

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

JORGE DIRCEU MELO DE CERQUEIRA



**ORTORRETIFICAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS
DE SATÉLITES DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL**

Recife, 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

JORGE DIRCEU MELO DE CERQUEIRA

ORTORRETIFICAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS DE SATÉLITES DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de concentração Cartografia e Sistemas de Geoinformação, e defendida no dia 13/02/2004.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Lúcia Bezerra Candeias

Recife, 2004

C417 Cerqueira, Jorge Dirceu Melo de

Ortorretificação digital de imagens de satélites de alta resolução espacial / Jorge Dirceu Melo de Cerqueira. – Recife: O Autor, 2004.

iv, 80 f. : il., tabs., gráfs.

Inclui bibliografia

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Depto. de Engenharia Cartográfica. Área de Cartografia e Sistemas de Geoinformação.

1. Sensoriamento remoto. 2. Ortorretificação digital. 3. Fotogrametria digital I. Título.

526.982 CDD (21 ed.)

UFPE/BCTG/2004-28

ORTORRETIFICAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS DE SATÉLITES DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL


POR


JORGE DIRCEU MELO DE CERQUEIRA

Dissertação defendida e aprovada em 13.02.04.

Banca examinadora:


Prof.ª Dr.ª ANA LÚCIA BEZERRA CANDEIAS (Orientadora)
Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco


Prof. Dr. DANIEL CARNEIRO DA SILVA
Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco


Prof. Dr. JOSÉ LUIZ PORTUGAL
Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco


Prof. Dr. JOSÉ JORGE DE SEIXAS
Departamento de Geologia - Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível graças à valiosa colaboração, direta ou indireta, de diversas pessoas e instituições. Manifesto minha gratidão a todas elas e de forma especial a:

- Ao Exército Brasileiro, à Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) e ao Instituto Militar de Engenharia (IME) por permitirem a realização do curso.
- À minha orientadora Dr^a. Ana Lucia Bezerra Candeias e ao Prof. Dr. Daniel Carneiro Silva que acompanharam o desenvolvimento deste trabalho e que me incentivaram, apoiaram, orientaram e me ensinaram.
- À Dr^a. Verônica Costa Romão e ao Dr. José Luiz Portugal por importantes discussões e contribuições na execução desta dissertação.
- Ao Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pelo apoio e condições oferecidas durante a realização do curso.
- À 3^a Divisão de Levantamento (3^aDL) pelo apoio prestado na realização desta Pesquisa.
- À Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife (FIDEM) por ceder o material cartográfico.
- À Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) pela cessão de uma imagem de satélite *QUICKBIRD*.
- Ao 1^o Sargento Alberto Santos de Souza, ao 2^o Sargento Senio Soares da Silva e ao 3^o Sargento Luiz Henrique Gonçalves Maia e Silva, pelo apoio prestado nos trabalhos de campo.

- À minha esposa e ao meu filho pelo incentivo durante a realização do curso e paciência nos momentos de ausência.
- Aos meus pais, grandes incentivadores e responsáveis por mais esta conquista.
- Aos meus companheiros de turma pelos momentos de estudos e debates.
- A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a confecção da dissertação.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	iv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos da Pesquisa.....	3
1.1.1. Objetivo Geral.....	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
1.2. Justificativa da Pesquisa	4
1.3. Organização do Trabalho.....	4
2. CONCEITOS DE CARTOGRAFIA E IMAGEM DIGITAL.....	6
2.1. Conceitos de Cartografia.....	6
2.1.1. Formas e Dimensões da Terra	6
2.1.2. Relações entre as diferentes formas adotadas para a Terra.....	7
2.1.3. Sistemas de Coordenadas utilizados em Geodésia	8
2.1.3.1 Sistema de Coordenadas Cartesianas.....	9
2.1.3.2. Sistema de Coordenadas Geodésicas.....	10
2.1.3.3. Sistema de Coordenadas Planas.....	11
2.1.4. Sistemas de Referência Clássicos	11
2.1.5. Datum Geodésico	12
2.1.5.1. Conceito.....	12
2.1.5.2. Datum Internacional	13
2.1.5.3. Datas regionais e locais	13
2.1.6. Sistemas de Referência Geodésicos adotados no Brasil	13
2.1.6.1 Córrego Alegre.....	13
2.1.6.2. Astro Datum Chuá.....	15
2.1.6.3. SAD69.....	15
2.1.6.4. Procedimentos de Densificação do SAD69	17
2.1.6.5. SAD69 – realização 1996	17

2.1.6.6. Transformação de Datum.....	18
2.2. Imagem Digital	19
2.3. Transformação de Imagens Digitais.....	20
2.4. Os Métodos de Reamostragem	21
2.4.1. Interpolação Vizinho Mais Próximo	22
2.4.2. Interpolação Bilinear.....	22
2.4.1. Interpolação Convolução Cúbica.....	22
3. MODELO MATEMÁTICO PARA ORTORRETIFICAÇÃO DIGITAL.....	23
3.1. A Equação APM - Affine Projection Model.....	24
3.2. Solução da Equação APM pelo Método dos Mínimos Quadrados-MMQ .	26
3.3. Modelo Digital de Terreno	29
3.3.1. Grades Regulares ou Retangulares	31
3.3.2. Grades Irregulares Triangulares.....	32
3.3.3. Interpolação de um MDT	33
3.4. Ortorretificação Digital.....	33
3.4.1. Algoritmos de Ortorretificação Digital	34
3.4.2. Retificação Diferencial de imagem Digital	35
3.5. Controle da Qualidade Geométrica de Dados Espaciais	36
3.5.1. Padrões de Exatidão Cartográfica.....	36
3.5.2. Análise Estatística da Exatidão Cartográfica Planimétrica	39
3.5.2.1. Análise de Tendência.....	39
3.5.2.2. Análise de Precisão	41
4. IMAGENS DE SATÉLITES DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL.....	43
4.1. Imagens de Satélites <i>IKONOS</i>	43
4.1.1. Modos de aquisição.....	44
4.1.2. Principais características técnicas.....	44
4.1.3. Níveis de Processamento.....	45
4.2. Imagens de Satélite <i>QUICKBIRD</i>	47
4.2.1. Características Técnicas	48
4.2.2. Níveis de Processamento.....	49
5. MATERIAL E METODOLOGIA.....	50

5.1. Materiais Utilizados	50
5.2 Metodologia Desenvolvida	52
5.3 Coleta de Pontos de Controle	56
5.4. Modelo Digital de Terreno	60
5.5. Ortorectificação das Imagens	62
6. RESULTADOS E ANÁLISE DA PESQUISA.....	66
6.1. Imagem <i>IKONOS</i> Ortorectificada.....	66
6.1.1. Análise de Tendência	67
6.1.2. Análise de Precisão	69
6.2. Imagem <i>QUICKBIRD</i> Ortorectificada.....	70
6.2.1. Análise de Tendência	71
6.2.2. Análise de Precisão	72
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

RESUMO

CERQUEIRA, Jorge Dirceu Melo de. **Ortorretificação Digital de Imagens de Satélites de Alta Resolução Espacial**. Recife, 2004. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.

Esta dissertação descreve um método para a ortorretificação de imagens de satélites de alta resolução espacial, utilizando o modelo matemático tri-dimensional *Affine Projection Model* – APM, também conhecido como a equação de projeção paralela. Em uma fase inicial da pesquisa foram implementados a equação de projeção paralela e o mapeamento usando programação em *MATLAB*, em imagens *GEO IKONOS* e *QUICKBIRD*. Este modelamento propiciou um embasamento teórico para a implementação de um programa mais completo para ortorretificação digital, através do método de retificação diferencial a partir de imagens de alta resolução espacial. Como área teste utilizou-se uma região de um quilometro quadrado no bairro do Curado na cidade de Recife - PE. O procedimento para verificar a exatidão cartográfica baseou-se na análise das discrepâncias entre as coordenadas de pontos no terreno, obtidas através de GPS, e as coordenadas dos pontos homólogos extraídas das imagens de satélites, através da análise da existência de tendência e da precisão. Como resultado final, chegou-se a conclusão que a ortorretificação de imagens de alta resolução espacial, utilizando a equação APM como modelo matemático, foi adequada, nesse caso particular, para trabalhos na escala de 1:10.000 e menores.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Ortorretificação Digital; Fotogrametria Digital.

ABSTRACT

CERQUEIRA, Jorge Dirceu Melo de. **Digital Orthorectification of High Resolution Space Image Satellites**. Recife, 2004. Dissertation (Mastership). Center of Technology and Geoscience, Federal University of Pernambuco.

This dissertation describes the development of a method for the space high resolution image satellites orthorectification, using the tri-dimensional mathematical model Affine Projection Model - APM, also known like equation of parallel projection. In an initial phase of the research the parallel projection equation and the mapping were implemented using programming in MATLAB, with GEO IKONOS and QUICKBIRD images. This model propitiated a theoretical basis for the implementation of a more complete program for digital orthorectification, through the method of differential rectification starting from images of space high resolution. As test area was used one kilometer square in the neighborhood of the Curado, Recife - PE. The procedure to verify the cartographic accuracy is based on the analysis of the discrepancies among the coordinates of points in the land, obtained through GPS, and the coordinates of the extracted of the images of satellites homologous points, through the analysis of the tendency existence and of the precision. As final result, the conclusion was arrived that the orthorectification of images of space high resolution, using the equation APM, it is adapted for this work the scale 1:10.000 and smaller.

Keywords: Remote Sensing; Orthoimages; High Resolution; Digital Photogrammetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Elipsóide de revolução	7
Figura 2.2 – Relações geométricas entre as formas adotadas para a Terra.	8
Figura 2.3 - Coordenadas cartesianas geocêntricas (X, Y, Z)	9
Figura 2.4 - Latitude (ϕ) e longitude (λ) geodésicas.....	10
Figura 2.5 - Representação de uma imagem. (a) imagem em níveis de cinza. (b) imagem numérica	19
Figura 2.6 - Matriz de formação da imagem digital I.....	20
Figura 2.7 – Transformações em uma imagem. (a) Método de transformação indireto e (b) direto.....	21
Figura 3.1 - Modelo esquemático da Equação de Colinearidade	24
Figura 3.2 – Superposição de grade regular retangular (•) com triangular (+) (à esquerda) e TIN (à direita).....	31
Figura 3.3 - Método de Retificação Diferencial Digital	35
Figura 4.1 - Satélite <i>IKONOS II</i>	43
Figura 4.2 - Satélite <i>QUICKBIRD II</i>	47
Figura 5.1 - Imagem <i>IKONOS GEO</i> da área de estudo.....	51
Figura 5.2 - Imagem <i>QUICKBIRD</i> da área de estudo.....	52
Figura 5.3. Metodologia de Ortorretificação de Imagens	53
Figura 5.4 - Pontos de Controle na imagem de satélite da área de estudo	58
Figura 5.5 - Curvas de nível no <i>SPRING</i>	60
Figura 5.6 - Arquivo .txt de uma grade regular de MDT gerado no <i>Spring</i>	61
Figura 5.7 - MDT superposto a imagem da área de estudo	61
Figura 5.8 - Imagem <i>IKONOS</i> ortorretificada.....	64
Figura 5.9 - Imagem <i>QUICKBIRD</i> ortorretificada.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores do PEC e EP, considerando as escalas da carta, conforme Decreto 89.817/84	39
Tabela 4.1 - Principais características técnicas do satélite <i>IKONOS II</i>	44
Tabela 4.2 - Custos dos produtos básicos GEO.....	46
Tabela 4.3 - Características Técnicas do satélite <i>QUICKBIRD II</i>	48
Tabela 4.4 - Produtos <i>QUICKBIRD II</i>	49
Tabela 5.1 - Dados de aquisição da imagem <i>IKONOS GEO</i>	50
Tabela 5.2 - Coordenadas dos Pontos de Controle.....	59
Tabela 6.1 - Discrepâncias entre as coordenadas <i>GPS</i> e <i>IKONOS</i>	67
Tabela 6.2 - Resultados para a Análise de Tendência	68
Tabela 6.3 - Resultado para a Análise de Precisão.....	69
Tabela 6.4 - Discrepâncias entre as coordenadas <i>GPS</i> e <i>QUICKBIRD</i>	70
Tabela 6.5 - Resultados para a Análise de Tendência	71
Tabela 6.6 - Resultado para a Análise de Precisão.....	73

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia dos satélites de observação da terra iniciado nos anos 70, as imagens de sensoriamento remoto são extensamente usadas em muitos campos das Ciências da Terra. O desenvolvimento de técnicas e procedimentos de mapeamento, a partir de imagens digitais, tem permitido maiores facilidades na obtenção de informações espaciais para várias aplicações de engenharia.

Uma questão fundamental quanto ao uso de imagens orbitais diz respeito à sua resolução espacial nominal, ou seja, a menor porção de área terrestre identificável na imagem. Neste sentido, a resolução espacial se apresentava como um fator limitante à sua utilização, ficando restrita sua aplicação a escalas pequenas, por exemplo, aos estudos de climas, agricultura, controles de queimadas, monitoramento de florestas, entre outros.

No início dos anos 70, a melhor resolução espacial era de 80 m. Esta resolução era aplicável a trabalhos cartográficos com escalas de até 1 :500.000 ou menores. Nos anos 80, a melhor resolução espacial passou para 30 m com os sensores multiespectrais temáticos e 10 m com sensores pancromáticos, aumentando consideravelmente a capacidade de identificação de feições nas imagens, permitindo sua utilização em trabalhos compatíveis com a escala de 1:100.000 ou menores.

Em setembro de 1999, com o lançamento do satélite *IKONOS-2* pela empresa americana *Space Imaging*, teve início a era comercial de satélites de alta resolução de observação da terra, apresentando uma imagem de resolução no terreno de 1 m para o modo pancromático e de 4 m para o multiespectral. Em outubro de 2001, foi lançado o satélite *QUICKBIRD II*, operado pela empresa americana *Digital Globe*, que apresenta uma resolução espacial de 0.72 m no modo pancromático, e 2.88 m no multiespectral.

Estes fatos possibilitaram que os usuários de imagens fotogramétricas e de sensores remotos vislumbrassem aplicações de extração de informações temáticas e métricas com maior rigor na exatidão espacial a partir de imagens orbitais. Porém,

muitas questões técnicas com respeito as reais potencialidades de sua utilização necessitam ser pesquisadas, especialmente no que se refere à questão métrica, objetivando sua aplicação no mapeamento planimétrico.

O tempo e o custo despendidos nos mapeamentos baseados em técnicas topográficas e de aerofotogrametria convencional encoraja à realização de pesquisas em busca de novas técnicas de mapeamento.

Atualmente, com os avanços tecnológicos, a ortorretificação de imagens digitais surge como uma interessante área de pesquisa, principalmente no caso de imagens orbitais, para obtenção de mapeamento planimétrico digital, tendo como principais vantagens a facilidade operacional, o baixo custo de equipamentos e o tempo de execução de um projeto de mapeamento planimétrico quando comparada ao método clássico estereofotogramétrico.

A ortorretificação é baseada em uma fundamentação matemática e geométrica, que reflete a realidade física da geometria de visada do sensor. Essa fundamentação leva em consideração as distorções que ocorrem na formação da imagem, isto é, distorções relativas à plataforma, ao sensor, a Terra e a projeção cartográfica.

O método rigoroso de ortorretificação é bem definido na Fotogrametria para imagens obtidas a partir de fotografias aéreas verticais. Ele é baseado nas equações de colinearidade, onde os parâmetros relativos à posição e a atitude do sensor são conhecidos. O produto final deste método é chamado de ortofotografia.

De acordo com SEIXAS (1981), a ortofotografia é por definição uma reprodução fotográfica em que os deslocamentos das imagens dos objetos, ocasionados pela inclinação da fotografia e pelos acidentes do terreno, foram eliminados, apresentando assim as mesmas propriedades de um mapa. Desta forma, são geometricamente equivalentes aos mapas planimétricos convencionais de traços e símbolos, apresentando as verdadeiras posições ortográficas das imagens dos objetos.

No caso de imagens de sensores orbitais de alta resolução espacial, os parâmetros relativos à posição e a atitude do sensor, normalmente, não são disponibilizados aos usuários, inviabilizando a utilização das equações de colinearidade, tornando-se assim, necessário uma aproximação por um modelo matemático que reflita as condições teóricas da formação da imagem.

Neste sentido, esta pesquisa aborda uma metodologia para a ortorretificação de imagens orbitais, através do método de retificação diferencial, utilizando como modelo matemático a equação APM – *Affine Projection Model*, conhecida como Equação de Projeção Paralela, que projeta o espaço R3 (terreno) no plano R2 (imagem). Esta transformação matemática permite a extração precisa de informações bidimensionais 2D do terreno a partir de imagens orbitais de alta resolução espacial, onde o deslocamento de pontos na imagem devido ao relevo é considerado.

1.1. Objetivos da Pesquisa

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia de ortorretificação digital de imagens de satélites de alta resolução espacial e avaliar sua precisão.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Definir e implementar uma modelagem matemática para a transformação de coordenadas de pontos entre os sistemas de referência envolvidos no processo de ortorretificação digital de imagens de sensores orbitais de alta resolução espacial.
- Definir uma metodologia de ortorretificação de imagens de satélites de alta resolução espacial.

- Analisar a metodologia de ortorretificação proposta, através de sua aplicação em imagens *IKONOS* e *QUICKBIRD*, avaliando a precisão dos resultados e indicando suas aplicabilidades.

1.2. Justificativa da Pesquisa

A diversidade de trabalhos executados com o auxílio de imagens orbitais de alta resolução espacial tem despertado interesse de usuários de várias áreas do conhecimento.

O grande atrativo destas imagens é a precisão nominal com que as informações são apresentadas. Elas são disponibilizadas em diferentes categorias ou níveis de processamento, de acordo com a precisão de posicionamento, variando com isto os seus custos de aquisição. Dessa forma, para que se obtenha uma melhor eficiência no seu emprego é necessário que se utilizem imagens com um nível de processamento maior, isto é, os produtos ortorretificados, que por sua vez também são os mais caros, chegando a ser quase três vezes superior ao preço das imagens mais simples.

Neste sentido, esta pesquisa propõe um método alternativo para a ortorretificação de imagens de satélites de alta resolução espacial, a partir de produtos com menor nível de processamento, propiciando sua utilização no mapeamento planimétrico, contribuindo desta forma, à melhor aplicação destas imagens com menor custo de aquisição das mesmas.

1.3. Organização do Trabalho

Esta dissertação esta organizada em sete capítulos. O capítulo 1 apresenta os objetivos e a justificativa para a Pesquisa. No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliografia abordando os conceitos e fundamentos necessários para a realização da metodologia de ortorretificação de imagens digitais. O capítulo 3 apresenta o modelo matemático utilizado para a ortorretificação digital. No capítulo 4 são apresentadas as características das imagens de satélites *IKONOS* e *QUICKBIRD*. No capítulo 5 são descritos os materiais utilizados e a metodologia

desenvolvida na Pesquisa. O capítulo 6 apresenta a análise da pesquisa através de testes estatísticos aplicados às imagens ortorretificadas pela metodologia proposta, e são apresentadas algumas considerações finais no capítulo 7.

2. CONCEITOS DE CARTOGRAFIA E IMAGEM DIGITAL

A seguir serão apresentados conceitos e fundamentos básicos necessários para a realização da ortorretificação digital em imagens orbitais, ou seja, alguns conceitos de cartografia, de sistemas de referências, de imagem digital, de transformação de imagem e os métodos de reamostragem.

2.1. Conceitos de Cartografia

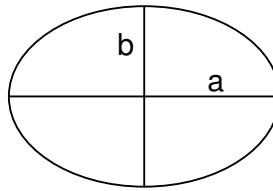
2.1.1. Formas e Dimensões da Terra

A Terra considerada genericamente como sendo uma forma "arredondada" ou esférica, pode assumir diferentes formas segundo o interesse e as necessidades das pesquisas que sobre ela são realizadas.

A *superfície física* ou *superfície topográfica* corresponde à configuração mais externa da Terra, na qual podem ser observadas as variações do relevo, caracterizando-a como uma forma irregular na parte continental do globo terrestre, segundo uma visão próxima dessa superfície. É sobre esta superfície que são desenvolvidas todas as atividades de levantamentos topográficos.

O *geóide* é a forma da superfície terrestre que mais se aproxima do nível médio do mar, gerada a partir do campo gravitacional que atua sobre a Terra. Tratando-se de uma superfície equipotencial, em qualquer ponto desta a direção da vertical ou do prumo aponta para o centro do geóide. Nas medições topográficas desenvolvidas sobre a superfície física da Terra é o geóide quem determina a orientação horizontal do plano topográfico do instrumento.

O *elipsóide de revolução* ou *elipsóide de referência* (Figura 2.1) é uma superfície matemática teoricamente definida a partir de dois semi-eixos (polar e equatorial). Esta superfície é utilizada como referência tanto pela geodésia matemática como pela cartografia, para a projeção dos pontos da superfície terrestre sobre um plano de representação.



a = semi-eixo equatorial

b = semi-eixo polar

Figura 2.1 – Elipsóide de revolução

As dimensões do globo terrestre são definidas a partir dos comprimentos dos semi-eixos do elipsóide adotado como referência. No Brasil, até a década de 60, utilizava-se o elipsóide internacional de Hayford como superfície de referência, cujos parâmetros são: raio equatorial $a = 6378388.0\text{m}$ e achatamento $f = 1/297$. Grande parte do mapeamento sistemático do Brasil encontra-se referido a este elipsóide. A partir de 1970 passou-se a adotar o elipsóide internacional UGGI 1967 como superfície geométrica de referência. Seus parâmetros são: raio equatorial $a = 6378160.0\text{m}$ e achatamento $f = 1/298.25$.

2.1.2. Relações geométricas entre as diferentes formas adotadas para a Terra

Ao adotar-se diferentes formas para a superfície terrestre criam-se entre elas algumas relações cujos conhecimentos é de suma importância para as operações geodésicas e cartográficas. A figura 2.2 ilustra as relações entre a superfície física, o geóide e o elipsóide de referência.

- Normal = linha normal à superfície do elipsóide. Vertical = linha normal à superfície do geóide (direção do fio de prumo).
- h = altura geométrica ou elipsoidal – distância entre um ponto da superfície física e sua projeção no elipsóide ao longo da Normal.
- H = altura ortométrica ou altitude – distância entre um ponto da superfície física e sua projeção no geóide ao longo da Vertical.

- N = altura geoidal – distância entre as superfícies do elipsóide e do geóide, medida ao longo da Normal.
- i = desvio da vertical – ângulo formado entre as direções da Normal e da Vertical em um ponto do geóide.

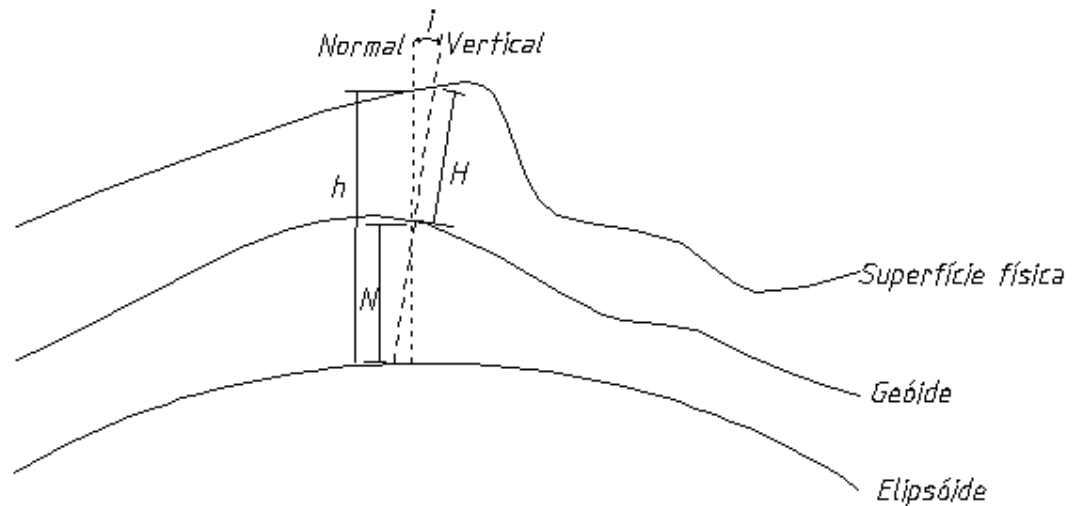


Figura 2.2 – Relações geométricas entre as formas adotadas para a Terra.

2.1.3. Sistemas de Coordenadas utilizados em Geodésia

As coordenadas referidas aos Sistemas de Referência Geodésicos são normalmente apresentadas em três formas: cartesianas tridimensionais, geodésicas (ou elipsoidais) e planas retangulares.

2.1.3.1 Sistema de Coordenadas Cartesianas Geodésicas Tridimensionais

Um sistema coordenado cartesiano no espaço 3-D é caracterizado por um conjunto de três retas (x,y,z), denominadas de eixos coordenados, mutuamente perpendiculares. Ele associado à um Sistema de Referência Geodésico, recebe a denominação de Sistema Cartesiano Geodésico de modo que:

- O eixo X coincidente ao plano equatorial, positivo na direção de longitude 0° ;
- O eixo Y coincidente ao plano equatorial, positivo na direção de longitude 90° ;
- O eixo Z é paralelo ao eixo de rotação da Terra e positivo na direção norte.
- Origem : se está localizada no centro de massas da Terra (geocentro), as coordenadas são denominadas de geocêntricas, usualmente utilizadas no posicionamento à satélites, como é o caso do WGS84.

A figura 2.3 apresenta as coordenadas cartesianas geocêntricas.

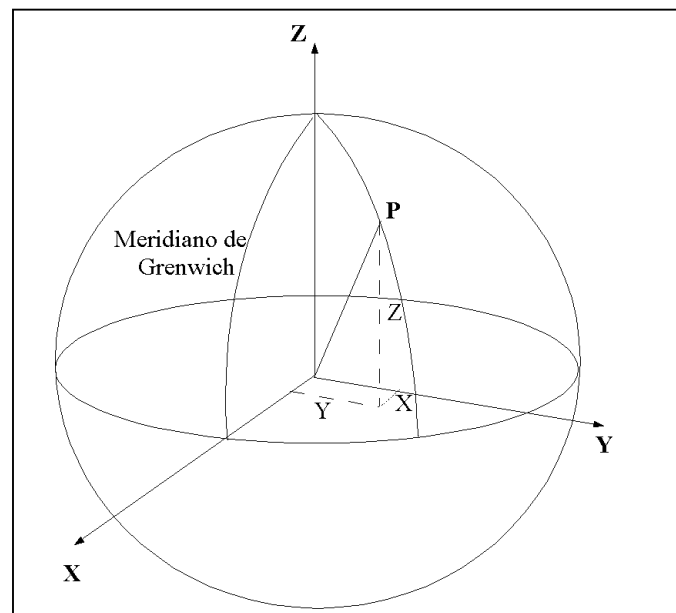


Figura 2.3 - Coordenadas cartesianas geocêntricas (X, Y, Z)

2.1.3.2. Sistema de Coordenadas Geodésicas ou Elipsoidais

Independente do método utilizado para se representar ou projetar uma determinada superfície no plano, deve-se adotar uma superfície que sirva de

referência, garantindo uma concordância das coordenadas na superfície esférica da Terra. Com este propósito, deve-se escolher uma figura geométrica regular, muito próxima da forma e dimensões da Terra, a qual permita, mediante a um sistema coordenado, posicionar espacialmente as diferentes entidades topográficas. Esta figura recebe à denominação de elipsóide e as coordenadas curvilíneas referidas a ele são denominadas de latitude e longitude geodésicas.

As definições de coordenadas geodésicas de um ponto qualquer P na superfície do elipsóide são:

- A latitude geodésica (ϕ) é o ângulo contado sobre o meridiano que passa por P, compreendido entre a normal passante por P e o plano equatorial (figura 2.4).
- A longitude geodésica (λ) é o ângulo contado sobre o plano equatorial, compreendido entre o meridiano de Greenwich e o ponto P (figura 2.4).
- A altitude elipsoidal corresponde a distância de P à superfície do elipsóide medida sobre a sua normal (figura 2.4).

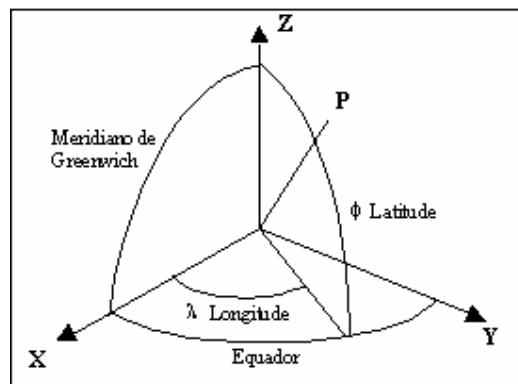


Figura 2.4 - Latitude (ϕ) e longitude (λ) geodésicas

Os sistemas coordenados curvilíneos também podem ser representados no espaço 3-D através do sistema cartesiano. O conjunto de formulações que fazem a associação entre estes dois sistemas (geodésico e cartesiano) consta na Resolução da Presidência da República n°23 de 21/02/89.

2.1.3.3. Sistema de Coordenadas Planas

As coordenadas referidas a um determinado Sistema de Referência Geodésico, podem ser representadas no plano através das componentes Norte e Leste e são usualmente encontrados em mapas. Para representar as feições de uma superfície curva em uma superfície plana são necessárias transformações matemáticas chamadas de Projeções. Diferentes projeções poderão ser utilizadas na confecção de mapas e cartas. No Brasil a projeção mais utilizada é a Universal Transversa de Mercator UTM. Maiores detalhes em SANTOS (1985).

2.1.4. Sistemas de Referência Clássicos

Historicamente, antes das técnicas espaciais de posicionamento, os referenciais geodésicos, conhecidos pela denominação de “datum astro-geodésico horizontal” – DGH, eram obtidos através das seguintes etapas:

(1) Escolha de um sólido geométrico (elipsóide de revolução), cujos parâmetros definidores são o achatamento (f) e semi-eixo maior (a). Este sólido por sua vez, representava de uma maneira aproximada as dimensões da Terra, no qual são desenvolvidos os cálculos geodésicos.

(2) Definição do posicionamento e orientação do referencial, feita através de 6 parâmetros topocêntricos: as coordenadas do ponto origem (2), a orientação (1 -azimute inicial), a separação geóide-elipsóide (ondulação geoidal) e as componentes do desvio da vertical (meridiana e primeiro vertical).

Estas informações tinham por objetivo, assegurar uma boa adaptação entre a superfície do elipsóide ao geóide na região onde o referencial era desenvolvido. Sendo assim, o centro do elipsóide não estava localizado no geocentro (centro da Terra), como por exemplo, no WGS 84.

(3) A realização (ou materialização) do referencial era feita através do cálculo de coordenadas dos pontos a partir de observações geodésicas de distâncias, ângulos e azimutes, ou seja, observações de origem terrestre.

Os itens 1 e 2 abordam os aspectos definidores do sistema, enquanto o item 3 aborda o aspecto prático na sua obtenção. Deste modo, as coordenadas geodésicas estão sempre associadas a um determinado referencial, mas não o definem.

2.1.5. Datum Geodésico

As operações geodésicas, terrestres ou espaciais, realizadas para determinar a posição de pontos da superfície terrestre têm como base o datum geodésico, adotado de acordo com as particularidades da região objeto dos levantamentos e também das relações entre os sistemas locais e um sistema global. Assim, o estabelecimento de um datum geodésico para uma região leva em conta não só as necessidades de orientação das medições, mas também o estabelecimento e aprimoramento de um sistema universal.

2.1.5.1. Conceito

Segundo OLIVEIRA (1993), datum geodésico "é uma superfície de referência que consiste de 5 valores: a latitude e a longitude de um ponto inicial, o azimute de uma linha que parte desse ponto e duas constantes para definição do elipsóide terrestre".

Ainda segundo o mesmo autor o termo datum altimétrico ou datum vertical também é empregado para designar a referência base para a medida das altitudes.

2.1.5.2. Datum Internacional

O sistema geodésico adotado internacionalmente a partir de 1984 é o *World Geodetic System – WGS-84*. Atualmente as efemérides do sistema GPS utilizam este sistema como referência para a determinação das coordenadas de pontos da superfície terrestre.

2.1.5.3. Datas regionais e locais

Tendo em vista o estabelecimento das grandes cadeias nacionais de pontos geodésicos, os países estabelecem datas regionais segundo critérios internacionalmente aceitos. Para o Brasil e também para América do Sul, a partir de 1969 adotou-se o South American Datum – SAD 69 como sistema geodésico de referência para os levantamentos geodésicos.

Seus parâmetros definidores são:

- elipsóide – UGGI 1967
- origem vértice Chuá
- latitude geodésica $19^{\circ} 45' 41.6527''$ S
- longitude $48^{\circ} 06' 04.0639''$ W
- azimute vértice Uberaba $271^{\circ} 30' 04.05''$.

Nas áreas onde ainda não existem pontos geodésicos das grandes cadeias é possível o estabelecimento de um sistema local independente, todavia as coordenadas dos pontos determinadas com base neste sistema não estarão referendadas nos sistemas internacionalmente aceitos, isto até que seja efetuada a ligação entre os mesmos.

2.1.6. Sistemas de Referência Geodésicos adotados no Brasil

2.1.6.1 Córrego Alegre

A Rede Planimétrica do SGB foi submetida a vários ajustes, em função das necessidades que eram envolvidas, principalmente no que diz respeito à definição de Sistemas Geodésicos. Anterior a era dos computadores, estes ajustes eram feitos com calculadoras mecânicas ou até mesmo a partir do uso da tábua de logaritmos. Um dos ajustamentos de importância realizados nesta época foi o que definiu o Sistema Geodésico de Referência Córrego Alegre. Neste ajuste foi adotado o método das equações de condições (método correlatos). A escolha do vértice Córrego Alegre para ponto datum, bem como, do elipsóide internacional de Hayford para superfície matemática de referência, foram baseadas em determinações

astronômicas realizadas na implantação da cadeia de triangulação em Santa Catarina. Verificou-se, na ocasião, que os desvios da vertical na região tinham uma tendência para o leste, ou seja, constatando uma maior concentração de massas a oeste e deficiência das mesmas a leste, concluindo que o ponto datum a ser escolhido ficaria melhor situado na região do planalto. O posicionamento e orientação no ponto datum, vértice Córrego Alegre, foram efetuados astronômicamente.

Foram adotados os seguintes parâmetros na definição deste Sistema:

- Superfície de referência : Elipsóide Internacional de Hayford 1924.
- semi-eixo maior : 6378388 metros.
- achatamento : 1/297
- Ponto Datum : Vértice Córrego Alegre.
- Coordenadas:
- $\phi = - 19^{\circ} 50' 14'' .91$
- $\ddot{\epsilon} = - 48^{\circ} 57' 41'' .98$
- $h = 683.81$ metros
- Orientação elipsóide-geóide no ponto datum : $\hat{\iota} = 0, \eta = 0$ (componentes do desvio da vertical)
- $N = 0$ metro (ondulação geoidal)

Com a finalidade de conhecer melhor o geóide na região do ponto datum, foram determinadas 2113 estações gravimétricas em uma área circular em torno do ponto datum. Estas observações tinham por objetivo o melhor conhecimento do geóide na região e estudos na adoção de um novo ponto datum, considerando-se arbitrária a escolha anteriormente feita (forçada a condição de tangência entre elipsóide e geóide). Como resultado destas pesquisas, foi escolhido um novo ponto datum, o vértice Chuá, localizado na mesma cadeia do anterior e através de um novo ajustamento foi definido um novo sistema de referência, denominado Astro Datum Chuá.

2.1.6.2. Astro Datum Chuá

O sistema Astro Datum Chuá, com ponto origem no vértice Chuá e elipsóide de referência Hayford, foi um sistema estabelecido segundo a técnica de posicionamento astronômico com o propósito de ser um ensaio ou referência para a definição do SAD69. Ele desenvolveria o papel de um sistema razoável a ser utilizado unicamente na uniformização dos dados disponíveis na época. Isso não representaria ainda o sistema “ótimo” para a América do Sul, faltando ainda a boa adaptação geóide-elipsóide para que as observações geodésicas terrestres pudessem ser reduzidas à superfície do elipsóide. Sendo assim, na condição de um sistema provisório, as componentes do desvio da vertical foram ignoradas, ou seja, foi assumida a coincidência entre geóide e elipsóide, no ajustamento das coordenadas em Astro Datum Chuá.

2.1.6.3. SAD69

O sistema SAD69 é um sistema geodésico regional de concepção clássica. A sua utilização pelos países Sul-americanos foi recomendada em 1969 através da aprovação do relatório final do Grupo de Trabalho sobre o Datum Sul-americano, pelo Comitê de Geodésia reunido na XI Reunião Pan-americana de Consulta sobre Cartografia, recomendação não seguida pela totalidade dos países do continente. Apenas em 1979 ele foi oficialmente adotado como sistema de referência para trabalhos geodésicos e cartográficos desenvolvidos em território brasileiro.

O Projeto do Datum Sul Americano foi dividido em duas partes :

(1) Estabelecimento de um sistema geodésico tal que o respectivo elipsóide apresentasse “boa adaptação” regional ao geóide.

(2) Ajustamento de uma rede planimétrica de âmbito continental referenciada ao sistema definido.

A triangulação foi a metodologia predominante no estabelecimento das novas redes. Uma rede de trilateração HIRAN fez a ligação entre as redes geodésicas da

Venezuela e Brasil. Outra melhoria a ser implementada diz respeito à forma do elipsóide de referência. Na época, a UGGI recomendou a utilização do GRS67, conduzindo, assim, à adoção desta figura no projeto SAD69, ao invés do Hayford. Escolhido o elipsóide de referência, era necessário fixar os parâmetros para o seu posicionamento espacial. No caso do SAD69, este posicionamento deu-se em termos de parâmetros topocêntricos no ponto origem Chuá: as componentes do desvio da vertical (ϵ e η) e a ondulação geoidal (N), cujos valores foram determinados de forma a otimizar a adaptação elipsóide-geóide no continente.

A definição do sistema foi complementada através do fornecimento das coordenadas geodésicas do ponto origem e do azimute geodésico da direção inicial Chuá-Uberaba. Em consequência das limitações impostas pelos meios computacionais da época, a rede brasileira foi dividida em 10 áreas de ajuste, que foram processadas em blocos separados. Os seguintes parâmetros foram adotados na definição deste Sistema:

- Superfície de referência : Elipsóide Internacional de 1967(UGGI67).
- Semi-eixo maior : 6378160 metros.
- Achatamento : 1/298.25
- Ponto datum : Vértice Chuá,
- Coordenadas geodésicas:
- Latitude $19^{\circ}45'41''$.6527 S
- Longitude $48^{\circ}06'04''$.0639 W
- Azimute (Chuá – Uberaba) $271^{\circ}30'04''$.05
- Altitude ortométrica : 763.28m
- Orientação elipsóide-geóide no ponto datum : $\hat{\eta} = 0.31$ $\zeta = -3.52$ N=0 m

2.1.6.4. Procedimentos de Densificação do SAD69

A rede planimétrica continental do SAD69 foi ajustada pela primeira vez na década de 60. Neste ajustamento, cadeias de triangulação de vários países tiveram seus dados homogeneizados, adotando-se o mesmo tratamento. Em função da extensão da rede e das limitações computacionais da época, fez-se necessário dividir o ajustamento por áreas. Optou-se, então, pelo método de ajustamento

conhecido por “piece-meal”, no qual uma vez ajustada uma determinada área, as estações das áreas adjacentes, comuns à ajustada, são mantidas fixas, de modo que cada estação da rede só tenha um par de coordenadas correspondente. Este procedimento foi mantido pelo IBGE no processo de densificação da rede planimétrica após a conclusão do ajustamento em SAD69. Esta metodologia de densificação foi uma das causas do acúmulo de distorções geométricas (escala e orientação) na rede planimétrica. Em alguns trechos da rede, as reduções das observações geodésicas ao elipsóide foram aplicadas através de dados obtidos por mapas geoidais pouco precisos, pois eram os únicos existentes na época. Outro fato que não pode ser ignorado é a diversidade de instrumentos e métodos utilizados no decorrer do estabelecimento da rede, tornando complexa a análise da precisão das coordenadas das estações.

Tendo em vista todos os fatos aqui abordados, aliados aos avanços tecnológicos emergentes, constatou-se a necessidade de um reajustamento da rede, desta vez de forma global, abrangendo todas observações disponíveis até então.

Como o SAD69 é o referencial oficialmente adotado no Brasil, neste reajustamento foram mantidos os mesmos parâmetros definidores e injunções iniciais do primeiro ajustamento. Sendo assim, forçosamente se deve manter a mesma denominação para o sistema de referência SAD69 na sua nova materialização após o reajustamento.

2.1.6.5. SAD69 – realização 1996

O IBGE, através do Departamento de Geodésia possui a atribuição de estabelecer e manter as estruturas geodésicas no Brasil. Muitas mudanças ocorreram na componente planimétrica na última década. A começar pela utilização da técnica de posicionamento através do sistema de satélites GPS. Esta alteração nos procedimentos de campo repercutiu no processamento das respectivas observações, acarretando a necessidade de conduzir ajustamentos de redes em três dimensões. Isso foi alcançado, no caso do reajustamento global da rede brasileira, com a utilização do sistema computacional GHOST, desenvolvido no Canadá para o Projeto *North American Datum of 1983 (NAD-83)*.

Além das observações GPS, as referentes à rede clássica também participaram do reajustamento, formando uma estrutura de 4759 estações contra 1285 ajustadas quando da definição do SAD69.

O reajustamento concluído em 1996 combinou duas estruturas estabelecidas independentemente por diferentes técnicas. A ligação entre elas é feita através de 49 estações da rede clássica observadas por GPS. A rede GPS (por ser uma estrutura de precisão superior) tem por função controlar a rede clássica. Algumas observações Doppler também foram incluídas no ajustamento com este objetivo. Uma informação importante fornecida pelo reajustamento foi o erro absoluto ou o desvio padrão das coordenadas.

2.1.6.6. Transformação de Datum

O mapeamento do território nacional foi referenciado durante muitos anos ao datum Córrego Alegre. A partir de 1979, houve uma mudança para o datum SAD 69. Já o sistema utilizado pelo GPS é o WGS 84, portanto diferentes dos adotados no Brasil.

Em função dessa diversidade de Data, há necessidade do uso de modelos matemáticos de transformação para que se possam realizar conversões entre eles. As formulações para as transformações entre os sistemas Córrego Alegre, SAD69 e WGS84 podem ser encontradas em SANTOS (2001).

2.2. Imagem Digital

A imagem digital de sensoriamento remoto é constituída por um arranjo de elementos sob a forma de uma malha ou grid , onde cada célula desse grid tem sua localização definida em um sistema de coordenadas do tipo linha e coluna, representada por “x” e “y”, respectivamente, com cada elemento possuindo um atributo “z” (nível de cinza), que representa a média da intensidade de energia refletida ou emitida pelos diferentes materiais presentes nesse pixel (CRÓSTA, 1992; GONZALES e WOODS,2000). Portanto, uma imagem digital pode ser vista como uma matriz composta por células geralmente quadradas, chamadas *pixels*

(*picture elements*). Cada *pixel*, está representado por um nível de cinza, que por sua vez define um número digital. A figura 2.5 mostra a distribuição matricial em níveis de cinza e os respectivos números digitais.

O intervalo de valores no qual o pixel está mapeado é dado pela resolução radiométrica (níveis de quantização de energia refletida ou emitida pelo objeto). O intervalo de níveis de cinza é representado por $[0, 2^n - 1]$. Para a maioria dos sensores orbitais $n=8$, ou seja, um byte, e portanto o intervalo é dados por $[0, 255]$. Para o caso dos sensores de alta resolução $n > 8$, e portanto, tem-se uma melhor definição radiométrica dos alvos. Desta forma, apresenta uma maior quantidade de níveis de cinza para representar os dados sensoriados.

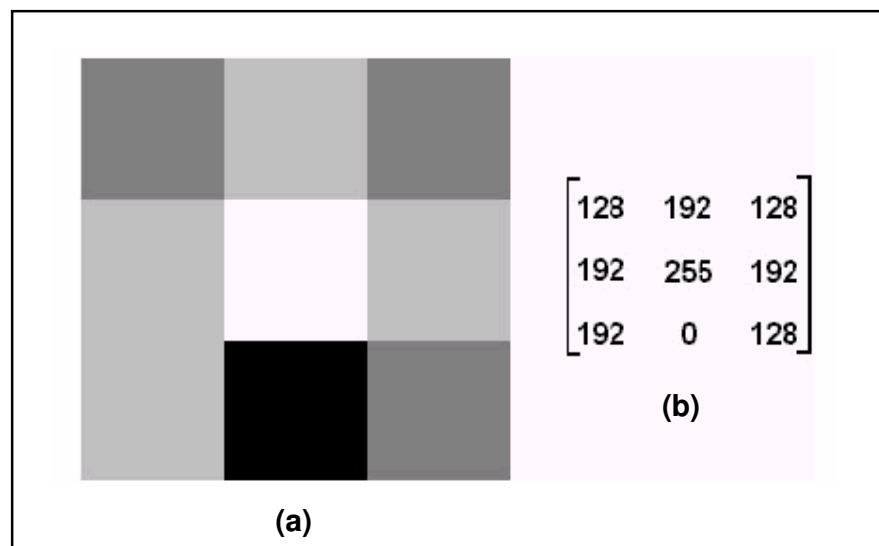


Figura 2.5 – Representação de uma imagem. (a) imagem em níveis de cinza.
(b) imagem numérica

A imagem digital pode ser também definida como uma função bidimensional de intensidade luminosa $f(x,y)$, onde x e y são as coordenadas espaciais e o valor f em qualquer ponto (x,y) é proporcional ao brilho ou nível de cinza da imagem naquele ponto. Esta é uma imagem discretizada tanto nas coordenadas espaciais quanto no brilho, ou seja, só assume valores inteiros positivos no intervalo fechado $[0, 2^n - 1]$. (GONZALES e WOODS, 2000).

No trabalho aqui apresentado, será adotada a representação matricial para as imagens, por ser esta mais adequada para a modelagem proposta.

A figura 2.6 mostra a matriz de formação da imagem e sua origem considerada na posição da 1ª linha e 1ª coluna ($I(1,1)$). Generalizando, a posição de um pixel na imagem é dada por x,y e o valor por $I(x,y)$.

Cada elemento da matriz que forma a imagem recebe o nome de pixel e corresponde ao menor elemento de resolução no terreno (resolução espacial).

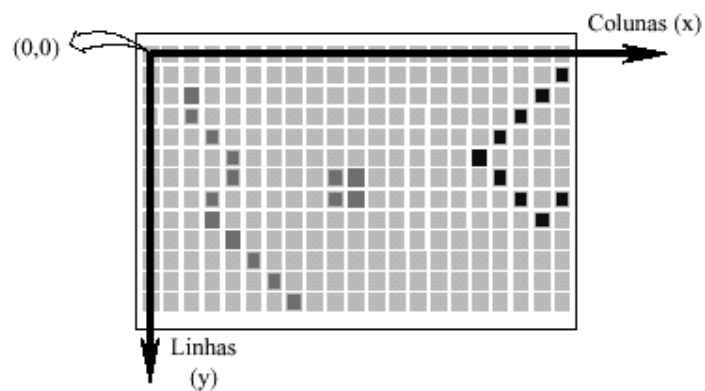


Figura 2.6 - Matriz de formação da imagem digital I.

2.3 Transformação de Imagens Digitais

Segundo NOVAK (1992), para transformar uma imagem digital por uma função analítica, pode-se utilizar uma aproximação direta ou uma indireta. O método indireto considera a posição de cada pixel da imagem resultado (por exemplo, ortoimagem), determina sua posição na imagem original pela transformação selecionada f_x e f_y (equação 2.1), e interpola o nível de cinza por um determinado método de reamostragem (figura 2.7a).

$$\begin{aligned}x &= f_x(x',y') \\y &= f_y(x',y')\end{aligned}\tag{2.1}$$

Onde, x,y = coordenadas do pixel na imagem original;
 x',y' = coordenadas do pixel na imagem resultado, e

f_x, f_y = funções de transformação.

Por outro lado, o método direto considera inicialmente a posição do pixel na imagem original, transforma suas coordenadas para a imagem resultado, e atribui o valor cinza do pixel inteiro mais próximo (figura 2.7b).

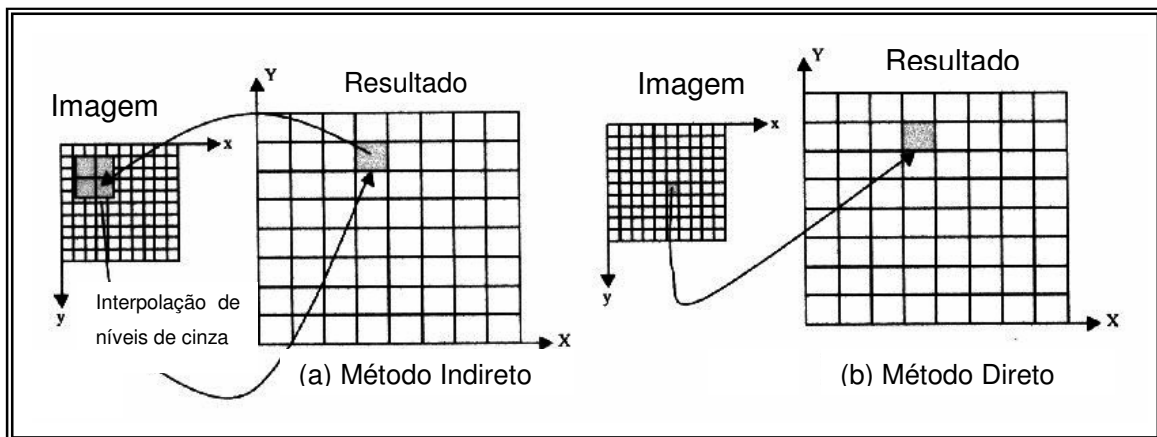


Figura 2.7 – Transformações em uma imagem. (a) Método de transformação indireto e (b) direto.

Como as coordenadas obtidas nos dois métodos de transformação não coincidem com posições (inteiras) dos pixels na imagem resultado é necessário uma interpolação para obter os tons de cinza dos pixels da ortoimagem. Esse processo é chamado de reamostragem.

2.4. Os Métodos de Reamostragem

Segundo (CRÓSTA, 1992), os métodos de reamostragem mais utilizados são: vizinho mais próximo, interpolação bilinear e convolução cúbica.

2.4.1. Interpolação Vizinho Mais Próximo

Este método apenas atribui o valor do nível de cinza de determinado pixel Z da imagem reamostrada ao pixel da imagem original que estiver mais próximo da posição ocupada por Z . Este método possui 0,5 pixel de erro, e isso leva a

descontinuidades na imagem reamostrada. Algumas de suas vantagens são seu rápido processamento e fácil implementação. Além disso, esta reamostragem não altera os valores radiométricos da imagem original (NOVO,1988; CROSTA,1992).

2.4.2. Interpolação Bilinear

Nesta interpolação o valor do nível de cinza a ser atribuído ao pixel Z é determinado a partir do valor dos quatro pixels vizinhos. Com este método, haverá uma maior precisão geométrica e o desaparecimento de descontinuidades. Entretanto, há que se considerar o maior processamento de cálculos e a alteração dos valores de níveis de cinza da imagem original (NOVO, 1988; CROSTA,1992).

2.4.3. Interpolação Convolução Cúbica

Neste caso, o nível de cinza a ser atribuído ao pixel Z é determinado a partir de cálculos realizados numa matriz de 16 pixels na sua vizinhança. Apresenta como vantagem a melhoria na visualização da imagem geometricamente corrigida, porém aumenta o tempo computacional comparado aos métodos citados anteriormente, além de degradar a qualidade radiométrica dos dados (NOVO, 1988; CROSTA,1992).

3. MODELO MATEMÁTICO PARA ORTORRETIFICAÇÃO DIGITAL

Sempre que se necessita descrever matematicamente uma realidade física, recorre-se a modelagens matemáticas na tentativa de representa-la com a melhor aproximação possível.

Segundo BALTSAVIAS (2001), HATTORI (2000) e FRASER (2001) nos últimos anos, vários modelos matemáticos vêm sendo pesquisados para a obtenção de informações espaciais tridimensionais (3D) e geração de ortoimagens a partir de imagens digitais de sensores remotos de varredura linear (line CCD sensors), tais como: *SPOT*, *IRS-1* e *IKONOS*.

Considerando a utilização de imagens de satélites, o desenvolvimento de modelos matemáticos rigorosos baseados nas equações de colinearidade, exigem o conhecimento de dados de calibração do sensor, informações da órbita do satélite e atitude do sensor. Como estes dados encontram-se indisponíveis ou de difícil obtenção para as imagens orbitais de alta resolução, se faz necessário o desenvolvimento de um modelo matemático que defina de forma mais exata, a transformação entre os sistemas de referência da imagem e o geodésico local.

O modelo matemático considerado nesta pesquisa para a transformação entre os sistemas de referências da imagem (x,y) e o referencial geodésico local (X,Y,Z) , é a equação APM – *Affine Projection Model*, conhecido como Equação de Projeção Paralela que projeta o espaço R^3 no plano R^2 . Segundo MITISHITA (2002), esta transformação matemática permite a extração precisa de informações tridimensionais 3D do terreno a partir dessas imagens sem o conhecimento dos parâmetros geométricos do sensor e órbita do satélite, onde o deslocamento de pontos na imagem devido ao relevo é considerado, sendo necessária a informação altimétrica que pode ser obtida através do Modelo Digital de Terreno (MDT) da região a ser trabalhada.

De acordo com LUGNANI (1987), a projeção paralela é um caso particular da projeção central onde o centro de projeção foi deslocado para o infinito. Este tipo de

projeção modela o comportamento dos sistemas de sensores dos satélites de alta resolução espacial que são tipicamente lineares do tipo *push-broom*.

A imagem *IKONOS*, por exemplo, é proveniente de um sensor linear que possui grande distância focal e campo de visada estreito. A geometria de uma linha da imagem tem uma perspectiva central no sentido da varredura e se aproxima de uma projeção paralela no sentido do deslocamento do satélite. Portanto, a projeção da imagem pode ser aproximada por uma projeção paralela.

3.1. A Equação APM - Affine Projection Model

Segundo OKAMOTO (1999), o modelo de projeção APM pode ser derivado da equação de colinearidade convencional (figura 3.1):

$$\begin{pmatrix} 0 \\ y \\ -c \end{pmatrix} = \lambda (R_{\phi_i} R_{\omega_i} R_{\kappa_i})^T \begin{pmatrix} X - X_{0i} \\ Y - Y_{0i} \\ Z - Z_{0i} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Onde, (X, Y, Z) são as coordenadas do ponto no terreno, λ é o parâmetro de escala, c é a distância principal, $R_{\phi_i} R_{\omega_i} R_{\kappa_i}$ são matrizes de rotação nos três eixos e (x, y) são coordenadas de ponto imagem.

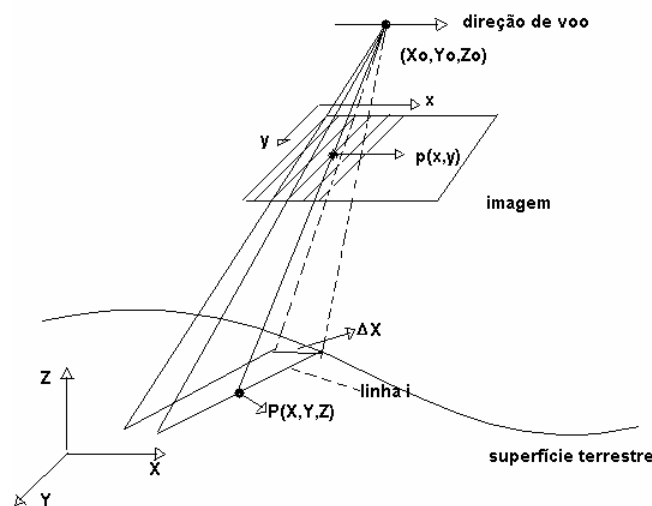


Figura 3.1 - Modelo esquemático da Equação de Colinearidade

A figura 3.1 apresenta um modelo esquemático da equação de colinearidade aplicada a imagens orbitais.

Considerando a imagem como uma projeção paralela, a distância c pode ser considerada no infinito e a equação (3.1) pode ser escrita como:

$$0 = a_{11}(X - X_{0i}) + a_{12}(Y - Y_{0i}) + a_{13}(Z - Z_{0i}) \quad (3.2)$$

$$Y = a_{21}(X - X_{0i}) + a_{22}(Y - Y_{0i}) + a_{23}(Z - Z_{0i}) \quad (3.3)$$

Onde, a_{ij} ($i=1,2,3$; $j=1,2,3$) são elementos da matriz $\lambda (R_{\phi_i} R_{\omega_i} R_{\kappa_i})^T$.

Considerando, além disso, que o sensor se move linearmente no espaço e que os parâmetros de orientação permanecem constantes, o centro de projeção de cada linha pode ser descrito por:

$$X_{0i} = X_0 + \Delta X i \quad (3.4)$$

Supõe-se que X_0 e ΔX valores constantes e i o número da linha. Expressões semelhantes são igualmente definidas para Y_{0i} e Z_{0i} .

A linha de número i é expressa pela equação (3.5), obtida substituindo a equação (3.4) na (3.2):

$$i = \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{11} \Delta X + a_{12} \Delta Y + a_{13} \Delta Z} \quad (3.5)$$

Substituindo a linha de número i pela coordenada de imagem x , e considerando os parâmetros de orientação constantes, a equação (3.5) pode ser expressa por:

$$x = \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{11} \Delta X + a_{12} \Delta Y + a_{13} \Delta Z} \quad (3.6)$$

A equação (3.6) organizada para os coeficientes constantes é descrita pela seguinte expressão algébrica:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}_1\mathbf{X} + \mathbf{A}_2\mathbf{Y} + \mathbf{A}_3\mathbf{Z} + \mathbf{A}_4 \quad (3.7)$$

A equação (3.3) também é expressa através de arranjo semelhante por:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}_5\mathbf{X} + \mathbf{A}_6\mathbf{Y} + \mathbf{A}_7\mathbf{Z} + \mathbf{A}_8 \quad (3.8)$$

Onde,

(x, y) = coordenadas planas no sistema de referência da imagem;

(X, Y, Z) = coordenadas tridimensionais no sistema de referência geodésico local;

$(A_1, A_2 \dots A_8)$ = parâmetros de transformação.

As equações (3.7) e (3.8) são conhecidas como Equação APM.

3.2. Solução da Equação APM pelo Método dos Mínimos Quadrados - MMQ

Para determinar os parâmetros da Equação APM, (3.7) e (3.8), necessitamos de 8 (oito) equações. Entretanto, cada ponto forma duas equações, e podem ser utilizados no mínimo 4 (quatro) pontos para resolver o sistema de equações.

Segundo DALMOLIN (2002), o MMQ consiste em estimar variáveis estocásticas X e seus parâmetros de distribuição, a partir de amostras L observadas com precisão Σ_L . Portanto tem-se que, conhecendo a priori os dados L e Σ_L estima-se X e Σ_x .

Estarão envolvidos nos problemas de ajustamento três espaços: o espaço das observações ou medidas, o espaço do modelo matemático e o espaço dos parâmetros incógnitos. Dentre os vários modelos do MMQ, descrevemos a seguir o modelo paramétrico, utilizado nesta Pesquisa para a determinação dos parâmetros da equação APM (equação (3.7) e (3.8)).

De acordo com GEMAEL (1994), o modelo matemático paramétrico, também conhecido como modelo de observações indiretas, é dado por:

$$L_a = F(X_a) \quad (3.9)$$

Onde, L_a é o vetor das observações ajustadas, X_a é o vetor dos parâmetros ajustados e F uma função que relaciona L_a a X_a . Sua solução é representada pela equação (3.10), demonstrada em GEMAEL (1994):

$$X = - (A^T P A)^{-1} P L_b \quad (3.10)$$

Onde, X é a matriz dos parâmetros;
 A é a matriz das derivadas parciais;
 A^T é a matriz transposta de A ;
 P é a matriz peso das observações; e,
 L_b é o vetor dos valores observados.

Considerando como modelo matemático a equação APM, (3.7) e (3.8), as matrizes correspondentes, para um exemplo em que quatro pontos de controle são utilizados, seguem conforme as equações abaixo.

a. Matriz A – obtida das derivadas parciais da equação APM com relação aos seus oito parâmetros ($A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$ e A_8).

Para a equação (3.7), temos que as derivadas parciais em relação aos parâmetros, são dadas por:

$$\partial x / \partial A_1 = X, \quad \partial x / \partial A_2 = Y, \quad \partial x / \partial A_3 = Z, \quad \partial x / \partial A_4 = 1$$

$$\partial x / \partial A_5 = 0, \quad \partial x / \partial A_6 = 0, \quad \partial x / \partial A_7 = 0, \quad \partial x / \partial A_8 = 0$$

E, para a equação (3.8):

$$\partial y / \partial A_1 = 0, \quad \partial y / \partial A_2 = 0, \quad \partial y / \partial A_3 = 0, \quad \partial y / \partial A_4 = 0$$

$$\partial y/\partial A_5 = X, \quad \partial y/\partial A_6 = Y, \quad \partial y/\partial A_7 = Z, \quad \partial y/\partial A_8 = 1$$

Logo, a matriz A é representada por:

$$A = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_3 & Y_3 & Z_3 & 1 \\ X_4 & Y_4 & Z_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_4 & Y_4 & Z_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

b. Matriz Peso - considerando as observações com o mesmo peso, a matriz P pode ser representada pela matriz identidade:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

c. Vetor das observações L_b – obtido das coordenadas dos pontos medidas na imagem.

$$L_b = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

A partir das matrizes assim definidas, a aplicação do método dos mínimos quadrados irá garantir a minimização dos resíduos, determinando assim os valores dos novos parâmetros.

3.3. Modelo Digital de Terreno

Segundo BURROUGH (1986), o MDT é uma representação matemática da distribuição espacial da característica de um fenômeno vinculada a uma superfície real. De acordo com DESTRI (1987), o modelo digital de terreno (MDT) é um conjunto tridimensional de pontos dispostos planimetricamente segundo uma distribuição definida que tanto pode ser segundo triângulos quanto quadriláteros regulares.

Para MITISHITA (1997), modelo digital de terreno é o termo empregado para referir-se ao modelamento matemático de superfícies. Pode-se definir MDT como sendo um conjunto de pontos amostrados da superfície real, com coordenadas espaciais (X,Y,Z) determinadas num dado referencial e algoritmos que possibilitem construir um modelo matemático que reproduza da melhor maneira possível o comportamento altimétrico da superfície real.

As aplicações do MDT são diversas e para exemplificar, mostra-se a seguir as citadas por PORTUGAL (1999):

1. armazenamento de dados de altimetria para mapas topográficos digitais;
2. identificação e cálculo de volume para cortes e aterros para projetos de engenharia;
3. visualização do terreno em 3D;
4. planejamento de traçado de estradas, estudo de barragens;
5. análise estatística de tipos de terreno;

6. identificação de intervisibilidade entre pontos do terreno;
7. identificação de superfícies quaisquer, substituindo-se os valores de altitude por outros que representem determinado fenômeno;
8. identificação de áreas de inundação e áreas agricultáveis;
9. geração de mapas de aspecto e de declividade;
10. utilização em processos de ortorretificação, entre outras.

Para a representação de uma superfície real no computador é indispensável à elaboração e criação de um modelo digital, que pode estar representado por equações analíticas ou uma rede (grade) de pontos.

No processo de modelagem numérica do terreno podemos identificar três fases distintas: aquisição de dados, geração de grades e operações para gerar informações, sendo definidas por MITISHITA, 1997, da seguinte forma:

- a) aquisição do conjunto de amostras – obtenção de informações da superfície real que possibilite a caracterização matemática do modelo;
- b) geração do modelo – elaboração de um modelo matemático composto por estruturas de dados e funções de interpolação que simulem o comportamento da superfície real;
- c) utilização do modelo gerado – utilização do modelo em substituição à superfície real.

A obtenção de informações da superfície real para fins de modelamento matemático de superfícies, consiste em levantar por uma técnica de amostragem um certo número de pontos com coordenadas espaciais (X,Y,Z). O processo de amostragem não pode ser conduzido de forma casual. A escolha de pontos deve ser realizada de maneira que o conteúdo informativo dos mesmos represente o

comportamento estrutural da superfície real. A correta definição dos pontos amostrados constitui a base de funcionamento dos algoritmos matemáticos utilizados na interpolação matemática de alturas.

Os pontos com suas coordenadas espaciais podem ser obtidos com base nas seguintes técnicas:

- Levantamentos topográficos e geodésicos;
- Fotogrametria;
- Digitalização vetorial de curvas de nível; Transformação de curvas de nível digital (vetorial) para pontos com coordenadas espaciais.

Os dois principais tipos de grade utilizados em modelagem digital do terreno são a triangulação e a grade retangular (figura 3.2).

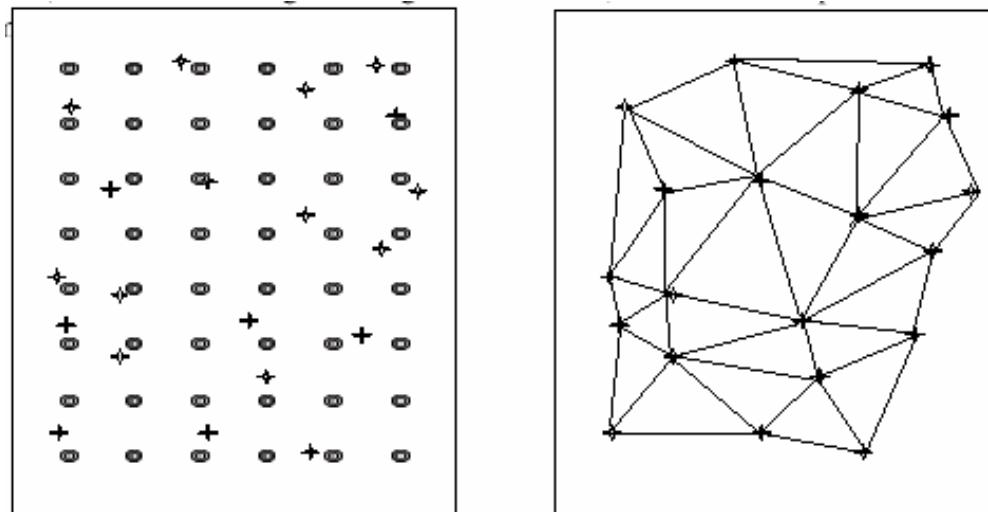


Figura 3.2 - Superposição de grade regular retangular (●) com triangular (+) (à esquerda) e TIN (à direita).

3.3.1. Grades Regulares ou Retangulares

A grade regular ou retangular é um modelo digital que aproxima superfícies através de um poliedro de faces retangulares. Os vértices desses poliedros podem

ser os próprios pontos amostrados caso estes tenham sido adquiridos nas mesmas posições XY que definem a grade desejada.

A geração da grade regular deve ser efetuada quando os dados amostrados na superfície não são obtidos com espaçamento regular. Desta forma, a partir de informações contidas nas isolinhas ou nos pontos amostrados, gera-se uma grade que represente a superfície aproximando-se da realidade.

CÂMARA (1998) descreve a grade regular como 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 de medidas de elevação conhecidas.

Uma das considerações importantes a respeito da grade regular é o espaçamento a ser estabelecido entre os seus elementos. Valor excessivamente pequeno proporciona um aumento na fidelidade em regiões de comportamento irregular, mas nada oferece em regiões regulares, com aumento significativo de tempo de processamento. Por outro lado, um valor grande, diminui o tempo de processamento, mas perde a fidelidade em regiões de comportamento irregular.

3.3.2. Grades Irregulares Triangulares

A rede triangular irregular (*triangular irregular network*), ou TIN, é composta pelos pontos originais, ligados três a três, formando triângulos irregulares, porém, com propriedades matemáticas bem definidas.

Na modelagem da superfície por meio de grade irregular triangular, cada polígono que forma uma face do poliedro é um triângulo. Os vértices do triângulo são geralmente os pontos amostrados da superfície. Esta modelagem permite que as informações morfológicas importantes como as discontinuidades, representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas durante a geração da grade triangular, possibilitando modelar a superfície do terreno preservando as feições geomórficas da superfície.

Em certas aplicações, a malha regular apresenta vantagens, quando comparada com a malha triangular, mas em outras, a malha triangular é superior. Para atender as diversas tarefas, os sistemas de MDT apresentam ambas soluções, ficando para o usuário a opção de escolha do método, que se dá, geralmente, em função do tipo de trabalho a ser realizado.

3.3.3. Interpolação de um MDT

Segundo WEIBEL e HELLER (1991), citado por CORTES (1998), na modelagem digital de terreno a interpolação tem o objetivo de estimar cotas em regiões onde não existam dados. A interpolação é utilizada para:

- Cálculo de altitudes (z) para localizações pontuais;
- Cálculo de altitudes (z) para uma malha particular a partir dos pontos amostrados originalmente;
- Cálculo de localização de coordenadas (x,y) de pontos ao longo de curvas de nível;
- Reamostragem de malhas regulares.

A qualidade do MDT é resultante da escolha do método de interpolação e do processo de amostragem dos pontos, não podendo afirmar que um algoritmo de interpolação seja superior a outro ou que seja apropriado a todas as aplicações.

Dentro dos vários modelos de interpoladores existentes, utilizamos a Média Ponderada por Quadrante e Cota, pois além da ponderação por quadrantes, o valor de cota de cada amostra a ser usada na estimativa do ponto da grade é considerado. Seu uso é recomendado quando as amostras são do tipo isolinhas (www.dpi.inpe.br/spring/teoria/mnt/mnt.htm).

3.4. Ortorectificação Digital

De acordo com BRITO (1999), o objetivo da ortorectificação é gerar uma nova imagem digital (de perspectiva ortogonal) a partir de uma imagem fotogramétrica (de

perspectiva central), sem as distorções introduzidas pela atitude do sensor durante a formação da imagem e sem os deslocamentos devido ao relevo.

Para VOLOTÃO (2001), o processo de ortorretificação digital 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 ortorretificação das imagens, necessariamente deve haver um MDT (modelo digital de terreno), sem o qual não seria possível a correção devido ao relevo.

3.4.1. Algoritmos de Ortorretificação Digital

Segundo BRITO (1997), há três principais aproximações para a implementação de algoritmos de retificação de imagem:

- retificação polinomial;
- transformação projetiva, e
- retificação diferencial.

Estas aproximações foram estudadas e implementadas durante os últimos anos, analisando-se suas aplicações e principais vantagens e desvantagens. Veja, por exemplo, KONECNY (1979), WIESEL (1985), MAYR e HEIPKE (1988), KRAUS (1992), e CHEN e LEE (1993), citados por NOVAK (1992) . O estudo comparativo destas aproximações, concluiu que:

- embora de uso muito fácil , os algoritmos de retificação polinomial não corrigem adequadamente deslocamentos na imagem devido ao relevo;
- a transformação projetiva tem seu uso limitado a retificação de fotografias aéreas de terreno plano ou imagens de fachadas de edifícios, sem correção de deslocamento de relevo;
- a retificação diferencial corrige deslocamento de relevo e distorções de máquina fotográfica, apresentando melhores resultados comparada

aos métodos acima citados, e pode ser aplicada para fotografia aérea e para imagem de satélite.

Baseado na análise das principais vantagens e desvantagens dos algoritmos de retificação apresentados acima, o método indireto de retificação diferencial digital foi o escolhido para o desenvolvimento desta Pesquisa.

3.4.2. Retificação Diferencial de imagem Digital

De acordo com NOVACK (1992), a retificação diferencial consiste em atribuir valores de cinza da imagem de satélites para cada pixel do MDT. Para determinar os valores de cinza na imagem, as coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) de cada pixel do MDT são transformadas para o domínio da imagem utilizando um modelo matemático de mapeamento (Equação APM, por exemplo). Obtendo-se as coordenadas de imagem (x, y) , o valor de cinza é interpolado por um método de reamostragem de pixels (o método de interpolação bilinear, por exemplo) e em seguida armazenado nas mesmas coordenadas (X, Y) do MDT gerando a ortofoto. A figura 3.3 mostra o método da retificação diferencial digital.

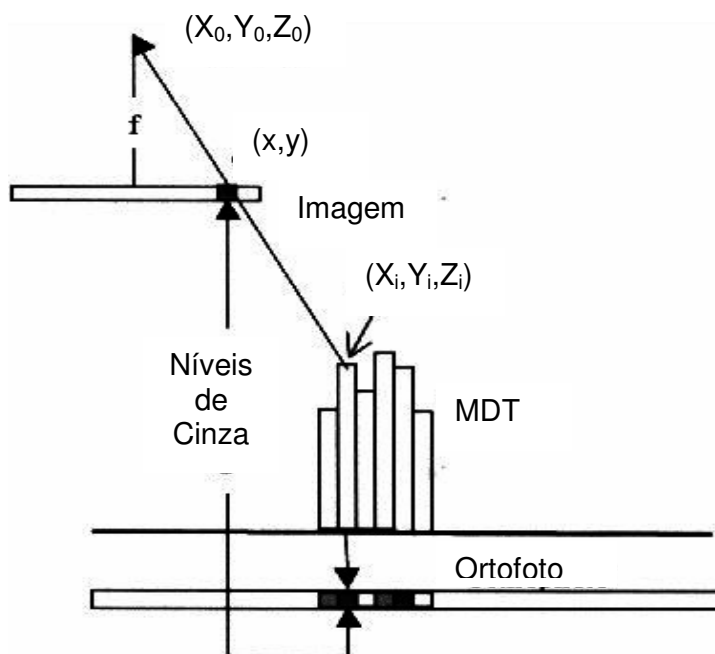


Figura 3.3 - Método de Retificação Diferencial Digital

3.5. Controle da Qualidade Geométrica de Dados Espaciais

De acordo com BORGES (2002), o controle da qualidade posicional ou geométrica de imagens provenientes de plataformas orbitais, pode ser obtido através da avaliação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Normalmente, o controle é realizado pela comparação entre a posição de pontos na imagem (E_i, N_i), com suas respectivas coordenadas de referência no terreno (E_r, N_r), obtidas por exemplo, através de um levantamento GPS. Obtendo-se estas coordenadas, pode-se assim avaliar as discrepâncias por $(dx, dy) = (E_i - E_r, N_i - N_r)$ e obter as estatísticas (média, desvio padrão e erro máximo) para cada uma das componentes. Com estas estatísticas amostrais, realizam-se testes específicos para a avaliação de tendência e precisão.

3.5.1. Padrões de Exatidão Cartográfica

Segundo ISHIKAWA (2001), o Padrão de Exatidão Cartográfica é um conjunto de critérios e normas estabelecidas e que norteiam os processos de determinação e quantificação da exatidão de um documento cartográfico.

No Brasil, o Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 – Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, se destina a estabelecer procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação da Cartografia Nacional, bem como os padrões mínimos a serem adotados no desenvolvimento das atividades cartográficas.

Este Decreto, em seu Capítulo II, Artigos 8º e 9º, transcritos abaixo, apresenta as normas que estabelece a forma de classificar um documento cartográfico segundo sua qualidade geométrica.

“...- Classificação de uma Carta Quanto a Exatidão

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

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

Parágrafo Primeiro- Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.

Parágrafo Segundo- A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o ErroPadrão - $PEC = 1,6449 EP$.

Parágrafo Terceiro - O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

Parágrafo Quarto - Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

- Classes de Cartas

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

a.Classe A

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

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

b. Classe B

- Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,8 mm na escala da carta, sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.
- Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quintos da eqüidistância entre as curvas-de-nível, sendo de dois quintos o Erro-Padrão correspondente.

c. Classe C

- Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 1,0 mm na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.
- Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quartos da eqüidistância entre as curvas-de-nível, sendo de metade desta eqüidistância o Erro-Padrão correspondente.”

A tabela 2.5 apresenta um resumo das diferentes valores do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e Erro Padrão (EP) planimétrico, considerando as escalas dos documentos cartográficos, conforme as normas do Decreto 89.817/84.

Tabela 3.1 – Valores do PEC e EP, considerando as escalas da carta, conforme Decreto 89.817/84

Classe	Planimetria	
	PEC	EP
A	0,5 mm	0,3 mm
B	0,8 mm	0,5 mm
C	1,0 mm	0,6 mm

Para efeito de avaliação da acurácia planimétrica das ortoimagens geradas pela metodologia proposta nesta Pesquisa, considerar-se-á estas como sendo um documento cartográfico de Classe A.

3.5.2. Análise Estatística da Exatidão Cartográfica Planimétrica

Segundo GALO (1994), a análise estatística da acurácia planimétrica é composta por duas fases:

a) a análise de tendências, com o objetivo de se averiguar a presença de erros sistemáticos; e,

b) a análise de precisão.

Estas análises são baseadas na realização de testes de hipóteses sobre a média e o desvio padrão amostral das discrepâncias, obtidas através das diferenças entre as coordenadas dos pontos no terreno e na imagem.

3.5.2.1. Análise de Tendência

O teste de tendência é feito a partir das análises das discrepâncias médias amostrais, e se baseia na distribuição *t-Student*. Caso as discrepâncias médias amostrais forem estatisticamente iguais a zero, dentro de um certo nível de significância, admite-se a não existência de tendência.

Nas equações apresentadas a seguir, a variável X representará para um ponto tanto as coordenadas E quanto as N.

As discrepâncias entre as coordenadas de referência obtidas no terreno (X_r) e as obtidas na imagem ortorretificada (X_i), são calculadas por:

$$\Delta X = X_r - X_i \quad (3.14)$$

A média e o desvio padrão das discrepâncias são calculadas por:

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (3.15)$$

Onde, n indica o número de pontos amostrais.

$$S_{\Delta X} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \overline{\Delta X})^2 \right]^{1/2} \quad (3.16)$$

Na análise de tendência serão avaliadas as seguintes hipóteses:

$$H_0 : \overline{\Delta X} = 0, \text{ não é tendencioso} \quad (3.17)$$

$$H_1 : \overline{\Delta X} \neq 0, \text{ é tendencioso.} \quad (3.18)$$

Para esta análise deverá ser obtida o valor da estatística t de *Student* (valor tabelado), e verificar se o valor de t_x amostral está no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula.

O valor de t_x amostral é calculado através de:

$$t_x = \frac{\overline{\Delta X}}{\sigma_x} n^{1/2} \quad (3.19)$$

Onde σ_x corresponde ao desvio padrão esperado para a coordenada planimétrica.

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

$$|t_x| < t_{(n-1, \alpha/2)}. \quad (3.20)$$

3.5.2.2. Análise de Precisão

O teste de precisão é feito a partir da comparação entre a variância das discrepâncias amostrais com os valores pré-estabelecidos nos Padrões de Exatidão Cartográfica, para a classe na qual se deseja testar. É baseada na distribuição Qui-Quadrado.

Portanto, o teste de hipótese a ser formulado é o seguinte:

$$H_0 : S_x^2 = \sigma_x^2 \quad (3.21)$$

$$H_1 : S_x^2 > \sigma_x^2 \quad (3.22)$$

O valor da Qui-Quadrado amostral é obtido através da equação:

$$\chi_x^2 = (n-1) \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_x^2} \quad (3.23)$$

A hipótese nula é aceita se este valor satisfaz a seguinte desigualdade:

$$\chi_x^2 \leq \chi_{(n-1, \alpha)}^2 \quad (3.24)$$

Se a expressão (3.22) não for aceita, rejeita-se a hipótese nula, de que a imagem atende a precisão pré-estabelecida.

Ainda, segundo GALO (1994), a exatidão de um mapa deve ser verificada utilizando-se pelo menos vinte pontos bem definidos, de modo a recobrir toda a área de estudo de forma homogênea e bem distribuídos espacialmente.

4. IMAGENS DE SATÉLITES DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL

Basicamente dois tipos de imagens orbitais serão considerados nesta pesquisa: as imagens *IKONOS II* e a *QUICKBIRD II*, tendo em vista que são as imagens de alta resolução espacial disponíveis comercialmente neste momento.

4.1. Imagens de Satélites *IKONOS*

O satélite *IKONOS II* (figura 4.1) foi lançado pelo foguete *Athena II* no dia 24 de Setembro de 1999, na *Vanderberg Air Force Base*, Califórnia, e está operacional desde janeiro de 2000. É operado pela empresa americana *SPACE IMAGING*, que detém os direitos de comercialização a nível mundial.

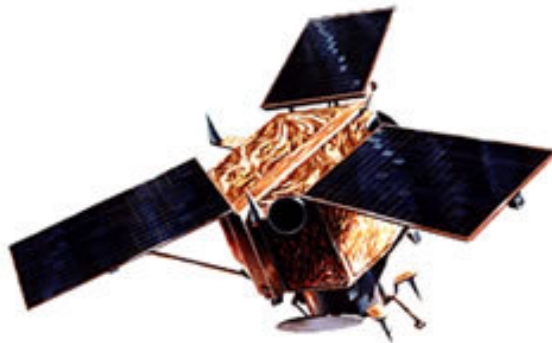


Figura 4.1 - Satélite *IKONOS II*

Fonte: <http://spaceimaging.com> em 10 jan. 2004

As imagens geradas pelo *IKONOS II* possuem uma resolução espacial de 1 m no modo pancromático e 4 m no multiespectral. A resolução radiométrica é de 11 bits, isto é, 2048 níveis de cinza aumentando o poder de contraste e de discriminação dos alvos. Outras imagens de satélites, como *SPOT*, *CBERS*, *IRS*, ou *LANDSAT*, tem resolução radiométrica de 8 bits ou 256 níveis de cinza e portanto, com nível de detalhamento radiométrico menor que as imagens geradas pelo *IKONOS*.

4.1.1. Modos de aquisição

O *IKONOS* segue uma órbita de aproximação polar, repetitiva, circular e sincrónico-solar, o que garante uma cobertura completa da terra. O sensor pode se inclinar para adquirir imagens em até 700 km para cada lado de sua órbita (para frente e para trás e para os dois lados, com ângulo de incidência máxima 26º fora do Ponto Nadir), permitindo a revisita, com diferentes ângulos e resoluções, com uma média de 1,5 dias (resolução espacial de 2m). Uma média de revisita a cada 2,90 dias pode fornecer resolução de dados de 1m, cobrindo uma distância de até 300km para cada lado da órbita (ângulo de +/-10º).

Os dados não são adquiridos continuamente, como acontece com os outros satélites (por ex. Landsat), mas sim de forma programada. O satélite Ikonos é equipado com um 'gravador' (on-board recorder) que pode guardar 64 Gigabytes de dados (aprox. 26 imagens com dados pancromáticos ou multiespectrais), que são enviados para as estações de processamento.

4.1.2. Principais características técnicas

As principais características técnicas do satélite *IKONOS II* estão resumidas tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Principais características técnicas do satélite *IKONOS II*

Altitude	680 km
Inclinação	98,1º
Velocidade	7km / s
Sentido da Órbita	Descendente
Duração da Órbita	98 minutos
Tipo de Órbita	Sol-síncrona
Resolução Espacial	Pancromática: 1m / Multiespectral: 4m
Bandas espectrais	Pan 0.45 - 0.90 µm

	Azul 0.45 - 0.52 μm Verde 0.52 - 0.60 μm Vermelho 0.63 - 0.69 μm Infra vermelho próximo 0.76 - 0.90 μm
Imageamento	13km na vertical (cenas de 13km x 13km)
Capacidade de Aquisição de imagens	Faixas de 11km x 100km até 11km x 1000km Mosaicos de até 12.000km ² 20.000km ² de área imageada numa passagem
Freqüência de Revisita	2,9 dias no modo Pancromático 1,5 dia no modo Multiespectral Esses valores valem para latitude de +/- 40°. A freqüência de revisita para latitudes maiores será menor, e maior para as latitudes perto do Equador.

Fonte: <http://www.engesat.com.br> em 10 jan. 2004

4.1.3. Níveis de Processamento

As imagens *IKONOS* são produzidas segundo diferentes níveis de processamento, que correspondem a diferentes custos de aquisição:

a) Produtos Básicos Carterra Geo:

Os produtos Geo são corrigidos geometricamente, retificados segundo o elipsóide e as projeções especificados. A retificação remove as distorções da imagem adquiridas na geometria de coleta, e reamostra as imagens segundo uma distância uniforme de controle no terreno (GSD – ground sample distance) e a uma projeção específica (map projection). Este produto apresenta uma precisão horizontal de +/- 50 metros (CE 90%) e resolução de 1 m a 4 m. Seus preços são apresentados na tabela 2.2.

Tabela 4.2 - Custos dos produtos básicos GEO

PRODUTO GEO	CUSTO POR km ²
Pancromático – 1m	35 USD
Multiaspectral – 4m	35 USD
Fusão Pancromático + Multiespectral – 1m	39 USD
Ambos (Pan e Multiespectral) – 1m / 4m	53 USD

Fonte: <http://spaceimaging.com> em 10 jan. 2004

b) Produtos Ortorretificados:

Estes produtos são retificados segundo um elipsóide e uma projeção especificada pelo usuário. Os erros do terreno podem ser corrigidos através do uso de um MDT construído pelo *IKONOS* ou fornecido pelo usuário. Os produtos ortorretificados são disponíveis com um nível de precisão de 5m. Pontos de Controle no terreno poderão ser adquiridos para atender a certas especificações, dependendo da geometria de coleta e do nível de precisão requerido. Podem ser de diferentes tipos:

1. **Reference:** este produto possui resolução de 1 a 4m, precisão horizontal de +/- 25,4m (CE 90%) e atende aos padrões de precisão dos mapas na escala 1:50.000. Preço 62 USD.
2. **Map:** possuem precisão horizontal de +/- 12m (CE 90%) e atende aos padrões de precisão dos mapas na escala 1:24.000.
3. **Pro:** apresentam uma resolução de 1 a 4m, precisão horizontal de +/- 10m (CE 90%) e atende aos padrões de precisão dos mapas na escala 1:12.000. Preço 98 USD.
4. **Precision:** este produto é produzido com a utilização de Pontos de Controle no Terreno (GCP) e um MDT de alta precisão, possui resolução de 1 a 4m, precisão

horizontal de +/- 4m (CE 90%) e atende aos padrões de precisão dos mapas na escala 1:4.800. Preço 136 USD.

5. **Precision Plus:** É o produto ortorretificado que apresenta maior grau de precisão. É produzido com a utilização de Pontos de Controle no Terreno (GCP), tem precisão horizontal de +/- 2m (CE 90%) e atende aos *standards* de precisão dos mapas na escala 1:2.400. Somente Pancromático. Preço 199 USD.

- *Standard Stereo:* Somente Pancromático. Preço 128 USD.
- *Precision Stereo:* Preço sob cotação específica.
- DEM (Digital Elevation Model) : Preço 100 USD.

4.2. Imagens de Satélite **QUICKBIRD**

O satélite *QUICKBIRD II* (figura 4.2) foi lançado pelo *Boeing Delta II*, em outubro de 2001, na Vanderberg Air Force Base, Califórnia, é operado pela empresa americana Digital Globe, que detém os direitos de comercialização a nível mundial.

As imagens geradas pelo *QUICKBIRD II* possuem uma resolução espacial de 0,61 metro (nadir) a 0,72 metro (25° off-nadir) no modo pancromático, e de 2,44 metro (nadir) a 2,88 metro (25° off-nadir) no multiespectral.



Figura 4.2 - Satélite *QUICKBIRD II*

Fonte: www.Intersat.com.Br em 10 jan. 2004

4.2.1. Características Técnicas

As características técnicas do satélite *QUICKBIRD II* estão apresentadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Características Técnicas do satélite *QUICKBIRD II*

Local e Data de lançamento	Califórnia, USA, Outubro 2001
Veículo de lançamento	Boeing Delta II
Capacidade de armazenamento de dados	128 Gbytes
Altitude da órbita	450 km
Inclinação da órbita	98° em sincronismo com o sol
Velocidade	7,1 km / segundo
Duração da órbita	98 minutos
Capacidade de envio de dados	320 Mbps em banda X
Peso, tamanho	953 kg, 3,04 metros de comprimento
Tempo de vida útil	No mínimo de 7 anos
Tempo de revisita	1 a 3,5 dias, dependendo da latitude (30° off nadir)
Largura de imageamento	16,5 km x 16,5 km, no nadir
Precisão métrica	Horizontal : 23 m (CE90%); Vertical: 17 m (LE90%)
Digitalização	11 bits
Resolução	Pan: 61 cm (nadir) a 72 cm (25° off-nadir) Multispectral: 2,44 m (nadir) a 2,88 m (25° off nadir)
Formatos disponíveis	GeoTIFF 1,0, NTIF 2.1 ou NTIF 2,0
Bandas	Pancromática: 0,45 – 0,90 µm
	Azul: 0,45 – 0,52 µm
	Verde: 0,52 – 0,60 µm
	Vermelho: 0,63 – 0,69 µm
	Infravermelho Próximo: 0,76 – 0,90 µm

4.2.2. Níveis de Processamento

As imagens *QUICKBIRD* são produzidas segundo diferentes níveis de processamento, que são apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Produtos *QUICKBIRD II*

Produto	Processo	Precisão Absoluta		Disponível
		CE 90%	RMSE	
Basic Imagery	Sem tratamento	23 m	14 m	Mundo
Standard Imagery	Georreferenciada	23 m	14 m	Mundo
Ortho 1:25.000	Ortorreferenciada	2.7 m	7.7 m	Mundo
Ortho 1:25.000	Ortorreferenciada	10.2m	6.2 m	USA
Ortho 1:25.000	Ortorreferenciada	4.1 m	2.5 m	USA
Custom Ortho	Ortorreferenciada	Variável	Variável	Mundo

Fonte:www.Intersat.com.br em 10 jan. 2004

5. MATERIAL E METODOLOGIA

5.1. Materiais Utilizados

Para a realização desta Pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- Uma ortofotocarta plani-altimétrica, na escala de 1:2.000, na projeção UTM, Córrego Alegre, da Fundação de Desenvolvimento da Cidade de Recife (FIDEM), cobrindo uma área de 1.0 km², com enquadramento de E1 = 283000.000, N1 = 9105000.000, e E2 = 284000.000, N2 = 9106000.000, meridiano 33°W.
- Uma imagem *IKONOS* e uma *QUICKBIRD* da área teste, apresentadas nas figuras 3.1 e 3.2, respectivamente.
- Os softwares utilizados para a implementação foram: *MatLab 6.0*, o *Spring 4.0* e o *ENVI 3.5*.

A área de teste, localizada próxima ao bairro do Curado, Recife-PE, foi delimitada em função do MDT obtido das curvas de nível desta ortofoto. O relevo da região é pouco acidentado, com variação máxima de aproximadamente 70 m.

A imagem *IKONOS GEO* utilizada tem uma resolução espacial de 1.0 metro, e resolução radiométrica de 11 bits, na forma PAN/MSI, obtida com a fusão de imagens multiespectral com a pancromática. A dimensão do corte utilizado foi de 1000 x 1000 pixels. No programa ENVI, foi realizada a transformação de resolução radiométrica de 11 bits (2048 níveis de cinza) para 8 bits (256 níveis de cinza). A tabela 5.1 mostra os dados da aquisição desta imagem.

Tabela 5.1 - Dados de aquisição da imagem *IKONOS GEO*

Data / Hora da tomada	05-06-2000 /12:19
Azimute do Sensor (°)	34.8269

Elevação do Sensor (°)	61.75382
Azimute do Sol (°)	42.8826
Elevação do Sol (°)	47.76976

A figura 5.1 apresenta a imagem *IKONOS GEO* da área de estudo.



Figura 5.1 - Imagem *IKONOS GEO* da área de estudo.

A imagem *QUICKBIRD* utilizada tem uma resolução espacial de 0.7 m, resolução radiométrica de 8 bits, obtida com a fusão de imagens multiespectral com a pancromática, coletada com ângulo de elevação entre 75° e 90°. A dimensão de corte utilizada foi de 1428 x 1428 pixels.

A figura 5.2 apresenta a imagem *QUICKBIRD* da área de estudo.



Figura 5.2 - Imagem *QUICKBIRD* da área de estudo.

5.2 Metodologia Desenvolvida

A metodologia de ortorretificação de imagens de alta resolução espacial desenvolvida nesta Pesquisa é apresentada na figura 5.3.

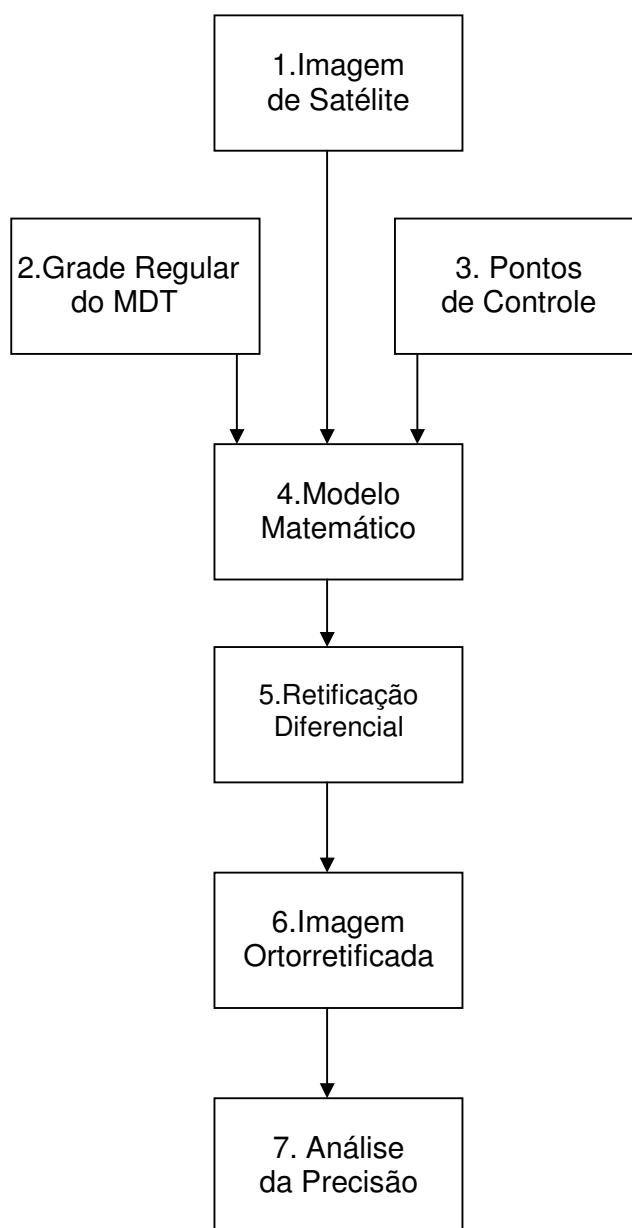


Figura 5.3 - Metodologia de Ortoretificação de Imagens

A seguir são descritos os itens da metodologia apresentada na figura 5.3.

1. Imagens de Satélites

As Imagens de satélites de alta resolução espacial utilizadas são a *IKONOS* e a *QUICKBIRD* explicadas nos itens 4.1. e 4.2.

2. Grade do MDT

Para a obtenção da grade do MDT foi utilizado o *software SPRING 4.0*, tendo como dados de entrada as curvas de nível com equidistância de 2,0m obtidas da digitalização vetorial da ortofoto na escala de 1:2.000, gerando uma malha regular, com espaçamento de acordo com a resolução espacial das imagens testadas (1.0m e 0.7m para *IKONOS* e *QUICKBIRD*, respectivamente), e com o interpolador: Média Ponderada/Cota/Quadrante. Este processo está mostrado no item 5.4.

3. Pontos de Controle

As coordenadas E e N dos pontos de controle foram obtidas por GPS. Para determinar a altura h desses pontos, utilizou-se o arquivo vetorial das curvas de nível. Os pontos de controle para gerar a ortorretificação estão mostrados em 5.3.

4. Modelo Matemático

O modelo matemático utilizado foi o *APM (Affine Projection Model)* demonstrado no item 3.1.

Para a determinação dos parâmetros da equação *APM* (3.7) e (3.8) foi empregado o Método dos Mínimos Quadrados – *MMQ*, através do método paramétrico. A implementação dessa equação foi realizada no *software MATLAB 6.0*. Os pontos de apoio, que são detalhes pontuais identificados na imagem e de fácil acesso no terreno, foram obtidos de levantamento de campo por GPS.

5. Retificação Diferencial

A metodologia de ortorretificação de imagens de satélites de alta resolução a partir de um MDT é conceitualmente simples. Pode ser obtido através do método de retificação diferencial digital, utilizando como modelo matemático a equação *APM*, tendo em vista que os parâmetros da posição e atitude deste tipo de sensor não são

disponibilizados aos usuários, o que inviabiliza a utilização das equações de colinearidade.

O método de retificação diferencial utilizando a equação APM, explicado no item 3.4, foi implementado em *MatLab 6.0*.

6. Imagem Ortorretificada

O resultado da metodologia é uma imagem ortorretificada e está mostrada no item 5.5.

7. Análise da Precisão

Para avaliação da qualidade geométrica da imagem ortorretificada, foram utilizados os teste estatísticos *t* de Student e Qui-Quadrado, considerando como valores de referência o padrão de exatidão cartográfica (PEC) previsto na legislação vigente. Isto está descrito em 3.5 e analisado em 6.1 e 6.2.

Como o objetivo principal deste trabalho é a ortorretificação de imagens de satélites de alta resolução espacial, o primeiro passo foi o levantamento das informações disponíveis para a sua execução, fixando como área teste uma região da cidade de Recife-PE.

A região foi escolhida devido à disponibilidade de uma imagem *IKONOS*, de 7000 x 7000 pixels, que cobre uma parte da Região Metropolitana do Recife (RMR). Dentro desta região, procurou-se uma área onde existisse uma maior movimentação do relevo, o que viabilizaria uma melhor avaliação da metodologia de ortorretificação. Em seguida, foi utilizada uma imagem de satélite *QUICKBIRD* da mesma área.

O relevo da região é pouco acidentado, com variação máxima de 70.0m. Desta forma, foi escolhida uma área de 1.0 km² no Bairro do Curado, em Recife-PE, em função desta área apresentar seu relevo movimentado e também da existência de uma ortofocarta plani-altimétrica, na escala 1:2000, o que facilitaria a obtenção do MDT a partir de suas curvas de nível.

A validação da metodologia proposta consistiu basicamente do levantamento dos pontos de controle, da geração da grade regular do modelo digital de terreno (MDT), da ortorretificação das imagens de satélite supracitadas e da avaliação da precisão dos resultados encontrados.

5.3 Coleta de Pontos de Controle

Os pontos de controle no terreno (*Ground Control Points* – GCPs) são pontos identificáveis na imagem (cruzamento de ruas, pontes, cantos de quadra, cantos de edificações, entre outros) e de fácil acesso no terreno, onde suas coordenadas geodésicas planas (E,N,h) possam ser obtidas.

Em primeiro lugar foi realizada uma pré-seleção dos GCPs na imagem totalizando 33 pontos, procurando pontos notáveis de forma que, estes estivessem bem distribuídos por toda a cena, representando bem as áreas de maior e menor elevação. Para uma melhor representação das áreas de maior elevação é necessário uma maior quantidade de pontos. Em seguida, foi realizado um reconhecimento de campo com o objetivo de verificar se os pontos escolhidos eram propícios para a realização de um rastreamento utilizando o sistema GPS, observando a existência de obstáculos que pudessem causar problemas para a medição. Desta forma, foram definidos 30 pontos de controle apresentados na figura 4.1.

A seguir foi realizada uma campanha, utilizando dois receptores geodésicos, *4000 SSE Trimble*, sendo um colocado como base numa estação com coordenadas conhecidas, localizada na caixa d'água da 3ª Divisão de Levantamento, a aproximadamente 10 km da área de estudo, e o outro utilizado no levantamento nos pontos escolhidos, pelo método de irradiação de coordenadas. O tempo de duração de rastreamento foi de 30 minutos por estação.

Os dados de rastreamento foram posteriormente processados através do programa *GPSurvey* versão 2.35, sendo obtidas as coordenadas do GCPs, no sistema WGS-84 e transformadas posteriormente para Córrego Alegre, tendo em vista que as curvas de nível utilizadas para gerar o MDT são do datum Córrego Alegre.

A figura 5.4 mostra a distribuição dos trinta pontos de controle na imagem *QUICKBIRD*. Pode-se observar que uma maior quantidade de pontos foi escolhida na região de maior elevação da área de estudo. Para o caso da imagem *IKONOS*, esta região apresenta-se coberta por nuvens, o que impossibilitou a identificação destes pontos, reduzindo assim o número de pontos de controle para vinte nesta análise.

A tabela 5.2 apresenta as coordenadas (E,N) dos pontos de controle obtidas no levantamento GPS realizado, transformadas para o datum Córrego Alegre.

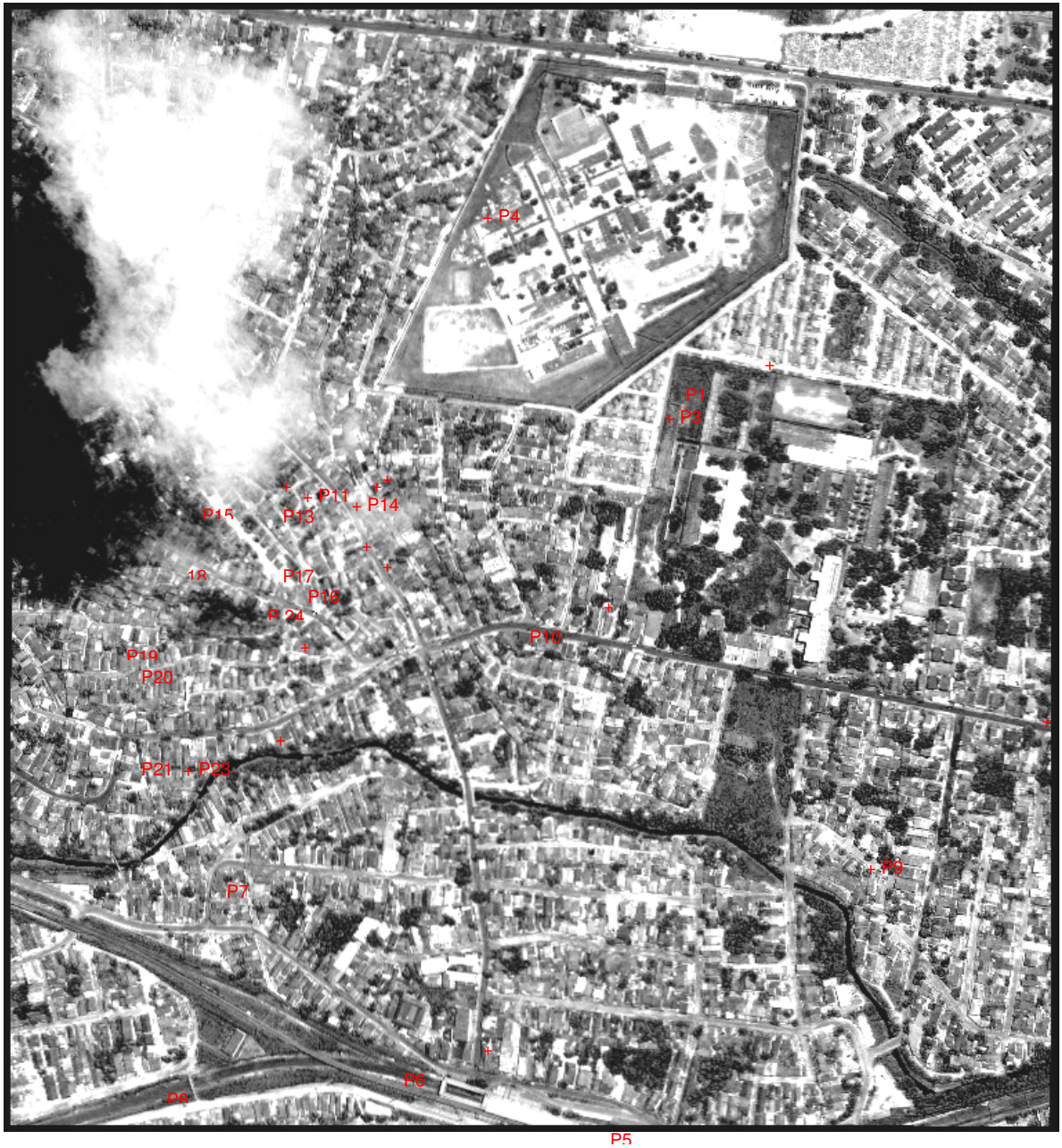


Figura 5.4 - Pontos de Controle na imagem de satélite da área de estudo

Tabela 5.2 - Coordenadas dos Pontos de Controle

Pontos de Controle	Coordenadas UTM	
	N (m)	E (m)
P001	9105841,183	283628,844
P002	9105897,653	283837,944
P003	9105791,562	283541,474
P004	9105989,113	283355,503
P005	9105079,940	283562,594
P006	9105146,801	283357,753
P007	9105338,431	283168,103
P008	9105127,620	283106,702
P009	9105329,431	283735,344
P010	9105468,741	283065,492
P011	9105310,801	283651,824
P012	9105589,962	283474,143
P013	9105737,282	283267,213
P014	9105724,842	283257,603
P015	9105714,052	283241,112
P016	9105703,282	283222,722
P017	9105664,712	283245,832
P018	9105626,962	283265,323
P019	9105651,722	283229,092
P020	9105546,041	283158,502
P021	9105537,211	283216,492
P022	9105574,522	283101,182
P023	9105580,272	283044,732
P024	9105705,922	283156,502
P025	9105694,302	283172,692
P026	9105672,712	283181,972
P027	9105692,652	283201,082
P028	9105651,712	283229,153
P029	9105589,252	283241,663
P030	9105666,202	283109,023

5.4. Modelo Digital de Terreno

Para a geração do MDT da área de estudo, foi utilizado o arquivo digital DXF das curvas de nível, com equidistância de 2.0 metros, obtido da digitalização vetorial da ortofotocarta na escala de 1:2000, no sistema de projeção UTM, datum Córrego Alegre.

O arquivo DXF das curvas de nível foi importado para o *SPRING*, conforme mostra a figura 5.5.

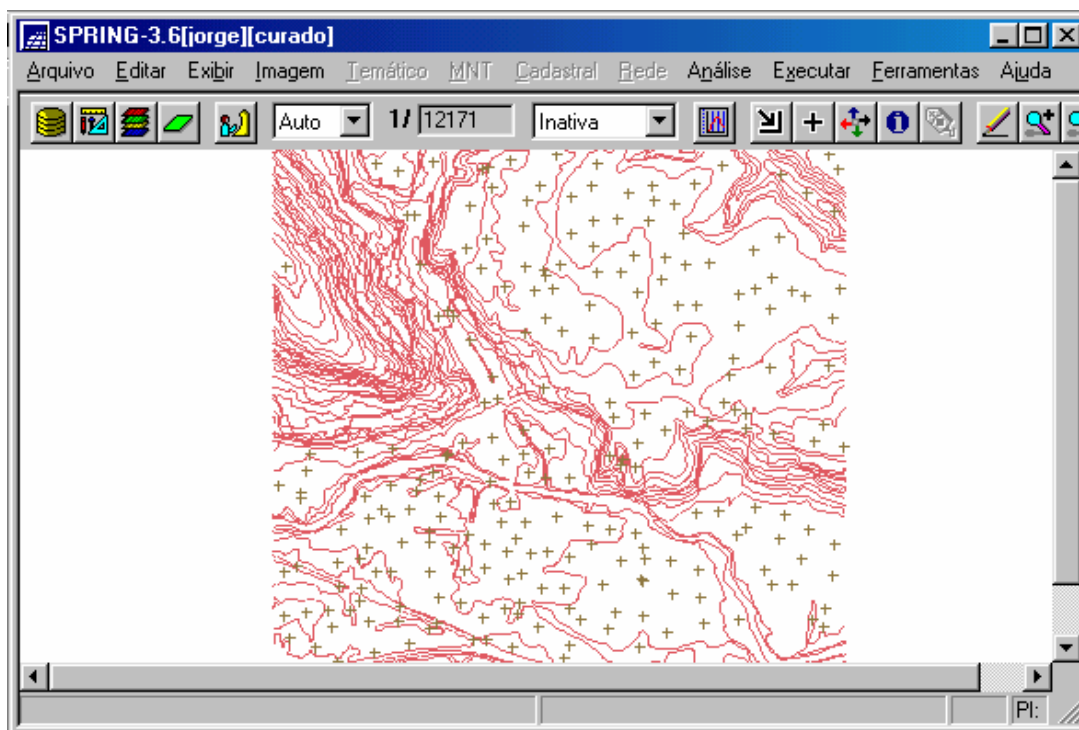


Figura 5.5 - Curvas de nível no *SPRING*

Ainda no *Spring*, foram geradas duas grades regulares, de acordo com as resoluções espaciais das imagens de satélites, ou seja, uma com espaçamento de 1.0 pixel para a ortorretificação da imagem *IKONOS*, e outra com espaçamento de 0.7 pixel para a ortorretificação da imagem *QUICKIRD*. Como interpolador foi utilizado a Média Ponderada por Quadrante e Cota, pois além da ponderação por quadrantes, o valor de cota de cada amostra a ser usada na estimativa do ponto da

grade é considerado. Seu uso é recomendado quando as amostras são do tipo isolinhas.

A figura 5.6 mostra um extrato do arquivo texto gerado de uma grade regular. Ele fornece informações cartográficas, tamanho da grade, resolução do pixel, entre outros.

```
GRIDREG
INFO
//Grade Regular de Modelagem Numérica
//Arquivo ASCII gerado pelo Sistema SPRING
//Projeto: curado - Plano de informação: curvas1
//Categoria: mnt - Modelo: DIGITALMODEL
DATUM Hayford, 6378388.000000, 0.003367, 0.000000, 0.000000, 0.000000
PROJECTION UTM/Hayford, 1, 0.000000, -0.575959, 0.000000, 0.000000
BOX 283000.000000, 9105000.000000, 284000.000000, 9106000.000000
UNITS Metros
SCALE 5000.000000
//Formato GRIDDEF <ncols> <nlines> <X1> <Y2> <resX> <resY>
<nodatavalue>
GRIDDEF 1000 1000 283000.000000 9106000.000000 1.000000
1.000000 3.4000000000e+037
INFO_END
17.869961 17.342051 16.630022 16.208414 16.456444 17.382338 17.104944
16.294348
```

Figura 5.6 - Arquivo .txt de uma grade regular de MDT gerado no *Spring*

A figura 5.7 mostra uma visualização no *Spring* do MDT com a superposição da imagem da área, em escala de cinza.

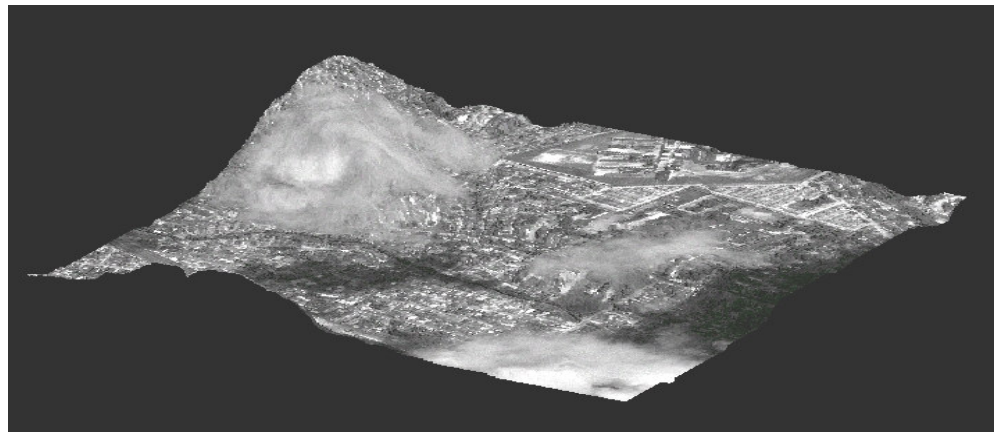


Figura 5.7 - MDT superposto a imagem da área de estudo

5.5. Ortorretificação das Imagens

Para realizar a ortorretificação foi utilizado um programa, implementado em *MATLAB*, do método de retificação diferencial digital, considerando como modelo matemático a equação APM.

Os dados de entrada do programa de ortorretificação desenvolvido são:

- O arquivo digital da imagem de satélite de alta resolução espacial a ser ortorretificada;
- O arquivo digital das coordenadas dos pontos de controle (E,N,h);
- O arquivo digital das coordenadas de imagem dos pontos homólogos (x,y);
- As coordenadas iniciais (E,N) da grade regular do MDT, do canto superior esquerdo; e,
- A arquivo digital (.txt) da grade regular do MDT, gerado no *Spring*.

As coordenadas de imagem (x,y) dos pontos de controle foram determinadas a partir de interpretação visual no programa desenvolvido em *MATLAB*. A origem do sistema de coordenadas de imagem considerada é a posição do *pixel* do canto superior esquerdo da imagem (figura 2.6).

A partir das coordenadas dos pontos de controle (E,N,h) e das coordenadas de imagem (x,y) dos pontos homólogos, os parâmetros (A_1, A_2, \dots, A_8) da equação APM são calculados através do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Uma vez definidos esses parâmetros, a equação APM, (3.7) e (3.8), é aplicada como modelo matemático no método de retificação diferencial gerando a imagem ortorretificada.

O método de retificação diferencial digital implementado, obedece aos seguintes passos:

- cada pixel da grade do MDT é mapeado para o arquivo da grade da imagem de satélite, através da equação APM;
- Como o novo valor da posição mapeada necessariamente não coincide com um valor inteiro da grade da imagem de satélite, o valor do nível de cinza é determinado pelo método de reamostragem bilinear;
- Este valor de nível de cinza é, em seguida, armazenado na mesma posição do pixel na grade do MDT em uma imagem de saída, a imagem ortorretificada.

As figuras 5.8 e 5.9 mostram, respectivamente, as imagens *IKONOS* e *QUICKBIRD* ortorretificadas.

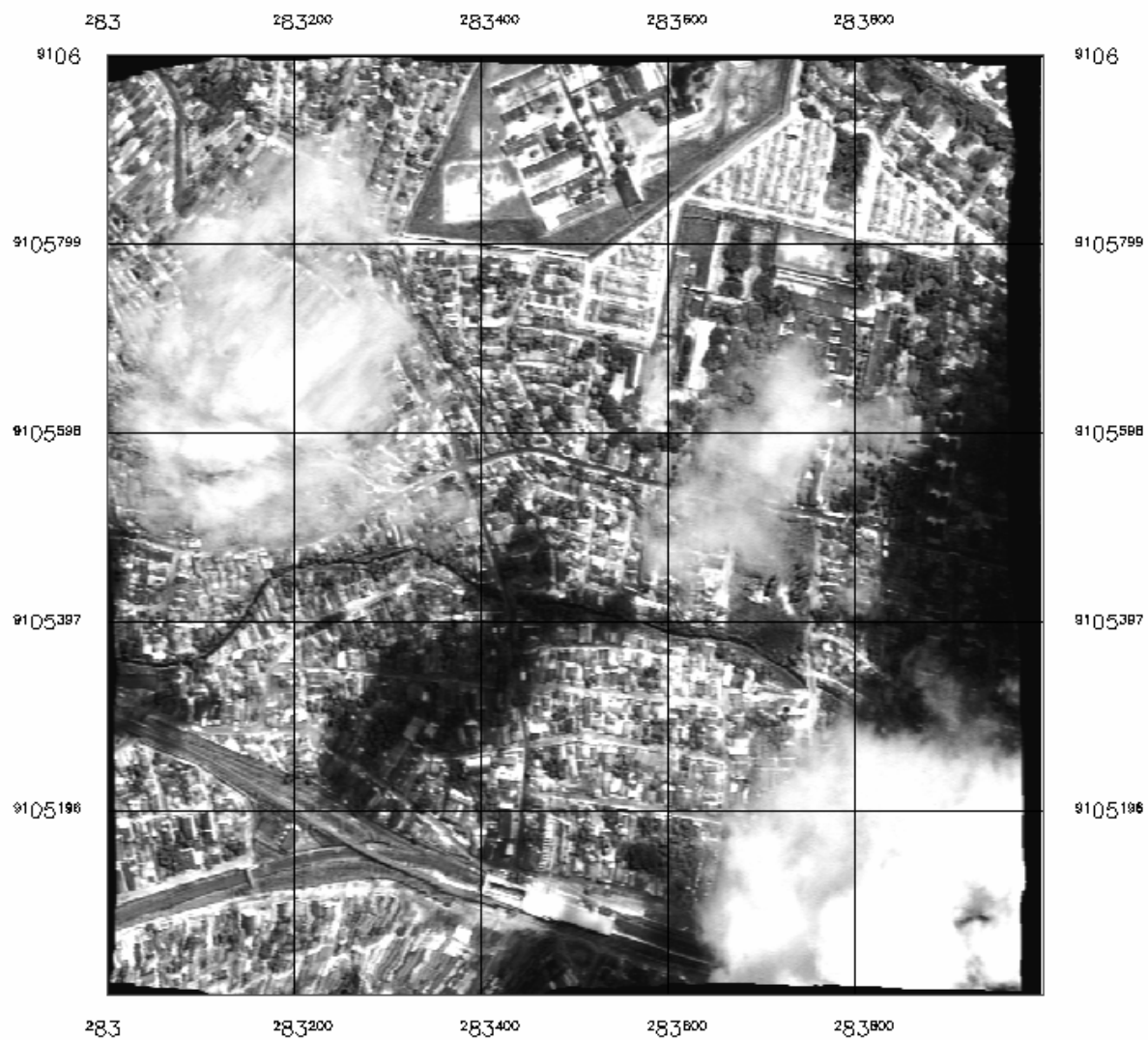


Figura 5.8 – Imagem *IKONOS* Ortoretificada

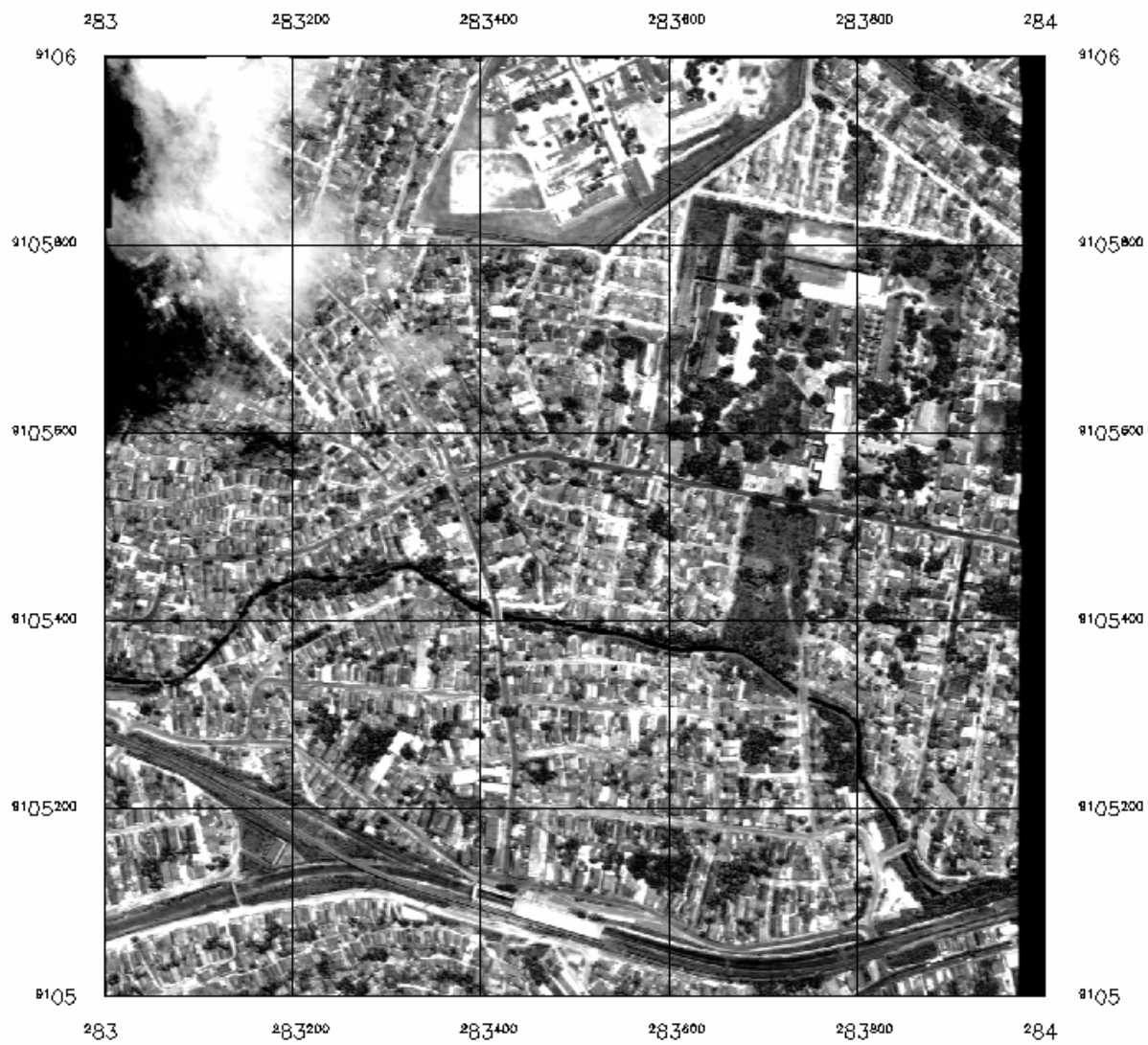


Figura 5.9 – Imagem *QUICKBIRD* Ortorretificada

6. RESULTADOS E ANÁLISE DA PESQUISA

A avaliação da qualidade dos dados obtidos na pesquisa foi realizada através da análise da exatidão cartográfica planimétrica descrita por GALO (1994). Ela é composta pela análise de tendências para verificar a existência de erros sistemáticos e a análise de precisão. Tais procedimentos são baseados na realização de testes de hipóteses sobre a média e o desvio padrão amostral das discrepâncias, obtidas entre as coordenadas dos pontos no terreno e na imagem, considerando o padrão de exatidão cartográfica (PEC) previsto no Decreto n° 89.817/94.

Para esta análise, considerou-se a imagem como sendo um documento cartográfico de classe A, em virtude desta classe ser considerada a mais exata. Diversas análises foram realizadas para diferentes escalas, porém a maior escala que foi aceita na análise estatística foi a de 1:10.000.

Desta forma, a partir das coordenadas dos pontos de controle, obtidas por levantamento GPS, e das coordenadas de imagem dos pontos homólogos obtidas na imagem ortorretificada, foram calculadas as discrepâncias, e a próxima fase constituiu-se em efetuar a análise estatística dos resultados.

6.1. Imagem *IKONOS* Ortorretificada

A tabela 6.1 apresenta as discrepâncias entre as coordenadas dos pontos de controle e seus homólogos na imagem *IKONOS* ortorretificada, bem como sua média e desvio padrão.

Tabela 6.1 - Discrepâncias entre as coordenadas *GPS* e *IKONOS* ortorretificada

Pontos de Controle	Coordenadas GPS		Coordenadas da Imagem Retificada		Discrepâncias		Erro Planimétrico e_p (m)
	N (m)	E (m)	N (m)	E (m)	ΔN (m)	ΔE (m)	
P01	9105841,183	283628,844	9105842,104	283624,7333	-0,9214	4,1107	4.2126
P02	9105897,653	283837,944	9105901,077	283833,6707	-3,4243	4,2733	5.4760
P03	9105791,562	283541,474	9105792,281	283536,7477	-0,7185	4,7263	4.7806
P04	9105989,113	283355,503	9105987,161	283353,6063	1,952	1,8967	2.7217
P05	9105079,94	283562,594	9105076,49	283561,6724	3,45	0,9216	3.5709
P06	9105146,801	283357,753	9105147,594	283359,0158	-0,7928	-1,2628	1.4910
P07	9105338,431	283168,103	9105339,677	283171,057	-1,2462	-2,954	3.2061
P08	9105127,62	283106,702	9105125,531	283109,2566	2,0888	-2,5546	3.2998
P09	9105329,431	283735,344	9105327,373	283735,0391	2,0583	0,3049	2.0807
P10	9105911,903	283186,523	9105911,871	283184,779	0,0318	1,744	1.7442
P11	9105714,854	283600,154	9105716,214	283598,1104	-1,3599	2,0436	2.4547
P12	9105727,927	283518,742	9105729,113	283516,323	-1,1857	2,419	2.6939
P13	9105468,741	283065,492	9105465,707	283066,4027	3,0339	-0,9107	3.1676
P14	9105310,801	283651,824	9105308,421	283652,375	2,3796	-0,551	2.4425
P15	9105589,962	283474,143	9105589,511	283470,4091	0,4513	3,7339	3.7610
P16	9105485,832	283908,185	9105483,098	283906,4279	2,7336	1,7571	3.2496
P17	9105085,657	283513,382	9105082,821	283512,281	2,836	1,1014	3.0423
P18	9105359,931	283192,253	9105361,195	283194,065	-1,264	-1,812	2.2093
P19	9105163,324	283100,236	9105161,126	283102,5105	2,1982	-2,2745	3.1631
P20	9105821,108	283822,224	9105823,577	283820,0358	-2,4692	2,1882	3.2992
				Média	0,491575	0,945055	3.1033
				Desvio Padrão	2,066287	2,369883	0.9708

6.1.1. Análise de Tendência

Para a análise de tendência foi realizado um teste de hipótese estatístico utilizando a distribuição *t* de *Student*, pois esta é particularmente válida para amostras pequenas, ou seja, menores que trinta.

Nesta pesquisa o tamanho da amostra é de 20 pontos e o nível de confiança $(1-\alpha)$ adotado foi de 90%, considerando as normas do PEC em vigência (Decreto n° 89.817/84). Aplicando o teste *t* de *Student*, foi determinado um valor limite obtido

por meio de tabelas estatísticas para este teste e realizado o teste de hipótese descrito no item 3.5.2.1.

A tabela 6.2 mostra os resultados do teste estatístico realizado para a análise de tendência, efetuado nas discrepâncias calculadas entre as coordenadas dos pontos obtidos com o *GPS* e na imagem.

Tabela 6.2 - Resultados para a Análise de Tendência

n	20	
\bar{X}_E	0.945 m	
\bar{X}_N	0.491 m	
\bar{X}_{ep}	3.103 m	
S_E	2.369 m	
S_N	2.066 m	
S_{ep}	0.970 m	
EP 1:10.000	3.0 m	
σ_x	2.12 m	
$t_{30; 0.05}$	1.725	
t_E	1.993	
t_N	1.036	
t_{ep}	6,545	
Análise	$ t_E > t_{Amostral}$	
	$ t_N < t_{Amostral}$	
	$ t_{ep} > t_{Amostral}$	
Componentes	E	Apresenta tendência
	N	Sem tendência
Erro Planimétrico		Apresenta tendência

Como pode ser observado na tabela 6.2, a comparação do valor de t amostral com o valor teórico indica a existência de uma tendência na direção E. Para a direção N, não existe tendência, tendo em vista que o valor de t amostral é menor que o teórico. E, considerando o vetor do erro planimétrico total (nas duas direções), este também apresenta tendência, pois o seu valor do t amostral é maior que o teórico.

6.1.2. Análise de Precisão

A análise da precisão é feita comparando-se o desvio padrão das discrepâncias com o erro padrão (EP) esperado, para a classe que se deseja testar. Para esta análise utilizou-se da estimativa dada pela distribuição Qui-Quadrado (χ^2), num intervalo de confiança de 90%. O teste estatístico realizado está descrito no item 3.5.2.2.

A tabela 6.3 apresenta a análise de precisão para a escala de 1:10.000 efetuada nas discrepâncias calculadas entre as coordenadas GPS e as da imagem *IKONOS* ortorretificada.

Tabela 6.3 - Resultado para a análise de precisão

$\chi^2_{19;10\%}$	27.2
S_E	2.369 m
S_N	2.066 m
S_{ep}	0.970 m
$\sigma_{(1:10.000)}$	2.12 m
χ^2_E (Classe A)	23.725
χ^2_N (Classe A)	18.044
χ^2_{ep} (Classe A)	3,9776
Análise	$\chi^2_{(Classe A)} < \chi^2_{19;10\%}$
Escala a ser utilizada	1:10.000

A comparação do valor Qui-Quadrado amostral com o valor teórico indica que a imagem atende aos pré-requisitos de precisão nas tanto duas direções E e N, como no erro planimétrico total. Desta forma, esta imagem atenderá aos requisitos geométricos de um mapeamento na escala de 1:10.000, para um nível de confiança de 90%.

6.2. Imagem *QUICKBIRD* Ortoretificada

A tabela 6.4 apresenta as discrepâncias entre as coordenadas dos pontos de controle e seus homólogos na imagem *QUICKBIRD* ortoretificada, bem como sua média e desvio padrão. As coordenadas GPS foram transformadas para o datum Córrego Alegre.

Tabela 6.4 - Discrepâncias entre as coordenadas GPS e *QUICKBIRD* ortoretificada

Pontos de Controle	Coordenadas GPS		Coordenadas da Imagem Retificada		Discrepâncias		Erro Planimétrico $e_p(m)$
	N (m)	E (m)	N (m)	E (m)	ΔN (m)	ΔE (m)	
P001	9105841,183	283628,844	9105841,855	283629,4458	-0,6716	-0,6018	0,9017
P002	9105897,653	283837,944	9105897,326	283838,4875	0,3274	-0,5435	0,6344
P003	9105791,562	283541,474	9105789,383	283542,4462	2,1792	-0,9722	2,3862
P004	9105989,113	283355,503	9105989,357	283356,7027	-0,2439	-1,1997	1,2242
P005	9105079,94	283562,594	9105081,335	283561,9355	-1,3945	0,6585	1,5421
P006	9105146,801	283357,753	9105148,535	283356,3546	-1,7344	1,3984	2,2279
P007	9105338,431	283168,103	9105338,993	283168,8837	-0,5621	-0,7807	0,9620
P008	9105127,62	283106,702	9105127,843	283106,5846	-0,2234	0,1174	0,2523
P009	9105329,431	283735,344	9105328,719	283735,0649	0,7122	0,2791	0,7649
P010	9105468,741	283065,492	9105469,243	283065,9761	-0,502	-0,4841	0,6973
P011	9105310,801	283651,824	9105311,461	283651,6407	-0,6598	0,1833	0,6847
P012	9105589,962	283474,143	9105589,305	283474,1008	0,6566	0,0422	0,6579
P013	9105737,282	283267,213	9105736,596	283269,5801	0,6862	-2,3671	2,4645
P014	9105724,842	283257,603	9105724,716	283262,1196	0,1259	-4,5166	4,5183
P015	9105714,052	283241,112	9105710,852	283245,2086	3,2004	-4,0966	5,1985
P016	9105703,282	283222,722	9105697,668	283228,0501	5,614	-5,3281	7,7398
P017	9105664,712	283245,832	9105661,413	283247,1885	3,2988	-1,3565	3,5668
P018	9105626,962	283265,323	9105624,84	283268,9887	2,1219	-3,6657	4,2355
P019	9105651,722	283229,092	9105647,611	283230,6899	4,1107	-1,5979	4,4103
P020	9105546,041	283158,502	9105543,081	283160,9262	2,9603	-2,4242	3,8262

P021	9105537,211	283216,492	9105535,616	283216,9754	1,5949	-0,4834	1,6665
P022	9105574,522	283101,182	9105572,356	283101,8877	2,1658	-0,7057	2,2778
P023	9105580,272	283044,732	9105577,418	283045,0912	2,8545	-0,3592	2,8770
P024	9105705,922	283156,502	9105701,085	283157,4415	4,8372	-0,9395	4,9275
P025	9105694,302	283172,692	9105688,116	283176,6771	6,1861	-3,9851	7,3585
P026	9105672,712	283181,972	9105668,422	283183,8904	4,2897	-1,9184	4,6991
P027	9105692,652	283201,082	9105692,919	283206,4923	-0,2672	-5,4103	5,4168
P028	9105651,712	283229,153	9105647,768	283230,0559	3,9439	-0,9029	4,0459
P029	9105589,252	283241,663	9105586,286	283241,1163	2,9663	0,5467	3,0162
P030	9105666,202	283109,023	9105659,296	283113,1955	6,906	-4,1725	8,0686
				Média	1,849	-1,519	3,1083
				Desvio Padrão	2,353	1,867	2,2259

6.2.1. Análise de Tendência

Nesta pesquisa o tamanho da amostra é de 30 pontos e o nível de confiança $(1-\alpha)$ adotado foi de 90%, considerando as normas do PEC em vigência (Decreto nº 89.817/84). Aplicando o teste t de *Student*, foi determinado um valor limite obtido por meio de tabelas estatísticas para este teste e realizado o teste de hipótese descrito no item 3.5.2.1.

A tabela 6.5 mostra os resultados do teste estatístico realizado para a análise de tendência, efetuado nas discrepâncias calculadas entre as coordenadas dos pontos obtidos com o *GPS* e na imagem.

Tabela 6.5 - Resultados para a Análise de Tendência

n	30
\bar{X}_E	-1.519 m
\bar{X}_N	1.849 m
\bar{X}_{ep}	3.108 m
S_E	1.867 m
S_N	2.353 m
S_{ep}	2.225 m

EP 1:10.000		3.0 m
σ_x		2.12 m
$t_{29; 0.05}$		1.699
t_E		-3.924
t_N		5.010
t_{ep}		8,029
Análise		$ t_E > t_{Amostral}$
		$ t_N > t_{Amostral}$
		$ t_{ep} > t_{Amostral}$
Componentes	E	Apresenta tendência
	N	Apresenta tendência
Erro Planimétrico		Apresenta tendência

Como pode ser observado na tabela 6.5, a comparação do valor de t amostral com o valor teórico indica a existência de tendência tanto nas direções E e N, quanto no vetor resultante do erro planimétrico.

Considerando-se que existem influências sistemáticas nas coordenadas E e N, pode-se tomar os valores médios dos intervalos de influência, com o sinal contrário e introduzi-los em todas as coordenadas E e N, respectivamente, diminuindo-se as suas respectivas discrepâncias.

6.2.2. Análise de Precisão

A análise da precisão é feita comparando-se o desvio padrão das discrepâncias com o erro padrão (EP) esperado, para a classe que se deseja testar. Para esta análise utilizou-se da estimativa dada pela distribuição Qui-Quadrado (χ^2), num intervalo de confiança de 90%. O teste estatístico realizado está descrito no item 3.5.2.2.

A tabela 6.6 apresenta a análise de precisão para a escala de 1:10.000 efetuada nas discrepâncias calculadas entre as coordenadas GPS e as da imagem *QUICKBIRD* ortorretificada.

Tabela 6.6 - Resultado para a análise de precisão

$\chi^2_{29;10\%}$	39.1
S_E	1.867 m
S_N	2.353 m
S_{ep}	2.225 m
$\sigma_{(1:10.000)}$	2.12 m
χ^2_E (Classe A)	22,491
χ^2_N (Classe A)	35,724
χ^2_{ep} (Classe A)	31,943
Análise	$\chi^2_{(Classe A)} < \chi^2_{29;10\%}$
Escala a ser utilizada	1:10.000

A comparação do valor Qui-Quadrado amostral com o valor teórico indica que a imagem atende aos pré-requisitos de precisão tanto nas duas direções E e N, como no vetor resultante do erro planimétrico. Desta forma, esta imagem atenderá aos requisitos geométricos de um mapeamento na escala de 1:10.000, para um nível de confiança de 90%.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1. Conclusões

Esta Pesquisa teve por objetivo desenvolver uma metodologia para a ortorretificação de imagens de satélites de alta resolução espacial, visando a aplicação dessas imagens no mapeamento planimétrico.

A grande vantagem da utilização das imagens de satélites de alta resolução espacial ortorretificadas é que elas são geometricamente equivalentes aos mapas planimétricos convencionais, ou seja, as imagens dos objetos são apresentadas em suas verdadeiras posições ortográficas. Desta forma, elas podem ser utilizadas em sistemas de informações geográficas, projetos de atualização cartográfica, entre outros.

O modelo matemático considerado para a transformação entre os referenciais envolvidos no processo de ortorretificação, ou seja, o referencial da imagem (x,y) e o geodésico local (X,Y,Z) , foi o APM – Affine Projection Model, equações (3.7) e (3.8), que projeta o espaço R^3 (terreno) no plano R^2 (imagem). Por ser representado por um polinômio de primeiro grau, ele apresenta grande facilidade de implementação computacional.

Para a validação da metodologia foi realizado um estudo de caso, em uma região na cidade de Recife-PE, tendo em vista a disponibilidade de uma imagem *IKONOS*, de 7000 x 7000 pixels, para a pesquisa. Dentro dessa região, procurou-se uma área com relevo acidentado, para melhor avaliação da metodologia de ortorretificação. Foi definida uma área de $1,0\text{km}^2$, em função da existência de uma ortofoto com curvas de nível com equidistância de 2,0m, no datum Córrego Alegre. Em seguida, foi utilizada uma imagem *QUICKBIRD* da mesma área.

Observa-se, na análise do Decreto nº 89.817/84, que este não se refere às escalas que deverão ser contempladas pela avaliação. Porém, estabelece o Padrão de Exatidão Cartográfica e o Erro Padrão que permitem classificar os documentos cartográficos com A, B ou C, deixando implícito que este padrão poderá ser usado

para todas as escalas. Para esta pesquisa, considerou-se a imagem gerada (ortorretificada) como classe A, em virtude desta ser considerada segundo o Decreto Lei a mais exata. Diversas análises foram realizadas para escalas diferentes, porém a escala que foi aceita foi a de 1:10.000.

Na análise estatística de tendências, ao nível de confiança de 90%, verificou-se uma influência sistemática tanto nas duas direções, E e N, como no vetor do erro planimétrico total, para as imagens *IKONOS* e *QUICKBIRD*. Estas influências podem ser atribuídas a erros internos e/ou externos provenientes do próprio sistema de imageamento dos satélites, a qualidade do modelo digital do terreno, e a reamostragem dos níveis de cinza.

Na análise estatística de precisão, verificou-se que a desigualdade do teste estatístico aplicado é satisfeita tanto para as coordenadas E e N, como para o vetor do erro planimétrico total, o que permitiu classificar as imagens como pertencentes a Classe A para uma escala de 1:10.000.

Portanto, esta Pesquisa apresentou uma metodologia para a ortorretificação de imagens de satélites de alta resolução espacial, através do método de retificação diferencial digital, utilizando a equação APM, (3.7) e (3.8), como modelo matemático. A validação foi realizada em imagens *IKONOS* e *QUICKBIRD*, e a análise da qualidade da acurácia planimétrica através das análises de tendência e de precisão das ortoimagens geradas, considerando o padrão de exatidão cartográfica (PEC) da legislação em vigor. Como resultado final, chegou-se a conclusão que as imagens geradas por essa metodologia, são adequadas para o mapeamento planimétrico na escala de 1:10.000 e menores.

7.2. Sugestões para Futuros Desenvolvimentos

Como resultado dos trabalhos e pesquisas desenvolvidos, percebe-se uma ampla gama de possibilidades para continuidade e desenvolvimento de projetos de pesquisa associados à temática abordada. Algumas das possibilidades de investigação que se somariam ou complementariam o trabalho aqui desenvolvido são listadas a seguir:

- Estudar os erros inerentes ao sistema de imageamento visando a implementação destas correções no processo de ortorretificação apresentado;
- Testar a metodologia apresentada em áreas de dimensões maiores e mais acidentadas que a considerada no estudo de caso, utilizando um MDT de alta precisão.
- Analisar outros modelos matemáticos como, por exemplo, a equação *DLT* – *Direct Linear Transformation*, para o processo de ortorretificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALTSAVIAS, E. PETERAKI, M. ZHANG, L. Radiometric and Geometric Evaluation of Ikonos Geo Images and Their Use For 3D Guiding Modelling. ISPRS joint Workshop "High resolution Mapping From Space 2001", Hanover, Germany, 19-21 September 2001.

BORGES, P.A.F.; VIEIRA, C.A.O. Métodos para Controle da Acurácia e Qualidade Geométrica de Imagens Digitais, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2002.

BRITO, J.L.N.S.; FILHO, L.C.T.C. Fotogrametria Digital, Instituto Militar de Engenharia, 2002.

BRITO, J.L.N.S. Assessment of the Precision of Digital Orthoimages, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1997.

BRITO, J.L.N.S. Instituto Militar de Engenharia. Estágio de Fotogrametria Digital para Engenheiros Cartógrafos, Rio de Janeiro – RJ, 1999.

BURROUGH, P.A. Principles of geographic information system for land resource assessment. Oxford, Clarendon Press, 1986.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. Geoprocessamento para Projetos Ambientais, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, São José dos Campos-SP, 1998.

CRÓSTA, A. P. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto, IG/UNICAMP, Campinas, 1992.

CORTES, J.B.R. O Uso de Fotografias Aéreas de Pequeno Formato Digitalizadas em Mapeamento Topográfico Planimétrico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 1998.

DALMOLIN, Q. Ajustamento por Mínimos Quadrados, Universidade Federal do Paraná, 2002, 175p.

DESTRI, A. R. Modelos digitais do terreno. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1987.

FRASER, C. S.; HANLEY H. B.; YAMAKAWA, T. Sub-Metre Geopositioning With Ikonos Geo Imagery. ISPRS joint Workshop "High Resolution Mapping From Space 2001", Hanover, Germany, 19-21 September 2001.

GALO, M. Utilização do GPS no Controle de Qualidade de Cartas. UNESP - Presidente Prudente - SP, 1994.

GEMAEL, C. Introdução ao Ajustamento das Observações. Editora da Universidade Federal do Paraná, 1994.

GONZALES, R.C.; WOODS, R. E. Processamento de Imagens Digitais, Editora Edgard Blucher Ltda, 2000, 509p.

HATTORI, S.; ONO, T.; FRASER, C. S.; HASEGAWA, H. Orientational of High-resolution Satellite imagens Based on Affine Projection Model. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing. Vol 33, Part B3/1, pp. 359-366, Amsterdam, 2000. CD-ROM.

ISHIKAWA, M.I. Potencialidades de Uso de Imagens Ikonos/Geo para Aplicações em Áreas Urbanas. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente-SP, 2001.

LEE, C. K. Dynamic Monitoring With Video Systems. Departament of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, P.O. Box 4400, Fredericton, B.B. Canada, 1996.

LUGNANI, J. B. Introdução à Fototriangulação. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 1987.

MITISHITA, E. A. Monorestituição digital de Aerofotos Associada ao Sistema de Computação Gráfica C. A. D. para fins de Mapeamento na área Florestal. Curitiba, 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

MITISHITA, E.A.; SARAIVA, C.C. Modelos Matemáticos para fins de Monorestituição de Imagens de Satélites de Alta Resolução Ikonos 2 - GEO. Simpósio Brasileiro de Geomática, UESP, Presidente Prudente, 2002.

NOVAC, K. Analytical Photogrammetry. Department of Geodetic Science and Surveying. Ohio State University, Columbus, OH. 1992.

NOVO, E.M.L.M. Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações, INPE/MCT, São José dos Campos, 1988.

OKAMOTO, A.; ONO, T.; AKAMATSU, S. Geometric Characteristics of Alternative Triangulation Models for Satellite Imagery, Proceedings of ASPRS, Annual Conference, 1999.

OLIVEIRA, C. Dicionário Cartográfico. 4.ed, Rio de Janeiro, IBGE, 1993.

PORTUGAL, J.L.; SÁ, L.A.C.M. de; ROMÃO,V.M.C.; CARNEIRO, A.F.T. Modelo Digital do Terreno. Cartografia e Cadastro, n. 10, p. 23 – 31, junho, 1999.

SANTOS, A.A. Geodésia Elementar : Princípios de Posicionamento Global (GPS), Editora Universitária da UFPE, Recife-PE , 2001.

SANTOS, A.A. Representações cartográficas, UFPE, Recife-PE,1985.

SEIXAS, J.J. Retificação de Fotografias. Universidade Federal de Pernambuco, 1981.

VOLOTÃO, C.F.S. Geração de Ortoimagens para Aplicações Urbanas: Desenvolvimento das Equações e Protótipo Experimental Dissertação de Mestrado. INPE, São José dos Campos, Setembro de 2001.

WOLF, P.R. Elements of Photogrammetry, International Student Edition, 1974.