT_SCALE: +00.02380000 degrees
LONG_SCALE: +000.05830000 degrees
HEIGHT_SCALE: +0081.000 meters
LINE_NUM_COEFF_1: -6.460915911624355E-03
LINE_NUM_COEFF_2: +2.748340231664483E-02
LINE_NUM_COEFF_3: -1.032328251273827E+00
LINE_NUM_COEFF_4: -2.727724381858832E-03
LINE_NUM_COEFF_5: -2.214700050520953E-02
LINE_NUM_COEFF_6: +1.071571198612666E-03
LINE_NUM_COEFF_7: -4.159635638581178E-02
LINE_NUM_COEFF_8: +1.020397356298280E-03
LINE_NUM_COEFF_9: +1.056965268655430E-01
LINE_NUM_COEFF_10: -1.004526856907754E-04
LINE_NUM_COEFF_11: -3.920365825151203E-05
LINE_NUM_COEFF_12: +9.501155064329377E-06
LINE_NUM_COEFF_13: -2.355176706796170E-05
LINE_NUM_COEFF_14: +2.360681792670389E-06
LINE_NUM_COEFF_15: -5.367248819473491E-05
LINE_NUM_COEFF_16: +6.054783168271217E-05
LINE_NUM_COEFF_17: -9.159332126553267E-05
LINE_NUM_COEFF_18: +2.022882133823851E-05
LINE_NUM_COEFF_19: +2.159391523521090E-04
LINE_NUM_COEFF_20: -2.183728768082222E-07
LINE_DEN_COEFF_1: +1.000000000000000E+00
LINE_DEN_COEFF_2: +1.868743295684755E-02
LINE_DEN_COEFF_3: -1.023191652674873E-01
LINE_DEN_COEFF_4: +4.054450984096128E-02
LINE_DEN_COEFF_5: +2.308128947614086E-05
LINE_DEN_COEFF_6: +3.229917675309598E-05
LINE_DEN_COEFF_7: -2.119385712561651E-04
LINE_DEN_COEFF_8: +1.935922240559018E-06
LINE_DEN_COEFF_9: -5.876672909891930E-05
LINE_DEN_COEFF_10: +9.042079546806726E-05
LINE_DEN_COEFF_11: +1.679759285933110E-09
LINE_DEN_COEFF_12: +1.156366832022639E-09
LINE_DEN_COEFF_13: +3.441990257443869E-10
LINE_DEN_COEFF_14: -3.591888198255138E-09
LINE_DEN_COEFF_15: +7.098233335029656E-09
LINE_DEN_COEFF_16: +1.862097075963304E-09
LINE_DEN_COEFF_17: +5.944130941482838E-09
LINE_DEN_COEFF_18: -8.421238007380682E-09
LINE_DEN_COEFF_19: +6.134072617487863E-08
LINE_DEN_COEFF_20: -5.489180688020829E-09
SAMP_NUM_COEFF_1: +9.031506642302040E-02
SAMP_NUM_COEFF_2: +1.154235172437502E+00
SAMP_NUM_COEFF_3: -3.002137914627306E-03
SAMP_NUM_COEFF_4: +5.891114116927682E-03
SAMP_NUM_COEFF_5: -1.175809524603444E-01
SAMP_NUM_COEFF_6: +4.692544442293843E-02
SAMP_NUM_COEFF_7: -1.254223356152322E-05
SAMP_NUM_COEFF_8: +2.154866040301968E-02
SAMP_NUM_COEFF_9: -6.463740163985668E-04
SAMP_NUM_COEFF_10: +9.877600194619463E-05
SAMP_NUM_COEFF_11: -2.505846375243624E-04
SAMP_NUM_COEFF_12: +2.549853521324872E-06
SAMP_NUM_COEFF_13: -9.107382078367501E-05
SAMP_NUM_COEFF_14: +1.104458972215680E-04
SAMP_NUM_COEFF_15: +2.983355605568914E-05
SAMP_NUM_COEFF_16: -8.852705718202836E-08
SAMP_NUM_COEFF_17: -6.712434725889915E-07
SAMP_NUM_COEFF_18: +4.064035696153477E-05
SAMP_NUM_COEFF_19: +2.981138227718541E-07
SAMP_NUM_COEFF_20: +2.098210070511885E-07
SAMP_DEN_COEFF_1: +1.000000000000000E+00
SAMP_DEN_COEFF_2: +1.868743295684755E-02
SAMP_DEN_COEFF_3: -1.023191652674873E-01
SAMP_DEN_COEFF_4: +4.054450984096128E-02
SAMP_DEN_COEFF_5: +2.308128947614086E-05
SAMP_DEN_COEFF_6: +3.229917675309598E-05
SAMP_DEN_COEFF_7: -2.119385712561651E-04
SAMP_DEN_COEFF_8: +1.935922240559018E-06
SAMP_DEN_COEFF_9: -5.876672909891930E-05
SAMP_DEN_COEFF_10: +9.042079546806726E-05
SAMP_DEN_COEFF_11: +1.679759285933110E-09
SAMP_DEN_COEFF_12: +1.156366832022639E-09
SAMP_DEN_COEFF_13: +3.441990257443869E-10
SAMP_DEN_COEFF_14: -3.591888198255138E-09
SAMP_DEN_COEFF_15: +7.098233335029656E-09
SAMP_DEN_COEFF_16: +1.862097075963304E-09
SAMP_DEN_COEFF_17: +5.944130941482838E-09
SAMP_DEN_COEFF_18: -8.421238007380682E-09
SAMP_DEN_COEFF_19: +6.134072617487863E-08
SAMP_DEN_COEFF_20: -5.489180688020829E-09

ANEXO 4
Código Fonte programa Ortoretifica

```

unit Transfo;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics,
  Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, Buttons, Menus;

type
  TFTransfo = class(TForm)
    ListBox1: TListBox;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Label11: TLabel;
    Label12: TLabel;
    PopupMenu1: TPopupMenu;
    AdicionaPontoaoAjustamento1: TMenuItem;
    ExcluiPontodoAjustamento1: TMenuItem;
    BtnOk: TBitBtn;
    BtnCancel: TBitBtn;
    GroupBox1: TGroupBox;
    Label1: TLabel;
    ListBox2: TListBox;
    procedure FormShow(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure FormDestroy(Sender: TObject);
    procedure PopupMenu1Popup(Sender: TObject);
    procedure AdicionaPontoaoAjustamento1Click(Sender:
TObject);
    procedure ExcluiPontodoAjustamento1Click(Sender:
TObject);
    procedure FormClose(Sender: TObject; var Action:
TCloseAction);
    procedure BtnOkClick(Sender: TObject);
    procedure BtnCancelClick(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
    procedure FillListBox;
    procedure FillGroupBox;
  end;

var
  FTransfo: TFTransfo;

implementation

{$R *.DFM}

Uses
  Base, Menu;

Var
  V, La : PMatriz;

{ Preenche o ListBox, com Observações, Ajustamento e
Resíduos }
procedure TFTransfo.FillListBox;
Var
  I, K : integer;
  S, X : string;
  Vr, R, Rm : double;
begin
  I := 0;
  Rm := 0.0;

```

```

{ Limpa o ListBox }
ListBox1.Clear;
{ Para todos os pontos... }
For K := 1 to Coord^.QtdeP do
begin
  { Identificação do ponto }
  S := Coord^.IdPto[K];
  While Length(S) < 8 do S := S + ' ';
  { Observações }
  Str(Coord^.Imagem[K].X:10:3, X);
  S := S + ' ' + X;
  Str(Coord^.Imagem[K].Y:10:3, X);
  S := S + ' ' + X;
  { Para os demais dados verifica se ponto está ativo }
  If Coord^.Estado[K] = 1 then
  begin
    { Ajustamento }
    Inc(I);
    Str(MGet(La, 2*I-1, 1):10:3, X);
    S := S + ' ' + X;
    Str(MGet(La, 2*I , 1):10:3, X);
    S := S + ' ' + X;
    { Resíduos }
    Str(MGet(V, 2*I-1, 1):8:3, X);
    S := S + ' ' + X;
    Str(MGet(V, 2*I , 1):8:3, X);
    S := S + ' ' + X;
    R := Sqr(MGet(V, 2*I-1, 1)) + Sqr(MGet(V, 2*I, 1));
    Vr := Sqrt(R);
    Str(Vr:8:3, X);
    S := S + ' ' + X;
    { Cálculo do erro médio quadrático }
    Rm := Rm + R;
  end;
  { Adiciona string ao ListBox }
  ListBox1.Items.Add(S);
end;
{ Erro médio quadrático }
Label1.Caption := 'Erro Méd Quad. = ' +
FloatToStrF(Sqrt(Rm/(I-1)),ffFixed,8,3);
end;

{ Preenche o GroupBox com os parâmetros ajustados da
Transformação selecionada }
procedure TFTransfo.FillGroupBox;
begin
  ListBox2.Clear;
  Case Stat.Transfo of
    0 : begin { Afim Geral no Plano }
      ListBox2.Items.Add('x = a.X + b.Y + X0
y = c.X + d.Y + Y0');
      ListBox2.Items.Add('a = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,1,1)));
      ListBox2.Items.Add('b = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,2,1)));
      ListBox2.Items.Add('c = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,4,1)));
      ListBox2.Items.Add('d = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,5,1)));
      ListBox2.Items.Add('X0 = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,3,1)));
      ListBox2.Items.Add('Y0 = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,6,1)));
    end;
    1 : begin { APM }
      ListBox2.Items.Add('x = L1.X + L2.Y + L3.Z + L4
y = L5.X + L6.Y + L7.Z + L8');
      ListBox2.Items.Add('L1 = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,1,1)));
      ListBox2.Items.Add('L2 = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,2,1)));
      ListBox2.Items.Add('L3 = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,3,1)));

```

```

        ListBox2.Items.Add('L4 = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,4,1)));
        ListBox2.Items.Add('L5 = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,5,1)));
        ListBox2.Items.Add('L6 = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,6,1)));
        ListBox2.Items.Add('L7 = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,7,1)));
        ListBox2.Items.Add('L8 = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,8,1)));
        end;
    2 : begin { DLT }
        ListBox2.Items.Add('x = (L1.X + L2.Y + L3.Z + L4)
/ (L9.X + L10.Y + L11.Z + 1)');
        ListBox2.Items.Add('y = (L5.X + L6.Y + L7.Z + L8)
/ (L9.X + L10.Y + L11.Z + 1)');
        ListBox2.Items.Add('L1 = ' + FloatToStr(MGet(Xa,
1,1)));
        ListBox2.Items.Add('L2 = ' + FloatToStr(MGet(Xa,
2,1)));
        ListBox2.Items.Add('L3 = ' + FloatToStr(MGet(Xa,
3,1)));
        ListBox2.Items.Add('L4 = ' + FloatToStr(MGet(Xa,
4,1)));
        ListBox2.Items.Add('L5 = ' + FloatToStr(MGet(Xa,
5,1)));
        ListBox2.Items.Add('L6 = ' + FloatToStr(MGet(Xa,
6,1)));
        ListBox2.Items.Add('L7 = ' + FloatToStr(MGet(Xa,
7,1)));
        ListBox2.Items.Add('L8 = ' + FloatToStr(MGet(Xa,
8,1)));
        ListBox2.Items.Add('L9 = ' + FloatToStr(MGet(Xa,
9,1)));
        ListBox2.Items.Add('L10 = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,10,1)));
        ListBox2.Items.Add('L11 = ' +
FloatToStr(MGet(Xa,11,1)));
        end;
    end;
end;

{ Procedimento para inicializar a matriz dos parametros
aproximados }
{ necessário para a transformação DLT (não linear)
}
{ Utilizam-se as primeiras onze equações do sistema
}
{ Ao.Xa = Bo ==> Xa = Inv(Ao).Bo }
procedure InicializaMatrizXo(Xa: PMatriz);
Var
    Ok : boolean;
    K, I : integer;
    Ao, Bo, Aux: PMatriz;
begin
    New(Ao);
    New(Bo);
    New(Aux);
    { Dimensões das Matrizes }
    Ao^.Lin := 11;
    Ao^.Col := 11;
    Bo^.Lin := 11;
    Bo^.Col := 1;
    { Montagem da Matriz }
    I := 0;
    { Para todos os pontos dados... }
    { Primeiras 11 equações }
    K := 0;
    Ok := False;
    While (not Ok) do
    begin
        Inc(K);
        { Verifica se ponto não foi eliminado }
        If Coord^.Estado[K] = 1 then
        begin
            { Somente os ativos }

```

```

        { Incrementa contador de pontos ativos }
        Inc(I);
        { Para cada ponto: Coeficientes da primeira equação (X)
        }
        MPut(Ao, 2*I-1, 1, Coord^.Apoio[K].X);
        MPut(Ao, 2*I-1, 2, Coord^.Apoio[K].Y);
        MPut(Ao, 2*I-1, 3, Coord^.Apoio[K].Z);
        MPut(Ao, 2*I-1, 4, 1.0);
        MPut(Ao, 2*I-1, 5, 0.0);
        MPut(Ao, 2*I-1, 6, 0.0);
        MPut(Ao, 2*I-1, 7, 0.0);
        MPut(Ao, 2*I-1, 8, 0.0);
        MPut(Ao, 2*I-1, 9, -
Coord^.Imagem[K].X*Coord^.Apoio[K].X);
        MPut(Ao, 2*I-1,10, -
Coord^.Imagem[K].X*Coord^.Apoio[K].Y);
        MPut(Ao, 2*I-1,11, -
Coord^.Imagem[K].X*Coord^.Apoio[K].Z);
        { Termo independente da equação em x }
        MPut(Bo, 2*I-1, 1, Coord^.Imagem[K].X);
        { Verifica se esta equação é necessária }
        If I < 6 then
        begin
            { Para cada ponto: Coeficientes da primeira equação
(Y) }
            MPut(Ao, 2*I, 1, 0.0);
            MPut(Ao, 2*I, 2, 0.0);
            MPut(Ao, 2*I, 3, 0.0);
            MPut(Ao, 2*I, 4, 0.0);
            MPut(Ao, 2*I, 5, Coord^.Apoio[K].X);
            MPut(Ao, 2*I, 6, Coord^.Apoio[K].Y);
            MPut(Ao, 2*I, 7, Coord^.Apoio[K].Z);
            MPut(Ao, 2*I, 8, 1.0);
            MPut(Ao, 2*I, 9, -
Coord^.Imagem[K].Y*Coord^.Apoio[K].X);
            MPut(Ao, 2*I,10, -
Coord^.Imagem[K].Y*Coord^.Apoio[K].Y);
            MPut(Ao, 2*I,11, -
Coord^.Imagem[K].Y*Coord^.Apoio[K].Z);
            { Termo independente da equação em x }
            MPut(Bo, 2*I, 1, Coord^.Imagem[K].Y);
        end
        else
            Ok := True;
        end;
    end;
end;
{ Resolução do sistema montado }
If MInversa(Ao, Aux) then
    Xa^ := MProduto(Aux, Bo)
else
    ShowMessage('ERRO: Matriz dos parâmetros
aproximados não obtida');
    Dispose(Aux);
    Dispose(Bo);
    Dispose(Ao);
end;

{ Procedimento de cálculo da matriz Lo = F(Xo) }
procedure CalculaLo(Xo: PMatriz; Ptos: PCoords; var Lo:
PMatriz);
Var
    N, K, I : integer;
    L : array[1..11] of double;
    Rx, Ry, Rd : double;
begin
    { Passagem de parâmetros aproximados }
    For I := 1 to 11 do L[I] := MGet(Xo, I, 1);
    { Qtde de Pontos Ativos }
    N := 0;
    For K := 1 to Coord^.QtdeP do
        If Coord^.Estado[K] = 1 then Inc(N);
    { Dimensionamento da matriz }
    Lo^.Lin := 2*N;
    Lo^.Col := 1;
    { Montagem da Matriz }
    I := 0;

```

```

{ Para todos os pontos dados... }
For K := 1 to Ptos^.QtdeP do
begin
  { Verifica se não foram eliminados }
  If Ptos^.Estado[K] = 1 then
  begin
    { Somente os ativos }
    { Incrementa contador de pontos ativos }
    Inc(I);
    { Numerador da Transformação }
    Rx := L[1]*Ptos^.Apoio[K].X + L[2]*Ptos^.Apoio[K].Y
+ L[3]*Ptos^.Apoio[K].Z + L[4];
    Ry := L[5]*Ptos^.Apoio[K].X + L[6]*Ptos^.Apoio[K].Y
+ L[7]*Ptos^.Apoio[K].Z + L[8];
    { Denominador da Transformação }
    Rd := L[9]*Ptos^.Apoio[K].X +
L[10]*Ptos^.Apoio[K].Y + L[11]*Ptos^.Apoio[K].Z + 1;
    { Equação em x }
    MPut(Lo, 2*I-1, 1, Rx/Rd);
    { Equação em y }
    MPut(Lo, 2*I-1, 1, Ry/Rd);
  end;
end;
end;

{ Procedimento executado para a visualização deste
formulário }
procedure TFTransfo.FormShow(Sender: TObject);
Var
  Ok : boolean;
  K, N, No, I : integer;
  A, P, Lb, Xo, L, Lo, X : PMatriz;
begin
  { Qtde de Pontos necessários }
  No := 3;
  Case Stat.Transfo of
    0 : No := 3;
    1 : No := 4;
    2 : No := 6;
  end;
  { Qtde de Pontos Ativos }
  N := 0;
  For K := 1 to Coord^.QtdeP do
  If Coord^.Estado[K] = 1 then Inc(N);
  If N > No then
  begin
    { Alocação de Memória }
    New(A);
    New(P);
    New(Lb);
    New(Xo);
    { Inicialização da matrix Xo }
    { Não é usada na transformação afim geral no plano }
    Xo^.Lin := 2*N;
    Xo^.Col := 1;
    { Transformação Seleccionada }
    Case Stat.Transfo of
      0 : begin { Transformação Afim Geral no Plano }
          GroupBox1.Caption := ' Parâmetros da
Transformação Afim Geral no Plano ';
          { Cálculo da derivada parcial de A, a partir das
coordenadas dos pontos }
          DerivadaParcialAAGP(Xo, Coord, A);
          { Monta a matriz dos pesos }
          MontaPeso(2*N, 1, P);
          { Monta a matriz das observações Lb }
          MontaLb(Coord, Lb);
          { Efetua o cálculo do método paramétrico: linear }
          AjusteParametricoLinear(A, P, Lb, Xo, V);
          { Cálculo do vetor ajustado }
          La^ := MProduto(A, Xo);
          { Display dos parâmetros da transformação }
          FillGroupBox;
          { Preenche o ListBox com as informações }
          FillListBox;
        end;
      1 : begin { Transformação APM }
          GroupBox1.Caption := ' Parâmetros da
Transformação APM ';
          { Cálculo da derivada parcial de A, a partir das
coordenadas dos pontos }
          DerivadaParcialAAPM(Xo, Coord, A);
          { Monta a matriz dos pesos }
          MontaPeso(2*N, 1, P);
          { Monta a matriz das observações Lb }
          MontaLb(Coord, Lb);
          { Efetua o cálculo do método paramétrico: linear }
          AjusteParametricoLinear(A, P, Lb, Xo, V);
          { Cálculo do vetor ajustado }
          La^ := MProduto(A, Xo);
          { Display dos parâmetros da transformação }
          FillGroupBox;
          { Preenche o ListBox com as informações }
          FillListBox;
        end;
      2 : begin { Transformação DLT }
          GroupBox1.Caption := ' Parâmetros da
Transformação DLT ';
          { Monta a matriz dos pesos }
          MontaPeso(2*N, 1, P);
          { Monta a matriz das observações Lb }
          MontaLb(Coord, Lb);
          { Atribuição Inicial }
          InicializaMatrizXo(Xo);
          { Matrizes Adicionais Necessárias }
          New(L);
          New(Lo);
          New(X);
          { Controle de Loop }
          N := 0;
          Repeat
            Inc(N);
            Xo^ := Xo^;
            CalculaLo(Xo, Coord, Lo);
            L^ := MSubtracao(Lo, Lb);
            { Cálculo da derivada parcial de A, a partir das
coordenadas dos pontos }
            DerivadaParcialADLT(Xo, Coord, A);
            { Cálculo dos coeficientes do sistema de equações }
            AjusteParametricoNaoLinear(A, P, L, X, V);
            Xo^ := MSoma(Xo, X);
            Ok := True;
            For I := 1 to 11 do
              If (Abs(MGet(X,I,1)) > 1.0E-6) then Ok := False;
            until Ok or (N > 10000);
            If not Ok then
              ShowMessage('ERRO: Ajustamento não converge');
            { Liberação de recursos utilizados }
            Dispose(X);
            Dispose(Lo);
            Dispose(L);
            { Obtidos os coeficientes, calcula-se La para
visualização }
            La^ := MSoma(Lb, V);
            { Display dos parâmetros da transformação }
            FillGroupBox;
            { Preenche o ListBox com as informações }
            FillListBox;
          end;
        end;
      { Liberação da memória alocada }
      Dispose(Xo);
      Dispose(Lb);
      Dispose(P);
      Dispose(A);
    end
  else
  begin
    ShowMessage('ERRO: Qtde de Pontos insuficientes para
o Ajustamento');
    ListBox1.Clear;
    ListBox2.Clear;
  end;
end;
end;

```

```

end;
end;

{ Procedimento executado na criação deste formulário }
procedure TFTransfo.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  { Alocação de memória para matrizes globais }
  New(V);
  New(La);
end;

{ Procedimento executado na destruição deste formulário }
procedure TFTransfo.FormDestroy(Sender: TObject);
begin
  { Liberação da memória utilizada para matrizes globais }
  Dispose(La);
  Dispose(V);
end;

{ Quando se clica no ListBox com o lado direito do mouse }
{ este procedimento é executado e aparece o Menu de }
{ Popup }
procedure TFTransfo.PopupMenu1Popup(Sender: TObject);
Var
  N, K, No : integer;
begin
  { Qtde de Pontos necessários }
  No := 3;
  Case Stat.Transfo of
    0 : No := 3;
    1 : No := 4;
    2 : No := 6;
  end;
  { Calcula a quantidade de pontos ativos: N }
  N := 0;
  For K := 1 to Coord^.QtdeP do
    If Coord^.Estado[K] = 1 then Inc(N);
  { Verifica a linha do ListBox selecionada: K }
  K := ListBox1.ItemIndex + 1;
  { Conforme o estado da linha selecionada... }
  { ...o menu de popup altera suas habilitações }
  PopupMenu1.Items[0].Enabled := (Coord^.Estado[K] = 0);
  PopupMenu1.Items[1].Enabled := (Coord^.Estado[K] = 1)
and (N > No);
end;

{ Quando o usuário seleciona no menu de popup }
{ Adicionar um ponto ao ajustamento }
procedure
TFTransfo.AdicionaPontoaoAjustamento1Click(Sender:
TObject);
Var
  K : integer;
begin
  { Verifica qual a linha selecionada }
  K := ListBox1.ItemIndex + 1;
  { Ativa o estado desta linha }
  Coord^.Estado[K] := 1;
  { Efetua novamente o ajustamento }
  FormShow(Sender);
end;

{ Quando o usuário seleciona no menu de popup }
{ Excluir um ponto do ajustamento }
procedure
TFTransfo.ExcluiPontodoAjustamento1Click(Sender:
TObject);
Var
  K : integer;
begin
  { Verifica qual a linha selecionada }
  K := ListBox1.ItemIndex + 1;
  { Desativa o estado desta linha }
  Coord^.Estado[K] := 0;
  { Efetua novamente o ajustamento }

```

```

FormShow(Sender);
end;

{ Procedimento executado no fechar deste formulário }
procedure TFTransfo.FormClose(Sender: TObject; var
Action: TCloseAction);
begin
  { Libera todos os objetos utilizados }
  Action := caFree;
  { Seta o estado: Nenhum formulário aberto }
  Tela := 0;
  { Habilita o menu do formulário principal }
  FMenu.SetMenu;
end;

{ Procedimento executado quando o usuário clica no botão }
{ OK }
procedure TFTransfo.BtnOkClick(Sender: TObject);
begin
  { Salva os parâmetros da transformação }
  SaveParms;
  { Estado do aplicativo }
  Stat.Status := 2;
  { Executa o procedimento FormClose acima }
  Close;
end;

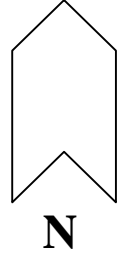
{ Procedimento executado quando o usuário clica sobre o }
{ botão Cancela }
procedure TFTransfo.BtnCancelClick(Sender: TObject);
begin
  { Executa o procedimento FormClose acima }
  Close;
end;

end.

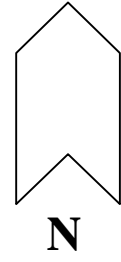
```

ANEXO 5
Ortoimagens Quickbird e Ikonos

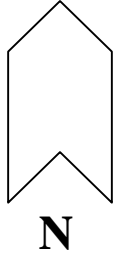
ANEXO 5A
Extrato Ortoimagem Quickbird área 1



ANEXO 5B
Extrato Ortoimagem Quickbird área 2



ANEXO 5C
Extrato Ortoimagem IKONOS área 1



ANEXO 5D
Extrato Ortoimagem IKONOS área 2

