

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA - CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
SENSORIAMENTO REMOTO

**ANÁLISE DE TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS
PARA O GEORREFERENCIAMENTO
DE IMAGENS DO SATÉLITE CBERS-I**

Corina Jara de Queiroz
Eng. Cartógrafa

Porto Alegre – R.S., Brasil

Março de 2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA - CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
SENSORIAMENTO REMOTO

**ANALISE DE TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS
PARA O GEORREFERENCIAMENTO
DE IMAGENS DO SATÉLITE CBERS-I**

Corina Jara de Queiroz
Eng. Cartógrafa

Orientador: Prof. Dr. Francisco Humberto Simões Magro

Dissertação apresentada como um dos requisitos à obtenção do
Grau de Mestre em Sensoriamento Remoto

Porto Alegre – R.S., Brasil

Março de 2003

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à Deus por ter me dado força nos momentos difíceis que ocorreram durante a realização desse projeto.

Agradeço de forma especial a meus pais, Rubens e Efigenia pelo amor, incentivo e compreensão que sempre me dedicaram.

À minha madrinha Corina Pasquali, tia Euvira Benedeti, Celina, tia Geni Queiroz e tio Paulo Queiroz, obrigada pelo apoio e confiança.

A Cnpq pela concessão de bolsa durante a execução deste trabalho.

Ao meu querido e estimado orientador Prof. Dr. Francisco Humberto Simões Magro, pela dedicação, orientação, paciência e confiança depositada na realização desse projeto.

Aos funcionários do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia – CEP SRM da UFRGS, em especial a Madalena, Luciana e Mônica por toda a atenção

Ao INPE que cedeu a imagem do CBERS-I, em especial ao Prof. Dr. Paulo Roberto Martini.

À minha amiga Patrícia Scalco, pela amizade e ajuda constante.

Aos meus amigos Cláudio Bielenki, Carlos Aluisio de Almeida e Rafael Zanardi, pela ajuda nas saídas de campo, amizade e convivência. Ao amigo Lizandro Jacóbsen por todo apoio e carinho.

Ao companheiro Rodrigo Nascimento, por toda atenção, ajuda e confiança.

Aos amigos da AEROGEO, Rosa, Rosaura, Paulo, Gilmar, Ricardo, Nicolau, Felipe pelas palavras amigas e por me ouvirem. Um obrigada especial ao Eng. Milton Dupont e Eng. Rosi Guedes pela compreensão e apoio para a realização deste trabalho.

Ao amigo Prof. Dr. Sérgio Florêncio pelos sábios conselhos e amizade.

Aos amigos Andréa Iescheck, e Flávio Peregrina pela atenção e apoio.

Deixo meus sinceros agradecimentos às pessoas que me auxiliaram direta ou indiretamente, durante a execução deste projeto, e que me apoiaram nas horas que mais precisei.

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me apoiaram ao longo dessa caminhada.

SINOPSE

Neste trabalho serão descritos métodos e técnicas na análise de transformações geométricas para o georreferenciamento de imagens do satélite CBERS I, utilizando o sensor CCD na região de Porto Alegre, com a utilização das transformações afim e equações projetivas e com o uso de pontos de apoio coletados com receptor GPS.

Os resultados experimentais obtidos com as transformações afim e equações projetivas são animadores, recomendando-se então continuar os estudos para as imagens do CBERS-I que pode ser um atalho importante para atualizar a cartografia regional brasileira, pois neste caso do sensor CCD se vislumbra a possibilidade de se gerarem cartas imagens nas escalas de 1:100.000 e 1:50.000.

ABSTRACT

In this work methods and techniques will be described in the analysis of geometric transformations for the geo-referencing of CBERS I satellite images, using sensor CCD in the area of Porto Alegre, with the use of the Afim and equations projetives transformations and with the use of support points collected with receiving GPS.

The experimental results obtained with the Afim and equations projetives transformations are exciting, being recommended then to continue the studies for the images of the CBERS-I that it can be an important shortcut to modernize the Brazilian regional cartography, because in this case of sensor CCD it is shimmered the possibility of if they generate map images in the scales of 1:100.000 and 1:50.000.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de sistemas orbitais	11
Tabela 2 – Componentes do satélite CBERS-I.....	17
Tabela 3 – Tabela de coordenadas dos pontos coletados com GPS	62
Tabela 4 – Coordenadas dos pontos de apoio escolhidos para as transformações.....	64
Tabela 5 – Resíduos obtidos com 30 pontos para a transformação Afim.....	67
Tabela 6 – Resíduos obtidos com 30 pontos para a transformação Projetiva.....	68
Tabela 7 – Resíduos obtidos com 29 pontos para a transformação Afim.....	69
Tabela 8 – Resíduos obtidos com 29 pontos para a transformação Projetiva.....	70
Tabela 9 –Resíduos obtidos com 27 pontos para a transformação Afim.....	71
Tabela 10 – Resíduos obtidos com 27 pontos para a transformação Projetiva	72
Tabela 11 – Análise das variâncias a posteriori para as transformações Afim e Projetiva, com 30 pontos.....	73
Tabela 12 – Análise das variâncias a posteriori para as transformações Afim e Projetiva, com 29 pontos.....	73
Tabela 13 – Análise das variâncias a posteriori para as transformações Afim e Projetiva, com 27 pontos.....	73
Tabela 14 – Comparação das coordenadas obtidas com GPS com as coordenadas geradas pelas transformações Afim.....	74
Tabela 15 – Comparação das coordenadas obtidas com GPS com as coordenadas geradas pelas transformações Projetivas.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- A barra sobre a onda representa um comprimento de onda.....	6
Figura 2 – Espectro Eletromagnético.....	6
Figura 3 – Caminho da radiação eletromagnética.....	8
Figura 4 – Reflectância espectral de diferentes alvos.....	9
Figura 5 – Esquema de funcionamento do sensor MSS. Fonte: NASA LANDSAT Data Handbook.....	12
Figura 6 - Esquema de aquisição de Imagens do sensor LANDSAT TM.....	13
Figura 7 - Funcionamento do espelho variável (à esquerda acima), e as faixas Possíveis de imageamento (esquerda abaixo e a direita). Fonte Kronberg. 1985 pag. 143.....	14
Figura 8 – Satélite CBERS-I.....	17
Figura 9 – Matriz de saída geometricamente corrigida, com os pixels sobrepondo a matriz de pixels de entrada da imagem original e distorcida. FONTE: Lillesand & Liefer (1987).....	28
Figura 10- Transformação Afim (Paralelismo invariante).....	29
Figura 11 - As variações de DN ao longo de uma linha de uma imagem (a) podem ser Expressa como várias componentes senóides (b), com diferentes amplitudes e frequências. Fonte Modif de Drury, 1989.....	36
Figura 12 – Modificação de um sinal através de um sistema inern. FONTE: Richards (1986).....	38
Figura 13 – Constelação de satélites GPS.....	47
Figura 14 - Satélite GPS. Fonte: Silva, 1995.....	48

Figura 15 - Estação de monitoramento GPS.(Fonte: Adaptado de Silva et al., 1997)....	49
Figura 16 - Posicionamento Relativo. Fonte: Rocha, 1994.....	50
Figura 17 – Localização geográfica da área de estudo.....	51
Figura 18 - Composição RGB bandas 4, 3, 2.....	55
Figura 19 – Banda 3 da imagem recortada.....	56
Figura 20 – Domínio de frequência da banda 4.....	58
Figura 21 – Recorte realizado para o filtro de Fourier.....	58
Figura 22 – Imagem Original.....	58
Figura 23 – Imagem filtrada com o filtro de Fourier.....	58
Figura 24 – Imagem com os pontos de controle.....	60

SUMÁRIO

FOLHA DE ROSTO.....	I
AGRADECIMENTOS.....	II
DEDICATÓRIA.....	III
SINOPSE	IV
ABSTRACT.....	V
LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
Capítulo I. Introdução.	
1.1. Considerações Introdutórias.....	1
1.2. Justificativa.....	2
1.3. Estrutura do Trabalho.....	3
1.4. Objetivo.....	4
Capítulo II - Fundamentação Teórica	
2.1. - Princípios de Sensoriamento Remoto.....	5
2.1.1. Definição de Sensoriamento Remoto.....	5
2.1.2. O Espectro de Radiação Eletromagnética.....	5
2.1.3. Sistemas Sensores.....	7
2.1.4. Tipos de Sensores.....	9
2.1.5. Sistemas Orbitais.....	10
2.1.6. Sistema de Recepção de Imagens.....	20
2.1.7. O Segmento de Solo.....	20
2.2. Processamento de Imagem Digital.....	21

2.2.1. Imagem Digital.....	21
2.2.2. Caracterização de imagens.....	21
2.2.3. Resolução e Bandas.....	21
2.2.4. Manipulação de imagens digitais.....	22
2.2.5. Correção de erros e registro de imagens digitais.....	23
2.2.5.1. Correção de distorções radiométricas.....	23
2.2.5.2. Georreferenciamento de imagens digitais.....	25
2.2.5.3. Pontos de Controle.....	27
2.2.5.4. Método de Ajustamento Paramétrico.....	29
2.3. Filtragem de Frequências Espaciais.....	35
2.3.1. Convolução.....	37
2.3.2. Domínio imagem X domínio de frequência (processo de transformada de Fourier).....	40
2.3.3. Filtros no Domínio da Frequência (Fourier).....	42
2.4. Sistema de Posicionamento Global.....	46
2.4.1. Introdução.....	46
2.4.2. Segmento Espacial.....	47
2.4.3. Segmento de Controle.....	48
2.4.4. Segmento dos Usuários.....	48
2.4.5. Métodos de posicionamento GPS.....	49
2.4.5.1. Posicionamento Relativo Estático Rápido.....	50
 Capítulo III - Metodologia	
3.1. Localização Geográfica.....	51
3.2. Escolha da Área.....	52

3.3. Materiais e Métodos.....	52
3.4. Softwares.....	52
3.5.Desenvolvimento da Metodologia.....	54
3.5.1. A Imagem.....	54
3.5.2. Preparação da imagem e leitura dos pontos de apoio.....	56
3.5.2.1. Realce.....	56
3.5.2.2. Filtragem.....	57
3.5.2.3. Escolha dos Pontos de Controle.....	59
3.5.2.4. Coleta de Pontos de Controle com GPS.....	60
3.5.3.Georreferenciamento.....	63

Capítulo IV – Análise Dos Resultados

4.1. Análise das Transformações Geométricas utilizadas no Georreferenciamento e Resultados.....	66
4.1.1.. Análise das transformações geométricas Afim e Projetiva em relação a quantidade de pontos a serem utilizados.....	66
4.1.2. Análise das variâncias a posteriori para as transformações Afim e Projetiva.....	72
4.1.3. Comparação das coordenadas obtidas com GPS com as coordenadas geradas pelas transformações Afim e Projetiva.....	74

Capítulo V – Conclusões e Recomendações

5.1. Conclusões.....	76
5.2. Recomendações.....	77

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
--	-----------

Capítulo I – Introdução

1.1. Considerações Introdutórias

Os recursos naturais que fazem parte do meio ambiente da Terra estão em mudanças contínuas em resposta à evolução natural e às atividades humanas. Para compreender o complexo inter-relacionamento dos fenômenos que causam estas mudanças é necessário fazer observações com uma grande gama de escalas temporais e espaciais. A observação da Terra pelo espaço é um dos meios mais efetivos e econômicos de coletar os dados necessários para monitorar e modelar estes fenômenos.

Os satélites de observação dos recursos da Terra devem ter uma resolução espacial do terreno compatível com sua aplicação, assim aqueles destinados a pesquisas oceânicas ou monitoramento de áreas continentais têm menor resolução que os destinados ao monitoramento de plantações. Para uso em mapeamentos a resolução espacial deve ser maior. A medida da resolução geométrica, por si só, não garante a visibilidade de objetos ou feições no terreno, pois entram outros fatores como: sensibilidade radiométrica do sensor, radiância do objeto (nos sensores ópticos), número de visadas, comprimento da onda, ângulo de incidência (nos radares), mas é uma forma conveniente de indicar a qualidade de uma imagem relativamente à outra.

A extração de informações geométricas de imagens de satélite, tais como distâncias, direções e avaliação de superfícies, requer o conhecimento das relações matemáticas entre os espaços imagem e objeto. A extração de feições de imagens digitais para a geração ou atualização de mapas pode ser feita quando a localização dos detalhes presentes na imagem é determinada em algum sistema de referência selecionado.

Neste trabalho será apresentada uma análise das transformações geométricas afim e equações projetivas para o georreferenciamento de imagens do satélite CBERS-I, utilizando pontos de apoio coletados com GPS.

1.2. Justificativa

No fim da década de 80, a China, um país em desenvolvimento, apresentava consideráveis avanços em vários setores – incluindo o espacial – que favorecia a criação de alternativas interessantes de cooperação em áreas consideradas de fundamental importância para o Brasil.

No setor espacial, o Brasil vivia momentos de rara expectativa em razão dos avanços obtidos em seu programa de satélites, denominado Missão Espacial Completa Brasileira, MECB. Subjacentes a esses aspectos, convergiam também os interesses em direcionar as atividades espaciais para o fortalecimento da indústria e da economia de cada país de empreendimentos em parceria. A China carregava em sua bagagem realizações de considerável envergadura na área de construção de satélites e foguetes lançadores, iniciadas na segunda metade da década de 50 e pontuadas pelo lançamento do primeiro veículo da série Longa Marcha em 1964, pelo lançamento do primeiro satélite científico em 1970 e pelo lançamento de mais de vinte outros satélites (incluindo os recuperáveis e os de órbita geostacionária), através de veículos lançadores, bases de lançamento e estações de rastreamento e controle construídos por meios próprios.

Sendo assim, o Brasil e a China conceberam então um satélite com sensores projetados especialmente para suas aplicações comuns nas áreas de gerenciamento de recursos terrestres, monitoramento de florestas, geologia e hidrologia, além da inclusão de um moderno sistema de monitoramento ambiental.

Com isso torna-se necessário analisar as imagens adquiridas pelo satélite CBERS-I para sua utilização na atualização de produtos cartográficos entre outros.

1.3 Estrutura Do Trabalho

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos.

No capítulo I, “**Considerações introdutórias**” apresenta-se uma descrição dos motivos que levaram Brasil e a China a conceber o satélite CBERS-I suas dificuldades e alternativas para a solução e os objetivos da dissertação.

No capítulo II, “**Revisão Bibliográfica**”, faz-se uma revisão bibliográfica da base teórica referente aos seguintes temas: princípios de sensoriamento remoto, sistemas sensores, sistemas orbitais, correção de erros e georreferenciamento de imagens digitais, filtragem de frequências espaciais e sistema de posicionamento global.

No capítulo III, “**Metodologia**”, apresenta-se a metodologia utilizada para a realização desta dissertação mostrando a localização da área escolhida, as materiais utilizados, softwares, coleta de pontos de controle com GPS, a seqüência metodológica proposta para a aplicação das transformações geométricas afim e equações projetivas utilizadas na execução desta dissertação.

No Capítulo IV, “**Análise dos Resultados**”, faz-se a descrição dos resultados obtidos quanto à aplicação do algoritmo para as transformações geométricas, utilizando pontos de apoio coletados com GPS.

No capítulo V “**Conclusões e Recomendações**”, apresenta-se uma análise conclusiva a respeito dos problemas então abordados e algumas recomendações para trabalhos futuros.

1.4. Objetivo

Este projeto visa analisar transformações geométricas para a transformação de coordenadas extraídas de imagens do satélite CBERS-I para o espaço objeto, utilizando pontos de apoio coletados com GPS, bem como ressaltar a utilização dessas imagens em futuras atualizações cartográficas.

Capítulo II - Fundamentação Teórica

2.1. - Princípios de Sensoriamento Remoto

2.1.1. Definição de Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é definido por Lillesand & Kiefer (1987) como “..a ciência e arte de receber informações sobre um objeto, uma área ou fenômeno pela análise dos dados obtidos de uma maneira tal que não haja contato direto com este objeto, esta área ou este fenômeno“. Nossos olhos são um excelente exemplo de um dispositivo de sensoriamento remoto. Somos capazes de reunir informações sobre o que nos rodeia julgando a quantidade e a natureza da reflectância da energia da luz visível (proveniente de alguma fonte externa, como o Sol ou uma lâmpada) conforme ela reflete de objetos em nosso campo visual.. As fotografias aéreas, imagens de satélite e radar são formas de dados remotamente sensoriados.

A captura da informação do objeto por um sensor ocorre através de energia eletromagnética refletida e/ou emitida pelo objeto em questão.

2.1.2. O Espectro de Radiação Eletromagnética

O Sol é a principal fonte natural de energia eletromagnética disponível para Sensoriamento Remoto, mas a própria Terra também é considerada uma importante fonte natural de radiação eletromagnética. Esta energia é transmitida através do espaço na forma de radiação eletromagnética. Quando o Sol é utilizado como fonte de energia, em Sensoriamento Remoto, o que se mede é a energia refletida pelos diversos objetos da superfície terrestre.

Outras formas de radiação eletromagnética incluem as ondas de rádio, microondas, radiação infravermelha (I.V.), raios ultravioleta (U. V), raios-X e raios gama. Todos estes, conhecidos coletivamente como o espectro eletromagnético, são similares pelo fato de se moverem na velocidade da luz. A diferença entre eles é o seu comprimento de onda (figura 1), que está diretamente relacionado com a quantidade de energia que a onda carrega. Quanto menor o comprimento de onda da radiação maior é a sua energia.



Figura 1- A barra sobre a onda representa um comprimento de onda.

O Espectro Eletromagnético é subdividido em faixas, representando regiões que possuem características peculiares em termos dos processos ou mecanismos físicos de detecção da energia. Dependendo da região do espectro, trabalha-se com energia (eletrón-volts), comprimentos de onda (micrômetro), ou frequência (hertz). Por exemplo: na região dos raios gama e cósmicos usa-se energia; na região entre U.V. e I.V. - usa-se comprimento de onda; na região microondas e radio - usa-se frequência. As principais faixas do espectro eletromagnético estão descritas abaixo e representados na figura 2.

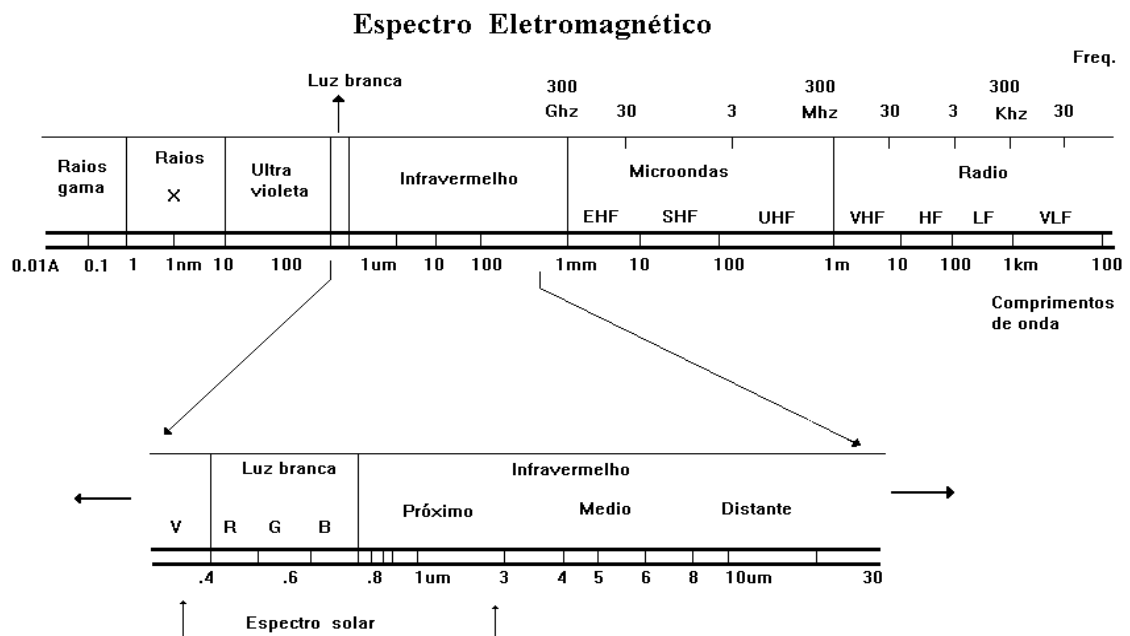


Figura 2 – Espectro Eletromagnético

Segundo Novo (1989), pode-se observar através de curvas da irradiância solar que, o máximo de energia disponível na superfície terrestre para fins de sensoriamento remoto, encontra-se na faixa de $0,4\mu\text{m}$ a $0,7\mu\text{m}$ que é conhecida como região **visível** do espectro eletromagnético (EEM).

Ondas de radio: As ondas eletromagnéticas nesta faixa são utilizadas para comunicação a longa distância, pois além de serem pouco atenuadas pela atmosfera, são refletidas pela ionosfera propiciando uma propagação de longo alcance.

Microondas: Nesta faixa de comprimentos de onda pode-se construir dispositivos capazes de produzir feixes de radiação eletromagnética altamente concentrados chamados radares. Por ser pouca atenuada pela atmosfera ou nuvens, propicia um excelente meio para uso de sensores de microondas em qualquer condição de tempo.

Infravermelho: A radiação I.V. é facilmente absorvida pela maioria das substâncias (efeito de aquecimento).

Visível: é definida como a radiação capaz de produzir a sensação de visão para o olho humano normal. Pequeno intervalo de comprimento de onda (380 a 750 *nm*). Importante para o Sensoriamento Remoto, pois imagens obtidas nesta faixa, geralmente, apresentam excelente correlação com a experiência visual do intérprete.

Ultravioleta: Películas fotográficas são mais sensíveis à radiação ultravioleta do que a luz visível. Usada para detecção de minerais por luminescência e poluição marinha. Estas ondas são também usadas em observatórios de astronomia.

Raios X: São gerados, predominantemente, pela parada ou freamento de elétrons de alta energia. Por se constituir de fótons de alta energia, os raios-X são altamente penetrantes, sendo uma poderosa ferramenta em pesquisa sobre a estrutura da matéria, com muitas aplicações na medicina.

Raios-GAMA: São os raios mais penetrantes das emissões de substâncias radioativas. Os raios Gama são gerados por átomos radioativos e explosões nucleares, e são usadas também em aplicações na medicina. Imagens do universo adquiridas por raios gama têm fornecido importantes informações sobre a vida e morte de estrelas.

Não existe, em princípio, limite superior para a frequência das radiações gama, embora ainda seja encontrada uma faixa superior de frequência para a radiação conhecida como raios cósmicos.

2.1.3. Sistemas Sensores

Sensores são equipamentos (sistemas fotográficos ou óptico-eletrônicos) capazes de coletar energia proveniente do objeto, convertê-la em sinal passível de ser registrado e apresentá-lo em uma forma adequada para a extração de informações, INPE. TUTORIAL - SPRING, Agosto, 1999a..

Um fluxo de radiação eletromagnética ao se propagar pelo espaço pode interagir com superfícies ou objetos sendo por estes refletido, absorvido e mesmo reemitido. As variações que essas interações produzem no fluxo considerado dependem fortemente das propriedades físico-químicas dos elementos na superfície.

Tudo na natureza está em constante vibração, emitindo ou modificando ondas eletromagnéticas (energia) e apresentando "perturbações" dos campos magnéticos e gravimétricos da Terra. Todos os instrumentos que captam e transformam essa energia poderiam ser classificados como sensores: rádio, televisão, máquina fotográfica etc.

Durante a fase de aquisição de dados pelos sensores, pode-se distinguir os seguintes elementos básicos: energia radiante, fonte de radiação, objeto (alvo), trajetória e sensor (sistema de imageamento óptico e detector). A Figura 3 apresenta estes elementos e exemplifica os vários caminhos que a radiação eletromagnética pode tomar antes de atingir o sistema sensor.

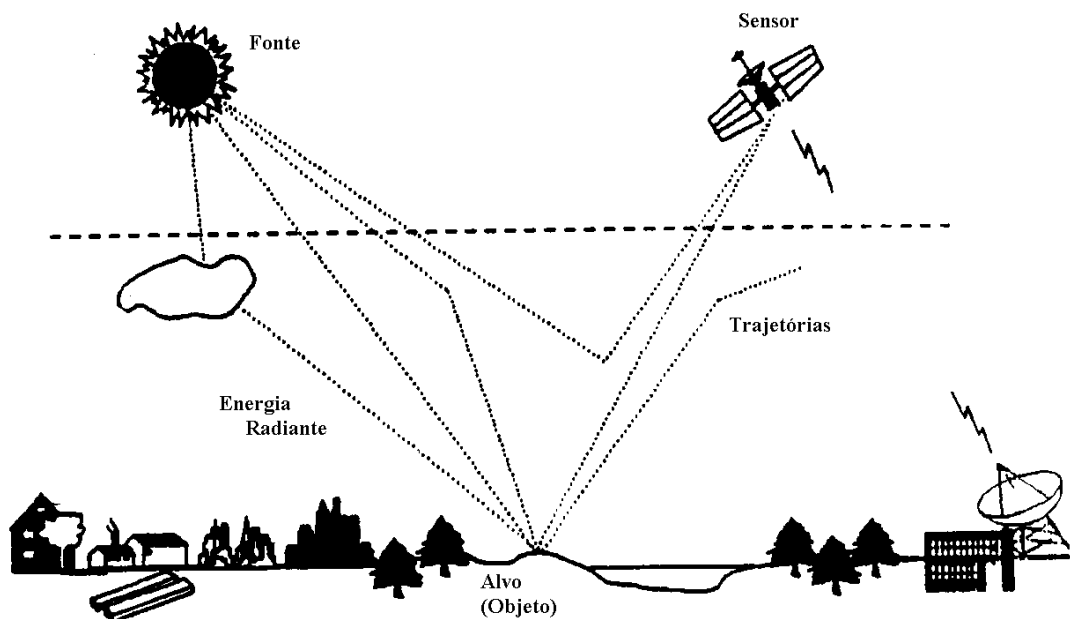


Figura 3 – Caminho da radiação eletromagnética

Toda matéria (objeto) com temperatura superior à de zero absoluto (0 K ou -273° C) emitem radiação eletromagnética, como resultado de suas oscilações atômicas e moleculares. Essa radiação emitida pode incidir sobre a superfície de outra substância podendo ser refletida, absorvida ou transmitida. No caso da absorção, a energia é geralmente reemitida, normalmente com diferentes comprimentos de onda.

Na prática, os quatro processos: emissão, absorção, reflexão e transmissão ocorrem simultaneamente e suas intensidades relativas caracterizam a matéria em investigação. Dependendo das características físicas e químicas da mesma, aqueles quatro processos ocorrem com intensidades diferentes em diferentes regiões do espectro. Dizemos que os objetos ou materiais possuem diferentes características espectrais. Esse comportamento espectral dos materiais é denominado **assinatura espectral** (um valor de reflectância para cada parte específica do EM) e é utilizado em Sensoriamento Remoto para distinguir diversos materiais/alvos entre si (Figura 4).

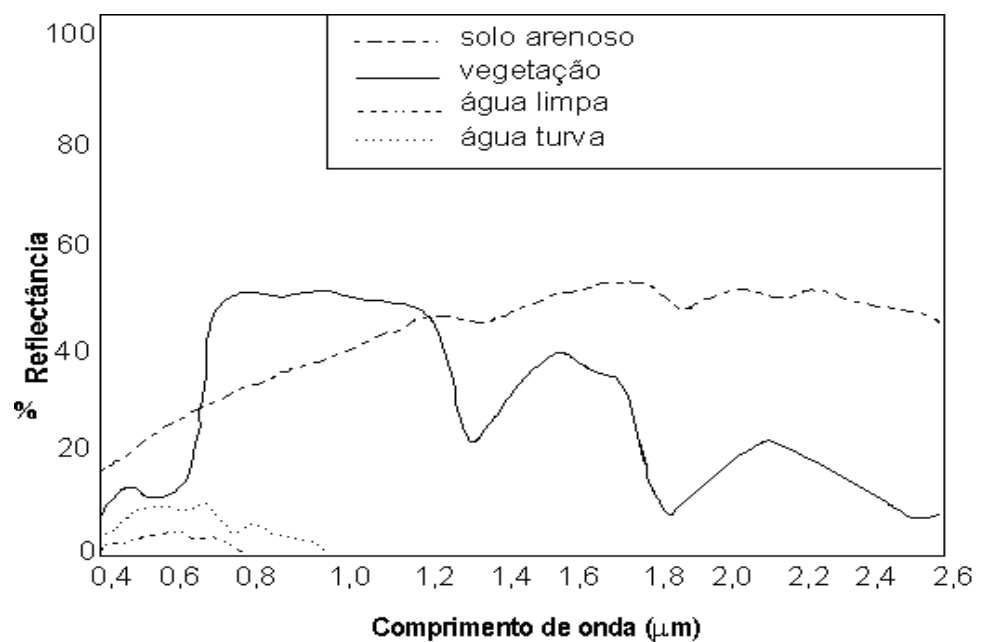


Figura 4 – Reflectância espectral de diferentes alvos.

2.1.4. Tipos de Sensores

Os sensores podem ser classificados em função da fonte de energia ou em função do tipo de produto que ele produz.

Em função da fonte de energia:

A-) **PASSIVOS** : não possuem uma fonte própria de radiação. Ele mede radiação solar refletida ou radiação emitida pelos alvos (sistemas fotográficos).

B-) **ATIVOS** : possuem sua própria fonte de radiação eletromagnética, trabalhando em faixas restritas do espectro (radares).

Em função do tipo de produto:

A-) **Não-imageadores:** não fornecem uma imagem da superfície sensoriada. ex: radiômetros (saída em dígitos ou gráficos) e espectro-radiômetro (assinatura espectral).

B-) **Imageadores:** obtém-se como resultado uma imagem da superfície observada. Fornecem informações sobre a variação espacial da resposta espectral da superfície observada.

B.1 - **sistema de quadro:** adquirem a imagem da cena em sua totalidade num mesmo instante (RBV).

B.2 - **sistema de varredura:** TM, MSS.

B.3 - **sistema fotográfico** – câmaras métricas aerotransportadas

Os sistemas de imageamento por varredura vieram a cobrir a lacuna deixada pelos problemas inerentes ao uso de câmaras fotográficas. As câmaras apresentam limitações para captar a resposta espectral porque os filmes cobrem somente o espectro do ultravioleta próximo ao infravermelho próximo.

Como os dados dos sensores não fotográficos são coletados sob forma de sinal elétrico eles podem ser facilmente transmitidos para estações distantes, onde um processamento eletrônico faz sua análise discriminatória.

As técnicas de Sensoriamento Remoto evoluíram primariamente a partir de necessidades militares. Atualmente essas técnicas e as pesquisas realizadas têm produzido ferramentas cada vez mais sofisticadas, ampliando sua aplicabilidade a uma grande gama de problemas ecológicos, urbanos e de recursos naturais. Porém, na seleção de uma determinada técnica de Sensoriamento Remoto o usuário deve ter o conhecimento antecipado do significado dos parâmetros medidos com relação ao problema que está sendo investigado. INPE. TUTORIAL - SPRING, Agosto, 1999a.

2.1.5. Sistemas Orbitais

Diversas agências de diferentes Países todo têm lançado ou estão preparando para lançar vários sistemas de observação da Terra, de alta resolução, multi-bandas e multi-sensores incluindo SPOT-3, LANDSAT-7, ENVISAT 1, TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), EOS-AM (Earth Observing System), o satélite brasileiro

SSR (Satélite de Sensoriamento Remoto) e o satélite sino-brasileiro CBERS-I . Nesta seção faz-se uma breve descrição dos sistemas LANDSAT, SPOT, ERS-1 e CBERS-I com o objetivo de mostrar as diferentes características que um sistema pode apresentar.

As características orbitais destes sistemas, mostradas na tabela abaixo, são baseadas nas seguintes premissas:

- a órbita deve ser circular, para garantir que as imagens tomadas em diferentes regiões da Terra tenham a mesma resolução e escala;
- a órbita deve permitir o imageamento cíclico da superfície, para garantir a observação periódica e repetitiva dos mesmos lugares;
- a órbita deve ser síncrona com o Sol (heliosíncrona), para que as condições de iluminação da superfície terrestre se mantenham aproximadamente constantes;
- o horário da passagem do satélite deve atender às solicitações de diferentes áreas de aplicação (geologia, geomorfologia, agricultura, etc.).

	LANDSAT 4 e 5	SPOT 1 e 2	ERS-1	CBERS-I
Órbita	Circular 98,2 graus heliosíncrono	Circular 98,7 graus heliosíncrono	circular 98,5 graus heliosíncrono	circular 98,5 graus heliosíncrono
Período	99 min.	97 min.	100,467 min.	100,26 min.
Altitude	705 km	832 km	785 km	778 km
Cruzamento	9:45 horas	10:39 horas	10:30 horas (desc.)	10:30 horas
Ciclo	16 dias	26 dias	35 dias (SAR)	26 dias

Tabela 1 - Características de sistemas orbitais

LANDSAT

O sistema LANDSAT foi desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration), recebendo inicialmente o nome de Earth Resources Technology Satellite-1 (ERTS-1), que passou a ser chamado de LANDSAT em janeiro de 1972.

O LANDSAT 1 e 2 carregaram a bordo dois sistemas sensores com a mesma resolução espacial, mas com diferentes concepções de imageamento: o sistema RBV, com imageamento instantâneo de toda a cena e o sistema MSS, com imageamento do terreno por varredura de linhas (line-scanner) (Figura 5) .

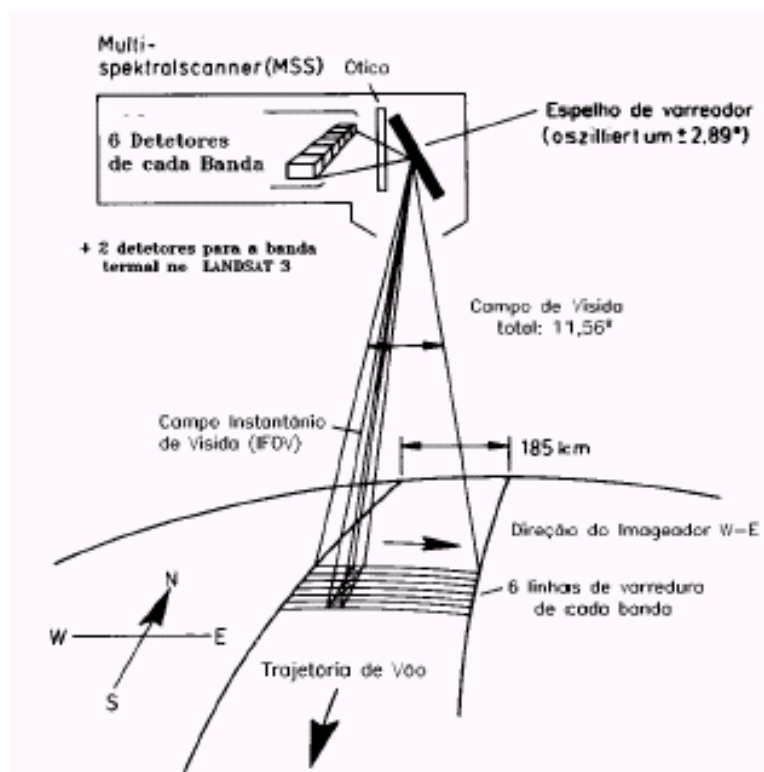
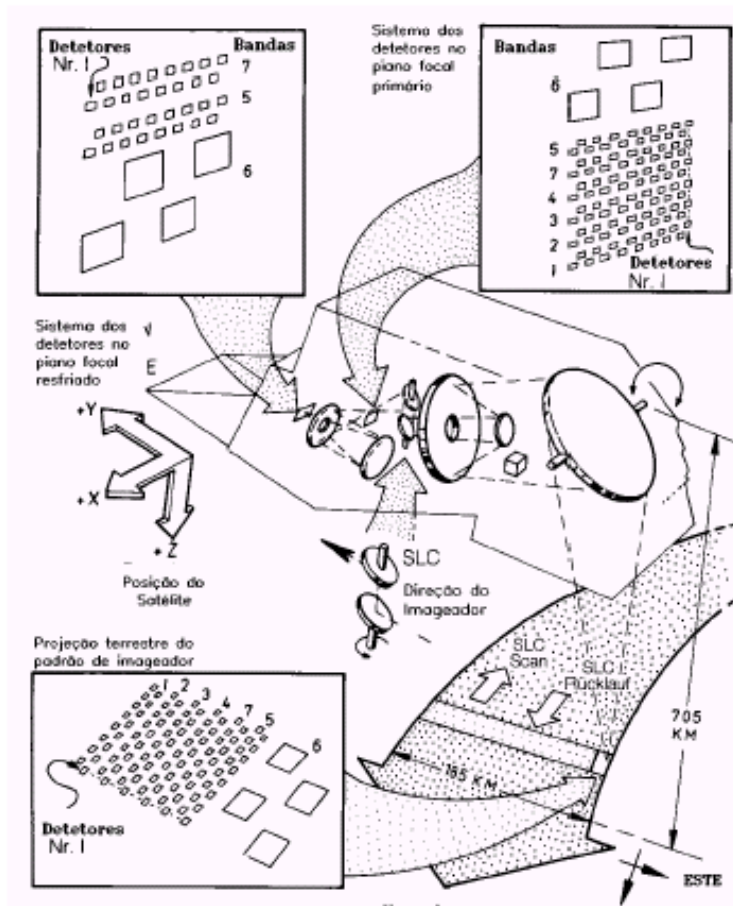


Figura 5 – Esquema de funcionamento do sensor MSS.
(fonte: NASA LANDSAT Data Handbook)

A partir do LANDSAT 4 e 5, ao invés do sensor RBV, a carga útil do satélite passou a contar com o sensor TM (Thematic Mapper), operando em 7 faixas espectrais. Esse sensor conceitualmente é semelhante ao MSS, pois é um sistema de varredura de linhas (line-scanner), como mostra a Figura 6. Entretanto, incorpora uma série de aperfeiçoamentos, quer nos seus componentes ópticos quer nos seus componentes eletrônicos.



O LANDSAT 6 foi perdido no lançamento.

Em abril de 1999, foi lançado o LANDSAT 7. O novo satélite da série LANDSAT conta com um sensor denominado ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) e além das bandas disponíveis no LANDSAT 5, conta com uma banda pancromática (Resolução espacial de 15m) e um canal termal (Resolução de 60m). Maiores informações podem ser encontradas através do “site” da NASA (<http://LANDSAT.gsfc.nasa.gov>).

SPOT

O sistema SPOT é um programa espacial francês semelhante ao programa LANDSAT, que foi concebido pelo Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) e leva a bordo dois sensores de alta resolução (HRV - HAUT Resolution Visible). Estes sensores foram concebidos para operarem em dois diferentes modos. O modo

multiespectral permite a aquisição de dados em três faixas do espectro eletromagnético com uma resolução espacial de 20 metros. E o modo pancromático com uma banda de resolução espacial de 10 metros.

Uma das características marcantes dos instrumentos a bordo do SPOT é a possibilidade de observação "off-nadir" (apontamento direcional). O sensor poderá ser direcionado de modo a observar cenas laterais à órbita em que se encontra inserido o satélite em dado momento (Figura 7). Esta possibilidade de observação "off-nadir" aumenta os meios de obter-se um aumento no recobrimento repetitivo de determinadas áreas. Outra vantagem da visada "off-nadir" é a possibilidade de serem obtidos pares estereoscópicos de determinadas áreas.

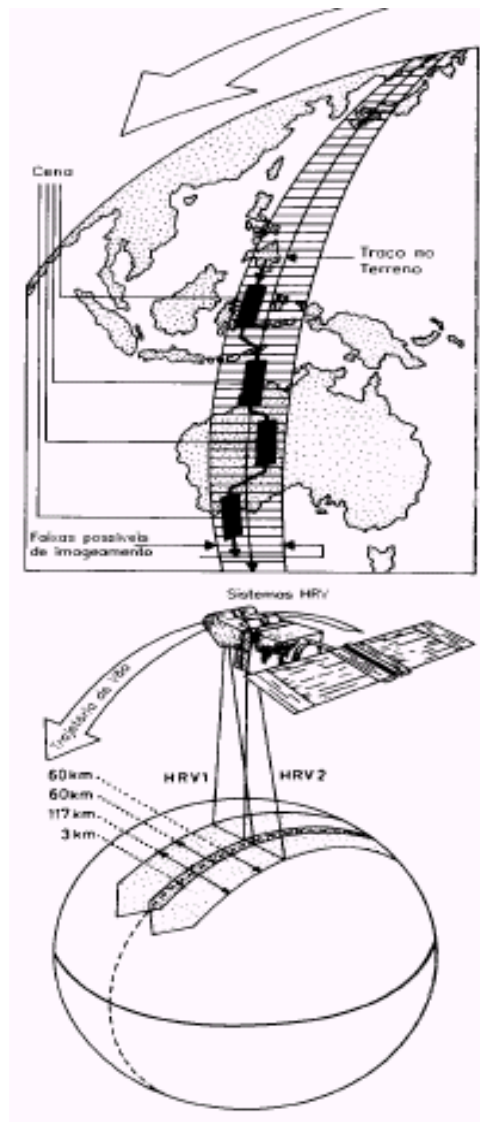


Figura 7 - Funcionamento do espelho variável (à esquerda acima), e as faixas possíveis de imageamento (esquerda abaixo e a direita) (Fonte kronberg. 1985 pag. 143)

A luz proveniente da cena atinge um espelho plano, que pode ser controlado a partir das estações terrenas variando em ângulos de $\pm 0,6^\circ$ até 27° em relação ao eixo vertical.

A energia que atinge o espelho plano é focalizada sobre uma matriz linear de detectores do tipo CCD (charge-Coupled Device). Cada matriz consiste em 6000 detectores arranjados linearmente, formando o que se convencionou chamar de "push-broom scanner" ou sistema de varredura eletrônica. Este sistema permite o imageamento instantâneo de uma linha completa no terreno, perpendicularmente à direção de deslocamento do satélite em sua órbita.

ERS-1

Foi construído pela Agência Espacial Européia (ESA), o ERS-1 foi lançado do centro espacial da Guiana Francesa pelo foguete Ariane 4 em 16 de julho de 1991. Com uma missão nominal de dois anos, os objetivos são voltados principalmente para estudos oceânicos e de geleiras nas várias áreas de ciências naturais.

Dentre os vários aparelhos a bordo do satélite, temos o AMI (Active Microwave Instruments), constituído por um radar de Abertura Sintética (SAR) e um escaterômetro (aparelho para medição de ventos). As imagens adquiridas pelo SAR, fornece dados de uma faixa de 100 x 100 km, com uma resolução espacial de 30 metros.

Uma antena de 10 x 1 metros emite e recebe um feixe de microondas na faixa de 5,3 Ghz (banda C), com polarização VV e um ângulo de incidência de 23 graus.

A operação do SAR no modo Imagem produz uma taxa de dados muito alta (105 Mbps), fazendo com que as imagens só possam ser geradas em zonas equipadas com estações receptoras. A superfície terrestre poderá ser inteiramente coberta e imageada em ciclos de 35 dias.

CBERS-I

O satélite CBERS-I

Em Julho de 1988, durante uma visita do Presidente José Sarney, os governos do Brasil e da República Popular da China assinaram um acordo para iniciarem um projeto de desenvolvimento de dois satélites avançados de sensoriamento remoto. O Programa CBERS-I (China-Brazil Earth Resources Satellite / Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) agrega a capacidade técnica e os recursos financeiros dos dois países para estabelecer um sistema completo de sensoriamento remoto competitivo e compatível com as necessidades internacionais atuais. O engajamento do Brasil no CBERS-I marcou o início de uma nova etapa do programa espacial brasileiro e serviu como fator estratégico para a diversificação de parcerias no escopo mais amplo da ciência e da tecnologia.

Na China, a implementação do Programa CBERS-I ficou a cargo da CAST (Chinese Academy of Space Technology / Academia Chinesa de Tecnologia Espacial) e no Brasil, do INPE.

Para aumentar os aspectos de semelhança entre o Brasil e a China, contribuíam fatores de natureza puramente físicos, como a vasta extensão territorial com grandes áreas despovoadas e de difícil acesso, assim como a acentuada vocação agrícola de ambos os países. O Brasil e a China conceberam então um satélite com sensores projetados especialmente para suas aplicações comuns nas áreas de gerenciamento de recursos terrestres, monitoramento de florestas, geologia e hidrologia, além da inclusão de um moderno sistema de monitoramento ambiental.

Algumas razões adicionais para a cooperação entre os dois países merecem destaque, tais como: divisão de custos financeiros, a China buscava conhecimento e procedimentos utilizados no mundo ocidental, e o Brasil possuía um parque industrial mais moderno e principalmente encontrava-se em estágio mais avançado em matéria de utilização de metodologia de sensoriamento remoto e meteorologia por satélites.

Em 14 de outubro de 1999, ocorreu o lançamento do primeiro Satélite CBERS-I, utilizando-se o foguete Longa Marcha 4B, a partir da Base de Lançamento de Taiyuan, situada na Província de Shanxi, a cerca de 750Km sudoeste de Beijing.

Coroado de grande êxito o lançamento foi realizado pontualmente às 11h 26m 14s, no primeiro instante da janela de 20 minutos estabelecida para que o satélite cruze o equador da Terra às 10:30h.

O satélite CBERS-I (Figura 8) é composto de dois módulos. O módulo "carga útil" acomoda os sistemas ópticos (CCD - High Resolution CCD Cameras, IRMSS - Infra-Red Multispectral Scanner e WFi - Wide Field Imager) e os eletrônicos usados para observação da Terra e Coleta de Dados. O módulo "serviço" contém os equipamentos que asseguram o suprimento de energia, os controles, as telecomunicações e demais funções necessárias à operação do satélite.

1	Módulo de Serviço
2	Sensor de Presença do Sol
3	Conjunto dos Propulsores de 20N
4	Conjunto dos Propulsores de 1N
5	Divisória Central
6	Antena UHF de Recepção
7	Câmera de Varredura Infravermelho (IRMSS)
8	Antena de Transmissão do IR
9	Antena de Transmissão em VHF
10	Antena UHF Tx/Rx
11	Antena em Banda S(DCS)
12	Antena de Transmissão do CCD
13	Antena de Transmissão em UHF
14	Câmera CCD
15	Antena em Banda S (TT&C)
16	Módulo de Carga Útil
17	Antena em Banda S (TT&C)
18	Antena de Recepção em UHF
19	Painel Solar
20	WFI

Tabela 2 – Componentes do satélite CBERS-I

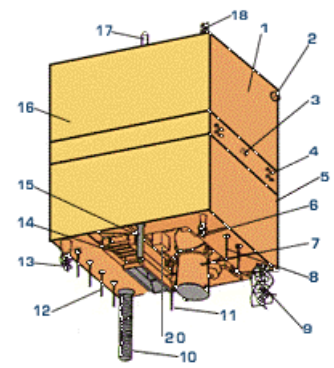


Figura 8 – Satélite CBERS-I

O satélite CBERS-I está em uma órbita heliosincrona a uma altitude de 778 km, completando cerca de 14 revoluções da Terra por dia. Este tipo de órbita é tal que o satélite cruza o equador sempre na mesma hora local, 10:30 da manhã, provendo assim as mesmas condições de iluminação solar para tornar possível a comparação de imagens em dias diferentes. O satélite demora 26 dias para retornar ao mesmo ponto de cobertura da Terra.

Uma característica exclusiva do CBERS-I é a diversidade de instrumentos sensores com diferentes resoluções espaciais e frequências de coleta de dados.

a) Imageador de Largo Campo de Visada (WFI - Wide Fiel Imagem):

- WFI imagea uma faixa de 890 km de largura;
- Resolução espacial de 260 x 260 m;

- Em cerca de 5 dias obtém-se uma cobertura completa do globo em duas bandas espectrais centradas em: 0,66 μ m (vermelho) e 0,83 μ m (infravermelho próximo)

- Sem espelho de visada lateral

- *2 bandas:*

- Banda 10: 0.63 a 0.69 μ m (igual a banda 3 de LANDSAT –TM)

- Banda 11: 0.77 a 0.89 μ m (igual a banda 4 de LANDSAT –TM)

b) Câmera CCD de alta resolução (CCD - High Resolution CCD

Camera):

- CCD fornece imagens de uma faixa de 113 km de largura

- Resolução espacial de 20 m;

- Esta câmara tem capacidade de obtenção de imagens estereoscópicas;

- Qualquer fenômeno detectado pelo WFI pode ser focalizado pela Câmera CCD;

- CCD opera em 5 faixas espectrais incluindo uma faixa pancromática;

- São necessários 26 dias para uma cobertura completa da Terra- Espelho de visada lateral: como no SPOT, com ± 32 graus;

- Gravador de bordo para apenas um canal (CCD1 ou CCD2)

5 bandas (4 multiespectrais + 1 pancromática):

- Banda 1: 0.45 a 0.52 μ m (igual a banda 1 de LANDSAT –TM)

- Banda 2: 0.52 a 0.59 μ m (igual a banda 2 de LANDSAT –TM)

- Banda 3: 0.63 a 0.69 μ m (igual a banda 3 de LANDSAT –TM)

- Banda 4: 0.77 a 0.89 μ m (igual a banda 4 de LANDSAT –TM)

- Banda 5: 0.51 a 0.73 μ m (pancromática, igual a do SPOT)

c) Câmera de varredura no infravermelho (IR-MSS - Infrared

MultispectralScanner):

- IR-MSS tem 4 faixas espectrais e estende o espectro de observação do CBERS-I até o infravermelho termal;

- Faixa de 120 km de largura;

- Com uma resolução de 80 m (banda 1, 2 e 3), 160 m na banda termal (banda 4);

- Em 26 dias obtém-se uma cobertura completa da Terra

- Sem espelho de visada lateral.

4 Bandas (1 pancromática + 3 infravermelha):

- Banda 1: 0.50 a 1.10 μm (pancromática estendida)
- Banda 2: 1.55 a 1.75 μm (igual a banda 5 de LANDSAT –TM)
- Banda 3: 2.08 a 2.35 μm (igual a banda 7 de LANDSAT –TM)
- Banda 4: 10.4 a 12.5 μm (igual a banda 6 de LANDSAT –TM)

Quadrantes CCD

Só o produto CCD tem quadrantes, iguais aos usados no sistema LANDSAT-TM:



Quadrante A



Quadrante B



Quadrante C



Quadrante D



Quadrante N (North)



Quadrante S (South)



Quadrante W (West)



Quadrante E (East)



Quadrante X (Central)

2.1.6. Sistema de Recepção de Imagens

O sistema Brasileiro de Recepção de Dados de Satélite compõe-se de uma Estação de Recepção, implantada em Cuiabá e operando desde 1973. Esta estação de recepção está localizada no centro geográfico da América do Sul, o que permite a aquisição de dados sobre todo o território brasileiro e parte do território dos países limítrofes.

Outro componente do sistema brasileiro de recepção de dados de satélite é o laboratório de processamento eletrônico e fotográfico dos dados coletados pelos sensores a bordo dos satélites localizado em Cachoeira Paulista-SP.

Em Cuiabá, os dados são recebidos através de uma antena parabólica e gravados em fitas magnéticas de alta densidade (High Density Digital Magnetic Tape-HDDT). Estas fitas são, então, enviadas para Cachoeira Paulista - São Paulo.

O laboratório de processamento de imagens em Cachoeira Paulista tem a função de transformar os dados recebidos pelas estações de recepção em imagens fotográficas, fitas magnéticas compatíveis com o computador (CCT-Computer Compatible Tapes, Streamer, Dat) ou discos ópticos (CD-ROM).

2.1.7. O Segmento de Solo

O segmento de solo do CBERS-I apóia as atividades necessárias ao controle dos satélites e ao cumprimento dos objetivos de suas missões de sensoriamento remoto. Inclui meio para rastreamento, comando e controle dos satélites e para recepção, armazenamento, processamento e distribuição de imagens.

As funções relativas à programação das operações das câmeras dos satélites em resposta às solicitações dos usuários serão efetuadas pelo Centro de Missão. Entretanto, o elemento central de todas as operações relativas ao satélite CBERS-I e de seu controle de missão é o Centro de Controle de Satélite. As estações TT&C provêm o elo de ligação entre o pessoal de controle e o satélite, além de serem as estações usadas para a aquisição dos dados brutos do sistema de coleta de dados do CBERS-I, em banda S.

As estações de recepção de imagens e os centros de processamento, no Brasil e na China, são a cadeia principal de recepção de imagens.

Poderão ser instaladas estações em outros países para estender a cobertura potencial do CBERS-I.

2.2. Processamento de Imagem Digital

2.2.1. Imagem Digital

Uma imagem digital pode ser definida por uma função bidimensional $I(x,y)$. Os valores de I , em cada coordenada espacial (x,y) , representam a intensidade de luz refletida ou emitida por uma cena nesse ponto. Em uma imagem digital, essa intensidade é representada por um **valor inteiro, não-negativo e finito** chamado **nível de cinza**. A cada ponto imageado pelos sensores corresponde uma área mínima denominada "pixel" (picture element), que deve estar geograficamente identificado, e para o qual são registrados valores digitais relacionados com a intensidade de energia refletida em faixas (bandas) bem definidas do espectro eletromagnético. INPE. TUTORIAL - SPRING, Agosto, 1999a.

2.2.2. Caracterização de imagens

Pode-se representar uma imagem por uma matriz de dados, onde as linhas e colunas definem as coordenadas espaciais do "pixel". Para isto utiliza-se um número finito de bits para representar a radiância da cena para cada "pixel".

Radiância é o fluxo radiante que provém de uma fonte, numa determinada direção, por unidade de área.

A quantificação da radiância contínua de uma cena, representada pelos níveis de cinza discretos na imagem digital, é dada por um número de bits por "pixel" para produzir um intervalo de radiância. Os sensores da nova geração obtêm, normalmente, imagens em 8 ou 10 bits (equivalente a 256 ou 1024 níveis digitais).

2.2.3. Resolução e Bandas

Resolução é uma medida da habilidade que um sistema sensor possui de distinguir entre respostas que são semelhantes espectralmente ou próximas

espacialmente. A resolução pode ser classificada em espacial, espectral e radiométrica. INPE. TUTORIAL - SPRING, Agosto, 1999a.

Resolução espacial: é definida pela **capacidade do sistema sensor em “enxergar”** objetos na superfície terrestre; quanto menor o objeto possível de ser visto, maior a resolução espacial.

Resolução espectral: é uma medida do número e da largura das faixas espectrais do sistema sensor. Por exemplo, um sensor que opera na faixa de 0,4 a 0,45 μm tem uma resolução espectral melhor do que o sensor que opera na faixa de 0,4 a 0,6 μm .

Resolução radiométrica: está associada à sensibilidade do sistema sensor em distinguir dois níveis de intensidade do sinal de retorno. Por exemplo, uma resolução de 10 bits (1024 níveis digitais) é melhor que uma de 8 bits.

2.2.4. Manipulação de imagens digitais

A idéia geral do processamento digital de imagens é simples: os dados são introduzidos em computadores específicos, programados para formar uma imagem digital que pode ser visualizada em um monitor ou armazenada para posterior manipulação, a partir da utilização de programas adequados.

As formas possíveis de manipulação de imagens são teoricamente infinitas. Entretanto, de um modo geral, podem ser categorizadas em um ou mais procedimentos que incluem quatro tipos abrangentes de operações computacionais:

a) Retificação e Restauração de Imagens: operações realizadas para minimizar as distorções e degradações dos dados de uma imagem, com a finalidade de criar uma representação mais fiel da cena.

b) Realçamento de Imagens: procedimentos aplicados aos dados de uma imagem com o objetivo de melhorar efetivamente a visualização da cena, para subsequente interpretação visual.

c) Classificação de Imagens: estas operações têm a finalidade de substituir a análise visual dos dados por técnicas quantitativas de análise automática, visando a identificação das regiões presentes na cena.

d) Combinação de Dados (*data merging*): procedimentos utilizados para combinar os dados de uma imagem, referente a uma certa área geográfica, com outros conjuntos de dados referenciados geograficamente, para a mesma área.

Genericamente, o processamento digital de imagens (PDI) envolve a manipulação e interpretação de imagens digitais com o auxílio de computadores, de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens.

Os campos de aplicações do processamento digital de imagens, conforme pode-se ver em Simonett (1983) compreendem, a análise de recursos naturais e meio ambiente, através de imagens de satélite, a análise de imagens climatológicas e meteorológicas, transmissão digital de sinais de TV ou fax-símile, a análise de imagens biomédicas, incluindo contagem automática de células e exame de cromossomos, a obtenção de imagens médicas por ultra-sons, a radiação nuclear ou técnicas de tomografia computadorizadas, as aplicações em automação industrial, envolvendo usos de sensores visuais em robôs, a geração de produtos de entrada em SIG's e, ainda, Medicina, Arqueologia, Astronomia, Cartografia, Agronomia, Florestas, Análise Ambiental, Geografia, Geologia, Pedologia e Meteorologia, entre outros.

2.2.5. Correção de erros e georreferenciamento de imagens digitais

O objetivo da restauração e retificação de imagens é a correção das distorções ou degradações que ocorrem no processo de aquisição da cena. Obviamente, a natureza dos procedimentos aplicados aos dados obtidos por uma câmera ou imageador multiespectral aerotransportados são bastante diferentes daqueles aplicados aos dados orbitais ou meteorológicos. Serão abordadas a seguir, operações mais genéricas utilizadas para correção radiométrica, geométrica e supressão de ruídos.

2.2.5.1. Correção de distorções radiométricas

O tipo de correção radiométrica a ser aplicada em uma imagem digital varia com o tipo de sensor utilizado na aquisição desta imagem. A radiância proveniente de um objeto da superfície é registrada por um determinado sensor, sofre a influência de fatores como:

- Variação na iluminação da cena;
- Condições atmosféricas;

- Geometria de visada;
- Característica do sistema sensor.

No caso de imagens de satélite adquiridas nas regiões do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, pode haver a necessidade de gerar mosaicos de imagens obtidas em épocas diferentes, seja para analisar as variações na refletância das feições terrestres em duas ou mais épocas distintas, ou em diferentes locais. Para estas aplicações, é necessário a utilização de técnicas de correção da elevação solar, a fim de se considerar a posição do Sol em relação à Terra. Através desse processo, as imagens adquiridas sob diferentes ângulos de iluminação solar são normalizadas através do cálculo dos valores de brilho dos pixels que compõem a cena, assumindo-se que o Sol estava na posição zenital em cada uma das tomadas de dados.

A influência da iluminação solar é resultante de uma combinação dos efeitos atmosféricos que afetam a radiância, em qualquer ponto da cena, de duas maneiras básicas. Na primeira provoca uma atenuação (redução) da energia incidente sobre um alvo no terreno e, na segunda, atua como um refletor, adicionando um componente de espalhamento ao sinal detectado pelo sensor (radiância de trajetória). Assim a composição do sinal de um pixel, registrado por um sistema sensor, pode ser expressa por:

$$L_{\text{total}} = L_{\text{sup}} * \delta_{\text{atm}} + L_p = [(\rho_{\text{sup}} + E_{\text{sup}} * \delta_{\text{atm}}) / \pi] + L_p$$

L_{total} - representa radiância espectral total medida pelo sensor;

ρ - representa a reflectância do alvo no terreno;

E - representa a irradiância sobre o alvo;

δ - representa a transmitância da atmosfera;

L_p - representa a radiância de trajetória

Apenas o primeiro termo da equação anterior contém informações válidas sobre a refletância da superfície. O segundo termo representa a radiância de trajetória espalhada, que introduz uma névoa (haze) no imageamento e reduz o contraste da imagem (lembrar que o espalhamento depende do comprimento de onda, e é maior nos λ 's menores).

Os procedimentos para correção da contribuição atmosférica são usados para

minimizar os efeitos da radiância de trajetória. Uma maneira de compensação de haze em imagens multiespectrais é observar a radiância registrada pelos alvos que apresentam uma radiância próxima de zero. Por exemplo, a reflectância de corpos d'água, limpa e profunda, aproxima-se de zero na região espectral do infravermelho próximo, e qualquer acréscimo considerável a este valor, para este tipo de alvo nesta banda, representa a radiância de trajetória e deve ser subtraído de todos os pixels da cena, na banda do infravermelho próximo.

Por conveniência, as rotinas para correção de haze são aplicadas uniformemente sobre toda a cena. Este procedimento pode ser ou não válido, dependendo da uniformidade da atmosfera na tomada da cena. Quando estão envolvidos ângulos de visada extremos na aquisição da imagem, e freqüentemente necessário compensar a influência da variação atmosférica. Nestes casos, os valores de brilho dos pixels off-nadir são usualmente normalizados para os valores equivalentes aos do nadir.

2.2.5.2. Georreferenciamento de imagens digitais

O georreferenciamento de uma imagem compreende uma transformação geométrica que relaciona coordenadas de imagem (linha, coluna) com coordenadas de um sistema de referência, em última instância, o sistema de coordenadas planas de uma certa projeção cartográfica. Como qualquer projeção cartográfica guarda um vínculo bem definido com um sistema de coordenadas geográficas, pode-se dizer então que o registro estabelece uma relação entre coordenadas de imagem e coordenadas geográficas usando assim transformações geométricas simples (usualmente transformações polinomiais de 1^o e 2^o graus) para estabelecer um mapeamento entre coordenadas de imagem e coordenadas geográficas. Neste trabalho serão aplicados dois tipos de transformação geométrica: afim e projetiva.

O processo de georreferenciamento é fundamental em vários problemas práticos na área de sensoriamento remoto, tais como: integração de uma imagem à base de dados existente num SIG; aplicação na área de cartografia, uso da terra, geografia, que exigem alta precisão geométrica ou fidelidade com respeito à cena, fusão de imagens adquiridas por sensores diferentes, aplicações relacionadas com a combinação de imagens sobre uma grande área (mosaico) e na análise de dados multi-temporais (imagens adquiridas em épocas diferentes).

Para que a precisão cartográfica seja avaliada em imagens de sensoriamento remoto, faz-se necessário que as mesmas sejam corrigidas das suas distorções e os elementos que as constituem fiquem referidos a algum sistema de coordenadas.

Ainda de acordo com Crósta (1992), a relação entre os dois sistemas de coordenadas (mapa e imagem) pode ser calculada de duas formas. A primeira delas é através do conhecimento exato dos parâmetros geométricos da órbita do satélite e de outras variáveis, também chamado de modelo de geometria orbital. A segunda forma de se calcular a relação entre os dois sistemas de coordenadas, é com o auxílio de pontos de controle no terreno, que têm de ser identificados tanto no mapa como na imagem.

a) Transformação baseada no modelo de geometria orbital

De acordo com Crósta (1992), a transformação relativa ao modelo de geometria orbital se baseia no conhecimento das características da órbita do satélite, da rotação da Terra e no fator de amostragem do sensor. O grau de precisão dessa técnica é relativamente baixo.

Os tipos de distorções eliminados por essa transformação são mudanças de escala, correção do “skew” (o ângulo de inclinação entre a projeção da órbita em relação ao eixo norte-sul da Terra) e a correção do efeito de rotação da Terra durante a aquisição da imagem.

As estações de recepção de imagens e os centros de processamento (no Brasil o INPE), são responsáveis pela aquisição dos dados brutos, armazenamento, processamento e distribuição de imagens.

b) Transformação Geométrica baseada em pontos de controle no terreno

Uma vez que a precisão fornecida pela transformação baseada no modelo de geometria orbital é reduzida, existe a necessidade de refinar a correção geométrica de uma imagem. Nestes casos, usam-se transformações geométricas baseadas em pontos de controle no terreno, que permite uma precisão bem mais elevada. É claro que essa maior precisão será uma função direta da precisão na identificação e posicionamento dos pontos de controle, o que é feito geralmente de forma interativa pelo usuário.

2.2.5.2. Pontos de Controle

No caso de imagens de satélite, os pontos de controle (PCs) são feições com localização conhecida, e que podem ser acuradamente identificados nestas. Algumas feições que constituem bons pontos de controle referem-se a cruzamentos de estradas e feições distintas na linha da costa. No processo de correção, numerosos PCs são localizados em termos de suas coordenadas x e y na imagem, e em termos de coordenadas de terreno (medidas em campo, ou a partir de um mapa - coordenadas UTM ou latitude e longitude). Estes valores são, então submetidos a uma análise de regressão pelo método dos mínimos quadrados, para determinar, os coeficientes de duas equações de transformação de coordenadas geometricamente corretas (medidas no terreno ou mapa) e as coordenadas da imagem distorcida. Uma vez determinados os coeficientes destas equações, as coordenadas da imagem distorcida, para qualquer posição, podem ser precisamente estimadas (dentro de um intervalo de erro). Expressando em notação matemática, tem-se:

$$\begin{aligned}x_2 &= f_1(x,y) \\ y_2 &= f_2(X,Y)\end{aligned}\tag{2.1}$$

onde:

(x,y) : coordenadas da imagem distorcida (linha, coluna);

(X,Y) : coordenadas corretas (terreno, mapa);

f_1, f_2 : funções de transformação.

Instintivamente, pode parecer que os parâmetros das equações anteriores estejam invertidos, isto é, eles especificam como determinar uma posição na imagem distorcida correspondente à posição correta no mapa o que, na realidade é feito durante o processo de correção geométrica. Em primeiro lugar, define-se uma matriz não-distorcida com as células do mapa “vazias”, e então completa-se cada uma das células com o nível de cinza do pixel ou pixels correspondente(s) na imagem distorcida. Este procedimento é ilustrado na figura 9, cujo diagrama mostra que a matriz de células geometricamente correta (linhas sólidas) é sobreposta à original, ou seja, à matriz de pixels da imagem distorcida (linhas tracejadas). Após gerada a função de transformação, utiliza-se um processo de reamostragem para determinar os valores que deverão preencher a matriz de saída, a partir da matriz da imagem original.

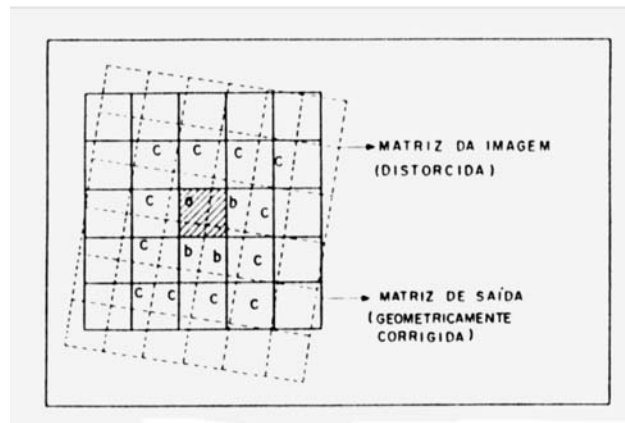


Figura 9 – Matriz de saída geometricamente corrigida, com os pixels sobrepondo a matriz de pixels de entrada da imagem original e distorcida. FONTE: Lillesand & Liefer (1987).

b1) Transformação afim

A transformação afim mantém invariante o paralelismo entre as respectivas linhas da figura, mas já altera sua forma, pois introduz duas escalas (no caso plano), nas direções x e y (figura 10)

A transformação afim é expressa matematicamente por:

$$\begin{aligned} X &= a_1x + a_2y + a_3 \\ Y &= a_4x + a_5y + a_6 \end{aligned} \quad (2.2)$$

onde:

X, Y representam as coordenadas UTM (extraídas da carta);

x, y representam as coordenadas das imagens;

a_i representa os parâmetros de transformação a serem determinados, mediante um cálculo de ajustamento pelo método dos mínimos quadrados com $i = (1, \dots, 6)$

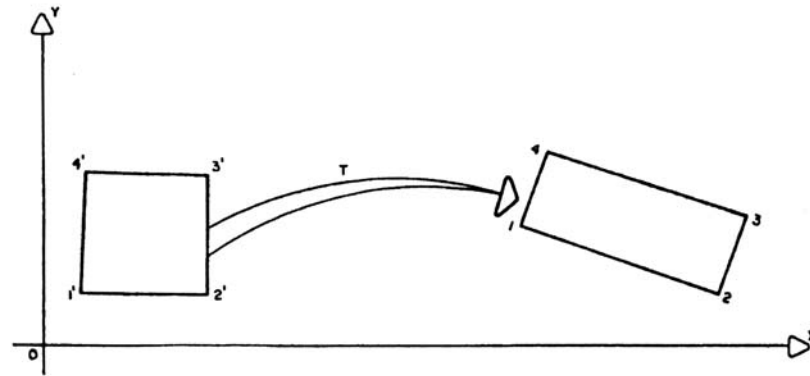


Figura 10- Transformação Afim (Paralelismo invariante)

b2) Equação projetiva

As transformações geométricas são instrumentos fundamentais de trabalho para o fotogrametrista e o geodesta. Os tratamentos matemáticos e computacionais, cada dia mais, substituem as atividades analógicas e gráficas convencionais.

A escolha das equações projetivas tem implicações fundamentais em aspectos de precisão, em problemas de mal condicionamento de sistemas, na eficiência numérica e na exatidão dos resultados obtidos.

As equações projetivas são expressas matematicamente:

$$X = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{a_4x + a_5y + 1}$$

$$Y = \frac{a_6x + a_7y + a_8}{a_4x + a_5y + 1} \quad (2.3)$$

X, Y representam as coordenadas UTM (extraídas da carta); e

x, y representam as coordenadas das imagens;

a_i representa os parâmetros de transformação a serem determinados, mediante um cálculo de ajustamento pelo método mínimos quadrados em que $i = 1, 2, \dots, 8$.

2.2.5.4. Método de Ajustamento Paramétrico

No caso de observações diretas, as incógnitas são os valores observados ajustados. Agora, no caso de observações indiretas, para estimar grandezas que se

vinculam às observadas; para distinguí-las das primeiras é usual designá-las de parâmetros, o que explica a denominação, mais atual, de método paramétrico.

Equações de observação

Seja:

$$La = Lb + V \quad (2.4)$$

Lb : vetor ($n \times 1$) dos valores observados;

V : vetor ($n \times 1$) dos resíduos;

La : vetor ($n \times 1$) dos valores observados ajustados:

$$Xa = X_0 + X \quad (2.5)$$

X_0 : vetor ($u \times 1$) cujas componentes são os valores aproximados dos parâmetros;

X : vetor correção ($u \times 1$);

X_8 : vetor dos parâmetros ajustados (um de nossos objetivos):

Quando os valores observados ajustados podem ser expressos explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados, isto é, quando se verifica o modelo matemático:

$$L_0 = F(Xa) \quad (2.6)$$

diz-se que o ajustamento se processa pelo **método paramétrico**.

Levando a expressão matricial (4.5) e (4.6) na (4.7) e linearizando o segundo com a *fórmula* de TAYLOR obtém-se:

$$L_b + V = F(X_o + X) = F(X_o) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{x_a=x_o} X \quad (2.7)$$

Considerando L_0 como um vetor (nx1) dos valores das observações calculadas a partir dos parâmetros aproximados e levando no modelo matemático paramétrico obtém-se:

$$L_0 = F(X_0) \quad (2.8)$$

e a matriz das derivadas parciais designada por A:

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{x_a=x_o} \quad (2.9)$$

pode-se escrever sucessivamente:

$$Lb + V = L_0 + AX \quad (2.10)$$

$$V = AX + L_0 - Lb \quad (2.11)$$

E, finalmente, fazendo:

$$L = L_0 - Lb \quad (2.12)$$

obtém-se o modelo matemático linearizado do método dos parâmetros:

$${}_n V_1 = {}_n A_{uu} X_1 + {}_n L_1 \quad (2.13)$$

Equações normais

Minimizando a forma quadrática fundamental obtém-se sucessivamente:

$$\phi = V'PV = (AX + L)'P(AX + L) = \min \quad (2.14)$$

$$\phi = (X' A' + L')P(AX + L) = X' A' PAX + X' A' PL + L' PAX + L' PL = \min$$

Pode-se observar que o 2º e 3º termos são iguais, donde:

$$\phi = X' A' PAX + 2(X' A' PL) + L' PL = \min \quad (2.15)$$

Igualando a zero a derivada primeira em relação a X:

$$\frac{\partial \phi}{\partial X} = 2A' PAX + 2A' PL = 0$$

$$A' PAX + A' PL = 0 \quad (2.16)$$

$$X = -(A' PA)^{-1} A' PL$$

Fazendo:

$$N = A' PA \quad (2.17)$$

$$U = A' PL \quad (2.18)$$

Resulta

$$NX + U = 0 \quad (2.19)$$

A equação matricial representa um sistema de u equações normais cuja solução é dada pelo vetor:

$$X = -N^{-1}U \quad (2.20)$$

e cujas componentes convergem para os parâmetros aproximados ajustados:

$$X_a X_0 + X \quad (2.21)$$

Matriz variância-covariância

Antes do ajustamento necessita-se estimar a precisão das medidas efetuadas para compor a matriz variância-covariância dos valores observados (\mathbf{Lb}) e, a partir desta e da variância da unidade peso a priori σ_o^2 , chegar à matriz dos pesos.

$$P = \sigma_o^2 \sum_{L_B}^{-1} \quad (2.22)$$

Após o ajustamento pode-se estimar a variância da unidade de peso a posteriori e a matriz variância-covariância das variáveis envolvidas no processo: X, X_a, V, La.

A matriz variância-covariância dos resíduos pode ser expressa matematicamente da forma seguinte:

$$\sum_V = \sigma^2 (AN^{-1}A' - P^{-1}) \quad (2.23)$$

Variância a posteriori σ_o^2

Com a expressão abaixo,

$$\sigma_o^2 = \frac{V'PV}{S} \quad (2.24)$$

pode-se estimar a variância da unidade de peso *a posteriori*. O número de observações superabundantes é dado por:

$$S = n - u \quad (2.25)$$

resultando para o caso paramétrico

$$\sigma_o^2 = \frac{V'PV}{n - u} \quad (2.26)$$

Comparação entre σ_o^2 e σ_o^2

A variância *a priori* repercute sobre a matriz N dos coeficientes das equações normais, circunstância que pode ser explorada, por exemplo, no caso de mau condicionamento.

Deve-se aplicar um teste de hipótese baseado na distribuição de χ^2 para

constatar se a discrepância é significativa a um certo nível de confiança. Uma resposta positiva indica que existem problemas no ajustamento. Estes problemas serão descritos a seguir.

A forma quadrática $V^T \Sigma_{Lb}^{-1} V$ tem distribuição de χ^2 com $\nu = n - u$ graus de liberdade, isto é:

$$V^T \Sigma_{Lb}^{-1} V \approx \chi^2(\nu) \quad (2.27)$$

Logo

$$\frac{V^T PV}{\sigma_o^{\wedge 2}} \approx \chi^2(\nu) \quad (2.28)$$

ou, utilizando a:

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_o^{\wedge 2}} S \approx \chi^2(\nu)$$

Testou-se a hipótese bilateral:

$$H_0 : \sigma^2 = \sigma_o^{\wedge 2} \quad (2.29)$$

contra a hipótese alternativa:

$$H_1 : \sigma^2 \neq \sigma_o^{\wedge 2} \quad (2.30)$$

compara-se o valor calculado:

$$\chi^{*2} = \frac{\sigma^2}{\sigma_o^{\wedge 2}} S = \frac{V^T PV}{\sigma_o^{\wedge 2}} \quad (2.31)$$

com valores teóricos

$$\chi^2_{\nu, \alpha/2} < \chi^{*2} < \chi^2_{\nu, 1-\alpha/2} \quad (2.32)$$

No caso da relação de desigualdade (2.32) não se verificar a hipótese básica H_0 deve ser rejeitada e a hipótese alternativa H_1 aceita. Nesta situação, deve-se proceder a uma análise cuidadosa do ajustamento e, uma das seguintes situações isoladamente ou em conjunto podem estar a ocorrer:

- 1) As ponderações das observações estão inadequadas;
- 2) Há erros grosseiros ou sistemáticos nas observações gerando resíduos excessivamente grandes;
- 3) O sistema ser mal condicionado; e,
- 4) As expressões matemáticas não expressam a realidade física do problema;

Para solucionar o problema das ponderações inadequadas deve-se fazer uma avaliação das técnicas usadas nas medições, na obtenção das medidas, os erros médios quadráticos e a resolução instrumental. Ao se verificar que há novos valores para as ponderações de algumas observações então, deve-se fazer as correções necessárias.

2.3. Filtragem de Frequências Espaciais

Segundo Crosta, em uma imagem qualquer de sensoriamento remoto, considerada em uma de suas bandas espectrais, observa-se que a intensidade de cinza, representada pelos DN's dessa imagem, varia bastante e função da distância. Ao se plotar essas variações em um gráfico como o da Figura 11 obtém-se geralmente uma curva complexa (Figura 11a). Essa curva, por sua vez, pode ser decomposta em um conjunto de componentes senoidais (Figura 11b), com diferentes frequências e amplitudes. Essas senóides fornecem uma idéia da **distribuição espacial de frequência** da imagem considerada. Nos gráficos da Figura 11, um caso hipotético é mostrado, em apenas uma dimensão, mas nas imagens de S.R. esse fenômeno é bidimensional.

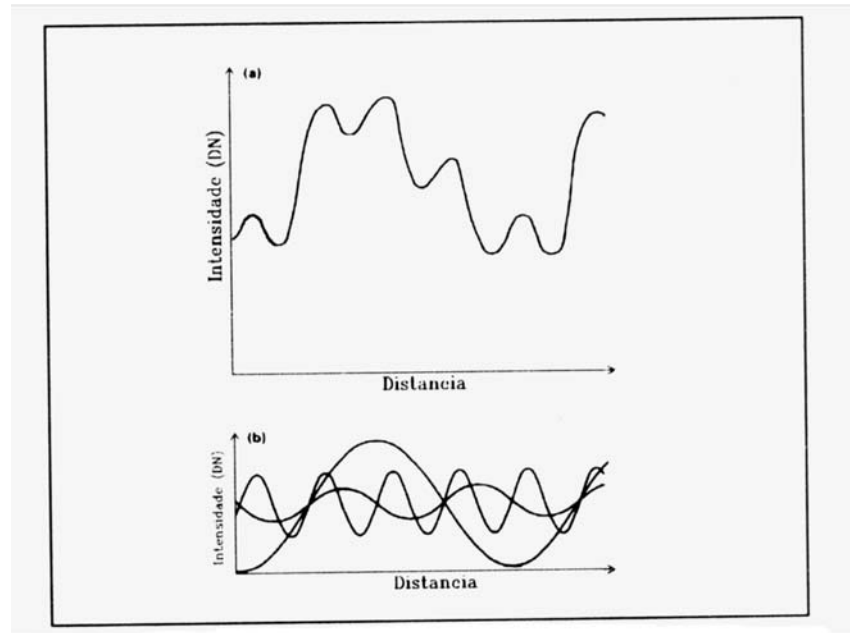


Figura 11 - As variações de DN ao longo de uma linha de uma imagem (a) podem ser expressa como várias componentes senóides (b), com diferentes amplitudes e frequências (Modif de Drury, 1989).

Todas as imagens possuem limites entre áreas com diferentes respostas em relação à energia eletromagnética. Esses limites podem ser, por exemplo, entre diferentes coberturas do terreno (solo, vegetação, rocha), ou podem representar o contato entre áreas com diferentes condições de iluminação, devido à ao sombreamento topográfico. Em uma imagem monocromática, esses limites representam portanto, mudanças de um intervalo de DNs para outro. Ao se plotar esses limites em um gráfico como o da Figura 11, eles serão representados por um gradiente bastante inclinado, podendo chegar a vertical. Limites deste tipo são conhecidos como **bordas**. Eles ocupam geralmente áreas pequenas na imagem, sendo mais estreitos do que largos. Por variarem bastante em áreas pequenas, são chamados de **feições de alta frequência**, sendo representados na figura 9a pelas senóides de pequena amplitude. Exemplos desse tipo de feição são limites entre diferentes tipos de plantações, entre áreas sombreadas e iluminadas, redes de transporte (malha urbana, rodovias, ferrovias), redes de drenagem, estruturas geológicas (falhas, fraturas) e outras.

Já limites gradacionais, que variam mais uniformemente com a distância, sendo conseqüentemente menos nítidos, são chamados de **feições de baixa frequência**. Estes são representados pelas senóides de grande amplitude na Figura 11b. Exemplos de feições de baixa frequência são dados por áreas monotonamente uniformes em imagens, tais como uma grande área de monocultura em terreno plano.

A enorme mistura de freqüências em uma imagem dificulta sobremaneira a interpretação de feições com freqüências específicas. Para contornar esse problema e melhorar a aparência da distribuição espacial das informações, são utilizadas técnicas de **filtragem espacial de freqüências**. Estas consistem em realçar seletivamente as feições de alta, média ou baixa freqüência que compõem as imagens de sensoriamento remoto.

Os realces geométricos de maior interesse em Sensoriamento Remoto referem-se a suavização (smoothing), detecção e realce de bordas e detecção de linhas. O realce de bordas e linhas conduz a um ‘aguçamento’ das feições imagem, enquanto que a suavização produz um efeito de homogeneização geral da cena. Muitos destes métodos são, ou podem ser, expressos como técnicas de máscaras (template), nas quais uma janela (máscara) é definida e deslocada sobre a imagem linha a linha, coluna a coluna. O produto dos valores de brilho dos pixels cobertos pela máscara são somados para gerar o valor do pixel central. Quando isto é feito para cada pixel da imagem, é produzida uma imagem modificada na qual estão realçadas ou suavizadas as feições geométricas, de acordo com os pesos especificados na máscara. Podem ser geradas máscaras de quaisquer dimensões, e para uma máscara de dimensões $M \times N$ pixels, o resultado para o pixel i, j da imagem será:

$$r(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \varphi(m, n)t(m, n) \quad (2.33)$$

onde (m, n) é o valor de brilho do pixel, endereçado de acordo com a posição da máscara, e $t(m, n)$ é a máscara de entrada para esta localização. Frequentemente, os pesos de entrada da máscara são conhecidos como “semente” de máscara, e o processo em si é denominado convolução, em vista de sua similaridade com a convolução no domínio temporal da teoria dos sistemas lineares.

2.3.1. Convolução

Inicialmente, é apresentada uma ligeira introdução sobre a teoria de sistemas lineares para o uso de máscaras expressas na equação (2.33).

Considerar um sinal no tempo representado por $x(t)$. Supor que este sinal itravesse um determinado sistema que produz um sinal modificado $y(t)$, conforme

iescrito na figura 12.

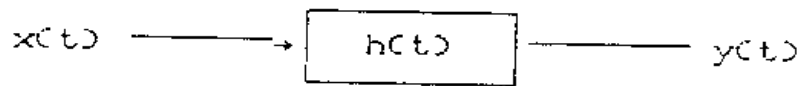


Figura 12 - Modificação de um sinal através de um sistema inern.
 FONTE: Richards (1986).

O sistema pode conter um amplificador ou filtro que poderá alterar intencionalmente o sinal de um modo pré-determinado; ou alternativamente, ele pode representar uma modificação não-intencional do sinal, como aquelas provocadas por distorções ou efeitos de ruídos. As propriedades do sistema podem ser descritas por uma função de tempo $h(t)$.

A relação entre $y(t)$ e $x(t)$ é descrita pela operação de convolução, o que pode ser expresso como uma integral do tipo:

$$y = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau = x(t)_{\text{signal}} h(t)_{\text{filtro}} \quad (2.34)$$

Uma descrição matemática similar é aplicada quando são usadas imagens ao invés de sinais, na equação (2.34) e na figura 12. A maior diferença é que as imagens têm duas variáveis independentes (seus índices de posição i, j - ou endereço, ao invés do sinal $x(t)$ na figura 12, que tem apenas uma variável - o tempo). Conseqüentemente, a função de transferência de um sistema que opera com imagens é bidimensional, e a imagem processada é uma versão bidimensional da integral da convolução definida em (2.34). Neste caso, o sistema pode representar qualquer função que modifica a imagem. Ele poderia, por exemplo, avaliar a degradação causada pela função de expansão de pontos finitos de um instrumento de aquisição da imagem, ou pelo equipamento display. Poderia, também, representar o efeito de um processamento intencional na cena, como aqueles utilizados em realçamento geométrico. Em ambos os casos, se as versões nova e antiga da imagem são descritas, respectivamente, por $r(x,y)$ e $D(x,y)$, onde x e y são as posições contínuas das variáveis que descrevem a localização dos pontos no domínio contínuo da imagem, então a operação de convolução bidimensional será descrita por:

$$r(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(u, v) t'(x - u, y - v) du dv \quad (2.35)$$

onde, $t'(x, y)$ é a função de transferência do sistema bidimensional (impulse response), e que também pode ser chamada de função do sistema.

Ainda que, em principio, $\varphi(x, y)$ e $t'(x, y)$ sejam definidos para um intervalo completo de x e y , na prática eles são limitados. Naturalmente, a própria imagem deve ser finita na sua extensão espacial, e a função do sistema $t(x, y)$ será também limitada. Ela deverá representar a função de expansão de um ponto do equipamento de imageamento e poderá ser significativamente diferente de zero (0) apenas para um pequeno intervalo entre x e y .

Para que se possa aplicar a equação (2.35) aos dados digitais de uma imagem, é necessário modificá-la de maneira que a natureza discreta de x e y , torne-se explícita e, conseqüentemente, que as integrais sejam substituídas pelos somatórios adequados. Se i, j representam os valores discretos de x e y e, similarmente, u e v representam os valores discretos das variáveis u e v da integração, então a equação (2.35) pode ser escrita como:

$$r(i, j) = \sum_u \sum_v \varphi(u, v) t'(i - u, j - v) \quad (2.36)$$

a qual é a forma digital da integral de convolução bidimensional. As somas são feitas para todos os valores de u e v , para os quais o resultado for diferente de zero.

Para visualizar como a equação (2.36) pode ser usada na prática é necessário interpretar a seqüência das operações implicadas no processo. Para simplificar assume-se que a intervalo diferente de zero para $t'(i, j)$ é consideravelmente menor, comparado com o da imagem $\varphi(i, j)$. Assume-se também que $t'(i, j)$ é uma amostra de ordem quadrada - por exemplo, de dimensão 3×3 .

Na equação (2.36) o sinal negativo de u e v em $t'(i - u, j - v)$ implica na reflexão completa de ambos os eixos. Isto é necessário para a rotação da função do sistema (system function) em 180 graus completos, antes que qualquer outra operação seja feita. A forma rotacionada ficará: $t(u - i, v - j)$.

A equação (2.36) implica que um valor de brilho na imagem resultante, para um pixel localizado na posição i, j - isto é (i, j) é fornecido a partir dos produtos da versão

original da imagem pela função do sistema rotacionado. Feito isto a origem das coordenadas μ, v será a mesma das coordenadas i, j de modo que as coordenadas simuladas e da variável real em (2.34) e (2.35) sejam as mesmas. Notar que o efeito da transformação de $\mu - i, v - j$ em $t(\mu - i, v - j)$ é o de deslocar a origem da função do sistema rotacionado para a localização i, j - que é o endereço do pixel que está sendo calculado. É necessário gerar valores de brilho para os pixels da imagem para cada posição i, j de forma que a origem da função do sistema deve ser deslocada progressivamente, o que implica em obter-se diferentes resultados entre a imagem original e a função do sistema rotacionado, a cada vez.

A seqüência de operações descritas, entre a função do sistema rotacionado e a imagem original, é a mesma. A única diferença entre (2.33) e (2.36) está na definição dos índices m, n e μ e v . Em (2.33) os endereços dos pixels referem-se a uma origem definida como sendo o canto superior esquerdo da máscara, da mesma maneira que para os sucessivos deslocamentos posteriores. Esta é uma forma simplificada de descrever a máscara e, literalmente, permite que uma máscara de qualquer tamanho seja definida. Em (2.36) os deslocamentos são incorporados na expressão a fim de definir corretamente as origens da imagem e da função do sistema rotacionado.

Qualquer operação de modificação de uma imagem que pode ser modelada por convolução, e descrita de acordo com o principio definido na figura 12 pode também ser expressa na forma de máscara. Por exemplo, se o ponto da função de expansão de um equipamento de display é conhecido, então uma máscara equivalente pode ser planejada para efetuar a operação. De maneira similar, modificações intencionais em uma imagem - tais como suavização ou realçamento - podem também ser implementadas usando máscaras. A entrada de uma máscara pode ser desenvolvida intuitivamente, tomando todo o cuidado em considerar o efeito desejado. Alternativamente, a função do sistema $t'(i, j)$, necessária para implementar a operação de filtragem desejada pode ser definida primeiro no domínio de freqüências espaciais, e então, transformado de volta para o domínio imagem.

2.3.2. Domínio imagem X domínio de freqüência (processo de transformada de Fourier)

Muitos dos procedimentos de realce geométrico podem ser implementados

usando tanto transformada de Fourier, quanto processos no domínio da imagem. A escolha do melhor procedimento depende de muitos fatores, tais como: software disponível; familiaridade com cada método (incluindo suas limitações e idiossincrasias); facilidade de uso de cada método; assim como, o custo computacional gasto em cada um dos processos.

Tanto a transformada de Fourier, que utiliza um processo no domínio de frequências, quanto a utilização de máscaras, constituem-se de um conjunto de multiplicações e adições, e nenhuma outra operação matemática está envolvida. Do ponto de vista tempo computacional, e conseqüentemente custos, isto é suficiente para comparar cada método com base no número de multiplicações e adições necessárias para encontrar o resultado.

Para uma imagem $K \times K$ pixels (considerando uma imagem quadrada para simplificar) e uma máscara de tamanho $M \times N$, o número total de multiplicações (ignorando-se as adições por se tratarem de cálculos muito rápidos) necessárias para a operação descrita na equação (2.33) e definir cada pixel da imagem é:

$$N = M \cdot N \cdot K^2 \quad (2.37)$$

Considerando o processo efetuado no domínio de frequências, tem-se:

$$N = 2K^2 \log_2 K + K^2 \quad (2.38)$$

A comparação do custo entre os processos será:

$$\frac{N_C}{N_F} = \frac{MN}{(2 \log_2 K + 1)} \quad (2.39)$$

Quando o resultado da razão for menor que 1 (um), é mais econômico usar um operador por máscara, pois a transformada de Fourier implica em um maior custo efetivo.

Como um comentário final nesta comparação deve-se levar em conta que o método no domínio das frequências é capaz de implementar processos que não são possíveis (ou são menos viáveis) com operações com máscaras, como no caso da remoção de ruídos periódicos.

2.3.3. Filtros no Domínio da Freqüência (Fourier)

A idéia básica deste tipo de filtro é aplicar-se a transformada de Fourier direta, dada pela equação (2.40), para que se obtenha o sinal analítico representado no domínio das freqüências, ou melhor, aplicamos a transformada de Fourier direta para obter o espectro de freqüências $F(w)$, do sinal analítico.

$$F(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) e^{i\lambda w} d\lambda \quad (2.40)$$

Na equação, λ representa o domínio original do sinal analítico e $f(\lambda)$, o sinal analítico. Para espectros, λ representa os comprimentos de onda; para cromatogramas ou fiagramas, λ representa a variável tempo e assim por diante.

Uma vez obtido o espectro de freqüências do sinal analítico, devemos cortar as freqüências altas, visto serem estas freqüências, na grande maioria dos casos, relacionadas ao ruído instrumental.

Finalmente aplicamos a transformada de Fourier inversa, dada pela equação (2.41) e recuperamos o sinal analítico inicial, livre de ruído.

$$F(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(w) e^{-i\lambda w} dw \quad (2.41)$$

O Filtro de transformada de Fourier pode ser entendido como a transformada de Fourier inversa (\mathfrak{F}^{-1}), da transformada de Fourier direta (\mathfrak{F}) de um sinal $f(\lambda)$ convolvido com uma unção de apodização $h(\lambda)$. A transformada de Fourier direta de $f(\lambda)$ convolvido com $h(\lambda)$ é dada pela equação (2.42):

$$F(S) = \mathfrak{F}(f(\lambda)h(\lambda)) \quad (2.42)$$

Uma vez que a transformada de Fourier da convolução de duas funções é o produto das transformadas, podemos escrever a equação (2.43):

$$F(S) = \mathfrak{F}(f(\lambda))\mathfrak{F}(h(\lambda)) \quad (2.43)$$

No domínio das freqüências, a convolução anterior (equação 1) se reduz à simples multiplicação das correspondentes transformadas de Fourier, como segue na equação (2.44):

$$F(S) = F(w) H(w) \quad (2.44)$$

Em que:

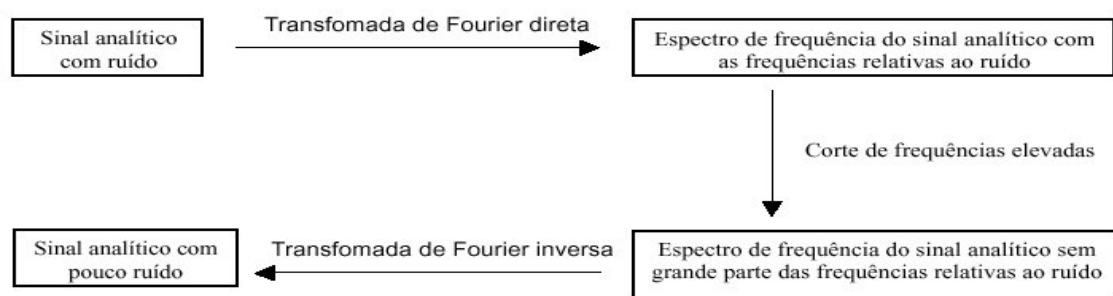
$$H(w) = \begin{cases} 1 & \text{se } w \leq w_{critica} \text{ (freq. de corte)} \\ 1 & \text{se } w > w_{critica} \end{cases}$$

No caso de um filtro passa baixa. Caso seja necessário outro tipo de filtro, deve-se alterar a função de apodização (H) conforme o desejado.

Aplicando a transformada de Fourier inversa à função $F(S)$ obtemos o sinal $f(\lambda)$ livre de ruído, como mostra a equação (2.45).

$$F(\lambda) = \mathfrak{F}^{-1}(F(S)) \quad (2.45)$$

A seqüência de operações utilizada no processo de remoção de ruído, através da transformada de Fourier, pode ser facilmente entendida ao observarmos a figura abaixo:



Representação esquemática da seqüência de operações utilizadas na aplicação do filtro de transformada de Fourier

A menos que se possa processar utilizando álgebra simbólica, torna-se inviável computacionalmente a aplicação da transformada de Fourier, pois é impossível processar numericamente integrais com o limite de integração variando de $(-\infty)$ a $(+\infty)$. Além disso, os dados analíticos são obtidos de forma discreta (são amostrados valores relativos a cada medida) e, desse modo, não se tem uma função $F(\lambda)$, mas sim um vetor de dados discretos (amostrados experimentalmente), o que também impossibilita a utilização da transformada de Fourier. Para resolver esse problema utiliza-se a transformada discreta de Fourier, definida pela equação (2.46) e pela equação (2.47), e a transformada discreta inversa, definida pela equação (2.48).

$$R(w) = \frac{1}{N} \sum_{\lambda=0}^{N-1} X_{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi j\lambda}{N}\right) \quad \lambda = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.46)$$

$$I(w) = \frac{-1}{N} \sum_{\lambda=0}^{N-1} X_{\lambda} \sen\left(\frac{2\pi j\lambda}{N}\right) \quad \lambda = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.47)$$

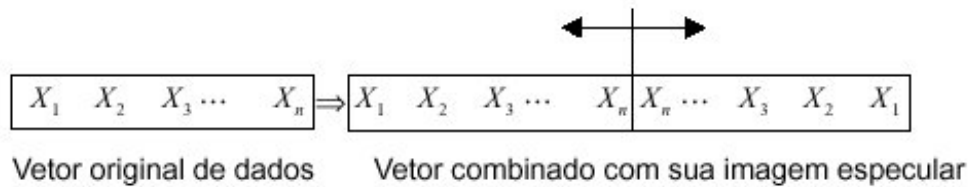
$$X(\lambda) = \frac{-1}{N} \sum_{w=0}^{N-1} X_{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi w\lambda}{N}\right) I_w \sen\left(\frac{2\pi w\lambda}{N}\right) \quad W = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.48)$$

No caso, N é o número total de elementos do vetor de dados, $R(w)$ e $I(w)$ se referem à parte real e imaginária da transformada discreta de Fourier (no domínio das frequências) e $X(\lambda)$ se refere ao vetor de dados analíticos (discretos), no domínio do tempo. As operações para a execução do filtro são idênticas às mencionadas com a transformada de Fourier, exceto pela utilização da transformada discreta ao invés da transformada contínua.

Existem algoritmos que executam a transformada discreta de Fourier de modo rápido e fácil, entre eles a FFT (“Fast Fourier transform”) disponível na maioria dos ambientes de computação numérica.

Tais algoritmos admitem que o vetor de dados experimentais refere-se a um período de uma função periódica, pois a transformada de Fourier é definida em todo o espaço amostral (as funções seno e cosseno possuem domínio em todo o espaço real). Isso pode gerar alguns problemas no caso em que o primeiro elemento do vetor de dados diferir muito do último. O algoritmo FFT irá modelar uma descontinuidade no

vetor de dados, ou seja, irá acrescentar elementos de frequência não encontrados nos dados experimentais. Para resolver esse problema pode-se simplesmente tomar o vetor de dados como a combinação dos dados amostrados com a reflexão especular dos mesmos, como ilustrado na Figura.



Esquema de composição do vetor de dados para eliminar a descontinuidade entre o primeiro e o último elemento

Com isso, o vetor de dados fica com o dobro de seu tamanho original, mas garante-se que o primeiro ponto seja igual ao último e, desse modo, não se tem nenhuma descontinuidade a ser modelada. Após a filtragem, remove-se a metade posterior do vetor de dados e retorna-se ao tamanho original. Tal procedimento além de evitar o problema da descontinuidade, também garante que, a menos de aproximações numéricas, toda a informação relativa ao espectro de frequências fique na parte real da transformada. O vetor de dados, da forma como é tomado, se refere a uma função par e, como tal, é modelada apenas por uma série de funções cosseno.

O problema da presença de descontinuidades é crítico para a utilização do filtro digital por transformada de Fourier, desse modo, se houver “outliers” (pontos espúrios causados por picos de interferências e / ou erros grosseiros) no vetor de dados, os mesmos devem ser eliminados antes da utilização do filtro. Os “outliers” se caracterizam por serem pontos cujos valores diferem significativamente (até mesmo ordens de grandeza) do valor esperado para os mesmos. Para remover tais pontos, geralmente substitui-se o mesmo pela média entre seus dois vizinhos mais próximos. (Autor: EDUARDO O CERQUEIRA, RONEI J. POPPI, LAURO T. KUBOTA, Universidade de Franca, SP, 1999).

2.4. Sistema de Posicionamento Global

2.4.1. Introdução

A partir da aparição dos primeiros satélites artificiais, os geodestas rapidamente descobriram as vantagens de utilizá-los como pontos espaciais geodésicos de referência e eles passaram, imediatamente, a ser utilizada no estabelecimento de redes geodésicas.

O primeiro sistema de satélite colocado a disposição do meio civil foi o sistema de satélites *TRANSIT*, disponível para tal desde 1967; e permite a determinação de pontos com a precisão da ordem do decímetro. Esse sistema está sendo utilizado, principalmente, para a navegação, a prospecção de recursos naturais e para o controle de redes geodésicas.

Essa situação mudou com o aparecimento, em 1973, do Sistema NAVSTAR/GPS Navigation System Using Time and Ranging ou Global Positioning System, que permite alcançar melhores precisões.

O Sistema de Posicionamento Global - GPS foi projetado e desenvolvido pelo Departamento de Defesa Americano. As intenções iniciais eram utilizá-lo, principalmente, para a navegação com propósitos militares. Somente com a descoberta da grande precisão do sistema e com o aumento da eficiência dos receptores é que ele passou a ser também utilizado pela comunidade civil.

O GPS consiste, atualmente, de 24 satélites, os quais estão distribuídos em 6 órbitas planas (Figura 13). Cada plano possui uma inclinação de 55 (**graus**) em relação ao plano do Equador. Todos os satélites estão a cerca de 20.200 Km acima da Terra e completam uma revolução inteira, em torno da Terra, a aproximadamente cada 11 horas e 58 minutos.



Figura 13 – Constelação de satélites GPS.

A constelação atual de satélite GPS garante a denominada cobertura bidimensional, ou seja, a todo instante, em qualquer lugar da superfície terrestre, pelo menos três satélites podem ser observados.

a) A estrutura do GPS

Para efeitos didáticos, o GPS é dividido em três entidades distintas. São elas:

- Segmento Espacial;
- Segmento de Controle e
- Segmento dos Usuários.

2.4.2. Segmento Espacial

O segmento espacial é constituído pelos satélites. Segundo Silva (1995), eles devem assegurar as seguintes funções:

- manter uma escala de tempo bastante precisa. Para atender esse objetivo, cada satélite possui dois relógios de césio e dois relógios de rubídio;
- emitir dois sinais ultra-estáveis em frequência, modulados em fase através dos códigos denominados pseudo-aleatórios, sobre as duas frequências específicas do sistema:

$$L1 = 1.57542 \text{ GHz}$$

$$L2 = 1.22760 \text{ GHz};$$

- receber e estocar as informações provenientes do segmento de controle;

- efetuar manobras orbitais para guardar a sua posição definida na constelação ou para substituir um outro satélite defeituoso;
- efetuar a bordo alguns cálculos;
- retransmitir informações (mensagens ou efemérides) ao solo.

Os satélites são alimentados por corrente elétrica gerada através de duas placas solares com superfície de $7,25 \text{ m}^2$, ilustradas na figura 14.

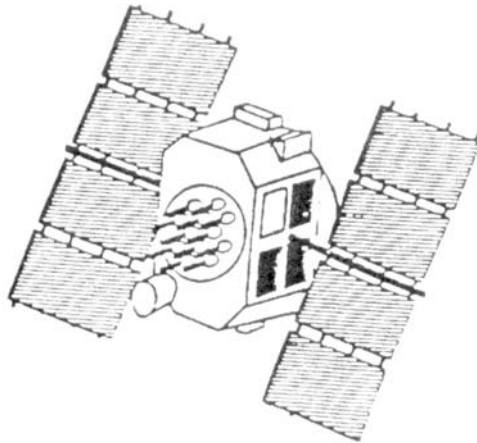


Figura 14 - Satélite GPS. (fonte: silva, 1995).

2.4.3. Segmento de Controle

O segmento de controle é constituído por um grupo de cinco estações terrestres que registram os sinais GPS, efetuam medidas meteorológicas e enviam os dados para a estação principal, a qual calcula as efemérides dos satélites, bem como os coeficientes de correção dos relógios e transmite-os para as estações de transmissão.

As efemérides são as mensagens transmitidas pelos satélites, com informações de sua órbita (em relação à origem do sistema de referência) e do seu sistema de tempo. Para medições mais precisas, necessita-se conhecer as efemérides precisas, só fornecida pelas agências *Defense Mapping Agency*.

Existem cinco estações de monitoramento (Ground Control Stations - Monitor Stations - MS) que servem à constelação GPS, localizadas em Colorado Springs (a principal), Hawaii, Ilha Ascensão, no Atlântico Sul, Diego Garcia, no Oceano Índico, e Kwajalein, no Pacífico Norte. A figura 15 apresenta a distribuição destas estações de monitoramento.



Figura 15 - Estação de monitoramento GPS.
(Fonte: Adaptado de Silva et al., 1997).

2.4.4. Segmento dos Usuários

O segmento dos usuários compreende o conjunto de usuários civis e militares do sistema GPS. Trata-se, fundamentalmente, dos receptores que possuem a capacidade de registrar as medidas de pseudodistâncias - código e de fase, com base nas duas frequências L1 e L2, transmitidas pelos satélites.

2.4.5. Métodos de posicionamento GPS:

Existem vários métodos de posicionamento relativo, ou seja, métodos que envolvem sempre mais que um receptor a observar em simultâneo.

Historicamente o posicionamento relativo só com código foi designado por DGPS (Differential GPS), no entanto existem autores que aplicam esta designação a posicionamentos com observação da fase, outros preferem designar o DGPS com fase por CPD (Carrier Phase Differential). O leitor deve ter muito cuidado na interpretação das várias terminologias usadas.

O posicionamento relativo com fase em tempo real tem sido designado por RTK (*Real-Time Kinematic*). Para aplicações sem ser em tempo real termos como posicionamento Estático, Rápido-estático, cinemático, pseudo-cinemático ou para-avança podem ser usados.

2.4.5.1. Posicionamento Relativo Estático Rápido

Os maiores erros em um posicionamento absoluto (que somente utiliza um receptor), ocorrem devido à imprecisão das e devido ao erro de sincronização entre os relógios do satélite e do receptor. Dessa forma, se for conhecido, de antemão, um ponto sobre o sistema global de coordenadas, pode-determinar, com boa precisão, um outro ponto, relativamente ao primeiro. Trata-se de um posicionamento relativo. Vide figura 16.

Modificando-se, portanto, as equações do sistema, para que considerem o fato de haver um ponto com coordenadas conhecidas e fixas, a precisão do sistema toma-se submétrica.

Este posicionamento é bastante usado para estabelecer redes locais de controle, adensamento de redes, etc. Corresponde a uma sessão estática de curta duração (de 5 a 20 minutos), e é bastante preciso em bases de comprimento até 20 Km.

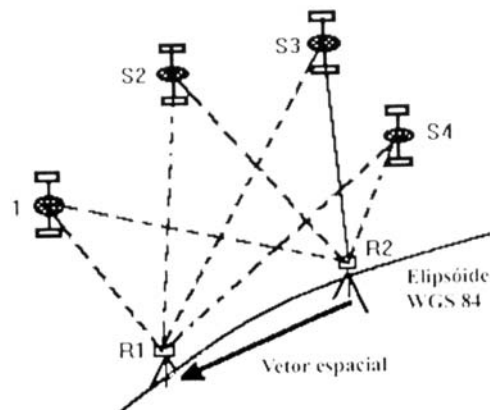


Figura 16 - Posicionamento Relativo. (Fonte: Rocha, 1994).

Capítulo III - Metodologia

3.1. Localização Geográfica

O Município de Porto Alegre possui uma área de 496,827 km², está localizado a leste do Estado do Rio Grande do Sul, com 30 km longitudinais e 15 km de largura no sentido leste-oeste como mostra a figura 17, e possui as seguintes coordenadas geográficas: 30° 01' 59'' S de latitude 51° 13' 48'' W de longitude.

A população do município é de aproximadamente 1.383.454 habitantes, (fonte: IBGE/2002)

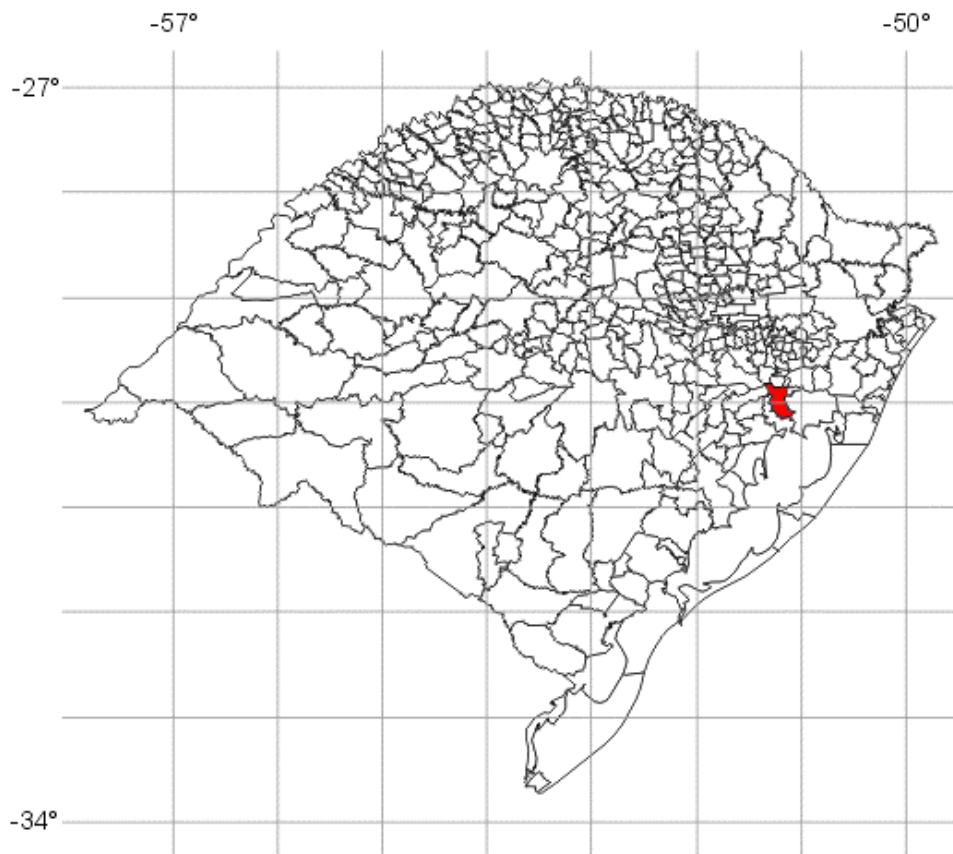


Figura 17 – Localização geográfica da área de estudo

3.2. Escolha da Área

A escolha do município de Porto Alegre deve-se pelos seguintes fatores:

- Grande disponibilidade de cartas em diferentes escalas, facilitando a escolha dos pontos de apoio;
- Presença de área urbana e rural possibilitando a identificação dos pontos de apoio e de feições com graus de dificuldades diferentes;
- Disponibilidade de imagens CBERS I da região;
- Facilidade e rapidez na verificação da verdade terrestre em campo dos pontos de apoio.

3.3. Materiais e Métodos

No decorrer do trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

- Mapas topográficos, DSG na escala de 1:50000;
- Imagem Orbital, CBERS-I bandas 1, 2, 3, 4, com resolução de 20 m, sensor CCD, órbita/ponto 157/134, data de passagem foi dia 03 de janeiro de 2001, adquirida no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE;
- Hardwares: Microcomputador, Impressora, Scanner;
- Software específico para processamento de imagens orbitais, e para processamento dos pontos coletados com receptor GPS e linguagem Basic;
- Pontos coletados com GPS;

3.4. Softwares

ENVI

ENVI, o ambiente para visualização de imagens é um software completo para processamento de imagens em Sensoriamento Remoto/SIG muito fácil de utilizar, proporcionando alto desempenho e sofisticação sem exigir equipamento caro para isto.

O ENVI permite realizar:

- Análise avançada de imagens hiperespectrais;
- Correções radiométricas e geométricas de sensores específicos;

- Suporte para vários formatos de imagens e vetores;
- Classificação e melhoramento da imagem interativa;
- Muitas ferramentas para Região de Interesse (ROI), visualização de vetores, digitalização, edição e consultas;
- Análise avançada de RADAR polarimétrico.

Diferente de outros pacotes de processamento de imagens, ENVI possui acesso completo a linguagem [IDL](#), Interactive Data Language, permitindo ao usuário expandir as funcionalidades do ENVI ou criar suas próprias rotinas.

A arquitetura aberta do ENVI permite trabalhar com dados dos principais fornecedores como [Landsat](#), [SPOT](#), [RADARSAT](#), [NASA](#), [NIMA](#), [NOAA](#), [EROS Data Center](#), [Space Imaging](#), [Terra](#), [ESA](#) e está pronto para utilizar dados da [EarthWatch](#), [ORBIMAGE](#) e outros sensores.

ProMARK X

O ProMARK X é um receptor portátil destinado a coletar dados de pseudo-distâncias. Este modelo foi desenvolvido primariamente para profissionais que necessitam de um alto nível de precisão na marcação e relocação de áreas geográficas.

São necessários apenas alguns toques de teclado para ter acesso a qualquer função. Permite configurar muitos parâmetros de operação e apresentação da unidade, incluindo modo de operação (2D, 3D ou chaveamento automático), sistema de coordenadas da posição (Geodésico, UTM, Grade inglesa, definido pelos usuários e outros) e referência de altitude.

O ProMARK X exibe a altitude como altura sobre o elipsóide (do datum selecionado) ou como altura ortométrica (altura acima do nível do mar). A altura geoidal usada pode ser de um modelo interno da unidade ou um valor introduzido pelo usuário.

O ProMARK X armazena até 500 waypoints, e 10 rotas de até 20 ramificações cada. Além disso, a unidade tem memória suficiente para permitir até 9 horas de dados de campo, sem necessidade de utilização de uma unidade armazenadora separada (os dados são descarregados em um PC para pós-processamento). A memória

é protegida contra uma perda de energia inadvertida por uma bateria interna de lítio recarregável.

O ProMARK X é geralmente capaz de fornecer 12 metros (RMS) de precisão horizontal em operação autônoma e na ausência de disponibilidade seletiva (SA). Esta precisão pode ser melhorada usando-se o Software de pós-processamento Magellan para cálculo diferencial; o pós-processamento diferencial.

Precisões Centimétricas (15mm+3ppm) e Submétricas (0.9 metros RMS) podem ser obtidas usando-se o Módulo de fase da portadora do software de pós-processamento e uma antena resistente a multi-caminhamentos opcionais.

MSTAR

MSTAR (Magellan Transformação Submétrica, Análise e Retificação) é um sistema avançado para pós-processamento diferencial dos dados do Sistema de Posicionamento Global (GPS). Provê todas as funcionalidades e utilidades necessárias para carregar, processar, analisar e exibir dados de GPS que usam uma variedade de técnicas de processamento diferencial.

Com MSTAR o usuário fica habilitado a:

- Planejar uma sessão de coleção de dados;
- Download dos dados coletados de um receptor GPS Magellan ou de outro receptor que suporta arquivo de formato RINEX;
- Analisar dados estatisticamente;
- Imprime os resultados das sessões planejadas, analisadas e pós-processamento diferencial;
- Pós-processamento diferencial com uma única sessão ou múltiplas sessões;

3.5.Desenvolvimento da Metodologia

3.5.1. A Imagem

A imagem utilizada neste trabalho é uma imagem corrigida, ou seja, é geodificadas com reamostragem para corrigir distorções geométricas, orientada para o Norte e o elipsóide de referência é o SAD 69. Sua aquisição da imagem foi feita junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, figura 18.

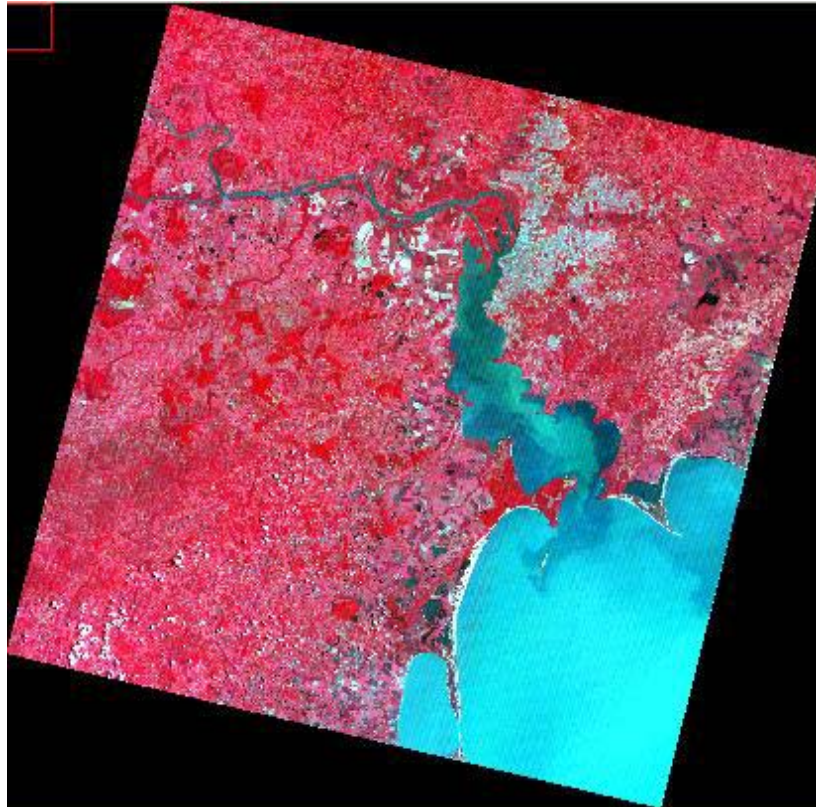


Figura 18 - Composição RGB bandas 4, 3, 2.

A imagem CBERS do sensor CCD é composta de 4 bandas, sendo que neste trabalho somente foram utilizadas as banda 2, 3, 4, pois a banda 1 foi considerada imprópria para o projeto devido uma distorção sistemática do sinal e a apresentação de muitos ruídos, prejudicando assim toda a imagem gerando então faixas escuras por toda sua extensão. Esta distorção, segundo Martini (2001) é devido a falhas dos detetores.

Visando obter melhor resultado no georreferenciamento da imagem, teve-se a necessidade de recorta-la, como mostra a figura 19 pois a imagem bruta apresenta grande quantidade de corpos d'água e regiões de difícil acesso, e isso dificultaria a etapa de escolha dos pontos de controle, prevalecendo assim as áreas urbanas neste recorte. O recorte utilizado tem uma área aproximadamente de 50 km / 65 km (de 2520 linhas por 3172 colunas).



Figura 19 – Banda 3 da imagem recortada.

3.5.2. Preparação da imagem e leitura dos pontos de apoio

Utilizando-se o programa ENVI 3.2, foram realizados os processamentos de realce linear de 2% na imagem bruta e de filtragem de Fourier para melhorar a visualização dos pontos de controle.

3.5.2.1. Realce

A maioria das imagens de sensoriamento remoto são registradas com uma resolução radiométrica de 8 bits, que podem produzir 256 valores ou níveis de cinza. Normalmente, as imagens contêm, em cada banda, uma pequena faixa desses valores e,

além disso, a presença de bruma atmosférica e a geometria de iluminação da cena podem atenuar as próprias características da imagem.

O sistema visual do homem só consegue discriminar cerca de 30 tons de cinza, quando estão bastante espalhados em relação ao intervalo de 0 a 255. Por isso, o tratamento das imagens pelo método do aumento do contraste é uma técnica necessária para extrair informações não identificadas a princípio pelo intérprete. O contraste de uma imagem é uma medida do espalhamento dos níveis de cinza que nela ocorrem.

É fundamental distinguir entre os dados “reais” como estão armazenados no disco, e a representação deles na tela. Mudar o contraste da imagem não muda os dados em disco. Não é incomum a mesma imagem (um CD com uma imagem do INPE em .tif por exemplo) aparentar bastante modificada em softwares diferentes.

Isso em geral nada tem a ver com a capacidade de visualização do software (realce de contraste é uma tarefa bastante básica), mas com os parâmetros de padrão de visualização deste software. No ENVI a configuração inicial é um realce de 2 % linear .

3.5.2.2. *Filtragem*

Neste trabalho prático foi utilizado o filtro de Fourier para as bandas 2, 3 e 4, a fim de melhorar a qualidade visual da imagem e facilitar a identificação dos seus pontos de controle.

A imagem utilizada se encontrava no domínio espacial e para a execução do trabalho a imagem foi levada para o domínio de Fourier, através de um recurso existente no software ENVI onde as informações contidas na imagem, tendem a se agrupar no centro como mostra a figura 20. As falhas e ruídos (altas frequências) agrupam-se em formas de linhas ou pontos nas bordas da imagem do domínio da frequência; informações como estradas, cruzamentos, linhas férreas também são informações de alta frequência, porém, como fazem parte da imagem, se agrupam em direção do centro, ao invés das bordas.

Assim, optou-se pela aplicação do filtro de Fourier, com as máscaras definidas manualmente, como mostrado na figura 21, com o objetivo de eliminar esses ruídos e procurando minimizar os prejuízos às informações de altas frequências, em detrimento aos outros tipos de filtro.

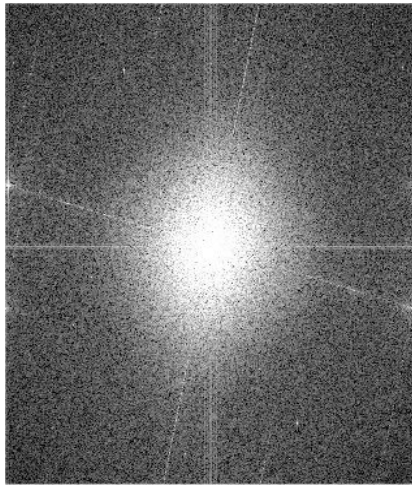


Figura 20 – domínio de frequência da banda 4



Figura 21 – Recorte realizado para o filtro de Fourier

Já tendo sido removido os ruídos com a preservação das feições na imagem, figuras 22 e 23, foi aplicado um filtro de passa altas, operando, então, no domínio espacial, que não permite um desempenho seletivo como o filtro de Fourier. Tem-se por objetivo, aplicando este filtro, destacar, ainda mais, as feições de alta frequência contidas na imagem.

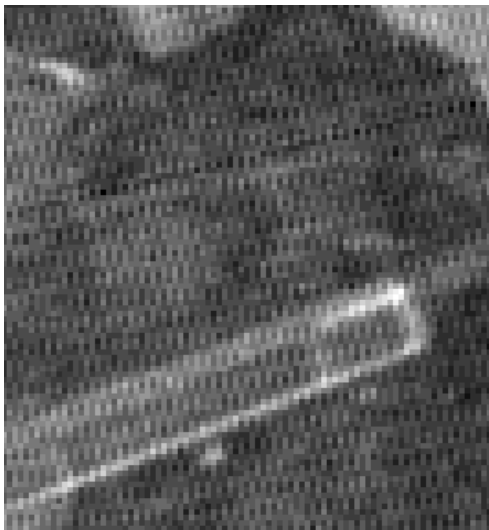


Figura 22 – Imagem Original



Figura 23 – Imagem filtrada com o filtro de Fourier

O modo de filtragem no domínio de Fourier apresenta algumas vantagens, ressaltando entre elas: fácil manipulação e modelagem dos filtros, e a eliminação de problemas associados a bordas abruptas.

Esse filtro destacou áreas com alto contraste na imagem, concluindo-se então que o objetivo foi alcançado e que a técnica de utilizar o domínio de Fourier é muito satisfatória.

3.5.2.3. Escolha dos pontos de controle

Em primeiro lugar foi feita a escolha dos pontos de controle a serem utilizados para georreferenciar a imagem. Para tanto foram escolhidos 50 pontos, sendo esses identificáveis tanto na carta topográfica, como na imagem de satélite, procurando que estivessem bem distribuídos.

É de extrema importância a escolha adequada de pontos de controle para um bom georreferenciamento.

Neste trabalho foram coletados pontos os quais fossem, intersecções de estradas, pontes, tomando o cuidado na localização destes e procurando sempre sua distribuição ao longo das bordas da imagem, bem como, um espalhamento dos pontos também no corpo da imagem, como mostra a figura 24.



Figura 24 – Imagem com os pontos de controle.

- Pontos de controle

3.5.2.4. Coleta de Pontos de Controle com GPS

A coleta dos pontos no terreno foi realizada em dias que as condições climáticas eram favoráveis com o receptor geodésico *ProMARK X CM* da *Magellan*, no modo estático-rápido, com seções de 10 minutos e taxa de recepção de sinais de 1 segundo para um pós-processamento submétrico, procurando desta forma garantir uma

precisão melhor do que 5 metros, já que a distância dos pontos em relação às bases utilizadas não eram extensas.

A duração da campanha foi de aproximadamente 10 dias, com equipe de campo formada por quatro pessoas, e utilizaram-se os seguintes recursos: duas viaturas (Corsa e *Toyota*), um computador para processamento dos dados, um receptor *ProMARK X CM* da *Magellan* e uma bateria, um receptor *Garmim 12 XL*, uma antena de baixa perda e um bastão. Em todos os pontos foram utilizados a antena com bastão, sendo considerado como altura da antena o valor de 2,45 m na maior parte das observações.

Através do posicionamento estático-rápido, as coordenadas foram determinadas utilizando o sistema de referência *World Geodetic System - WGS 84* que está associado ao GPS, enquanto que as coordenadas foram coletadas utilizando o datum Córrego Alegre, pois as cartas topográficas que serviram para a identificação dos pontos se encontravam em Córrego Alegre. As cartas topográficas utilizadas para este trabalho são das seguintes cidades: Porto Alegre, São Leopoldo, Guaíba, Barra do Ribeiro, Passo do Vigário, Itapuã, Morrestes, Gravataí, todas elas na escala 1:50.000.

O processamento submétrico leva em consideração o código e a fase da portadora, porém, para alguns pontos coletados, não foi possível utilizar os dados da fase da portadora, tendo sido os mesmos processados apenas com os dados do código, no modo pseudorange do software *Mstar 2.07*.

Para o processamento dos pontos foi utilizado o software *Mstar 2.07*, no modo submétrico, tendo sido utilizado como base para os pontos POA-1, POA-2, POA-5, POA-6, POA-13, a estação da SPG (www.spg.com.br) e para os demais pontos a estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, Código Internacional 91.850, do IBGE, que situa-se na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Os pontos foram processados com saída na projeção UTM e Datum Córrego Alegre, da mesma forma que as cartas disponíveis. As coordenadas das estações foram transformadas do Datum SAD-69 para o Córrego Alegre usando-se a transformação de Molodenski (5 parâmetros), e o software *Mstar* converte a saída do WGS-84 para o Córrego Alegre usando a transformação por regressões múltiplas.

Os valores finais de coordenadas e suas precisões, que se encontram na tabela abaixo.

Ponto	N (m)	Precisão (m)	E (m)	Precisão (m)
BR-1	6648788.75720	0.245	468966.04583	0.982
BR-2	6649869.22819	0.218	460370.12594	2.186
BR-3	6637850.65892	0.603	458352.88134	0.478
BR-4	6641867.38053	0.780	456625.16479	0.780
BR-5	6650027.56588	0.214	456177.38379	1.602
GB-1	6676423.72333	0.598	468190.59229	0.412
GB-2	6675974.78869	0.522	464164.64428	0.802
GB-3	6668319.07271	0.387	463808.51430	0.296
GB-4	6675275.03415	0.259	458207.43339	0.298
GB-5	6671123.02992	0.328	461992.63988	0.308
GB-7	6657869.47743	3.919	466823.16043	2.553
GV-1	6695328.07949	1.267	502023.97887	2.471
IT-1	6643009.41915	0.106	498595.85307	0.463
IT-2	6650980.55563	0.107	499413.70353	0.174
M-1	6697140.58320	0.180	460471.10935	0.375
M-2	6693209.10053	0.539	464622.75492	1.511
M-3	6694073.41200	0.195	472953.49447	0.663
POA-1	6674003.20610	0.213	477436.39210	0.562
POA-2	6672874.80907	0.470	488797.90935	0.857
POA-4	6672249.55058	0.087	498383.68423	0.163
POA-5	6678414.86570	0.206	497648.63445	0.244
POA-6	6678373.88487	0.230	478084.15882	0.522
POA-7	6660489.81598	0.131	477992.10379	0.858
POA-8	6654575.24676	0.125	491047.20869	0.534
POA-9	6657264.80209	0.075	496101.40936	0.475
POA-10	6665370.22458	0.921	491805.31640	2.459
POA-11	6674806.29139	0.633	482350.87452	3.196
POA-12	6664493.19207	0.092	482993.42984	0.987
POA-13	6668898.41416	0.232	480842.75166	0.303
POA-14	6667929.47527	0.107	484871.25115	0.574
POA-15	6673540.99264	0.103	498510.67759	0.271
PV-1	6669504.81300	0.130	504698.21120	0.246
PV-2	6658709.98784	0.114	502964.24620	0.273
PV-3	6677330.86348	0.122	502576.83942	0.214
SL-1	6684793.59790	0.361	483050.17346	3.416
SL-2	6682570.99340	0.155	476914.21978	1.488
SL-3	6685097.75559	0.156	488914.47022	0.317
SL-5	6692213.98603	0.431	484192.72655	2.618

Ponto	N (m)	Precisão (m)	E (m)	Precisão (m)
SL-6	6691328.31335	1.216	496409.65184	3.489
SL-7	6695354.41197	0.636	490618.10559	0.446
SL-8	6698667.31543	0.614	482687.65608	0.501
SL-9	6694829.75580	0.216	476555.36316	0.608
SL-10	6691396.76118	0.193	476167.98495	1.235
SL-11	6688135.84717	0.452	481175.03101	1.727

Tabela 3 – Tabela de coordenadas dos pontos coletados com GPS

Durante o processamento ocorreu a perda de 6 pontos restando então 44 destes para o georreferenciamento da imagem.

Após o processamento foram obtidas as coordenadas a serem utilizadas no georreferenciamento das imagens.

3.5.3. Georreferenciamento

A escolha de uma transformação deve-se basear nas suas propriedades, de modo a melhor modelar a realidade física, ou seja, uma transformação geométrica consiste num modelo matemático que tem função de permitir que se projetem entidades de um espaço para outro, preservando ou não suas características geométricas como forma e dimensão. Neste trabalho foram utilizadas as transformações afin e projetiva no plano, para o processo de georreferenciamento.

Para analisar os diferentes modelos matemáticos, fez-se um estudo dos resultados obtidos a partir da análise dos resíduos normalizados e um teste de significância para a variância calculada pelo método dos mínimos quadrados, bem como um estudo da distribuição dos pontos de apoio pelas imagens, utilizando programas em linguagem Basic, os quais fossem capaz de executar as seguintes funções:

- a) Ler as coordenadas X, Y coletados com o GPS;
- b) Ler as coordenadas x,y extraídas da imagem de satélite;
- c) Calcular os parâmetros pelo método paramétrico utilizando o método dos mínimos quadrados;
- d) Calcular os resíduos e a variância da unidade de peso a posteriori;
- e) E gerar um arquivo com os resultados do processamento.

Para realizar o georreferenciamento foram utilizados 30 pontos dos 44 processados, sendo que os outros 14 foram utilizados como pontos de verificação (*check-points*), tabela 4.

Ponto	Coord. da imagem		Coord. Calculadas	
	X	Y	X	Y
1	3742	3586	468966.04583	6648788.75720
2	3203	4117	458352.88134	6637850.65892
3	3106	3503	456177.38379	6650027.56588
4	3731	2199	468190.59229	6676423.72333
5	3504	2597	463808.51430	6668319.07271
6	3234	2238	458207.43339	6675275.03415
7	3645	3129	466823.16000	6657869.48
8	5437	1309	502023.97887	6695328.07949
9	5215	3932	498598.85307	6643009.41915
10	5266	3533	499413.70353	6650980.55563
11	3369	1144	460471.10935	6697140.58320
12	3572	1348	464622.75492	6693209.10053
13	4191	2337	477436.39210	6674003.20610
14	4756	2414	488797.90935	6672874.80907
15	4205	3016	477992.10379	6660489.81598
16	4849	3335	491047.20869	6654575.24676
17	4899	2796	491805.31640	6665370.22458
18	4435	2307	482350.87452	6674806.29139
19	4555	2655	484871.25115	6667929.47527
20	5241	2398	498510.67759	6673540.99264
21	5545	2611	504698.21120	6669504.81300
22	5457	3156	502964.24620	6658709.98784
23	5442	2207	502576.83942	6677330.863048
24	4174	1905	476914.21978	6682570.99340
25	4774	1800	488914.47022	6685097.75559
26	5154	1500	496409.65184	6691328.31335
27	4869	1287	490618.10559	6695354.41197
28	4455	1091	482687.65608	6698667.31543
29	4168	1288	476555.36316	6694829.75580
30	4145	1460	476167.98495	6691396.76118

Tabela 4 – Coordenadas dos pontos de apoio escolhidos para as transformações

A partir dessas informações pode-se analisar quais dos modelos matemáticos apresentaram melhores resultados, isto é quais deles poderiam ser utilizados no georreferenciamento da imagem.

CAPÍTULO IV – ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Análise dos Modelos Matemáticos utilizados no Georreferenciamento e Resultados

Na presente pesquisa executou-se um programa desenvolvido em linguagem BASIC para se relacionar as coordenadas dos pontos nas imagens do satélite CBERS-I para o espaço objeto por meio das transformações Afim e Projetiva.

Os procedimentos descritos a seguir, são válidos tanto para a transformações Afim quanto para a Projetiva.

4.1.1.. Análise das transformações geométricas Afim e Projetiva em relação a quantidade de pontos a serem utilizados.

Para se relacionar às coordenadas dos pontos nas imagens CBERS-I para o espaço objeto por meio das transformações Afim e Projetiva, executou-se o programa desenvolvido em linguagem BASIC. Primeiramente tanto para a transformação Afim e para a Projetiva, executou-se os algoritmos utilizando inicialmente 30 pontos como mostrou a tabela 4. Analisando as variâncias da unidade de peso a posteriori do ajustamento, pelo método dos mínimos quadrados utilizando 30 pontos de apoio distribuídos na periferia e no corpo da imagem CBERS_I, mostra que são rejeitadas ao nível de 5 % de significância com 54 graus de liberdade para a transformação afim e 52 graus de liberdade para transformação projetiva. Neste caso, fez-se uma análise dos resíduos normalizados mostrados na tabela 5 e 6 obtidos pelos ajustamentos para detectar erros grosseiros.

Pontos	Coordenadas da imagem		Coordenadas Calculadas		Resíduos	
	x (m)	y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
1	3742	3586	468966.04583	6648788.75720	2.101	2.542
2	3203	4117	458352.88134	6637850.65892	1.664	2.549
3	3106	3503	456177.38379	6650027.56588	1.391	0.267
4	3731	2199	468190.59229	6676423.72333	-0.082	-1.600
5	3504	2597	463808.51430	6668319.07271	0.878	0.101
6	3234	2238	458207.43339	6675275.03415	-2.066	-0.774
7	3645	3129	466823.16000	6657869.48	0.598	-0.974
8	5437	1309	502023.97887	6695328.07949	-1.154	-1.517
9	5215	3932	498598.85307	6643009.41915	1.749	0.421
10	5266	3533	499413.70353	6650980.55563	-1.255	1.883
11	3369	1144	460471.10935	6697140.58320	-3.982	-2.320
12	3572	1348	464622.75492	6693209.10053	-3.549	-1.148
13	4191	2337	477436.39210	6674003.20610	-1.167	-1.268
14	4756	2414	488797.90935	6672874.80907	-0.536	-1.109
15	4205	3016	477992.10379	6660489.81598	0.083	0.314
16	4849	3335	491047.20869	6654575.24676	1.769	2.211
17	4899	2796	491805.31640	6665370.22458	-0.460	-0.303
18	4435	2307	482350.87452	6674806.29139	0.690	-2.826
19	4555	2655	484871.25115	6667929.47527	0.053	-0.464
20	5241	2398	498510.67759	6673540.99264	-0.483	-1.162
21	5545	2611	504698.21120	6669504.81300	0.405	-0.067
22	5457	3156	502964.24620	6658709.98784	-8.036	-5.313
23	5442	2207	502576.83942	6677330.863048	4.818	6.551
24	4174	1905	476914.21978	6682570.99340	-2.308	1.078
25	4774	1800	488914.47022	6685097.75559	-1.447	-1.589
26	5154	1500	496409.65184	6691328.31335	-1.866	-1.456
27	4869	1287	490618.10559	6695354.41197	-2.014	-1.333
28	4455	1091	482687.65608	6698667.31543	19.498	13.814
29	4168	1288	476555.36316	6694829.75580	-2.898	-1.21
30	4145	1460	476167.98495	6691396.76118	-2.386	1.264

Tabela 5 – Resíduos obtidos com 30 pontos para transformação afim.

Pontos	Coordenadas da imagem		Coordenadas Calculadas		Resíduos	
	x (m)	y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
1	3742	3586	468966.04583	6648788.75720	6.175	-1.492
2	3203	4117	458352.88134	6637850.65892	16.828	-15.332
3	3106	3503	456177.38379	6650027.56588	11.541	-1.512
4	3731	2199	468190.59229	6676423.72333	-2.905	6.200
5	3504	2597	463808.51430	6668319.07271	0.399	8.602
6	3234	2238	458207.43339	6675275.03415	-5.584	8.204
7	3645	3129	466823.16000	6657869.48	3.030	3.015
8	5437	1309	502023.97887	6695328.07949	13.450	-10.485
9	5215	3932	498598.85307	6643009.41915	-10.414	-12.611
10	5266	3533	499413.70353	6650980.55563	-10.237	-3.995
11	3369	1144	460471.10935	6697140.58320	-16.835	-8.971
12	3572	1348	464622.75492	6693209.10053	-12.498	-3.742
13	4191	2337	477436.39210	6674003.20610	-2.455	6.112
14	4756	2414	488797.90935	6672874.80907	-0.594	5.359
15	4205	3016	477992.10379	6660489.81598	-0.762	4.945
16	4849	3335	491047.20869	6654575.24676	-3.106	1.943
17	4899	2796	491805.31640	6665370.22458	-2.410	5.149
18	4435	2307	482350.87452	6674806.29139	6.560	3.989
19	4555	2655	484871.25115	6667929.47527	-1.148	6.138
20	5241	2398	498510.67759	6673540.99264	1.110	4.377
21	5545	2611	504698.21120	6669504.81300	0.627	5.028
22	5457	3156	502964.24620	6658709.98784	-14.042	-3.639
23	5442	2207	502576.83942	6677330.863048	9.285	10.926
24	4174	1905	476914.21978	6682570.99340	-4.035	3.517
25	4774	1800	488914.47022	6685097.75559	1.504	0.294
26	5154	1500	496409.65184	6691328.31335	7.030	-5.491
27	4869	1287	490618.10559	6695354.41197	4.722	-9.118
28	4455	1091	482687.65608	6698667.31543	21.376	2.719
29	4168	1288	476555.36316	6694829.75580	-5.281	-6.875
30	4145	1460	476167.98495	6691396.76118	-4.835	-3.256

Tabela 6 – Resíduos obtidos com 30 pontos para transformação projetiva.

A análise dos resíduos normalizados mostra que o maior resíduo é o do ponto 28. Como consequência, eliminou-se o referido ponto e fez-se um novo ajustamento agora com 29 pontos. Neste novo ajustamento constatou-se, por meio de teste de

hipótese bilateral, que os pontos 22 e 23 apresentavam os maiores resíduos, mostrados nas tabelas 7 e 8, sendo então rejeitados.

Pontos	Coordenadas da imagem		Coordenadas Calculadas		Resíduos	
	x (m)	y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
1	3742	3586	468966.04583	6648788.75720	1.405	2.109
2	3203	4117	458352.88134	6637850.65892	2.391	0.426
3	3106	3503	456177.38379	6650027.56588	-1.582	-0.500
4	3731	2199	468190.59229	6676423.72333	0.758	0.189
5	3504	2597	463808.51430	6668319.07271	-3.026	-0.964
6	3234	2238	458207.43339	6675275.03415	1.567	-0.974
7	3645	3129	466823.16000	6657869.48	-1.454	-1.625
8	5437	1309	502023.97887	6695328.07949	1.758	0.641
9	5215	3932	498598.85307	6643009.41915	-3.258	2.353
10	5266	3533	499413.70353	6650980.55563	-3.982	-2.320
11	3369	1144	460471.10935	6697140.58320	-2.537	-1.005
12	3572	1348	464622.75492	6693209.10053	-1.982	-1.365
13	4191	2337	477436.39210	6674003.20610	-1.746	-0.115
14	4756	2414	488797.90935	6672874.80907	0.097	0.844
15	4205	3016	477992.10379	6660489.81598	1.009	1.271
16	4849	3335	491047.20869	6654575.24676	-1.740	-0.987
17	4899	2796	491805.31640	6665370.22458	0.157	-1.574
18	4435	2307	482350.87452	6674806.29139	0.087	-0.984
19	4555	2655	484871.25115	6667929.47527	-0.483	-0.172
20	5241	2398	498510.67759	6673540.99264	0.875	-0.157
21	5545	2611	504698.21120	6669504.81300	-7.657	-5.834
22	5457	3156	502964.24620	6658709.98784	24.818	6.551
23	5442	2207	502576.83942	6677330.863048	-9.208	28.182
24	4174	1905	476914.21978	6682570.99340	-2.784	-0.459
25	4774	1800	488914.47022	6685097.75559	-0.841	-2.546
26	5154	1500	496409.65184	6691328.31335	-1.044	-0.347
27	4869	1287	490618.10559	6695354.41197	18.578	12.454
28	4168	1288	476555.36316	6694829.75580	-1.587	-0.241
29	4145	1460	476167.98495	6691396.76118	-0.674	2.374

Tabela 7 – Resíduos obtidos com 29 pontos para a transformação Afim

Pontos	Coordenadas da imagem		Coordenadas Calculadas		Resíduos	
	x (m)	y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
1	3742	3586	468966.04583	6648788.75720	7.057	-0.872
2	3203	4117	458352.88134	6637850.65892	17.057	-14.981
3	3106	3503	456177.38379	6650027.56588	10.984	-1.241
4	3731	2199	468190.59229	6676423.72333	-3.4057	4.987
5	3504	2597	463808.51430	6668319.07271	0.024	7.547
6	3234	2238	458207.43339	6675275.03415	-4.854	7.044
7	3645	3129	466823.16000	6657869.48	2.871	1.982
8	5437	1309	502023.97887	6695328.07949	12.040	-12.051
9	5215	3932	498598.85307	6643009.41915	-11.341	-11.542
10	5266	3533	499413.70353	6650980.55563	-11.877	-2.745
11	3369	1144	460471.10935	6697140.58320	-18.235	-7.742
12	3572	1348	464622.75492	6693209.10053	-10.778	-2.642
13	4191	2337	477436.39210	6674003.20610	-2.875	5.212
14	4756	2414	488797.90935	6672874.80907	-0.874	6.459
15	4205	3016	477992.10379	6660489.81598	-1.642	5.652
16	4849	3335	491047.20869	6654575.24676	-3.216	2.443
17	4899	2796	491805.31640	6665370.22458	-1.520	6.448
18	4435	2307	482350.87452	6674806.29139	5.501	3.191
19	4555	2655	484871.25115	6667929.47527	-0.118	6.546
20	5241	2398	498510.67759	6673540.99264	0.890	4.741
21	5545	2611	504698.21120	6669504.81300	1.677	4.328
22	5457	3156	502964.24620	6658709.98784	-19.803	-6.394
23	5442	2207	502576.83942	6677330.863048	12.259	16.286
24	4174	1905	476914.21978	6682570.99340	-3.152	2.687
25	4774	1800	488914.47022	6685097.75559	1.543	0.845
26	5154	1500	496409.65184	6691328.31335	7.734	-4.512
27	4869	1287	490618.10559	6695354.41197	5.226	-9.851
28	4168	1288	476555.36316	6694829.75580	-4.213	-5.776
29	4145	1460	476167.98495	6691396.76118	-6.521	-2.651

Tabela 8 – Resíduos obtidos com 29 pontos para a transformação Projetiva.

Na terceira tentativa, agora com 27 pontos e 48 graus de liberdade para a transformação afim e 46 graus de liberdade para transformação projetiva obteve-se um resultado satisfatório, tabelas 9 e 10, pois a análise da variância da unidade de peso a posteriori do ajustamento foi aceita ao nível de 5% de significância, não havendo então a

necessidade de se fazer uma nova detecção de erros grosseiros.

Pontos	Coordenadas da imagem		Coordenadas Calculadas		Resíduos	
	x (m)	y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
1	3742	3586	468966.04583	6648788.75720	0.923	1.677
2	3203	4117	458352.88134	6637850.65892	-0.277	0.99
3	3106	3503	456177.38379	6650027.56588	0.485	-0.575
4	3731	2199	468190.59229	6676423.72333	1.035	-0.844
5	3504	2597	463808.51430	6668319.07271	1.384	0.368
6	3234	2238	458207.43339	6675275.03415	-0.911	-0.119
7	3645	3129	466823.16000	6657869.48	0.200	-1.312
8	5437	1309	502023.97887	6695328.07949	1.078	0.493
9	5215	3932	498598.85307	6643009.41915	-0.299	-0.668
10	5266	3533	499413.70353	6650980.55563	-2.655	-0.597
11	3369	1144	460471.10935	6697140.58320	-1.058	-0.366
12	3572	1348	464622.75492	6693209.10053	-0.996	0.589
13	4191	2337	477436.39210	6674003.20610	-0.372	-0.612
14	4756	2414	488797.90935	6672874.80907	0.014	-0.475
15	4205	3016	477992.10379	6660489.81598	-0.246	0.175
16	4849	3335	491047.20869	6654575.24676	0.777	1.774
17	4899	2796	491805.31640	6665370.22458	-0.569	-0.099
18	4435	2307	482350.87452	6674806.29139	1.486	-2.103
19	4555	2655	484871.25115	6667929.47527	0.248	-0.137
20	5241	2398	498510.67759	6673540.99264	-0.006	-0.450
21	5545	2611	504698.21120	6669504.81300	0.467	0.430
22	4174	1905	476914.21978	6682570.99340	-0.797	0.080
23	4774	1800	488914.47022	6685097.75559	0.112	-0.233
24	5154	1500	496409.65184	6691328.31335	0.109	0.296
25	4869	1287	490618.10559	6695354.41197	0.371	0.634
26	4168	1288	476555.36316	6694829.75580	-0.369	0.667
27	4145	1460	476167.98495	6691396.76118	-0.135	0.412

Tabela 9 – Resíduos obtidos com 27 pontos para a transformação Afim

Pontos	Coordenadas da imagem		Coordenadas Calculadas		Resíduos	
	x (m)	y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
1	3742	3586	468966.04583	6648788.75720	0.997	1.466
2	3203	4117	458352.88134	6637850.65892	0.378	0.053
3	3106	3503	456177.38379	6650027.56588	1.006	-0.808
4	3731	2199	468190.59229	6676423.72333	0.897	-0.518
5	3504	2597	463808.51430	6668319.07271	1.378	0.695
6	3234	2238	458207.43339	6675275.03415	-0.925	0.275
7	3645	3129	466823.16000	6657869.48	0.249	-1.196
8	5437	1309	502023.97887	6695328.07949	1.816	-0.151
9	5215	3932	498598.85307	6643009.41915	-0.782	-0.867
10	5266	3533	499413.70353	6650980.55563	-2.981	-0.519
11	3369	1144	460471.10935	6697140.58320	-1.433	-0.441
12	3572	1348	464622.75492	6693209.10053	-1.293	0.600
13	4191	2337	477436.39210	6674003.20610	-0.515	-0.326
14	4756	2414	488797.90935	6672874.80907	-0.051	-0.233
15	4205	3016	477992.10379	6660489.81598	-0.400	0.376
16	4849	3335	491047.20869	6654575.24676	0.505	1.891
17	4899	2796	491805.31640	6665370.22458	-0.696	0.161
18	4435	2307	482350.87452	6674806.29139	1.370	-1.849
19	4555	2655	484871.25115	6667929.47527	0.103	0.136
20	5241	2398	498510.67759	6673540.99264	0.116	-0.257
21	5545	2611	504698.21120	6669504.81300	0.649	0.659
22	4174	1905	476914.21978	6682570.99340	-0.939	0.249
23	4774	1800	488914.47022	6685097.75559	0.191	-0.250
24	5154	1500	496409.65184	6691328.31335	0.519	0.059
25	4869	1287	490618.10559	6695354.41197	0.633	0.157
26	4168	1288	476555.36316	6694829.75580	-0.509	0.431
27	4145	1460	476167.98495	6691396.76118	-0.285	0.323

Tabela 10 – Resíduos obtidos com 27 pontos para a transformação Projetiva.

4.1.2. Análise das variâncias a posteriori para as transformações Afim e Projetiva.

Os valores adotados para as variâncias das observações de peso unitário a priori tanto para a transformação Afim quanto para a Projetiva é igual a 1.

Testou-se para ambas as transformações a hipótese básica $H_0 : \sigma^2_o = \hat{\sigma}^2_o$ contra a hipótese alternativa $H_1 : \sigma^2_o \neq \hat{\sigma}^2_o$ com 54 graus de liberdade para a transformação afim e 52 graus de liberdade para transformação projetiva, utilizando 30 pontos, não obtendo resultados satisfatórios, pois o valor da variância a posteriori não atendia nenhuma das hipóteses. Os resultados da análise estatística deste teste encontram-se na tabela 11.

Transformação Geométrica	σ^2_o	$\hat{\sigma}^2_o$	
Afim	1	66.577	Não aceito
Projetiva	1	16.082	Não aceito

Tabela 11 - Análise das variâncias a posteriori para as transformações Afim e Projetiva, com 30 pontos.

Novamente testou-se para ambas as transformações a hipótese básica $H_0 : \sigma^2_o = \hat{\sigma}^2_o$ contra a hipótese alternativa $H_1 : \sigma^2_o \neq \hat{\sigma}^2_o$, agora com 52 graus de liberdade para a transformação afim e 50 graus de liberdade para transformação projetiva e 29 pontos, e como na primeira tentativa também não obteve-se resultados satisfatórios, pois o valor da variância a posteriori não atendia nenhuma das hipóteses. Os resultados da análise estatística deste teste encontram-se na tabela 12.

Transformação Geométrica	σ^2_o	$\hat{\sigma}^2_o$	
Afim	1	53.894	Não aceito
Projetiva	1	18.546	Não aceito

Tabela 12 - Análise das variâncias a posteriori para as transformações Afim e Projetiva, com 29 pontos.

Numa terceira situação, usando 27 pontos de apoio e com 48 graus de liberdade para a transformação afim e 46 graus de liberdade para transformação projetiva os testes de hipóteses bilateral foram aceitos ao nível de significância de 5 %, tanto para transformação Afim como para Projetiva, conforme pode-se ver na tabela 13.

Transformação Geométrica	σ^2_o	$\hat{\sigma}^2_o$	
Afim	1	0.7928	Aceito
Projetiva	1	0.7905	Aceito

Tabela 13 - Análise das variâncias a posteriori para as transformações Afim e Projetiva, com 27 pontos.

4.1.3. *Comparação das coordenadas obtidas com GPS com as coordenadas geradas pelas transformações Afim e Projetiva.*

Para a verificação das coordenadas obtidas pelas transformações Afim e Projetiva, foram utilizados 14 pontos de apoio obtidos com GPS, ditos estes como pontos de checagem, para analisar se realmente essas coordenadas apresentavam coerência com as coordenadas coletadas em campo conforme mostra as tabelas 14 e 15.

Coordenadas coletadas com GPS		Coordenadas Calculadas – Afim		Resíduos	
X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
460370.125	6649869.228	460368.961	6649867.558	1.164	1.670
456625.164	6641867.380	456624.086	6641866.247	1.078	1.133
464164.644	6675974.788	464165.089	6675973.489	0.445	1.299
461992.639	6671123.029	461995.322	6671120.614	2.683	2.415
472953.494	6694073.412	472955.248	6694075.651	1.754	2.239
498383.684	6672249.550	498382.785	6672248.558	0.899	0.992
497648.634	6678414.865	497650.122	6678416.154	1.488	1.289
478084.158	6678373.884	478085.647	6678376.245	1.489	2.361
496101.409	6657264.802	496104.759	6657262.546	3.350	2.256
482993.429	6664493.192	482995.829	6664495.258	2.400	2.066
480842.751	6668898.414	480845.324	6668896.114	2.573	2.300
483050.173	6684793.597	483047.578	6684790.872	2.595	2.725
484192.726	6692213.986	484190.256	6692211.198	2.470	2.788
481175.031	6688135.847	481177.205	6688137.648	2.174	1.801

Tabela 14 - Comparação das coordenadas obtidas com GPS com as coordenadas geradas pelas transformação Afim.

Coordenadas coletadas com GPS		Coordenadas Calculadas – Projetiva		Resíduos	
X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
460370.125	6649869.228	460371.587	6649870.254	1.462	1.026
456625.164	6641867.380	456630.243	6641872.516	5.079	5.136
464164.644	6675974.788	464166.572	6675972.111	1.928	2.677
461992.639	6671123.029	461991.524	6671122.663	1.115	0.366
472953.494	6694073.412	472952.354	6694074.325	1.140	0.913
498383.684	6672249.550	498382.258	6672248.559	1.426	0.991
497648.634	6678414.865	497647.758	6678413.445	0.876	1.913
478084.158	6678373.884	478083.514	6678372.661	0.644	1.223
496101.409	6657264.802	496100.969	6657262.985	0.440	1.817
482993.429	6664493.192	482996.487	6664496.587	3.058	3.395
480842.751	6668898.414	480841.579	6668899.547	1.172	1.133
483050.173	6684793.597	483052.157	6684794.968	1.984	1.371
484192.726	6692213.986	484194.179	6692217.957	1.453	3.971
481175.031	6688135.847	481172.098	6688132.547	2.933	3.300

Tabela 15 - Comparação das coordenadas obtidas com GPS com as coordenadas geradas pelas transformação Projetiva.

Os resultados desta comparação se mostraram satisfatórios com estes 14 pontos de checagem, já que as coordenadas coletadas com GPS e as calculadas pelas transformações são bem próximas.

Capítulo V – Conclusões e Recomendações

5.1. Conclusões

Neste trabalho foram apresentados os resultados de pesquisas realizadas, visando à obtenção de transformações geométricas que possibilite a correção geométrica da imagem do satélite CBERS-I, utilizando o sensor CCD na região da grande Porto Alegre, com a utilização das transformações afim e equações projetivas e com o uso de pontos de apoio coletados com receptor GPS, levaram às seguintes conclusões:

1) Os resultados experimentais obtidos com as transformações afim e equações projetivas são animadores, mostrando a viabilidade do processo a ser implementado.

2) Os resultados práticos obtidos por esta pesquisa, como em outros trabalhos desenvolvidos, tais como, **ALMEIDA, C. A., BIELENKI, C., ZANARDI, R. P. (2002)**, para a transformação Afim, mostram que para as imagens do sensor CCD do satélite CBERS-I esta transformação apresenta resultados bastante satisfatórios, podendo esta ser utilizada para o georreferenciamento destas imagens.

3) No caso da utilização da transformação projetiva os resultados também foram satisfatórios o que é de grande surpresa, pois em se tratando de imagens Landsat, SPOT entre outras, com a transformação projetiva não se consegue resultados adequados para o georreferenciamento destas imagens, porém para este caso das imagens CBERS-I a transformação Projetiva foi capaz de representar a realidade física.

5.2. Recomendações

As conclusões apresentadas mostram resultados gerados a partir de dados do sensor CCD das imagens CBERS-I, e que cabem as seguintes recomendações.

- 1) Outras alternativas muito interessantes deverão surgir a medida que sejam estudados os demais sensores do CBERS-I, tais como o Varredor Infravermelho e WFI. Sabe-se no entanto, que MARTINI, P.R., já realizou experimentos com a WFI e obteve bons resultados;
- 2) Incentivo da implementação da transformação geométrica das Equações Projetivas em softwares comerciais para fins de georreferenciamento de imagens, pois como se viu neste trabalho é possível o uso da mesma no caso de imagens CBERS-I;
- 3) Importante estimular o uso das imagens CBERS-I, já que os produtos CCD são distribuídos livres de custos pelo INPE uma vez que ele é parte do segmento brasileiro do CBERS-I. Esta condição livra o usuário brasileiro do pagamento de taxas de acesso e de royalties, procedimento normal com satélites estrangeiros.
- 4) Deve-se continuar os estudos para as imagens do CBERS-I que pode ser um atalho importante para atualizar a cartografia regional brasileira, pois neste caso do sensor CCD se vislumbra a possibilidade de se gerarem cartas imagens nas escalas de 1:100.000 e 1:50.000.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, C. A. M., JÚNIOR, C. B., ZANARDI, R. P., Análise de Processamento e Georreferenciamento em Imagens do Satélite CBERS-I. Porto Alegre. Trabalho de Graduação, Curso de Engenharia Cartográfica – UFRGS, 2002.
- AUCILINO, L. C. M., MARTINI, P. R., A Carta-Imagem ao Milionésimo: Resultados Parciais. INPE- São José dos Campos - S. P., 2001.
- BLOOMFIELD, P.; ‘Fourier Analysis of time series, Wiley, New York, 1976.
- CROSTA, A. P. , Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas, SP: IG/UNICAMP. 1993. 170p.
- GALO, M. L. B. T. e SILVA, E. A. Notas de Aula da disciplina Sensoriamento Remoto II. FCT/UNESP - Presidente Prudente - S.P., 1996.
- GEMAEL, C.(1994). Introdução ao ajustamento de observações – aplicações geodésicas, 319 pp.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. TUTORIAL - SPRING, Agosto, 1999a.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. AJUDA - SPRING, Agosto, 1999b.
- KONECNY, G. , Methods and Possibilities for Digital Differential Rectification. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 45, nº 6, June 1979, pag. 727-734.
- LUGNANI, J. B., Introdução à Fotogrametria. Curitiba. 1987. 134p.

- NORVAK, K. Rectification of Digital Imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 58, nº3, March 1992, pag. 339-344
- NOVO, E. M. L. de M. Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações. Editora Edgar Blücher Ltda. São José dos Campos, 1989. 308p.
- NUSSBAUMER, H. J.; 'Fast Fourier Transform and Convolutions algorithms', Springer-Verlag, New York, 1982.
- RICHARDS, J. A., Remote Sensing Digital Image Analysis – An Introduction. University of New South Wales. 1986. 271p.
- ROCHA, C. F. B., Geoprocessamento Tecnologia Transdisciplinar. – Juiz de Fora, M.G. : Ed. do autor, 2000.
- SCHOWENGERDT, R. A. Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing. University of Arizona. 1983. 249p.
- SILVA, E. A. Notas de Aula da disciplina de Sensoriamento Remoto I. FCT/UNESP - Presidente Prudente - S.P, 1995.
- SOUZA, S. F., Análise de Modelos Matemáticos para o Georreferenciamento de Imagens de Satélite, utilizando pontos de apoio extraídos de cartas nas escalas 1:5000 e 1:50000 de Porto Alegre. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, 1997, 95.
- SPRING - DPI/INPE. Introdução ao SPRING 2.0.
< <http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/info.htm#historico>>, Abril, 1998a.
Tutorial do Envi – Português, SulSoft < <http://www.sulsoft.com.br>>, 2000.