



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-7113-TDI/666

**CORREÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS DE RADAR DE  
ABERTURA REAL**

Fábio Furlan Gama

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Luciano Vieira Dutra, aprovada em dezembro de 1996.

INPE  
São José dos Campos  
1999



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**INPE-7113-TDI/666**

**CORREÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS DE RADAR DE  
ABERTURA REAL**

Fábio Furlan Gama

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Luciano Vieira  
Dutra, aprovada em dezembro de 1996.

INPE  
São José dos Campos  
1999

621.376.5

GAMA, F.F.

Correção radiométrica de imagens de radar de abertura real / F.F.Gama. – São José dos Campos: INPE, 1996. 92p. – (INPE-7113-TDI/666).

1.Radar. 2.Equação radar. 3.Correção radiométrica. 4.Radar de abertura real. 5.Sensoriamento remoto. I.Título.

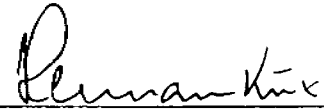
Aprovada pela Banca Examinadora em  
cumprimento a requisito exigido para a  
obtenção do Título de Mestre em  
Sensoriamento Remoto

Dr. Luciano Vieira Dutra



Orientador/Presidente

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux



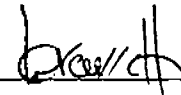
Membro da Banca

Dr. Diógenes Salas Alves



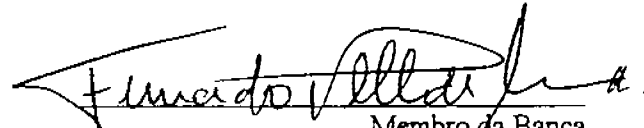
Membro da Banca

Dr. João Antonio Lorenzzetti



Membro da Banca

Dr. Fernando Pellon de Miranda



Membro da Banca  
- Convidado -

Candidato: Fábio Furlan Gama

São José dos Campos, 18 de dezembro de 1996



*“Criar é dar forma ao próprio destino*

*Albert Camus (1913-1960)*





À minha esposa Mitsuko, minha filha Karen e aos meus pais, pelo amor, compreensão e constante incentivo.



## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Luciano Vieira Dutra, pela orientação, apoio e ensinamentos úteis na elaboração deste trabalho.

Ao Dr. Davi Fernandes, pelas orientações nas primeiras etapas deste trabalho.

Ao Instituto de Radio Freqüência da Alemanha (DLR), pelas imagens cedidas para este trabalho.

Ao INPE, pela oportunidade de aprimoramento profissional.

Aos amigos, José Claudio Mura, Quaracy Erthal, Ulf W. Palme, Eugênio Sper de Almeida, Sílvia Pardi e Camillo Rennó, pelos apoios técnico e científico e pela oportunidade de discussões.

Finalmente, agradeço a todos que direta e indiretamente colaboraram para a elaboração deste trabalho.



## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo de desenvolver um método de correção radiométrica das imagens do radar de abertura real (SLAR-RAR) da cooperação INPE/DLR, com a finalidade de promover um pré-processamento das mesmas. Esta correção visa facilitar a discriminação dos alvos e obter um método capaz de separar e medir as áreas dos mesmos. Para estabelecer o algoritmo de correção, utilizou-se a equação radar, o diagrama de irradiação da antena, as informações de geometria de aquisição e as características elétricas do sistema. Imagens digitais, obtidas no experimento Arquimedes e fornecidas pelo DLR, bem como imagens da região de Presidente Figueiredo e Manaus-AM, adquiridas pela aeronave da FAB em 1993, foram corrigidas pelo algoritmo desenvolvido. Estas imagens também foram corrigidas pelo método de correção polinomial do "software" SPRING e comparadas entre si. Na seqüência, selecionou-se uma imagem com um derramamento de óleo para aplicar o algoritmo de cálculo de área. A correção pela equação radar apresentou resultados similares aos obtidos pelo sistema polinomial SPRING, com a vantagem de não haver dependência das imagens para a correção, possibilitando futuramente a correção das mesmas em tempo real durante o voo.



## RADIOMETRIC CORRECTION OF REAL APERTURE RADAR IMAGES

### ABSTRACT

The aim of the present work is the development of a radiometric correction for using with the images from the real aperture radar of the INPE/DLR cooperation. This correction is a necessary step for target discrimination as well as for obtaining a method capable of measuring such target areas. In order to establish the correction algorithm it were used: the radar equation, the antenna's irradiation diagram, the acquisition geometry data, and the system electric characteristics. Digital imagery obtained from Arquimedes experiment and supplied by DLR, as well as images from Presidente Figueiredo and Manaus-AM region acquired by FAB's airplane in 1993, were corrected by the developed algorithm. These images were also corrected by the polynomial correction method of the SPRING software, and a comparison of both methods was done. In addition to these previous cases, a scene with oil spill was selected to calculate its area. The results from the radar equation correction were similar to those from SPRING polynomial system correction, with the benefit of not being dependent on the images for correction. In the future, this kind of correction might also be more suitable for real time correction during the flight acquisition.





## SUMÁRIO

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| LISTA DE FIGURAS .....  | xvii        |
| LISTA DE TABELAS .....  | xix         |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....   | xxi         |
| <br>  |             |
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....                                     | 01          |
| <br>  |             |
| CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....                          | 03          |
| 2.1 - Introdução e histórico .....                                | 03          |
| 2.2 - O radar de abertura real - resolução e amostragem .....     | 10          |
| 2.2.1 - Cálculo da resolução .....                                | 10          |
| 2.2.2 - Cálculo do tamanho do pixel pela taxa de amostragem ..... | 15          |
| 2.3 - Equação radar .....   | 17          |
| 2.4 - Processamento de imagens .....                              | 30          |
| 2.4.1 - Convolução/correlação .....                               | 30          |
| 2.4.2 - Filtragem .....   | 32          |
| 2.4.3 - Segmentação .....   | 34          |
| <br>  |             |
| CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS .....                             | 35          |
| 3.1 - Material utilizado .....                                    | 35          |
| 3.1.1 - Introdução .....  | 35          |
| 3.1.2 - Imagens .....   | 35          |
| 3.1.3 - Diagramas de irradiação .....                             | 39          |
| 3.1.4 - “Hardware” e “Software” .....                             | 40          |
| 3.2 - Metodologia proposta .....                                  | 41          |
| 3.2.1 - Sumário .....   | 41          |
| 3.2.2 - Detalhamento da metodologia e outros comentários .....    | 43          |
| <br>  |             |
| CAPÍTULO 4 - RESULTADOS .....                                     | 47          |
| 4.1 - Resolução .....   | 47          |
| 4.2 - Equação radar SLAR-RAR .....                                | 53          |
| 4.3 - Segmentação das imagens .....                               | 61          |
| CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS .....                       | 67          |
| <br>  |             |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                  | 69          |
| <br>  |             |
| APÊNDICE A - ESPECIFICAÇÕES DO SLAR - INPE/DLR .....              | 73          |
| <br>  |             |
| APÊNDICE B - SISTEMA SLAR - DLR .....                             | 75          |
| <br>  |             |
| APÊNDICE C - PRINCIPAIS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS .....             | 81          |
| <br>  |             |
| APÊNDICE D - LOCALIZAÇÃO DAS IMAGENS .....                        | 89          |



## LISTA DE FIGURAS

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 2.1 - Classificação dos sensores de microondas .....  | 4           |
| 2.2 - Componentes básicos de um radar .....   | 7           |
| 2.3 - Radar de visada lateral tipo RAR .....  | 9           |
| 2.4 - Geometria de iluminação de um radar SLAR-RAR .....  | 10          |
| 2.5- Área de uma célula de resolução projetada no solo .....  | 13          |
| 2.6 - Deslocamento da aeronave .....  | 16          |
| 2.7 - Antena retangular com o seu padrão de ganho.....  | 17          |
| 2.8 - Geometria e parâmetros envolvidos na equação radar .....  | 19          |
| 2.9 - Geometria de iluminação .....   | 25          |
| 2.10 - Exemplo de um sinal-eco em uma área agrícola .....   | 27          |
| 2.11 - Sistema de correção AGC para radares SLAR .....  | 28          |
| 2.12 - Exemplo de filtragem digital .....   | 34          |
| 3.1 - Imagem de derramamento de óleo no mar; data: 21/10/83,<br>hora:6:34h.....   | 36          |
| 3.2 - Imagem de derramamento de óleo no mar; data: 21/10/83,<br>hora:6:47h.....   | 37          |
| 3.3 - Imagem de derramamento de óleo no mar; data: 21/10/83,<br>hora:17:57h.....  | 37          |
| 3.4 - Imagem da estrada BR-174, região do Município de Presidente<br>Figueiredo -AM; data: 14/10/93, hora: 8:00h.....               | 38          |
| 3.5 - Imagem do Lago Manguari, região de Manaus -AM;<br>data: 14/10/93, hora: 9:30h .....   | 38          |
| 3.6 - Imagem do Rio Pitinga, região do Município de Presidente<br>Figueiredo -AM, Usina de Balbina; data: 14/10/93, hora: 10:00h... | 39          |
| 3.7 - Diagrama do ganho da antena em “range” .....  | 40          |
| 3.8 - Diagrama do ganho da antena em azimute .....  | 40          |
| 3.9 - Fluxograma da etapa de caracterização da antena .....   | 43          |
| 3.10 - Fluxograma dos procedimentos de correção/avaliação de<br>resultados.....   | 44          |
| 3.11 - Seqüência das imagens .....  | 45          |
| 4.1 - Variação da resolução transversal e radial projetada em<br>“ground range” .....   | 47          |
| 4.2 - Distribuição das áreas de resolução no solo (“ground range”) .....  | 48          |
| 4.3 - Fator de sobreposição azimutal .....  | 49          |
| 4.4 - Fator de sobreposição radial azimutal em função da distância .....  | 50          |
| 4.5 - Função de Autocorrelação do alvo .....  | 51          |
| 4.6 - Histograma da imagem bruta .....  | 52          |
| 4.7 - Histograma da imagem filtrada .....   | 52          |
| 4.8 - Diagrama do ganho da antena em “range” com a função de<br>interpolação .....  | 53          |
| 4.9 - Variação do nível de cinza médio das colunas em função da posição.  | 55          |

|  |    |
|--|----|
| 4.10 - Modelo em tres dimensões da imagem de derramamento de óleo ...                | 56 |
| 4.11 - Imagem da Figura 3.1 corrigida pela equação radar .....                       | 56 |
| 4.12 - Imagem da Figura 3.3 corrigida pela equação radar .....                       | 57 |
| 4.13 - Imagem da Figura 3.2 corrigida pela equação radar .....                       | 57 |
| 4.14 - Modelo em tres dimensões da imagem corrigida .....                            | 58 |
| 4.15 - Variação do nível de cinza com a coluna da imagem .....                       | 59 |
| 4.16 - Média das colunas com o gráfico de correção .....                             | 59 |
| 4.17 - Imagem corrigida pelo “software” SPRING .....                                 | 60 |
| 4.18 - Média das colunas das imagens corrigidas .....                                | 60 |
| 4.19 - Segmentação da imagem corrigida pela equação radar .....                      | 61 |
| 4.20 - Segmentação da imagem corrigida pelo SPRING .....                             | 62 |
| 4.21 - Imagem editada a partir da imagem da Figura 4.19 .....                        | 62 |
| 4.22 - Imagem editada a partir da imagem da Figura 4.20 .....                        | 63 |
| 4.23 - Imagem diferença gerada a partir das imagens das Figuras<br>4.21 e 4.22 ..... | 63 |
| 4.24 - Imagem da Figura 3.4 corrigida pela equação radar .....                       | 64 |
| 4.25 - Imagem da Figura 3.5 corrigida pela equação radar .....                       | 65 |
| 4.26 - Imagem da Figura 3.6 corrigida pela equação radar .....                       | 65 |
| 4.27 - Média das colunas das imagens das Figuras 4.24 e 3.4 .....                    | 66 |
| B.1 - Aeronave C310 com a antena instalada .....                                     | 75 |
| B.2 - Aeronave Dornier com a antena instalada .....                                  | 75 |
| B.3 - Diagrama em blocos do sistema-segmento aerotransportado .....                  | 76 |
| B.4 - “Rack” do sistema instalado .....  | 77 |
| B.5 - Diagrama em blocos do sistema-segmento solo .....                              | 78 |
| B.6 - Diagrama em blocos do “Front End” .....  | 79 |
| D.1 - Localização do Lago Manguari-AM .....  | 89 |
| D.2 - Localização da estrada BR-174 .....  | 90 |
| D.3 - Localização do Rio Pitinga .....   | 91 |
| D.4 - Localização da área de derramamento de óleo, Mar do Norte/<br>Holanda .....    | 92 |

## LISTA DE TABELAS

|  | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 2.1 - Freqüências de operação dos radares..... | 07          |
| 4.1 - Área dos alvos .....                     | 64          |
| A.1 - Especificações do SLAR INPE/DLR.....     | 73          |



## LISTA DE SÍMBOLOS

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $\alpha$              | - Ângulo de aspecto, graus                                      |
| $\phi_h, \eta$        | - Ângulo de abertura da antena na direção horizontal, graus     |
| $\phi_v, \varepsilon$ | - Ângulo de abertura da antena na direção vertical, graus       |
| $\theta_i$            | - Ângulo de incidência, graus                                   |
| $t_{prf}$             | - Período de “PRF”, s   |
| $T_p$                 | - Largura de pulso de “PRF”, s                                  |
| $T_s$                 | - Período de amostragem, s                                      |
| $T_0$                 | - Período de deslocamento da aeronave entre dois pulsos PRF, s. |
| $h$                   | - Altitude de vôo, m  |
| $l, l_1$              | - Comprimento da antena, m                                      |
| $l_2$                 | - Largura da antena, m  |
| $R$                   | - Distância na linha de visada, m                               |
| $R_s$                 | - Distância na linha de visada no solo, m                       |
| $r_r$                 | - Resolução em range projetado no solo, m                       |
| $r_{ts}$              | - Resolução em “slant range”, m                                 |
| $r_a$                 | - Resolução em azimute, m                                       |
| $S$                   | - Deslocamento da aeronave, m                                   |
| $v$                   | - Velocidade da aeronave, m/s                                   |
| $\sigma$              | - Seção de choque de radar, m <sup>2</sup>                      |
| $\sigma^o$            | - Seção de choque de radar por m <sup>2</sup> , (adimensional)  |
| $P_r$                 | - Potência refletida, Watts                                     |
| $P_t$                 | - Potência transmitida, Watts                                   |
| $c$                   | - Velocidade da luz, m/s  |
| $S_t$                 | - Densidade de potência, W/m <sup>2</sup>                       |





## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Deutsche Forschungsanstalt für Luft- and Raumfahrt (Institut für Hochfrequenztechnik) (HF-DLR) têm mantido um convênio de cooperação para pesquisa e desenvolvimento de sistemas sensores aerotransportados na faixa do espectro de microondas. No âmbito deste convênio, o INPE e o DLR têm obtido excelentes frutos na área de processamento de imagens de radar e no desenvolvimento de sensores voltados para as necessidades particulares das duas instituições.

Como previsto, já foi instalado na aeronave do INPE e da Força Aérea Brasileira (FAB) um radar de abertura real (SLAR-X, side-looking airborne radar), primeira dentre uma série de atividades que visam a construção de um radar de abertura sintética, (SAR, "Synthetic Aperture Radar"). Para tanto, foi doado ao INPE um radar de abertura real, para operação e aperfeiçoamento de todas as etapas do conhecimento neste tipo de sistema.

Uma das principais aplicações dos radares de abertura real é o patrulhamento e monitoramento ambiental, com ênfase na área de poluição do mar, por detectar com extrema facilidade derramamentos de óleo. Esta eficiência foi comprovada no projeto Arquimedes, na avaliação de diferentes sensores para esta finalidade.

As imagens obtidas por este tipo de sensor apresentam, no entanto, distorções intrínsecas à sua engenharia de geração, que causam decaimento de brilho das cenas à medida que se afasta da aeronave, e variações no tamanho das células de resolução, dificultando a análise e interpretação das mesmas. Com o desenvolvimento de novas técnicas e uma melhor compreensão do sensor, as imagens podem ser tratadas de forma a facilitar seu uso pelo intérprete.

Sumariando, os objetivos deste trabalho são:

- 1- caracterizar os parâmetros do radar INPE/DLR;
- 2- estabelecer um método de correção radiométrica das imagens geradas pelo sensor SLAR-RAR do HF-DLR, e, em particular, no caso do radar SLAR-RAR do INPE;
- 3- examinar uma aplicação de detecção de derramamentos de óleo e desenvolver um método de determinação de área nas imagens.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são revistos alguns conceitos básicos para a compreensão dos sistemas SLAR. A Seção 2.1 enfoca conceitos básicos de sensores radar e um breve histórico; a 2.2 apresenta os conceitos de radar de abertura real; a 2.3 revisa a equação radar para o caso SLAR e a 2.4 apresenta uma descrição dos recursos de processamento de imagens empregados neste trabalho. As partes mais importantes neste capítulo são a descrição geral do sistema e a equação radar (Equação 2.4 e Equação 2.30).

#### 2.1 - INTRODUÇÃO E HISTÓRICO

O Sensoriamento Remoto por microondas tem-se mostrado uma importante ferramenta para o estudo e caracterização dos mais variados tipos de alvos, por apresentar independência das condições de iluminação solar, e por proporcionar a obtenção de imagens sob as mais variadas condições meteorológicas, sendo pouco influenciado pela presença de nuvens e/ou precipitação.

Outro motivo da crescente utilização deste tipo de sistema é permitir a inferência de diferentes propriedades de interação energia-matéria, pois enquanto na faixa de comprimento de onda conhecida como ótica a interação está ligada às propriedades químicas dos materiais, a resposta em microondas é condicionada à geometria de aquisição e às propriedades dielétricas da superfície ou volume estudado (Ulaby et al., 1981).

Os sistemas que operam na faixa de microondas podem ser classificados em dois grupos básicos: os passivos e os ativos. Os sistemas do tipo passivo, conhecidos como radiômetros, detectam a energia emitida/refletida pelo alvo analisado. Como o Sol possui valores de radiância muito pequenos na faixa de frequência de microondas, as

antenas necessitam cobrir extensas faixas do terreno, para compensar a falta de energia iluminante, acarretando uma baixa resolução espacial.

Os sistemas ativos possuem a sua fonte própria de energia, podendo assim iluminar convenientemente os alvos através de antenas diretivas e obter alta resolução espacial.

Os sistemas radares podem ainda ser agrupados em imageadores e não imageadores (Reeves et al., 1975; Ulaby et al., 1981). Os imageadores compreendem os sistemas de antena rotativa, os radares de abertura real (SLAR-RAR) e os do tipo abertura sintética (SLAR-SAR). Os não imageadores compreendem os escaterômetros, os altímetros e os espectrômetros.

A Figura 2.1 apresenta um quadro resumido dos grupos de sistemas aerotransportados que operam em microondas:

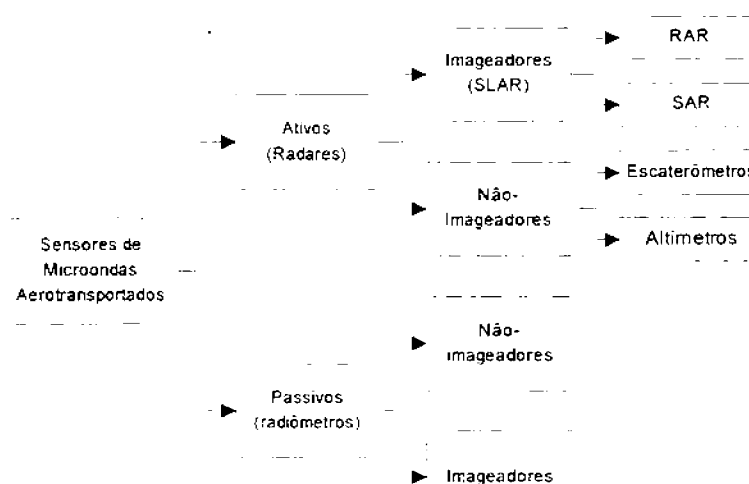


Fig. 2.1 - Classificação dos sensores de microondas aerotransportados.

Os radares podem ainda ser classificados em sistemas biestáticos de aquisição e sistemas monoestáticos de aquisição. No sistema biestático são utilizadas duas antenas, uma para transmissão e a outra para recepção, sendo que as antenas podem possuir características distintas de polarização, dimensão, ângulo de visada etc.

Os radares tiveram a sua origem nos estudos realizados por Hertz em 1886 sobre geração, recepção e espalhamento de ondas eletromagnéticas. Hulsmeyer pôde demonstrar em 1903 a possibilidade de utilização do radar na detecção de navios, patenteando este conceito em 1904. Em 1922, o primeiro radar foi demonstrado por Taylor, mas somente em 1937 Sir Watson-Watt construiu o primeiro sistema radar operacional (Curlander e McDonough, 1991; Dallemand et al., 1993).

Os primeiros radares imageadores foram utilizados durante a II Guerra Mundial para fins militares, como instrumentos de auxílio durante operações de bombardeios noturnos. Após a II Guerra Mundial, iniciou-se o desenvolvimento dos radares de visada lateral (SLAR- “Side Looking Airborne Radar”), em que uma antena era afixada na fuselagem das aeronaves, em uma direção paralela ao eixo longitudinal do avião, com o seu feixe voltado para baixo, e, por meio do deslocamento da aeronave, se produzia a varredura no solo (de Loor, 1983).

Este tipo de radar apresentava uma qualidade de imagem muito superior aos antecessores, apesar da resolução depender da distância entre a antena e o alvo imageado, e ser inversamente proporcional ao comprimento da antena utilizada. Assim, para conseguir uma melhor resolução, necessitava-se diminuir a distância entre o radar e o alvo, ou aumentar o comprimento da antena. Apesar destes fatores desfavoráveis, este tipo de sistema foi e continua sendo muito utilizado. Entre 1965 e 1966, foram obtidas várias imagens com o radar SLAR Westinghouse AN/APQ-97, as quais recobriram cerca de 500.000km<sup>2</sup> de área dos EUA, para aplicações exclusivas de sensoriamento remoto.

A empresa Westinghouse operou comercialmente este sistema até 1973; as empresas Motorola, Ericsson e Terma (Dinamarca) dispõem de radares SLAR para vigilância que são comercializados até a atualidade.

Os problemas da dependência da resolução com a distância e do tamanho da antena foram solucionados com o advento dos radares de abertura sintética (SAR), na década de 50, quando Wiley, em 1952, desenvolveu o primeiro sistema conhecido na época como “Doppler Beam-Sharpening”. Várias empresas e órgãos de pesquisas investiram posteriormente nestes sistemas, como, por exemplo, a Goodyear, com a série

GEMS, que operou no projeto RADAM. A Universidade de Michigan gerou o protótipo do SAR-580; a empresa EMI, o SLAR-X e o SLAR-Q; a Thomson CSF desenvolveu a série RAFALE e VIGIE; o JPL, o AirSar e o TopSAR; o DLR, o E-SLAR-X e o E-SAR; a Ericsson com o seu SLAR-X (Leberl, 1983; Krul e de Loor, 1992).

O radar consiste basicamente de um sistema eletrônico para detecção e localização de alvos. Seu princípio de funcionamento baseia-se na comparação entre um sinal conhecido, que é por ele gerado e transmitido, e o sinal de retorno (eco), resultante da reflexão do sinal transmitido pelos alvos. O termo “radar” (radar detection and ranging), hoje é aplicado a qualquer dispositivo de radio no qual um transmissor ilumina uma superfície refletora e/ou espalhadora, e um receptor que mede algumas propriedades do sinal eco proveniente do objeto ou superfície (Ulaby et al., 1981).

A Figura 2.2 apresenta os componentes básicos de um radar. O transmissor têm a função de produzir os sinais que são transmitidos para o espaço por meio de uma antena. Os sinais, por sua vez, ao serem refletidos ou espalhados pelos alvos, voltam para uma antena receptora que os envia ao receptor. O receptor demodula e amplifica os sinais eco e os envia ao processador, que extrai informações e as representa através de um sistema de visualização e/ou armazenamento.

Os radares monoestáticos utilizam uma única antena para transmissão e recepção, sendo que, neste caso, é utilizado um componente adicional denominado chave TR (“transmit-receive switch”), que é utilizado para comutar a antena entre o transmissor e o receptor, impedindo que a energia do transmissor danifique o receptor. Alguns tipos de radares de baixa potência utilizam um componente mais simples conhecido como “circulador” para realizar a função descrita.

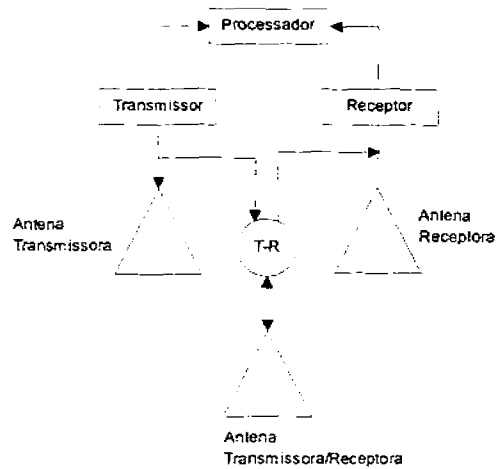


Fig. 2.2 - Componentes básicos de um radar.

O espectro de frequência de operação dos radares compreende desde 300Mhz até 300Ghz (comprimentos de onda de 1m até 1mm). Por questões de padronização, dividiu-se este espectro em faixas internacionalmente conhecidas como P, L, X etc.. A Tabela 2.1 apresenta resumidamente as principais bandas e a sua correspondência em frequência e comprimento de onda.

TABELA 2.1 - FREQUÊNCIAS DE OPERAÇÃO DOS RADARES

| BANDA | FREQ. (GHz)  | COMPR.DE ONDA (cm) | BANDA | FREQ. (GHz) | COMPR.DE ONDA (cm) | BANDA | FREQ. (GHz)  | COMPR.DE ONDA (cm) |
|-------|--------------|--------------------|-------|-------------|--------------------|-------|--------------|--------------------|
| P     | 0,225 a 0,39 | 133 a 76,9         | C     | 4,20 a 5,75 | 7,0 a 5,20         | Q     | 36,0 a 46,0  | 0,83 a 0,65        |
| L     | 0,390 a 1,55 | 77,0 a 19,3        | X     | 5,75 a 10,9 | 5,2 a 2,75         | V     | 46,0 a 56,0  | 0,65 a 0,54        |
| S     | 1,550 a 4,20 | 19,30 a 7,0        | K     | 10,9 a 36,0 | 2,75 a 0,83        | W     | 56,0 a 100,0 | 0,54 a 0,30        |

FONTE: Itt (1968), p. 1-3 e Ulaby et al (1981), p. 22.

Os radares de visada lateral tipo abertura real, também conhecidos como radares "força bruta" (Trevett, 1986), são utilizados para imageamento em aeronaves. Estes sensores são constituídos de uma longa antena instalada na lateral, que irradia um

feixe estreito de microondas dirigido para baixo, a uma certa altitude. O radar emite um pulso com tempo de duração muito pequeno, que ilumina a faixa de visada.

Os ecos recebidos de cada pulso são armazenados para a formação das imagens. Nos sistemas mais antigos, os dados eram gravados em filmes fotográficos que eram desenrolados na mesma velocidade da aeronave; nos sistemas mais recentes, os dados são armazenados na forma digital em fitas e/ou discos magnéticos.

No sistema de armazenamento em filme, os ecos recebidos modulam um feixe que é mostrado em um osciloscópio, e por meio de uma ótica apropriada, o feixe é gravado em um filme fotográfico. Com o deslocamento da aeronave, associado à seqüência de transmissões e recepções dos pulsos, obtém-se uma imagem bidimensional da superfície (Ulaby et al., 1981).

A velocidade do filme é ajustada de forma que a escala da imagem nas direções perpendicular e ao longo do vôo, sejam mantidas tão próximas uma da outra quanto possível. Como a dimensão ao longo da linha de varredura é determinada pela medida do tempo de retorno dos ecos do radar, a imagem resultante é ligeiramente distorcida, devido à diferença entre a linha de visada e a distância no solo. Em alguns sistemas radar, esta distorção é removida através de uma correção apropriada. Entretanto, isto só se aplica se os pontos estiverem dispostos numa superfície plana, o que não ocorre na prática, o que pode resultar em distorções excessivas na imagem corrigida. (Ulaby et. al., 1981).

A Figura 2.3 apresenta o conceito de um radar SLAR-RAR, em que um retorno típico de um instante particular de vôo é visualizado, com fortes sinais refletidos vindo das árvores e do caminhão, nenhum sinal vindo da sombra radar e um sinal muito baixo proveniente do rio (Ulaby et al., 1981).



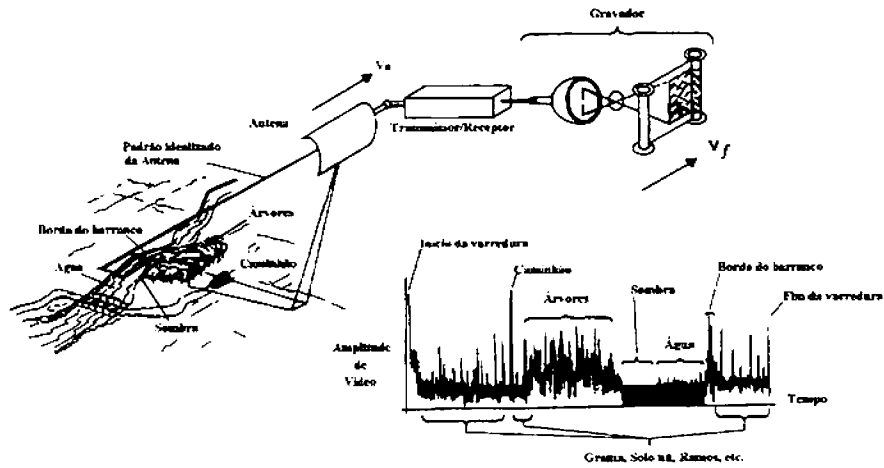


Fig. 2.3 - Radar de visada lateral tipo RAR.

FONTE: Modificada de Ulaby et al. (1986), p. 570.

O radar SLAR-RAR coleta os dados provenientes dos ecos dos alvos iluminados, formando uma imagem em "tempo real". O mesmo não acontece com os radares do tipo SAR, que necessitam um processamento muito complexo dos ecos recebidos para que o operador possa visualizar as imagens durante o voo.

## 2.2 - O RADAR DE ABERTURA REAL - RESOLUÇÃO E AMOSTRAGEM

### 2.2.1 - CÁLCULO DE RESOLUÇÃO

A Figura 2.4 mostra a geometria de iluminação do solo de um radar SLAR/RAR. As aberturas vertical e horizontal da antena, de comprimento  $l$ , são definidas respectivamente pelos ângulos  $\phi_v$  e  $\phi_h$ . A antena é instalada em uma aeronave, que se movimenta com uma velocidade  $v$ , a uma altitude  $h$ .

Observa-se na referida figura, a geometria volumétrica e superficial de uma célula de resolução. A célula de resolução é definida como a menor área no solo que o sistema consegue detectar. Para que os ecos desses alvos situados na direção radial e perpendicular ao plano de vôo sejam separáveis, basta que eles distem uma distância maior que  $r_{rs}$  na direção do plano inclinado. A  $r_{rs}$  é uma distância em “slant range” referente à metade do tempo do pulso  $T_p$ , necessário para que os ecos de dois alvos distintos não se misturem na recepção. Assim a célula de resolução tem um comprimento, no plano inclinado, de  $cT_p/2$ , onde  $c$  é a velocidade da luz, e  $T_p$  é a largura de pulso do radar, como ilustrado na Figura 2.4.

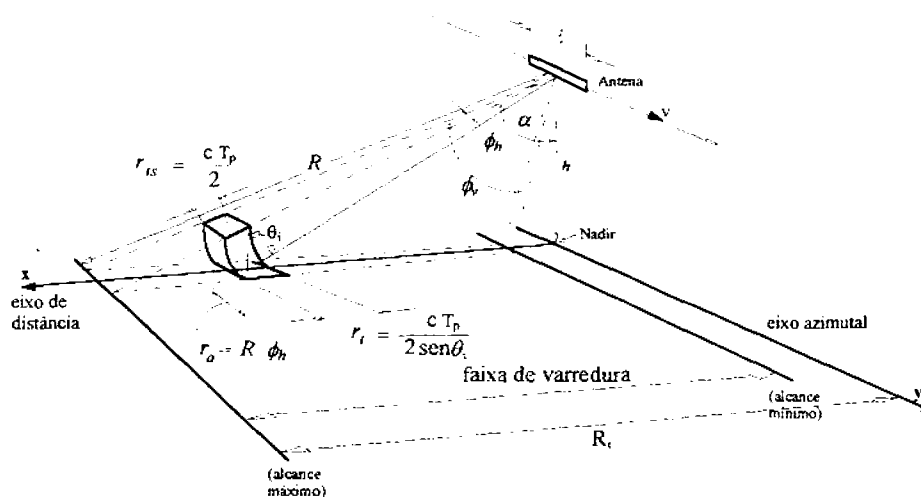


Fig. 2.4 - Geometria de iluminação de um radar SLAR-RAR.

FONTE: Modificada de Ulaby et al. (1981), p. 46.

O lóbulo principal da antena na direção azimutal possui uma abertura típica de  $0,5^\circ$  a  $1^\circ$  ( $\phi_h$ ) (Ulaby e Dobson, 1989); sendo os ângulos de abertura  $\phi_h$  e  $\phi_v$  definidos normalmente pela abertura na qual o ganho da antena é igual à metade do seu valor máximo (-3dB) (Horn e Moreira, 1988).

A abertura horizontal da antena pode ser definida de forma aproximada pela expressão:

$$\phi_h \cong \frac{l}{\lambda} \quad (\text{Ulaby et al., 1981 ; Steinberg e Subbaram, 1991});$$

onde  $l$  é o comprimento da antena na direção do vôo e  $\lambda$  é o comprimento de onda da portadora do sinal transmitido pela antena.

Define-se também o ângulo de “visada” (ou ângulo de “aspecto”),  $\alpha$ , como o ângulo de apontamento do eixo da antena, onde o ganho é máximo em relação ao eixo vertical (nadir) que passa pela antena, conforme é mostrado na Figura 2.4.

A resolução ao longo da linha (“along track”) de vôo (resolução “em azimute” ou “azimutal”),  $r_a$ , de uma célula de resolução que está a uma distância  $R$  do radar, é dada por: (Ulaby et al., 1981)

$$r_a = \phi_h \cdot R \quad (2.1)$$

onde  $R$  é a distância da antena ao alvo.

A resolução transversal à linha de vôo projetada no solo (“across track” ou “range”),  $r_t$ , relativa a uma célula de resolução que está a uma distância radial  $R$  do radar, depende do tempo de duração dos pulsos transmitidos,  $T_p$ , e do ângulo de incidência da onda eletromagnética nessa célula,  $\theta_i$ , (Ulaby et al., 1981); assim tem-se:

$$r_i = \frac{r_{ts}}{\text{sen}\theta_i}$$

A resolução radial ou resolução “slant range”,  $r_{ts}$ , situada a uma distância radial  $R$  relativa à antena do radar, é dada por:

$$r_{ts} = \frac{c \cdot T_p}{2} \quad (2.1a)$$

Desta forma tem-se :

$$r_i = \frac{c \cdot T_p}{2 \text{sen}\theta_i} \quad (2.2)$$

onde  $\theta_i$  é o ângulo de incidência dado por:

$$\theta_i = \text{arc cos } \frac{h}{R} \quad (2.3)$$

onde  $h$  é a altitude da antena do radar e  $R$  é a distância do radar ao centro da célula de resolução, onde a onda eletromagnética incide com o ângulo  $\theta_i$ .

Através das Equações 2.1 e 2.2 pode-se calcular, de modo aproximado, a área de uma célula de resolução no solo, relativa a uma distância radial  $R$ , através da expressão:

$$A \cong r_a \cdot r_t = \frac{\phi_h \cdot R \cdot c \cdot T_p}{2 \cdot \text{sen}\theta_i} \quad (2.4)$$

A partir da Equação 2.4, nota-se que as dimensões das células de resolução no solo variam com a distância  $R$ . As células próximas ao nadir (“near range”) possuem pequenas dimensões em azimuth e grandes em “range”, enquanto que, no ponto mais distante (“far range”), as células são pequenas em “range” e grandes em azimuth (de Loor, 1992), conforme ilustrado na Figura 2.5.

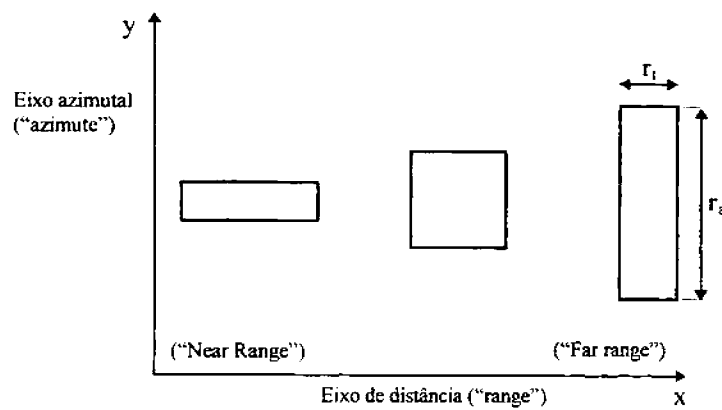


Fig. 2.5 - Área de uma célula de resolução projetada no solo.

A variação da dimensão radial da célula de resolução é devida à variação do ângulo de incidência,  $\theta_i$ , calculado através da Equação 2.3. Desta maneira, para grandes faixas de cobertura do radar, têm-se grandes variações no valor de  $\theta_i$  e, por sua vez, grandes variações na resolução radial,  $r_a$ , e resolução transversal  $r_t$ .

Para obter a distância no solo,  $R_t$ , em que ocorre a melhor uniformidade, igualam-se as resoluções em azimuth e “range”:

$$r_a = r_t$$

$$\phi_r \cdot R = \frac{c \cdot T_p}{2 \cdot \text{sen } \theta_i} \quad (2.5)$$

onde:

$$R = \sqrt{h^2 + R_i^2} \quad (2.6)$$

e:

$$\text{sen } \theta_i = \frac{R_i}{R} \quad (2.7)$$

Aplicando a Equação 2.6 e 2.7 em 2.5, tem-se:

$$\phi_s(\sqrt{h^2 + R_i^2}) = \frac{c \cdot T_p}{2 \cdot \frac{R_i}{\sqrt{h^2 + R_i^2}}}$$

$$\phi_s(\sqrt{h^2 + R_i^2}) = \frac{c \cdot T_p \cdot \sqrt{h^2 + R_i^2}}{2 \cdot R_i}$$

$$\frac{2 \cdot \phi_s}{c \cdot T_p} = \frac{1}{R_i}$$

logo:

$$R_i = \frac{c \cdot T_p}{2 \cdot \phi_h}$$

Aplicando os parâmetros do radar INPE/DLR, [Apêndice A], tem-se:

$$R_i = 972,97 \text{ metros.}$$

### 2.2.2 - CÁLCULO DO TAMANHO DO PIXEL PELA TAXA DE AMOSTRAGEM

Em geral o sinal-eco é amostrado em uma frequência maior que  $1/T_p$ , de forma a não ocorrer perda de informação. Seja o período de amostragem do sinal igual a  $T_s$ , pode-se calcular o espaçamento radial entre os pixels consecutivos, através da expressão:

$$\Delta r_r = \frac{c \cdot T_s}{2} \quad (2.8)$$

O espaçamento transversal no solo entre pixels é dado por:

$$\Delta r_t = \frac{c \cdot T_s}{2 \cdot \text{sen}\theta_1} \quad (2.9)$$

Como, nesse caso, os pixels projetados no solo são menores que a célula de resolução do sistema, pode-se considerar que ocorre uma sobreposição entre os mesmos. Define-se, então, Fator de Sobreposição Radial (FSR) como a razão entre a resolução em range e o espaçamento entre pixels; assim tem-se:

$$\text{FSR} = \frac{r_s}{\Delta r_r} = \frac{r_t}{\Delta r_t} = \frac{T_r}{T_s} \quad (\text{Ulaby et al., 1981; Fernandes e Menchik, 1994}) \quad (2.10)$$

De modo análogo pode-se definir o fator de sobreposição azimutal (FSA) como a relação entre a resolução azimutal,  $r_a$ , e a separação azimutal de dois pixels consecutivos,  $\Delta r_a$ , ou seja:

$$FSA = \frac{r_a}{\Delta r_a} = \frac{\phi_h \cdot R}{v \cdot T_0} \quad (2.11)$$

A Figura 2.6 apresenta, de forma pictórica, o deslocamento da antena entre dois pulsos de PRF transmitidos ( $\Delta r_a$ ), onde  $v$  é a velocidade de deslocamento da aeronave e  $T_0$  é o período de deslocamento da mesma entre dois pulsos de PRF.

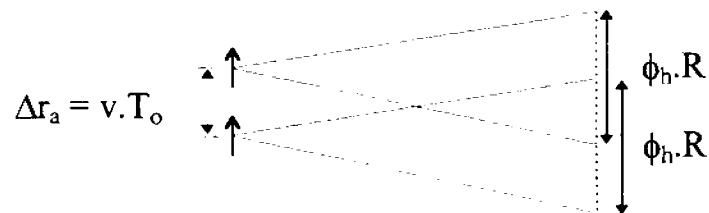


Fig. 2.6 - Deslocamento da aeronave.

Através da Equação 2.3, obtém-se o valor de  $R$  em relação a  $\theta$  e a altura de vôo  $h$ :

$$R = \frac{h}{\cos \theta} \quad (2.12)$$

Aplicando o valor de  $R$  da Equação 2.12 na Equação 2.11, tem-se que:

$$FSA = \frac{\phi_h \cdot h}{v \cdot T_0 \cdot \cos \theta} \quad (2.13)$$



Para avaliar a correlação entre as áreas dos pixels, é necessário levar em consideração a geometria de aquisição.

Aplicando a Equação 2.6 em 2.11, obtém-se o FSA projetado no solo:

$$FSA = \frac{r_a}{\Delta r_a} = \frac{\phi_h \cdot \sqrt{h^2 + R_i^2}}{v \cdot T_0} \quad (2.14)$$

### 2.3 - EQUAÇÃO RADAR

As antenas para os radares de abertura real possuem um diagrama de irradiação tipicamente “laminar”, como ilustrado na Figura 2.7, ou seja, o lóbulo primário da antena apresenta valores de ângulos muito pequenos na direção azimutal (plano horizontal) e altos na direção de elevação (plano vertical), conforme descrito na Seção 2.2.

A Figura 2.7 apresenta pictoricamente uma antena e seu feixe de irradiação.

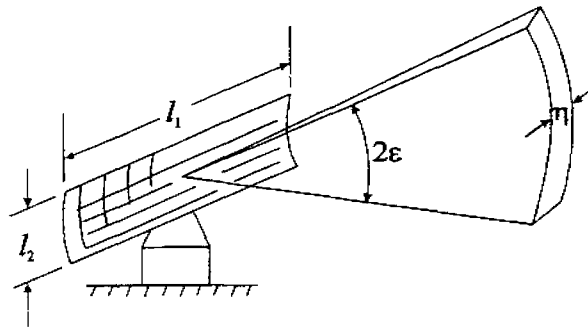


Fig. 2.7 - Antena retangular com o seu padrão de ganho.

FONTE : Modificada de Hovanessian (1980), p.6.

As antenas utilizadas em radares RAR são do tipo guia fendido (“waveguide slot array”) e refletor cilíndrico (“cylindrical reflector antenna”). As antenas

do tipo guia fendido são as mais utilizadas por serem de fácil construção e aerodinamicamente mais apropriadas para instalação em aeronaves (Ulaby et al., 1981).

O ângulo de abertura da antena no sentido de “range” ( $\varepsilon$ ) pode ser estimado à partir do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a largura da antena ( $l_1$ ) (Jasik, 1961; Hovanessian, 1980; Lo e Lee, 1993), por meio da equação:

$$\varepsilon = \frac{51.\lambda}{l_2} \Big|_{\text{graus}} \quad \text{ou} \quad \varepsilon = \frac{0,886.\lambda}{l_2} \Big|_{\text{rd}}$$

Analogamente, o ângulo de abertura no sentido de “azimute” ( $\eta$ ) pode ser estimado por:

$$\eta = \frac{51.\lambda}{l_1} \Big|_{\text{graus}} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{0,886.\lambda}{l_1} \Big|_{\text{rd}}$$

Para se obter uma resolução refinada é necessário que o valor de  $\eta$  seja pequeno, o que implica um comprimento grande da antena ( $l_1$ ), resultando assim, uma maior dificuldade na sua confecção e instalação em aeronaves.

A equação radar é uma relação fundamental entre as características do radar, do alvo e do sinal refletido pelo alvo e recebido pela antena (Ulaby et al., 1981). A Figura 2.8 apresenta um alvo isolado e os parâmetros envolvidos na equação radar.

A densidade de potência por unidade de área, a uma distância  $R$ , gerada por uma antena isotrópica, pode ser calculada através da equação:

$$S_t = \frac{P_t}{4\pi R^2} \tag{2.15}$$

onde  $P_t$  é a potência média transmitida pela antena durante o período do pulso e  $R$  é o raio da esfera ao redor da antena.

Nos casos onde a antena não é isotrópica, ou seja, quando possui uma direção preferencial de irradiação, acrescenta-se, na Equação 2.15, o ganho  $G_t$  da antena na direção do alvo (Krul, 1983; Ulaby et al., 1986; Kingsley e Quegan, 1992). Dessa forma a equação torna-se:

$$S_t = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi R^2}$$

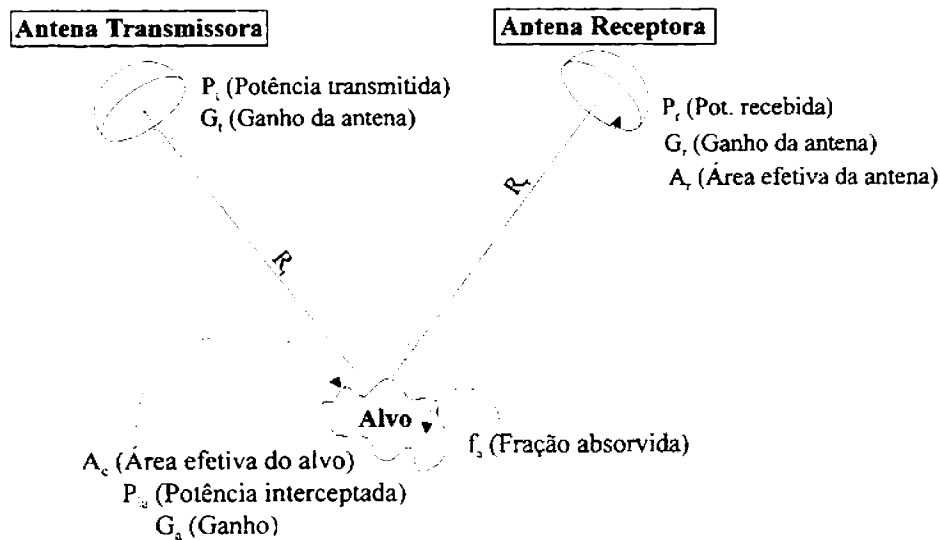


Fig. 2.8 - Geometria e parâmetros envolvidos na equação radar.

FONTE: Modificada de Ulaby et al. (1986), p. 458.

Considerando que um alvo, a uma distância  $R_r$ , possui uma área efetiva  $A_e$ , a potência interceptada pelo alvo,  $P_{ia}$ , é dada por:

$$P_{ia} = S_t \cdot A_e$$

ou:

$$P_{ia} = \frac{P_t \cdot G_t \cdot A_e}{4\pi R_t^2}$$

Parte da potência interceptada é absorvida pelo alvo. Sendo  $f_a$  a fração absorvida, a potência reirradiada pelo alvo ( $P_{ta}$ ) é dada por:

$$P_{ta} = P_{ia} (1 - f_a)$$

A potência reirradiada pelo alvo que chega ao receptor é:

$$P_r = \frac{P_{ta} \cdot G_a}{4\pi R_r^2} \cdot A_r \quad (2.16)$$

onde  $G_a$  é o ganho do alvo na direção da antena receptora,  $A_r$  é a área efetiva da antena receptora e  $R_r$  é a distância entre o alvo e a antena receptora.

A Equação 2.16 pode ser combinada com as demais, resultando em:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot A_e}{4\pi R_t^2} \cdot (1 - f_a) \cdot \frac{G_a A_r}{4\pi R_r^2}$$

Agrupando os termos tem-se:

$$P_r = \left[ \frac{P_t \cdot G_t \cdot A_r}{(4\pi)^2 R_t^2 \cdot R_r^2} \right] \cdot (A_e \cdot G_a \cdot [1 - f_a]) \quad (2.17)$$

Os fatores relacionados com o difusor (alvo) estão entre parênteses na Equação 2.17, sendo combinados em um fator denominado “seção de choque radar”, “ $\sigma$ ” (Ulaby et al., 1981), ou seja:

$$\sigma = [A_e \cdot G_a \cdot (1 - f_a)]$$

Assim, a equação radar pode ser simplificada para:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot A_r}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \cdot \sigma$$

Nos casos onde o radar é monoestático, isto é, uma mesma antena trabalha como transmissora e receptora, considera-se que:

$$\begin{aligned} R_t &= R_r = R, \\ G_t &= G_r = G, \\ A_t &= A_r = A, \end{aligned}$$

Pode-se então reescrever a equação de radar monoestático como:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G \cdot A \cdot \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (2.18)$$

Seja a área efetiva de uma antena, (Eaves e Reedy ,1987; Skolnik, 1990; e Lo e Lee, 1993), definida por :

$$A = \frac{\lambda^2 G}{4\pi}$$

Pode-se obter  $P_r$  em relação a essa área como:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad (2.18a)$$

As Equações 2.18 e 2.18a são válidas para alvos pontuais (único difusor). Considera-se, entretanto, que os objetos são formados por um número  $N$  (muito grande) de difusores independentes, que são distribuídos aleatoriamente. Assim tem-se:

$$P_r = \sum_{i=1}^N P_{ri} \quad (2.19)$$

onde  $P_r$  é a potência recebida pela antena e  $P_{ri}$  é a potência recebida, relativa a cada um dos difusores dentro de uma célula de resolução.

Combinando as Equações 2.18a e 2.19, tem-se:

$$P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \sum_{i=1}^N \frac{P_t G_i^2 \sigma_i}{R_i^4} \quad (2.20)$$

Costuma-se normalizar  $\sigma_i$  pelos elementos de área  $dA_i$  pertencentes ao objeto  $i$ ; este novo valor de  $\sigma$  é conhecido como *seção de choque radar por m<sup>2</sup>* ou  $\sigma^0$ , (Curlander e McDonough, 1991). Assim tem-se:

$$\sigma^0 = \frac{\sigma_i}{dA_i}$$

Substituindo  $\sigma_i$  por  $\sigma^0 dA_i$  na Equação 2.20 tem-se:

$$\bar{P}_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \sum_{i=1}^N \frac{P_t G_i^2 \sigma^0 dA_i}{R_i^4}$$

onde  $\bar{P}_r$  é a potência média recebida pelo radar.

Passando ao limite, ou seja, para  $N \rightarrow \infty$  e  $dA_i \rightarrow 0$ , tem-se:

$$\bar{P}_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int_{A_i} \frac{P_t G^2 \sigma^0 \cdot dA}{R^4} \quad (2.21)$$

Considerando que  $P_t$  é constante dentro de uma célula de resolução, que a distância entre a antena e cada um dos difusores é praticamente a mesma, e que a

variação de  $\sigma^0$  é desprezível dentro da área iluminada pelo radar ( $A_i$ ) (Ulaby e Dobson, 1989), a Equação 2.21 pode ser simplificada da seguinte forma:

$$\bar{P}_r = \frac{P_t \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^0}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \int_{A_i} G^2 \cdot dA \quad (2.22)$$

Definindo o ganho da antena por:

$$G = G_0 \cdot g(\epsilon, \eta) \quad (2.23)$$

onde  $G_0$  representa o ganho máximo da antena, e  $g(\epsilon, \eta)$  a função que descreve o decaimento de potência (Figuras 2.7 e 2.9).

Pode-se determinar uma área equivalente  $A_p$ , através da expressão:

$$A_p = \frac{\int_{A_i} G^2 \cdot dA}{G_0^2} \quad (2.24)$$

Aplicando a Equação 2.24 em 2.22, tem-se:

$$\bar{P}_r = \frac{P_t \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^0 \cdot G_0^2 \cdot A_p}{(4\pi)^3 \cdot R^4}$$

Assim, pode-se concluir que a potência recebida pela antena é diretamente proporcional ao coeficiente de retroespalhamento,  $\sigma^0$ . Os demais parâmetros da equação podem ser reunidos num só, representando uma constante do sistema (Ulaby e Dobson, 1989).

A equação radar para SLAR, em alvos extensos, é definida pelo produto da potência média vezes a área de uma célula de resolução no solo, ou seja:

$$\bar{P}_r = \frac{P_t \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^0 \cdot G_0^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \cdot (r_a \cdot r_r) \quad (2.25)$$

Utilizando-se as Equações 2.1 e 2.1a, tem-se:

$$\bar{P}_r = \frac{P_t \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^0 \cdot G_0^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \cdot (\phi_h \cdot R) \cdot \frac{c \cdot T_p}{2}$$

Simplificando tem-se:

$$\bar{P}_r = \frac{P_t \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^0 \cdot G_0^2 \cdot \phi_h \cdot c \cdot T_p}{2 \cdot (4\pi)^3 \cdot R^3}$$

onde  $P_t$  e  $\bar{P}_r$  são as potências transmitidas e recebidas,  $G_0$  é o ganho da antena,  $\sigma^0$  é o coeficiente de espalhamento para uma área. (Ulaby et al., 1986).

Reagrupando as variáveis, tem-se :

$$\bar{P}_r = \frac{P_t \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^0 \cdot \phi_h \cdot c \cdot T_p \cdot G_0^2}{2 \cdot (4\pi)^3 \cdot R^3} \quad (2.26)$$

A Equação 2.26 define a potência refletida em “slant range”, isto é, sem realizar a projeção no solo. Para o caso “ground range”, deve-se aplicar a Equação 2.1 e 2.2 em 2.25, tendo-se desta maneira:



$$\bar{P}_r = \frac{P_t \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^0 \cdot \phi_h \cdot c \cdot T_p}{2 \cdot (4\pi)^3} \cdot \frac{G_0^2}{R^3 \cdot \sin\theta_i}$$

Pode-se notar que a potência recebida ( $\bar{P}_r$ ) sofre um decréscimo do seu valor com o inverso da distância  $R$  elevada à terceira potência na direção azimutal (Moreira, 1984; Fernandes e Menchik, 1994), acarretando um decaimento no brilho das imagens. Segundo Ulaby et al. (1986), outro fator de grande influência é o ganho da antena ( $G$ ), pois possui um diagrama de irradiação que varia à medida que se afasta do eixo principal (“boresight”). Deve-se também considerar a variação do valor de  $\theta_i$  com  $R$ , conforme Figura 2.9.

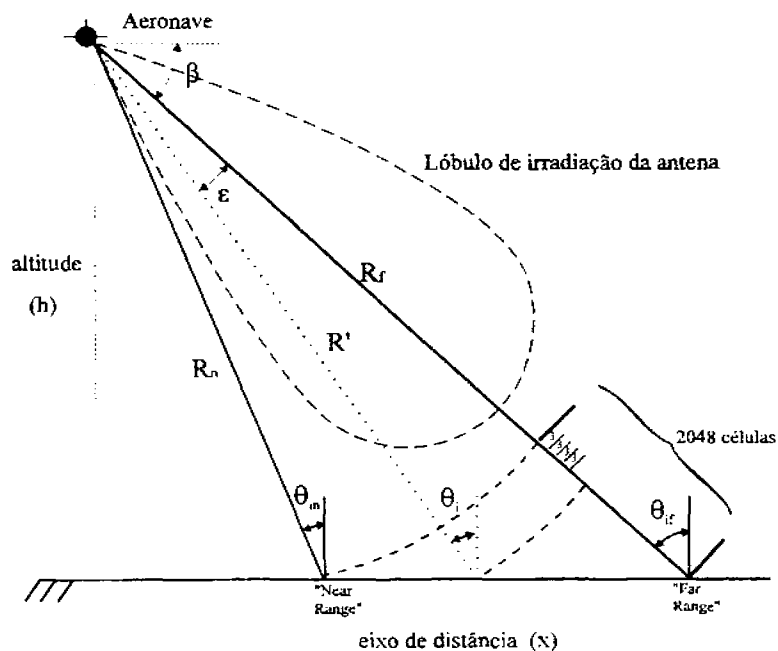


Fig. 2.9 - Geometria de iluminação.

Considerando-se que os termos restantes da Equação 2.26 são invariantes no tempo e na geometria de aquisição, os parâmetros  $R$ ,  $G_0$  e  $\theta_i$  permitem corrigir a atenuação dos sinais de forma a não se perder a resolução do sistema imageador.

Aplicando a Equação 2.23 em 2.26, tem-se:

$$\bar{P}_r = \frac{P_i \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^0 \cdot \phi_h \cdot c \cdot T_p \cdot [G_0 \cdot g(\varepsilon, \eta)]^2}{2 \cdot (4\pi)^3 \cdot R^3} \quad (2.27)$$

Pela Figura 2.9, tem-se:

$$\theta_i = \theta_{i(\text{"far range"})} - \varepsilon$$

ou

$$\varepsilon = \theta_{i(\text{"far range"})} - \theta_i \quad (2.28)$$

Utilizando a Equação 2.3 pode-se obter o valor de  $R$  em relação à altura de vôo e o ângulo de incidência, assim tem-se:

$$R = \frac{h}{\cos \theta_i} \quad (2.29)$$

Aplicando as Equações 2.28 e 2.29 em 2.27, obtém-se:

$$\bar{P}_r = \frac{P_i \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^0 \cdot \phi_h \cdot c \cdot T_p \cdot G_0^2 \cdot g^2(\varepsilon, \eta)}{2 \cdot (4\pi)^3 \cdot h^3} \cdot \cos^3(\theta_{i(\text{"far range"})} - \varepsilon) \quad (2.30)$$

O range dinâmico do sinal-eco em uma imagem é muito grande, principalmente devido às variações de distância do alvo à antena e às variações do

coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ) (Ulaby et al., 1986), sendo, portanto, muito difícil a interpretação/classificação de imagens sem uma correção prévia deste efeito.

Conforme a Equação 2.26, a potência recebida decai com o cubo da distância, sendo portanto a primeira etapa de correção a ser implementada. Nota-se também que o ganho da antena é um fator que afeta diretamente o sinal-eco, bem como o  $\sigma^0$ . Segundo Ulaby et al. (1986) e Chuvieco (1990), o  $\sigma^0$  fator varia conforme o tipo de alvo, a rugosidade, as condições dielétricas e o ângulo de incidência das ondas eletromagnéticas.

O decaimento da potência recebida acarreta uma queda de nível de cinza nas imagens, dificultando a interpretação visual e inviabilizando o uso de pacotes de processamento de imagens, como segmentadores/classificadores/filtros etc.

Alguns sistemas de aquisição de imagens de radar dispõem de um controle automático de ganho (AGC), com a função de buscar uma correção do retorno dos sinais-eco com a variação de seus atrasos. Esta tarefa é de implementação complexa, pois a função que descreve a correção deve cobrir uma extensa gama de atrasos, decorrentes das variações devido à natureza dos alvos. O controle de ganho não pode atuar sobre estes contrastes, que são desejados, e ainda ser capaz de retirar a variação da média do “background” no coeficiente de espalhamento (Ulaby et. al, 1981). Este problema está ilustrado na Figura 2.10

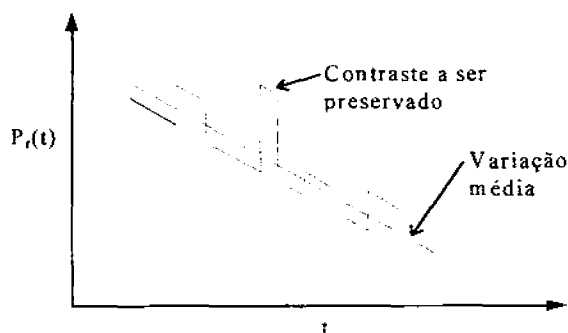


Fig. 2.10 - Exemplo de um sinal-eco em uma área agrícola.

FONTE: Modificada de Ulaby et al. (1986), p. 581.

Os AGCs trabalham com o retorno de um único pulso transmitido e, para a correção do sinal, utiliza-se internamente ao sistema um sinal de compensação que procura aumentar o ganho do receptor à medida que o sinal decai. Esta correção é chamada "STC" ("sensitivity time control"), em que o ganho do receptor é incrementado por meio de uma função que descreve o decaimento do sinal-eco (Ulaby et. al., 1986; Eaves e Reedy, 1987).

Existem várias técnicas de geração de compensação STC; a mais simples é o uso de um filtro passa-baixa, que se encarrega de eliminar as altas frequências, de forma a aplicar uma função de correção composta apenas por sinais de baixa frequência. Na prática, isto é difícil de realizar, pois as variações de baixa frequência do alvo podem se propagar pelo sistema, acarretando uma falha de correção.

Outra técnica é a aplicação de um sinal de correção resultante da média de vários sinais-eco. Nesse caso, os sinais seriam filtrados por um filtro passa-baixa, digitalizados por um conversor A/D, processados por um microprocessador, e o resultado armazenado em uma memória, de forma que possa ser aplicado ao receptor por meio de um conversor D/A. A Figura 2.11 apresenta a concepção de um sistema AGC para radares imageadores.

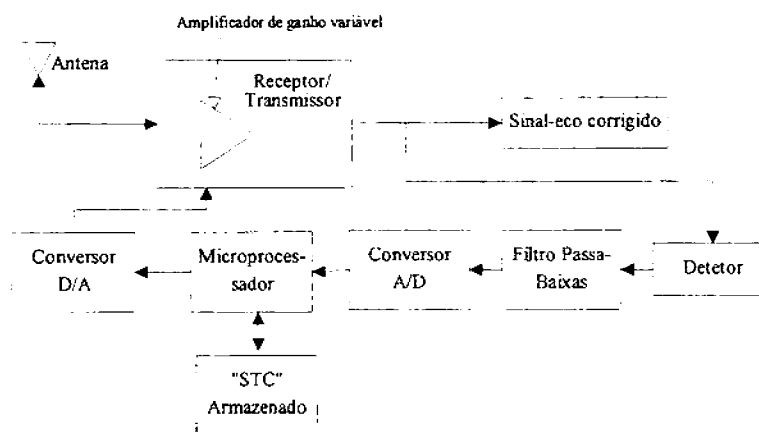


Fig. 2.11 - Sistema de correção AGC para radares SLAR.

FONTE: Modificada de Ulaby et al. (1986, p. 582).

Este sistema, apesar de flexível, apresenta forte dependência dos alvos na correção das imagens. Na prática é muito difícil haver grandes regiões homogêneas nas imagens para se obterem os fatores de correção.

O radar SLAR INPE/DLR não dispõe de um sistema de compensação STC durante a aquisição [Apêndice B], sendo as correções realizadas no solo. Este fato pode acarretar alguns problemas de conversão dos dados para a forma digital durante o vôo, pois os sinais-eco sofrem forte diminuição de valor à medida que se aproximam do “far range”, podendo-se levar o conversor A/D Biomation [Apêndice B] a operar fora de sua região linear, obtendo-se, assim, uma perda da variância nos níveis de cinza.

O método mais comumente utilizado na correção da variação de brilho em imagens de radar é através de uma função, ajustada por um polinômio de alta ordem, obtido a partir da média das colunas da imagem. Este processo foi utilizado no Projeto Arquimedes para a correção as imagens em solo (Witte,1985). O programa SPRING-2.0 dispõe deste tipo de correção em seu conjunto de funções.

A função de correção obtida para a “correção em solo” poderia ser aplicada durante a aquisição das imagens, por meio de um “hardware” apropriado, com o intuito de obter imagens já processadas, minimizando o tempo de processamento no solo e permitindo que a conversão seja realizada dentro de sua faixa dinâmica.

## 2.4 - PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Este capítulo apresenta resumidamente os principais recursos de processamento de imagens empregados no tratamento e avaliação dos resultados das imagens do radar SLAR utilizados.

As imagens empregadas possuem ruído “Speckle”, bem como ruídos espúrios decorrentes dos métodos empregados na aquisição e armazenamento. Para minimizar os ruídos contidos nas imagens sem interferir nas informações nelas contidas, necessita-se de um estudo das características destas imagens, de forma a definir uma filtragem adequada.

Para detectar e avaliar derramamentos de óleo, necessita-se empregar técnicas de segmentação de forma a isolar as informações mais relevantes.

### 2.4.1 - CONVOLUÇÃO/CORRELAÇÃO

Para a avaliação dos modelos desenvolvidos na Seção 2.2, em relação à sobreamostragem, necessita-se medir a correlação entre os elementos da imagem (pixels).

A operação de correlação entre duas funções  $f_1$  e  $f_2$ , é dada por:

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x)f_2(x - \tau)dx$$

De acordo com Hsu (1973), Pratt (1978) e Spiegel (1984), quando a função  $f_1(x)$  é idêntica a  $f_2(x)$ , tem-se um caso particular de correlação denominada Função de Autocorrelação (FAC), dada por:

$$R_{11}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_1(t - \tau) dt \quad (2.31)$$

Aplicando a transformada de Fourier em  $R_{11}(\tau)$ , tem-se:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[R_{11}(\tau)] &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{11}(\tau) e^{-jw\tau} d\tau \\ \mathcal{F}[R_{11}(\tau)] &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_1(t - \tau) dt \right] e^{-jw\tau} d\tau \end{aligned}$$

Substituindo  $(t-\tau)$  por  $x$ , tem-se:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[R_{11}(\tau)] &= \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x) e^{-jw(t-x)} dx \right] dt \\ \mathcal{F}[R_{11}(\tau)] &= \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) e^{-jw(t)} dt \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x) e^{-jw(-x)} dx \end{aligned}$$

$$\mathcal{F}[R_{11}(\tau)] = F_1(w) F_1(-w) = |F_1(w)|^2 \quad \text{ou}$$

$$R_{11}(\tau) = \mathcal{F}^{-1}[F_1(w) F_1(-w)] = \mathcal{F}^{-1}[|F_1(w)|^2] \quad (2.32)$$

Desta forma, conclui-se que a FAC pode ser calculada diretamente pela Equação 2.31 ou pela Equação 2.32, (Niblack, 1986). Esta transformação é conhecida como teorema de Wiener-Khintchine.

Segundo Crósta (1992), diz-se que duas imagens são correlacionadas quando, dada a intensidade de um determinado pixel em uma delas, pode-se deduzir com razoável aproximação a intensidade do pixel correspondente na outra imagem; caso as imagens sejam absolutamente iguais, elas são então 100% correlacionadas.

#### 2.4.2 - FILTRAGEM

As imagens recebidas por qualquer sistema imageador são constituídas por níveis de cinza, que representam a resposta ou retorno dos objetos em determinada faixa do espectro eletromagnético. A análise destes níveis de cinza mostra que os alvos apresentam perfis próprios, onde os níveis de cinza variam em decorrência das diferentes características químicas, elétricas e geométricas dos alvos. Esses perfis podem ser analisados quanto à sua variabilidade espacial, em que um conjunto de senóides se combina para a formação dos mesmos. A análise no domínio da frequência deste perfil (ou sinal) fornece uma idéia da distribuição espacial das frequências presentes na imagem analisada.

Assim, áreas da imagem que apresentam grandes gradientes de níveis de cinza em um espaçamento pequeno (bordas), necessitam de uma grande quantidade de componentes senoidais para representá-las, sendo chamadas feições de alta frequência. As áreas em que os níveis são mais gradativos constituem as feições de baixa frequência.

As imagens normalmente possuem uma enorme mistura de frequências, em que detalhes das feições de alta e baixa frequência, bem como ruídos se confundem, dificultando a interpretação. Os processos em que se filtram ruídos, se realçam bordas e feições lineares de determinadas regiões e padrões de textura são denominados de filtragem, sendo realizados por meio da supressão ou realce de determinadas frequências espaciais (Crósta, 1992).

Estes processos de filtragem são operações de área ou vizinhança, que podem ser implementados basicamente por dois métodos; por meio da técnica da convolução ou pela técnica da análise de Fourier, que opera no domínio das frequências espaciais que compõem as imagens. A técnica de filtragem no domínio da frequência é



muito mais eficiente e precisa, mas sua implementação é complexa, além de não se encontrar disponível na maioria dos sistemas de processamento de imagens.

Os filtros de convolução podem ser do tipo passa-baixa, passa-alta e do tipo direcional. Os filtros passa-faixa são mais difíceis de implementar, sendo, neste caso, mais simples implementá-los no domínio da frequência.

A implementação da convolução em imagens digitais necessita de um recurso próprio denominado janela móvel ou máscara, em que uma janela de um tamanho definido, é convoluída com a imagem de entrada, para se obter a imagem filtrada.

O processo de filtragem está ilustrado na Figura 2.12, onde se tem uma imagem hipotética de tamanho igual a 5 linhas por 6 colunas, na qual se deseja convoluir uma janela (ou imagem) de tamanho igual a 3 linhas por 3 colunas. Inicialmente, a janela de 3X3 é posicionada sobre o canto superior esquerdo da imagem; multiplica-se cada nível de cinza das células pelo respectivo valor das células da janela e, em seguida, substitui-se o valor do pixel central dessa área de imagem pela média ponderada desses 9 valores.

Repete-se o procedimento deslocando-se a janela de um pixel ao longo da linha; ao término da linha, desloca-se de uma linha da imagem e repete-se os passos descritos. Esta operação é realizada pixel a pixel, sempre recalculando o novo valor do pixel em função dos seus 8 vizinhos mais próximos (Crósta, 1992).

No caso exposto, em que se utilizou uma janela de 3X3, as bordas da imagem resultante ficam com nível de cinza igual a zero, sendo este efeito denominado de “efeito de bordas”, devido ao fato dos pixels das bordas da imagem original não possuírem vizinhança para serem processados.

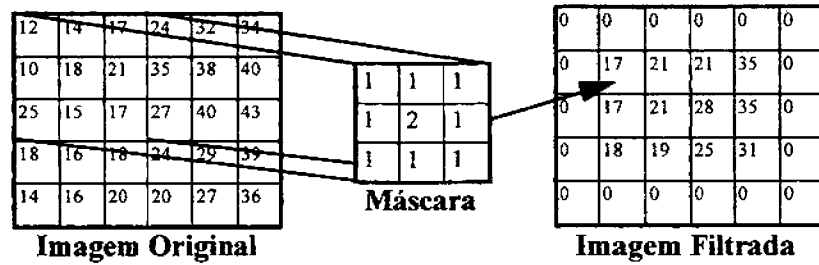


Fig. 2.12 - Exemplo de filtragem digital

FONTE: Modificada de Chuvieco, p. 298.

Uma particularização de tipo de filtragem digital são os chamados filtros direcionais, em que a máscara é montada convenientemente de modo a operar como um filtro passa-alta, realçando as bordas em direções pré-determinadas (Crósta,1992).

### 2.4.3 - SEGMENTAÇÃO

O processo de segmentação de imagem (Niblack,1986; Gonzalez e Woods,1992) consiste no particionamento da mesma em regiões que possuem alguma característica uniforme, tal como intensidade de cinza, cor, textura etc. O que define e distingue os diversos algoritmos são os diferentes critérios de uniformidade ou similaridade utilizados e a estratégia de procura das regiões uniformes.

O software SPRING dispõe de um processo de segmentação interativa por crescimento de regiões, no qual regiões são agrupadas espacialmente a partir de "pixels" individuais. Inicialmente este processo de segmentação rotula cada pixel como uma região distinta, calcula-se em seguida a média da intensidade do nível de cinza das regiões vizinhas, compara-se os valores segundo um limiar estabelecido, verifica-se a distância euclidiana entre elas, e finalmente agrega-se as regiões que sejam mutuamente mais próximas segundo um limiar de distância estabelecido (Bins et al., 1996).

### CAPÍTULO 3

#### MATERIAL E MÉTODOS

##### 3.1 - MATERIAL UTILIZADO

###### 3.1.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados no sistema desenvolvido, incluindo desde os tipos de imagens de sensoriamento remoto, até os requisitos de “hardware” e “software”. As imagens utilizadas estão descritas na Seção 3.1.2. Para a caracterização do radar, foram utilizados os dados referentes ao sistema, que constam do Apêndice A, e os dados do diagrama de irradiação (Seção 3.1.3). A Seção 3.1.4 apresenta o hardware e o software utilizados.

###### 3.1.2 - IMAGENS

Para a realização deste trabalho, utilizaram-se as imagens provenientes de várias áreas-teste que foram imageadas pelo HF-DLR durante o Projeto Arquimedes, que permitiram realizar análises e testes para a correção radiométrica.

Utilizaram-se adicionalmente, imagens digitalizadas das fitas de vídeo geradas na primeira campanha do radar de abertura real realizada no Brasil. O imageamento foi realizado na região do Município de Presidente Figueiredo-AM, em 14 de outubro de 1993. O objetivo da campanha foi verificar a eficiência do sistema no imageamento das áreas inundadas pela usina de Balbina. A qualidade destas imagens não

são tão boas quanto as do DLR, por terem sido digitalizadas de fitas de vídeo e porque na ocasião não se dispunha de equipamento de armazenamento digital.

As imagens do projeto Arquimedes, utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho, compreendem uma região do Mar do Norte, na costa da Holanda, e foram adquiridas no período de 21 a 22 de outubro de 1983, apresentando derramamentos de óleo. As Figuras 3.1 a 3.3 apresentam as imagens ainda sem correção em vários horários, demonstrando a dispersão dos derramamentos e a operação de limpeza.

As Figuras 3.4 a 3.6 apresentam alguns trechos digitalizados das imagens do SLAR do INPE sobre as áreas da usina hidroelétrica de Balbina, do Lago Manguari e da estrada BR-174, que serão depois corrigidas radiometricamente. As figuras apresentam um fator de escala aproximada, de 1:71775 para o Projeto Arquimedes; e 1:68950 para as imagens do Município de Presidente Figueiredo-AM. A localização geográfica destas áreas são apresentadas no Apêndice C.

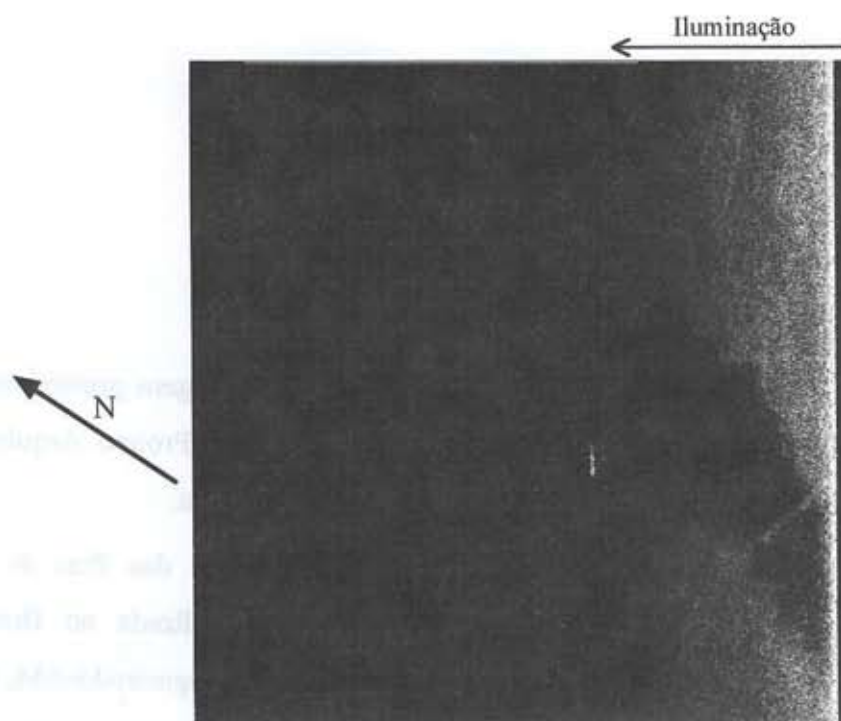


Fig. 3.1 - Imagem de derramamento de óleo no mar;  
data: 21/10/83, hora: 6:34h.

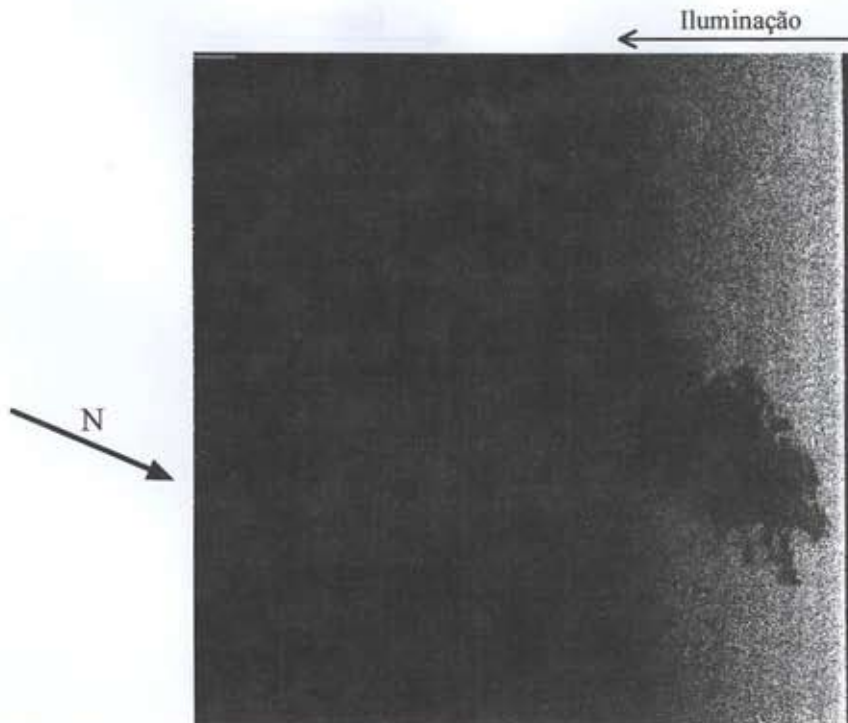


Fig. 3.2 - Imagem de derramamento de óleo no mar;  
data: 21/10/83, hora: 6:47h.

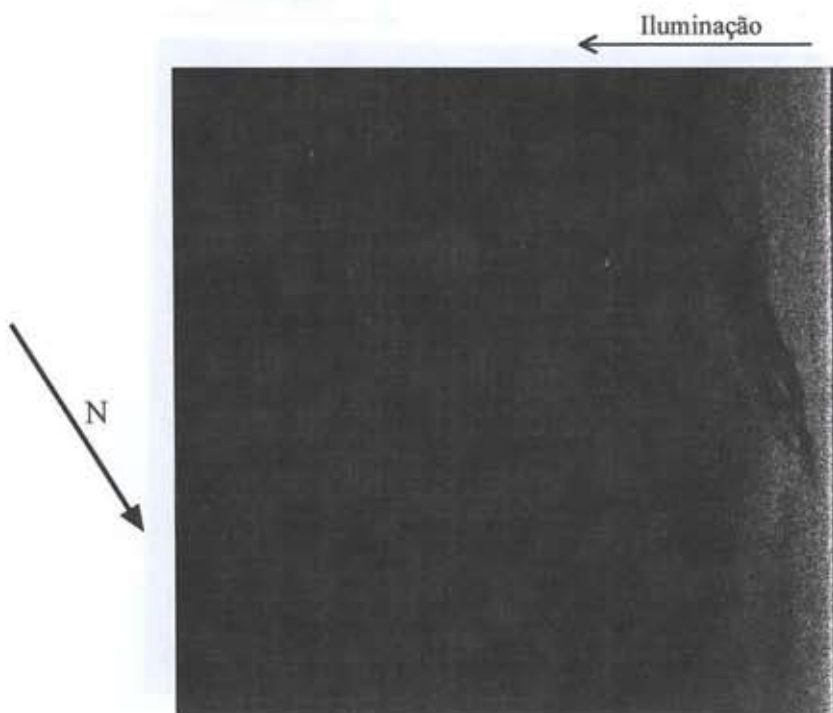


Fig. 3.3 - Imagem de derramamento de óleo no mar;  
data: 21/10/83, hora: 17:57h.

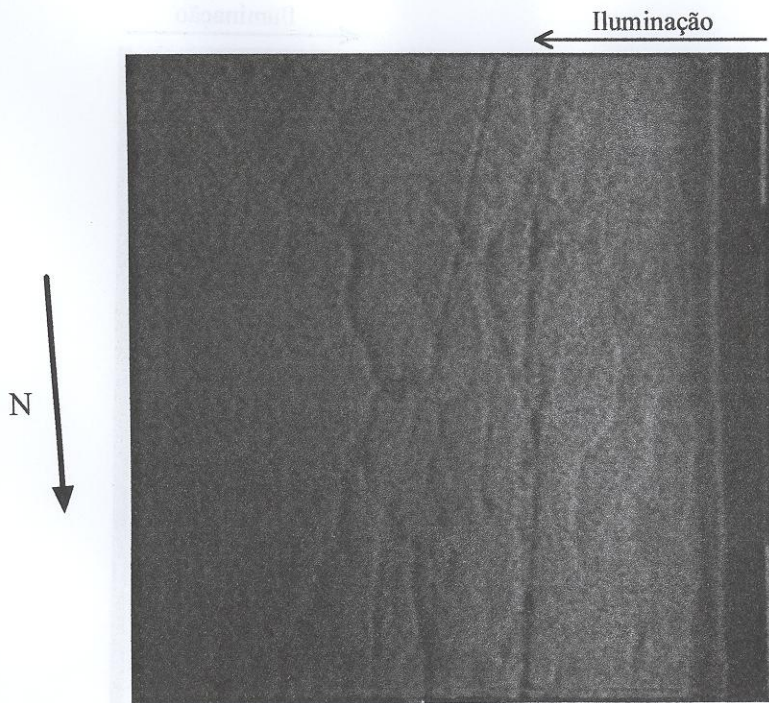


Fig. 3.4 - Imagem da estrada BR-174, região do Município de Presidente Figueiredo-AM; data: 14/10/93, hora: 8:00h.

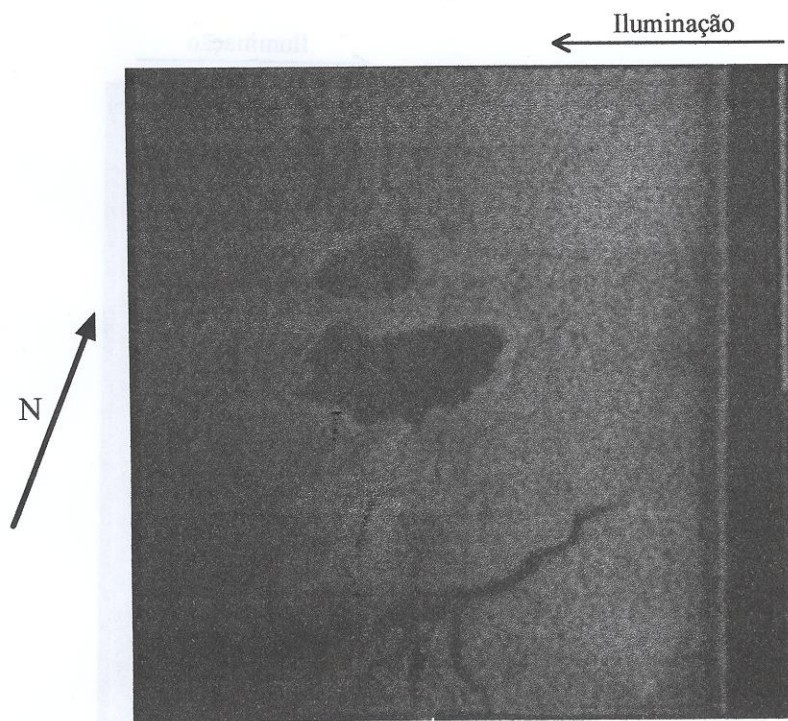


Fig. 3.5 - Imagem do Lago Manguari, região de Manaus-AM; data: 14/10/93, hora: 9:30h.



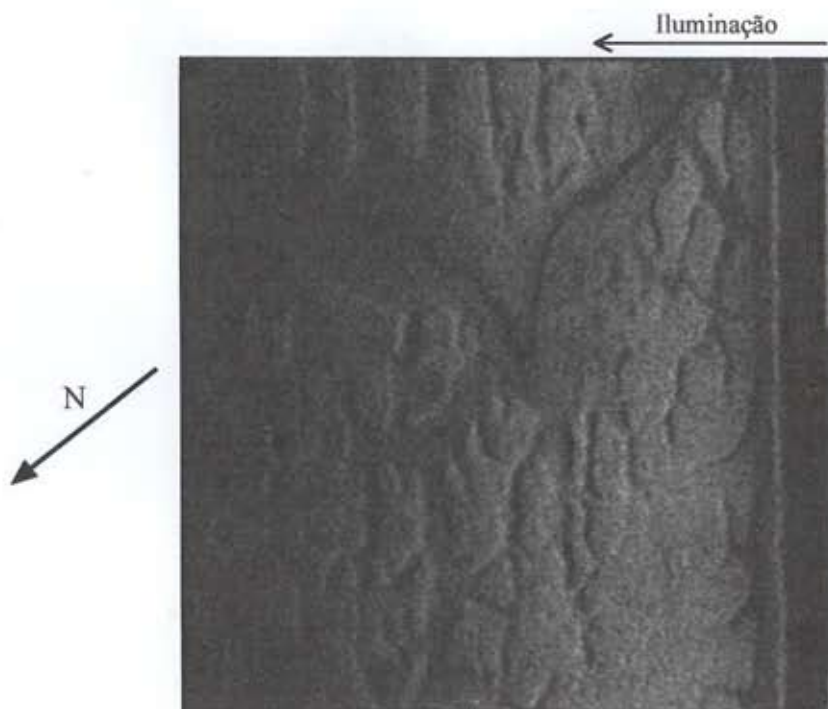


Fig. 3.6 - Imagem do Rio Pitinga, região do Município de Presidente Figueiredo -AM, Usina de Balbina; data: 14/10/93, hora: 10:00h.

### 3.1.3 - DIAGRAMAS DE IRRADIAÇÃO

Para a caracterização do comportamento da antena do radar, realizou-se um mapeamento da sua irradiação no campo de provas de antenas do DLR (Witte, 1992). Buscou-se mapear a antena no sentido azimutal e de "range". Os gráficos das Figuras 3.7 e 3.8 apresentam o resultado obtido.

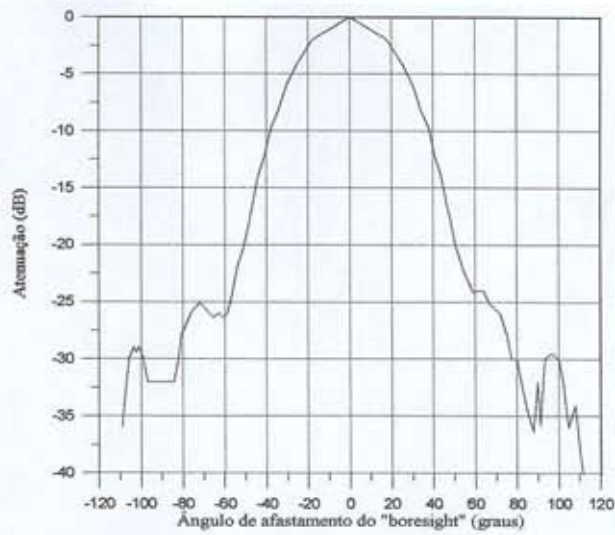


Fig. 3.7 - Diagrama do ganho da antenna em "range".

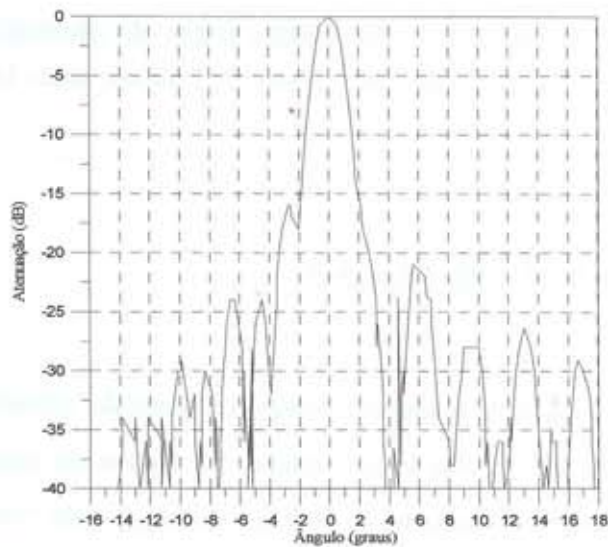


Fig. 3.8 - Diagrama do ganho da antenna em azimute.

### 3.1.4 - "HARDWARE" E "SOFTWARE"

O ambiente computacional escolhido para o desenvolvimento do modelo e testes foi o de "Workstations" e de microcomputadores tipo IBM-PC padrão 486. Nas estações de trabalho utilizou-se o "software" IDL - Interative Data Language, no



processamento das imagens para o modelo proposto, e também o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas “SPRING 2.0”, desenvolvido na Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do INPE.

O microcomputador tipo IBM-PC foi utilizado para operar o programa de geração e manipulação de gráficos “Grapher for Windows”, para gerar e comparar as curvas de correção com os dados gerados pelo programa IDL.

Para a conversão das imagens das fitas de vídeo para a forma digital, utilizou-se uma interface de aquisição de imagens para microcomputadores PC desenvolvida no INPE exclusivamente para este fim (Gama, 1993).

## 3.2 - METODOLOGIA PROPOSTA

### 3.2.1 - SUMÁRIO

Para a consecução dos objetivos deste trabalho, foram realizados os procedimentos aqui sumariados:

- modelamento matemático da equação radar para o radar SLAR-RAR;
- caracterização do radar SLAR-RAR em relação à resolução, ao espaçamento em “pixels” e ao tamanho de “pixel” projetado, baseada na engenharia do sistema;
- geração do algoritmo de medida de área a partir das características do produto digital projetado para o nível do solo (“ground range”);
- levantamento da função de autocorrelação medida sobre as imagens, para se estabelecer uma janela de filtragem para redução de ruído;
- geração de um algoritmo de correção a partir da equação radar, utilizando o “software” IDL, e correção da imagem bruta a partir do algoritmo gerado;

- repetição do procedimento desenvolvido por Witte (1985), através do método de correção da variação de brilho em imagens radar, utilizando uma função ajustada por um polinômio de alta ordem, obtido através da média das colunas da imagem. Tal função está disponível no “software” SPRING-2.0, sendo denominada “Correção do Padrão de Antena”.
- comparação dos resultados da correção obtidos pelos dois métodos, através da média das colunas das imagens corrigidas;
- segmentação das imagens corrigidas pelos dois métodos utilizando o “software” SPRING-2.0. Identificação das áreas segmentadas de interesse (óleo) e “exportação” das imagens classificadas para o formato bruto (para uso com o software IDL);
- realização das medidas das áreas de derramamento de óleo por meio do software IDL, utilizando o algoritmo de medida de área;

Os procedimentos acima descritos foram aplicados às imagens obtidas pelo DLR; sendo que às imagens do INPE, foram aplicadas apenas as correções pelo método da equação radar, depois de digitalizadas.

Como já mencionado, foram realizados vôos-teste do radar sobre o Município de Presidente Figueiredo, onde foi utilizado um vídeo-cassete analógico como meio de armazenamento. Para digitalizar as imagens, utilizou-se uma interface desenvolvida em 1992, na Divisão de Processamento de Imagens - DPI/INPE. Originalmente o sistema radar opera com 2048 pixels/linha, mas com o artifício de gravação em fitas VHS, a resolução sofre um decréscimo para 512 pixels/linha, além da natural inserção de ruídos provenientes da leitura e do processo de conversão análogo - digital (Gama,1993).

### 3.2.2 - DETALHAMENTO DA METODOLOGIA E OUTROS COMENTÁRIOS

Como já descrito, a antena ilumina os alvos de maneira não uniforme, necessitando-se assim modelar matematicamente esta distribuição de energia. Para isto utiliza-se o diagrama de irradiação da antena do radar. Primeiramente, digitaliza-se os diagramas de irradiação e ajusta-se um polinômio a esta curva, de forma a cobrir toda a faixa útil de trabalho da antena, por meio do “software” Grapher. Este modelamento é aplicado na equação radar de forma a determinar como a potência varia em relação ao afastamento do eixo central de irradiação (“boresight”).

Com o modelo do diagrama da antena e o modelo geométrico de irradiação, pode-se complementar a equação radar, de forma a permitir a melhor descrição da potência recebida pelo sensor. O fluxograma da Figura 3.9 apresenta as etapas descritas.

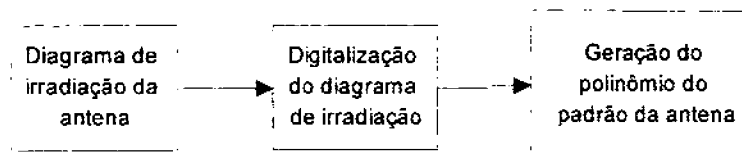


Fig 3.9 - Fluxograma da etapa de caracterização da antena.

As imagens de trabalho, por sua vez, continham ruído que prejudicava o processo de correção radiométrica e a sua avaliação, pois apareciam nas cenas picos de níveis de cinza espúrios que, ao se aplicar a curva de correção, levavam ao surgimento de saturações, sendo, portanto, necessária a execução de uma etapa de pré-filtragem nas imagens brutas.

Como todo o processo de filtragem por média resulta em uma suavização dos detalhes (Gonzalez e Woods, 1992), foi necessário definir um tamanho da janela de filtragem a ser utilizada, de tal forma a minimizar este efeito.



Como forma de avaliação, buscou-se comparar os resultados obtidos pelo método clássico de correção, empregado por Witte(1985), com o método de correção pela equação radar, confrontando a média de colunas e a segmentação das imagens corrigidas.

As imagens após a segmentação, apresentaram um número muito grande de polígonos, decorrente das diferentes respostas dos alvos, bem como da presença do ruído “speckle”. Desta forma, não foi possível obter apenas duas classes de saída (óleo e água), sendo necessária uma fase adicional de edição de classes, onde o operador edita as classes sobre a imagem segmentada, também conhecida como classificação supervisionada, com o objetivo de obter uma imagem com apenas duas classes, o fundo (“background”) e o óleo.

A Figura 3.11 apresenta uma seqüência de imagens, onde a primeira, no topo da pilha, corresponde a uma imagem corrigida; a segunda, a uma imagem segmentada; a terceira, a uma imagem editada; e a quarta, finalmente, corresponde àquela exportada na forma bruta para o IDL.

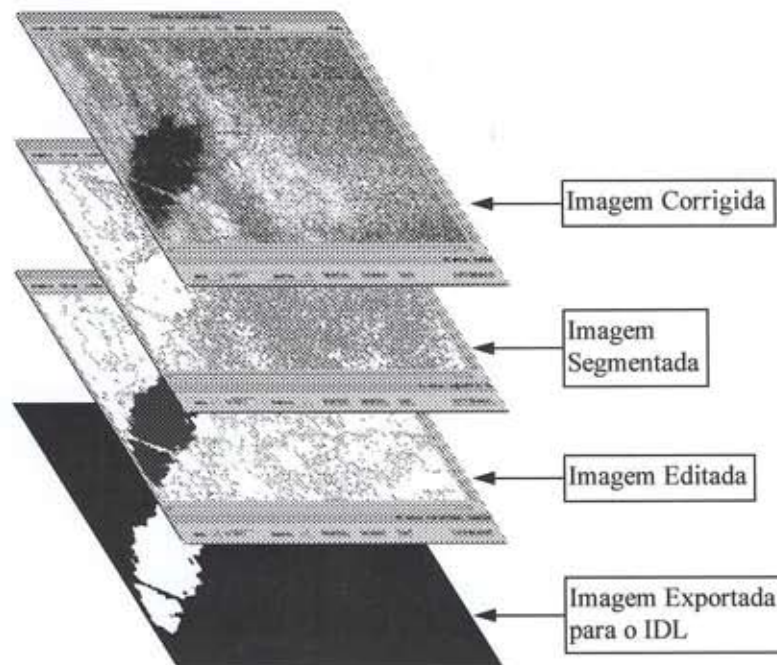


Fig. 3.11 - Seqüência das imagens.



## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da avaliação das características do SLAR-DLR e os testes do método de correção radiométrica proposto, que foram utilizados na correção das imagens do radar SLAR-INPE.

Os resultados obtidos são utilizados para desenvolver o método da correção radiométrica das imagens do SLAR, bem como para fornecer os subsídios à obtenção da área dos alvos no solo. O estudo da resolução, dos fatores de sobreposição, bem como a compreensão da engenharia do sistema são de vital importância para obter o tamanho do “pixel” no solo em função do “range” e, por conseguinte, obter a área dos alvos imageados.

#### 4.1 - RESOLUÇÃO

Através da análise desenvolvida na Seção 2.2, pode-se avaliar as características particulares do SLAR. A Figura 4.1 apresenta a variação da célula de resolução do radar do INPE/DLR, no sentido transversal  $r_t$  e no sentido radial  $r_a$ , em função do ângulo de incidência  $\theta_i$ , a partir das Equações 2.2 e 2.1, respectivamente, aplicando-se os parâmetros do sistema contidos no Apêndice A.

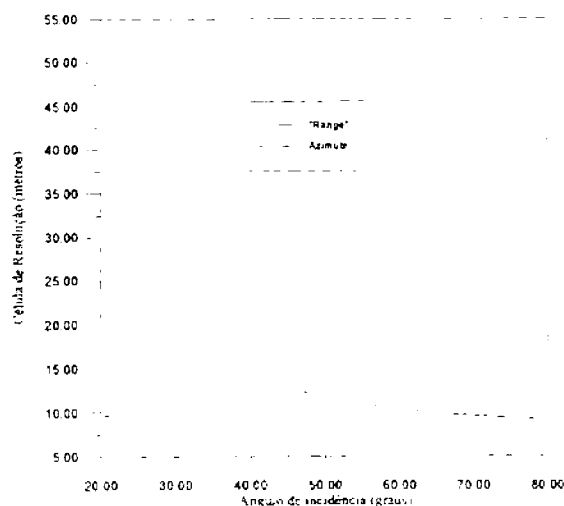


Fig. 4.1 - Variação da resolução transversal e radial projetada em “ground range”.

Pode-se observar na Figura 4.1, que os ângulos de incidência de menor valor apresentam valores de célula de resolução  $r_r$  maiores e, em contrapartida, células de resolução  $r_a$  menores. Nos ângulos de maior valor o efeito se inverte, denotando forte distorção geométrica ao longo das cenas, conforme apresentado na fundamentação teórica.

O gráfico da Figura 4.2 apresenta a variação das áreas das células de resolução para os radares do DLR e do INPE, em relação à distância no solo (projeção “ground range”), a partir da Equação 2.4. Nos extremos da curva (“near range” e “far range”), tem-se células de resolução de grandes dimensões no solo, e, na região onde se têm as menores áreas, é justamente onde a célula de resolução é regular.

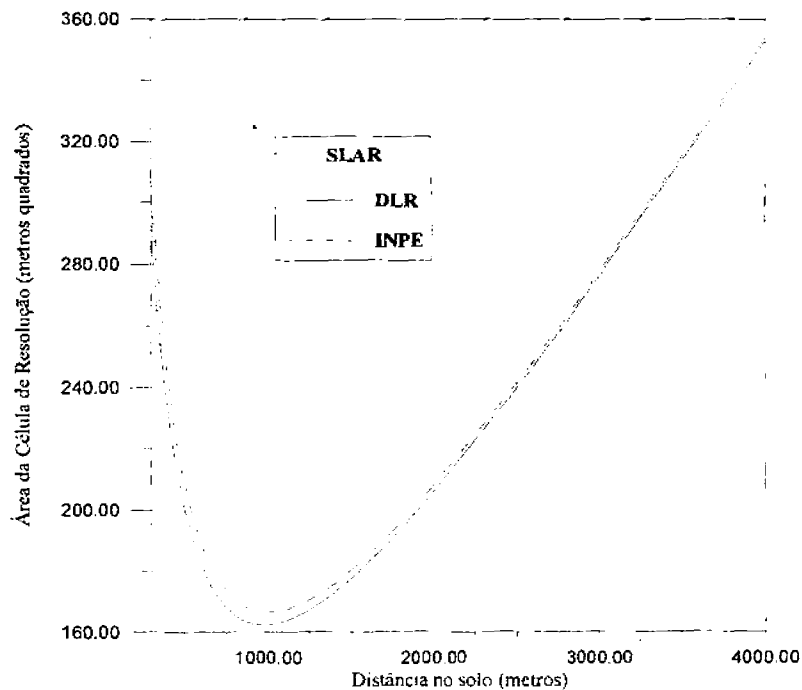


Fig. 4.2 - Distribuição das áreas de resolução no solo (“ground range”).

O fator de sobreposição radial (FSR) para as imagens obtidas através do radar INPE/DLR pode ser calculado pela Equação 2.10, onde a frequência de



amostragem utilizada foi de 50MHz, implicando em uma duração de pulso  $T_p$  de 20nS, e uma duração de um pulso de energia ( $T_s$ ) de 60nS [Apêndice A]; assim tem-se:

$$FSR = T_p/T_s = 3$$

Aplicando os valores dos parâmetros do radar [Apêndice A] na Equação 2.11, obtém-se uma comparação do fator de sobreposição azimutal (FSA) para os radares do INPE/DLR. A Figura 4.3 apresenta o gráfico da comparação do FSA com a variação do ângulo de incidência.

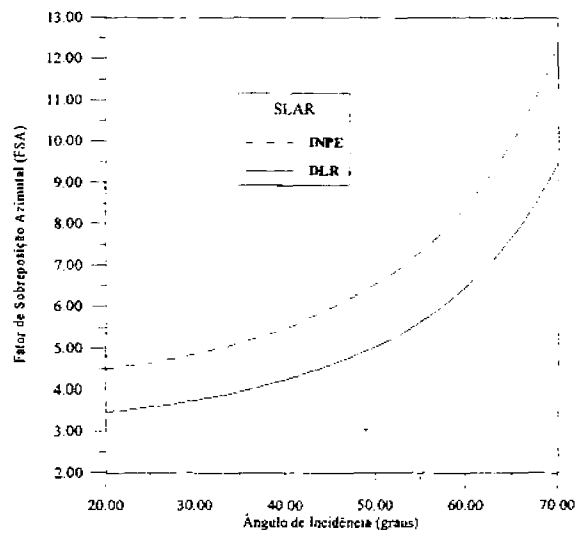


Fig. 4.3 - Fator de sobreposição azimutal.

A Figura 4.4 apresenta o gráfico do fator de sobreposição azimutal (FSA) a partir da Equação 2.14, onde o FSA está relacionado à distância projetada no solo, chamada projeção “ground range”, para os casos DLR e INPE/DLR [Apêndice A].

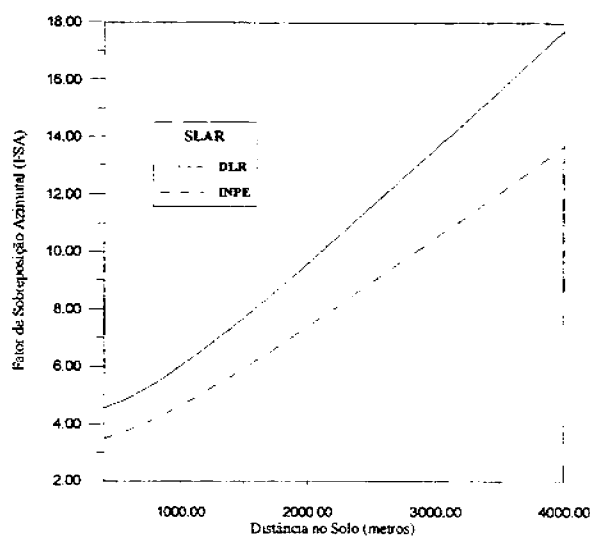


Fig 4.4 - Fator de sobreposição radial azimutal em função da distância.

Nota-se que quanto maior a distância (maior  $\theta_i$ ), maior será o fator de sobreposição. Isto ocorre porque a antena apresenta uma forte variação de resolução com a distância. Como o deslocamento da aeronave é constante, ocorre uma maior sobreposição entre os pixels em “far range” do que em “near range”.

O fator de sobreposição estimado para as cenas do SLAR previa valores estáveis no sentido de “range” e variações no sentido de azimute. Estes estimadores podem ser verificados na análise das imagens e/ou medidas de correlação.

O gráfico da Figura 4.5 apresenta um corte no sentido de range, da FAC bidimensional normalizada, calculada utilizando a transformada inversa de Fourier do espectro de potência (teorema de Wiener-Khinchine). As áreas das imagens utilizadas para a avaliação da FAC foram do mesmo tamanho, mas em coordenadas diferentes da imagem. A área 1 é a mais próxima do “near range” e a área 3 a mais distante.

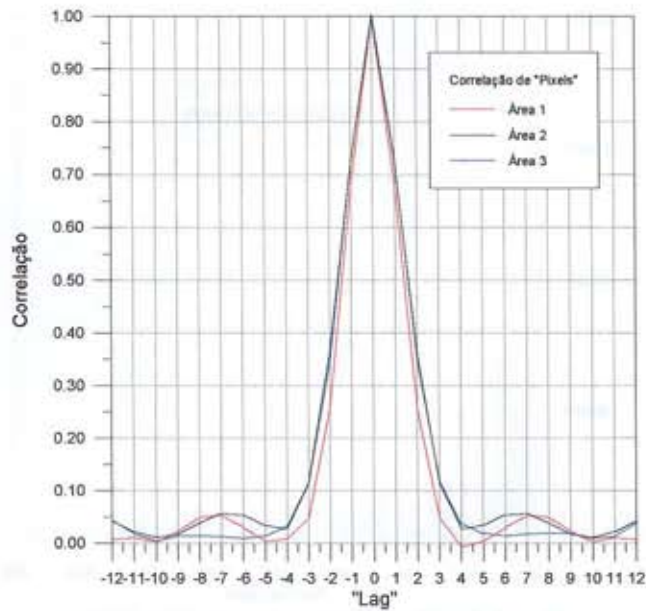


Fig. 4.5 - Função de Autocorrelação do alvo.

Neste caso, considerou-se como “pixels” correlacionados aqueles cuja vizinhança tenham uma correlação de 0,05 (5%), o que corresponde a “lags” menores do que 3; desta forma, máscaras de filtragem de tamanho menor ou igual a 4X4, não iriam alterar significativamente as correlações entre “pixels”. Escolheu-se a dimensão de 3X3 para a máscara de filtragem por conveniência de processamento.

Realizou-se adicionalmente uma análise do histograma da imagem-teste antes e depois de filtrada. Nota-se que o histograma da imagem bruta apresenta falhas, não possuindo continuidade em sua forma, provavelmente devido ao método de armazenamento dos dados. Os dados de imagem foram armazenados em fitas digitais, conjuntamente com as informações de voo, havendo, portanto, a necessidade de compactar os dados, perdendo, assim, alguns “bits” na resolução radiométrica. A Figura 4.6 apresenta graficamente o histograma da imagem homogênea.

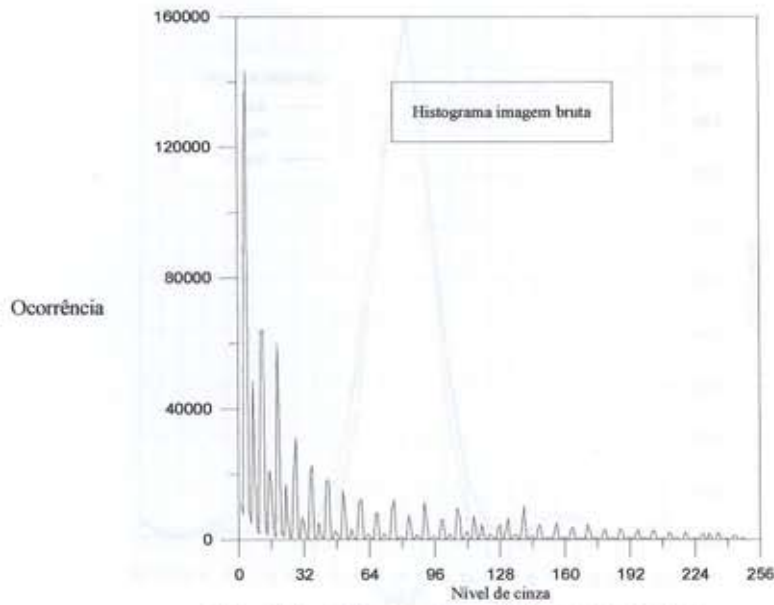


Fig. 4.6 - Histograma da imagem bruta.

Após a aplicação da filtragem com a máscara de tamanho 3 por 3 (3X3), os “bits ausentes” foram recuperados, fazendo com que o histograma se tornasse contínuo, resultando em uma maior quantidade de níveis de cinza. Esta melhoria na qualidade da imagem facilita a utilização de outros aplicativos, tais como segmentadores e ou classificadores. A Figura 4.7 apresenta graficamente o histograma da imagem homogênea filtrada.

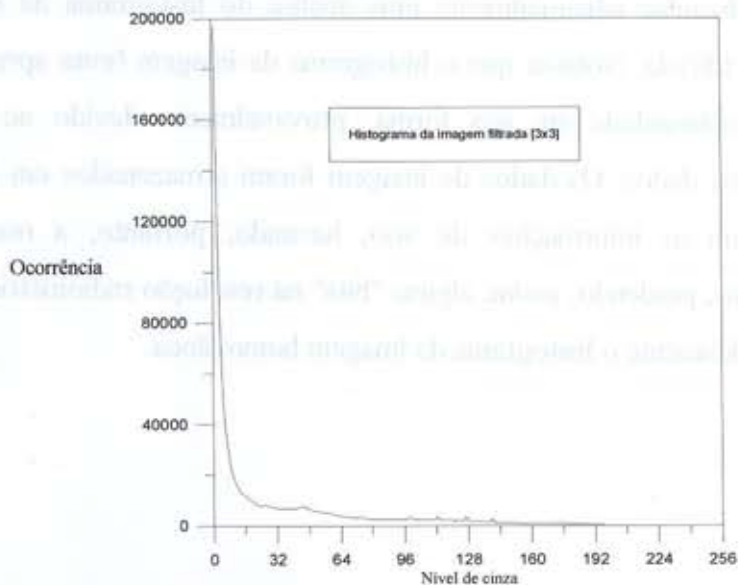


Fig. 4.7 - Histograma da imagem filtrada.

#### 4.2 - EQUAÇÃO RADAR SLAR - RAR

Conforme a Equação 2.30, um dos fatores que contribuem na variação do padrão da distribuição de energia da antena é a variação do ganho da mesma, que é função do ângulo  $\varepsilon$  e  $\eta$ . No caso particular, dispõe-se do diagrama de irradiação da antena no sentido de “range” (Figura 3.7), no qual se aplica uma função de ajuste. A Figura 4.8 apresenta esse diagrama de irradiação da antena em linha tracejada e o polinômio de ajuste em linha contínua.

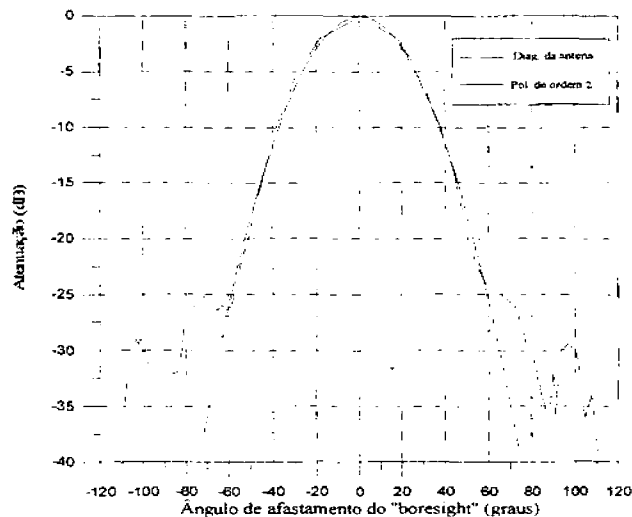


Fig 4.8 - Diagrama do ganho da antena em “range” com a função de interpolação.

Nota-se que entre -60 graus e +60 graus, o diagrama da Figura 4.8 não possui lóbulos laterais. Como os lóbulos laterais estão fora da faixa de imageamento dos alvos, que é em torno de 35 graus de abertura, restringiu-se a faixa de modelamento da antena para -60 a 60 graus. Esta limitação não incorre em erros significativos, pois os lóbulos laterais do diagrama de irradiação são da ordem de -25dBs e também estão fora da região imageada, portanto sem influência significativa. Neste ajuste, buscou-se um polinômio de menor ordem que se ajustasse à curva; o polinômio obtido foi de segunda ordem.

Conforme a Figura 3.8, que apresenta o diagrama de irradiação em azimute, nota-se que a antena apresenta uma abertura de 0,5 grau e uma forte atenuação à medida que se incrementam os valores de ângulo; portanto, devido a esta forte atenuação para pequenas variações angulares de abertura (eixo  $\eta$ ), admitiu-se que na direção de azimute não haveriam variações significativas no padrão da antena.

Assim, a equação de ganho da antena resume-se a:

$$G_0.g(\epsilon,\eta) = G_0 (-0.0072.\epsilon^2 + 0,0042\epsilon) \quad (4.1)$$

Aplicando a Equação 4.1 na Equação radar 2.30, conjuntamente com a Equação 2.28, tem-se:

$$\bar{P}_r = K \cdot \frac{\left[ G_0 \cdot (-0.0072(\theta_{i(\text{far range})} - \theta_i)^2 + 0.0042(\theta_{i(\text{far range})} - \theta_i)) \right]^2}{\left[ \frac{h}{\cos(\theta_i)} \right]^3}$$

onde:

$$K = \frac{P_t \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^0 \cdot \phi_h \cdot c \cdot T_p}{2 \cdot (4\pi)^3}$$

agrupando os termos, tem-se:

$$\bar{P}_r = K_2 \cdot \left[ -0.0072(\theta_{i(\text{far range})} - \theta_i)^2 + 0.0042(\theta_{i(\text{far range})} - \theta_i) \right]^2 \cdot \cos^3(\theta_i)$$

onde:

$$K_2 = \frac{P_t \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^0 \cdot \phi_h \cdot c \cdot T_p \cdot G_0^2}{2 \cdot (4\pi)^3 \cdot h^3} \cdot \phi$$

Utilizando a equação radar, pode-se estimar a forma como ocorre a variação da potência recebida ( $\bar{P}_r$ ) e, conseqüentemente, o decaimento do brilho da imagem. A Figura 4.9 apresenta o gráfico desse decaimento do sinal (equação radar) em função da posição na coluna da imagem, representando a direção de “range”, confrontado com a média das colunas de uma faixa homogênea da imagem teste mostrada na Figura 3.1.  $\varphi$  é uma constante experimental para transformar potência em níveis de cinza

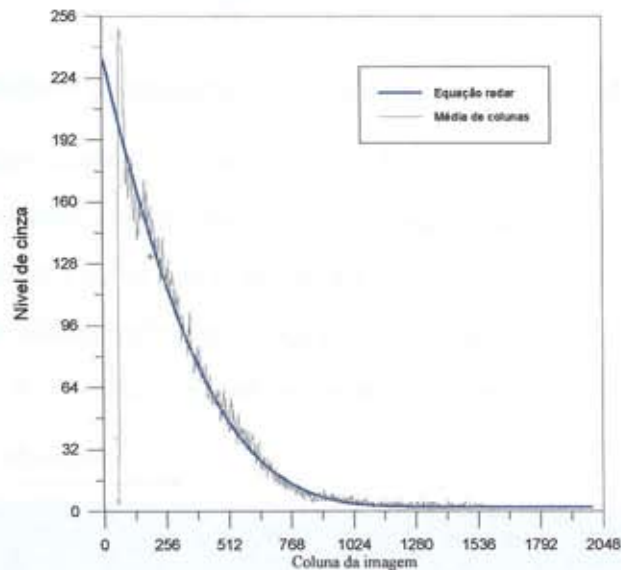


Fig. 4.9 - Variação do nível de cinza médio das colunas em função da posição.

O decaimento de brilho da imagem pode ser melhor visualizado com o modelo em três dimensões da Figura 4.10, cuja dimensão da “altura” é associada ao nível de cinza da cena. Para realizar esta visualização, utilizou-se o “software” IDL aplicado à imagem bruta da Figura 3.1.



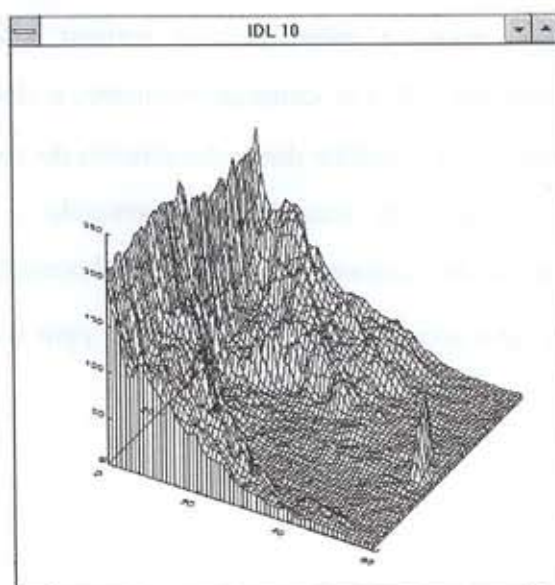


Fig. 4.10 - Modelo em três dimensões da imagem de derramamento de óleo.

Nota-se no gráfico da Figura 4.9, que a equação radar não acompanha a média das colunas da cena na região próxima ao near range (colunas 1-128), onde o sinal de retorno é muito forte, mascarando a influência dos alvos e saturando o sensor.

Aplicou-se a função de correção a partir da equação radar nas imagens das Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, resultando na imagens das Figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

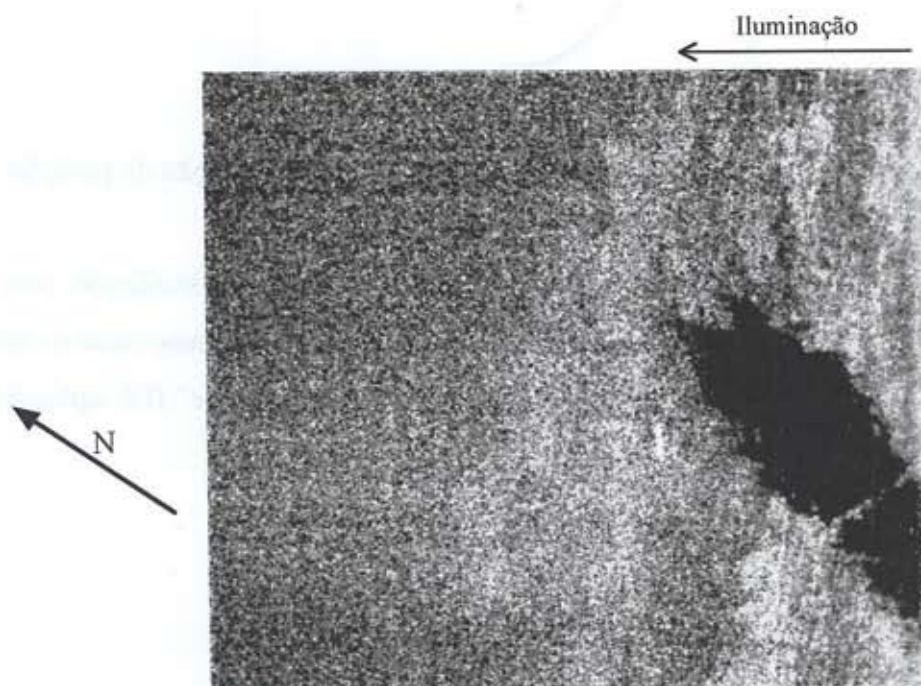


Fig. 4.11- Imagem da figura 3.1 corrigida pela equação radar



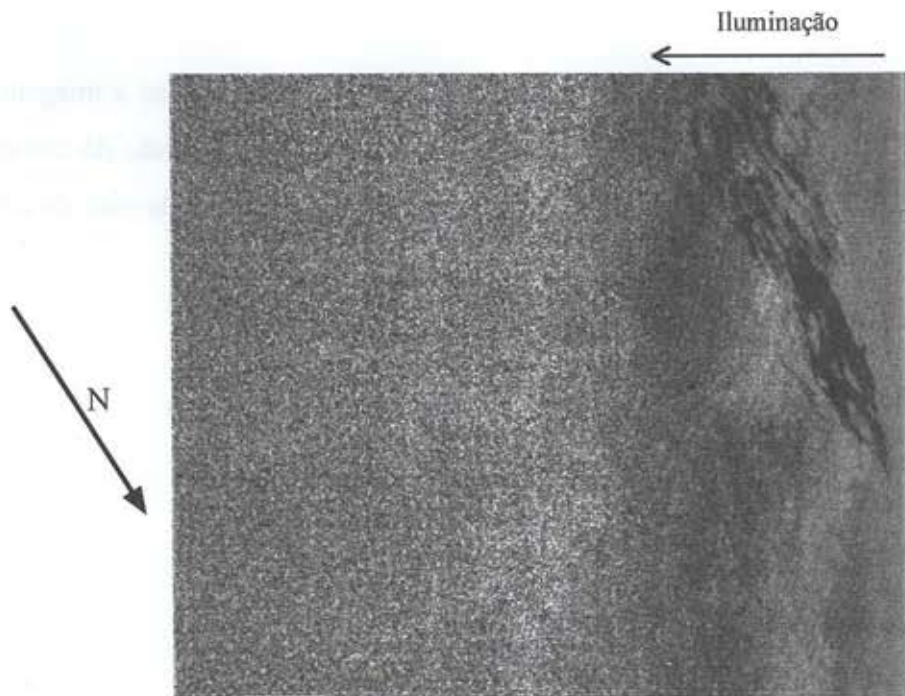


Fig. 4.12- Imagem da Figura 3.3 corrigida pela equação radar

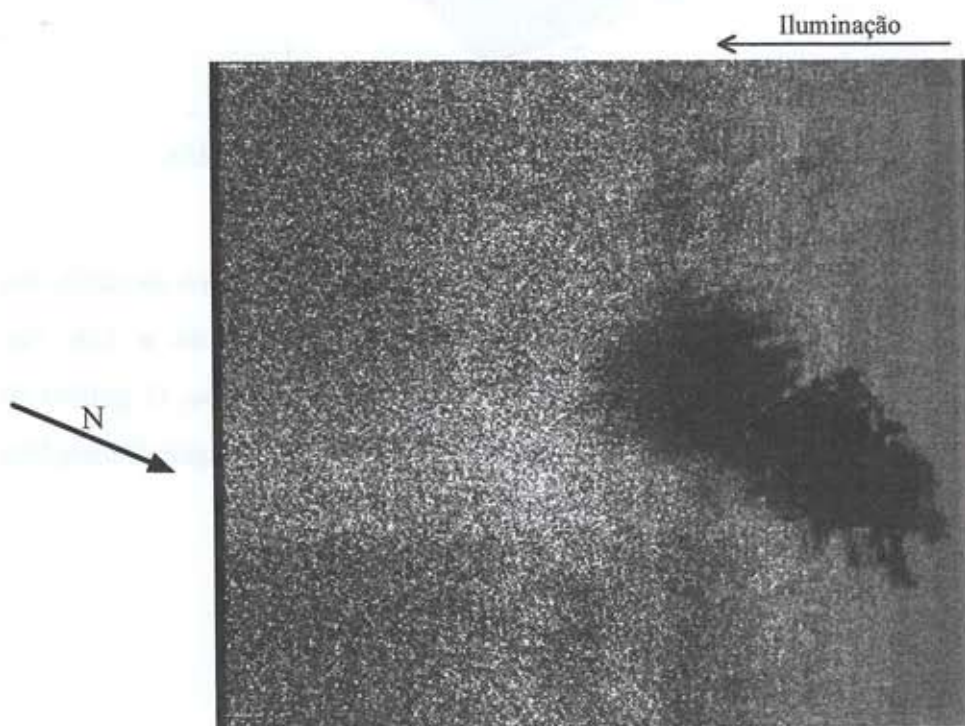


Fig. 4.13- Imagem da Figura 3.2 corrigida pela equação radar

Para analisar os resultados do método proposto, adotou-se a imagem da Figura 3.1 como referência, podendo-se desta forma, visualizar o resultado da correção pelo modelo em três dimensões, onde o nível de cinza é representado pelo eixo da altura (Figura 4.14).

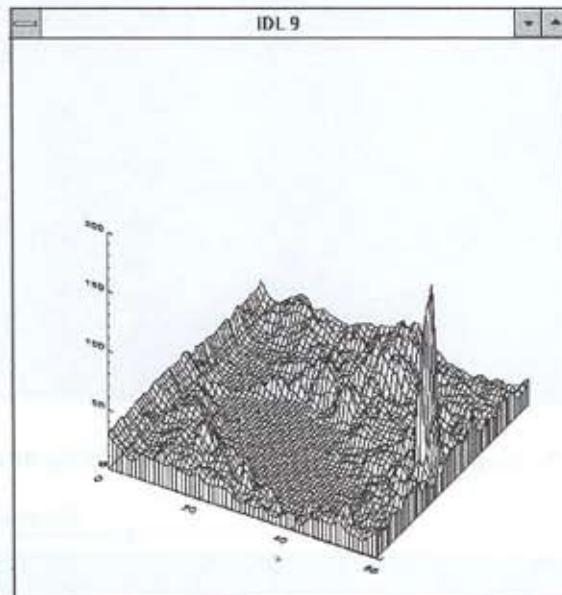


Fig. 4.14 - Modelo em tres dimensões da imagem corrigida.

Devido à equação radar não acompanhar o início do gráfico da média das colunas da imagem bruta, as primeiras colunas da imagem, entre 64 a 128, não receberam a devida correção, mantendo ainda níveis de cinza elevados. O gráfico da Figura 4.15 apresenta a comparação da média das colunas de uma imagem homogênea antes e após a correção por meio da equação radar.

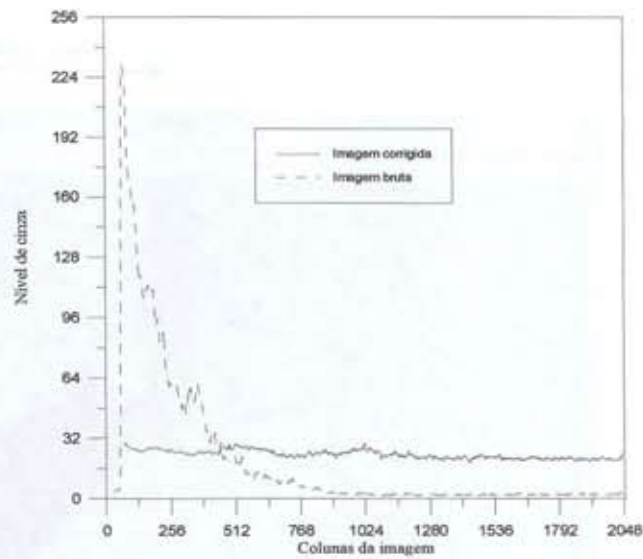


Fig. 4.15 - Variação do nível de cinza com a coluna da imagem.

Como já descrito, o programa Spring 2.0 pode ajustar uma função por um polinômio obtido a partir da média de colunas da cena, de modo a corrigir o “padrão da antena”. No caso em questão, o polinômio de menor ordem que se ajustou à média das colunas da imagem foi o de ordem 7. O gráfico da Figura 4.16 foi gerado pelo programa Spring; a linha tracejada representa a média das colunas da imagem e a contínua o polinômio ajustado.

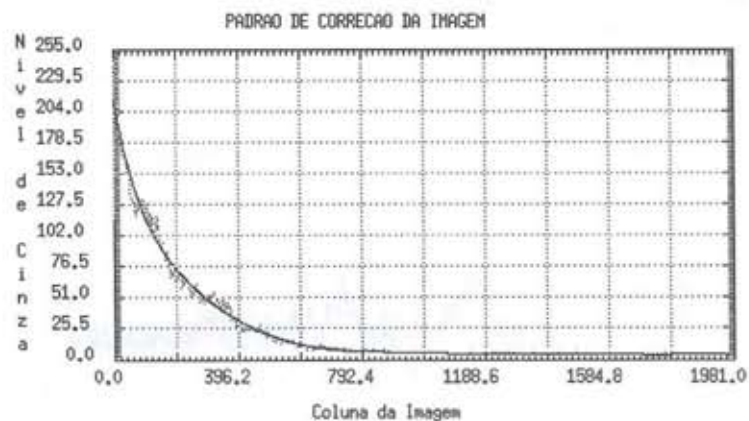


Fig. 4.16 - Média das colunas com o gráfico de correção.

Uma vez ajustado o polinômio de correção, o mesmo foi aplicado à imagem-teste, sendo o resultado observado na Figura 4.17.

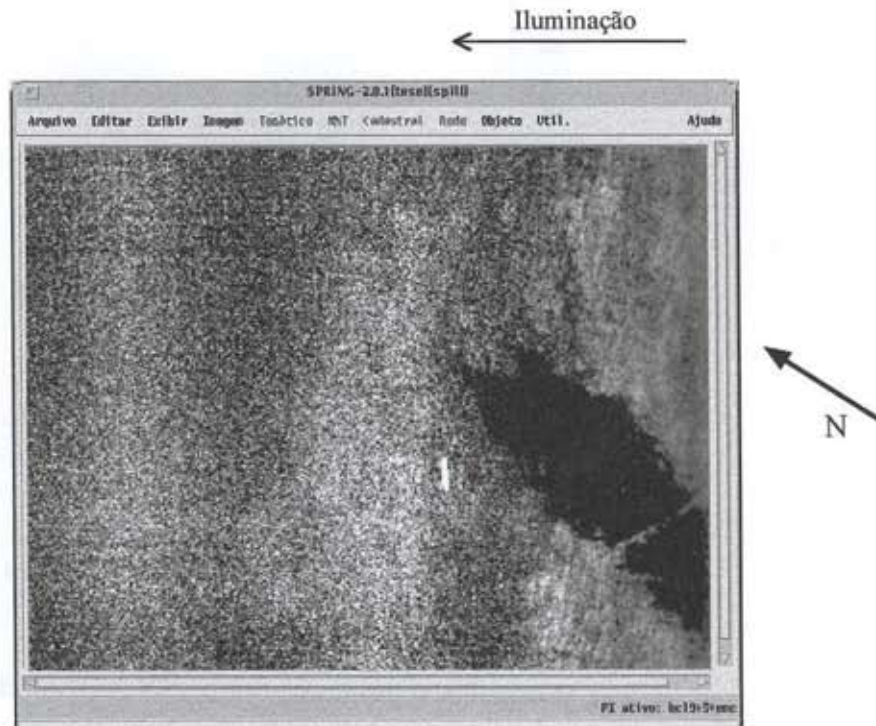


Fig. 4.17 - Imagem corrigida pelo “software” SPRING.

Realizando a média das colunas das áreas homogêneas da imagem corrigida pela equação radar e da imagem corrigida pelo SPRING, pode-se confrontar os métodos empregados. O gráfico da Figura 4.18 apresenta a média da imagem da Figura 4.11 em linha de cor vermelha e a média da imagem da Figura 4.17 em linha azul.

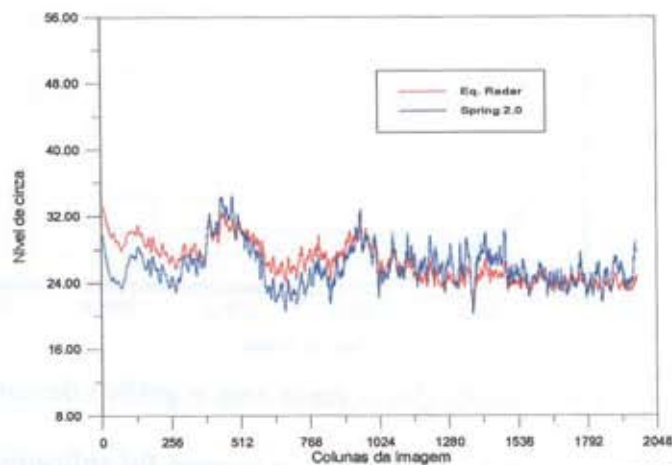


Fig. 4.18 - Média das colunas das imagens corrigidas.



Comparando os gráficos, pode-se notar que os resultados são similares; no caso em que se utilizou o SPRING, o contraste apresentou maior excursão de sinal e um valor médio mais uniforme. Para a equação radar, o gráfico da média de colunas apresentou menor excursão de sinal, ocorrendo uma pequena queda no nível médio do sinal nas colunas de maior ordem.

Em relação ao aspecto final das imagens resultantes, a correção por meio do SPRING apresentou uma faixa vertical próxima à região de “far-range”, o que não ocorreu na correção pela equação radar, que, por sua vez, apresentou uma melhor definição dos alvos.

#### 4.3 - SEGMENTAÇÃO DAS IMAGENS

Aplicando o segmentador por crescimento de regiões, disponível no “software” SPRING-2.0, nas imagens corrigidas, obtém-se a delimitação da área de derramamento de óleo. O valor de limiar de transição foi ajustado para cada imagem em particular, uma vez que as suas médias eram ligeiramente diferentes. Utilizou-se como área de aglutinação o valor de quinze pixels para ambas as imagens.

O resultado da segmentação da imagem corrigida pela equação radar é apresentado na Figura 4.19. O resultado do mesmo segmentador sobre a imagem corrigida pelo próprio SPRING é apresentada na Figura 4.20.

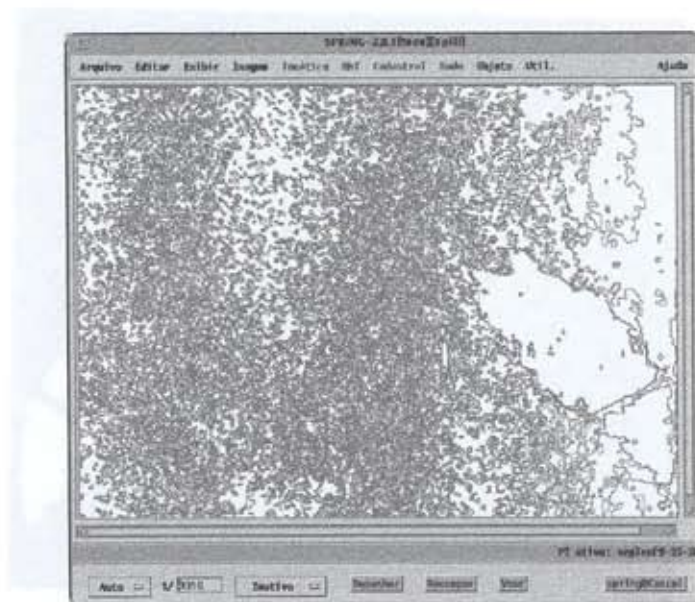


Fig. 4.19 - Segmentação da imagem corrigida pela equação radar.

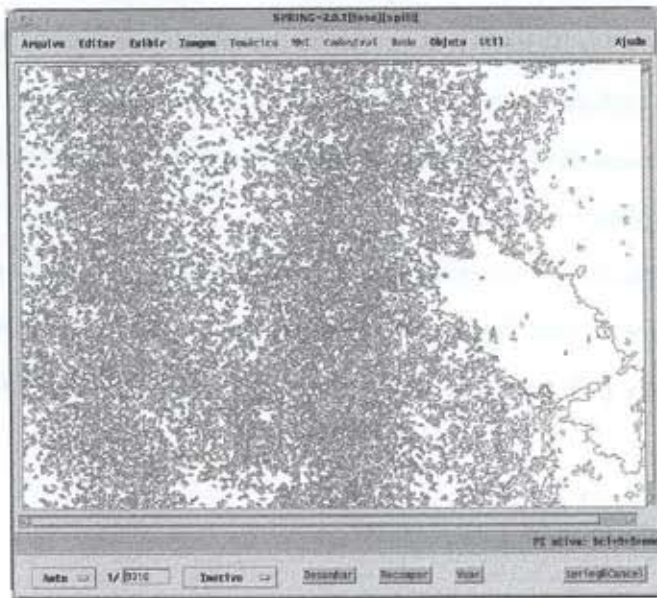


Fig. 4.20 - Segmentação da imagem corrigida pelo SPRING.

A partir das imagens segmentadas, utilizou-se um recurso do software SPRING, onde o operador atribui classes à imagem segmentada, de forma a separar os polígonos de interesse dos demais. Desta forma, isolou-se na imagem segmentada da Figura 4.19, apenas a “classe” óleo. As imagens das Figuras 4.21 e 4.22 apresentam o resultado desta operação nas imagens das Figuras 4.19 e 4.20, respectivamente.

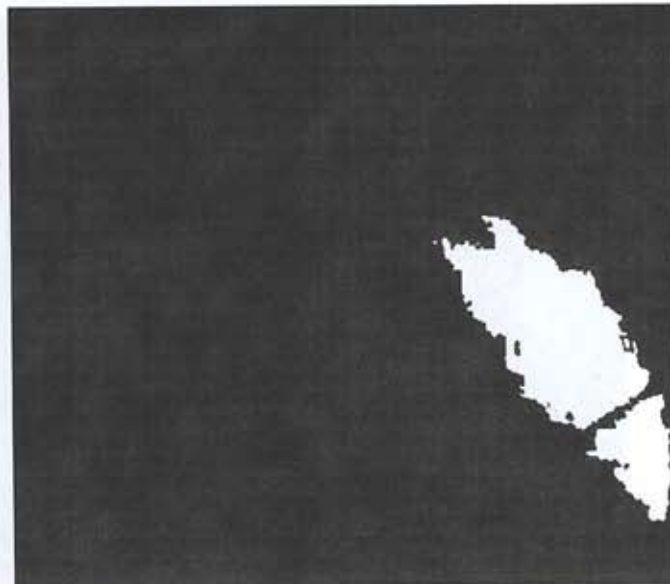


Fig. 4.21 - Imagem editada a partir da imagem da Figura 4.19.

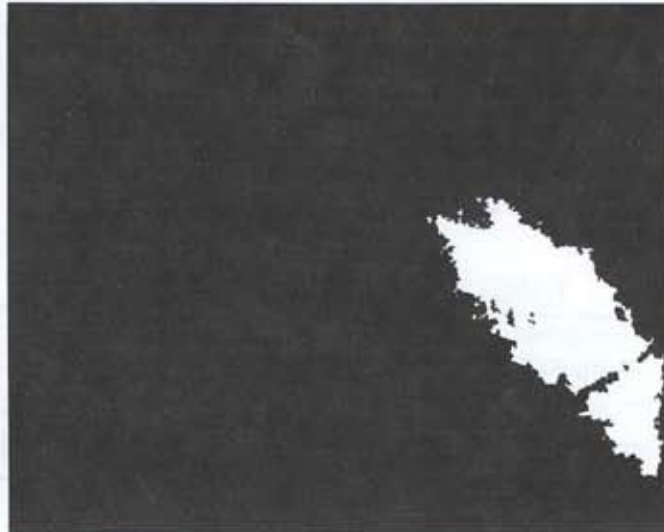


Fig. 4.22 - Imagem editada a partir da imagem da Figura 4.20.

Para a avaliação do método proposto com o disponível atualmente, foi realizada uma diferença entre as imagens segmentadas/editadas das Figuras 4.21 e 4.22 (correção pela equação radar e pelo "SPRING"). Para a realização desta operação utilizou-se o próprio "software" IDL, cuja imagem resultante é mostrada na Figura 4.23.

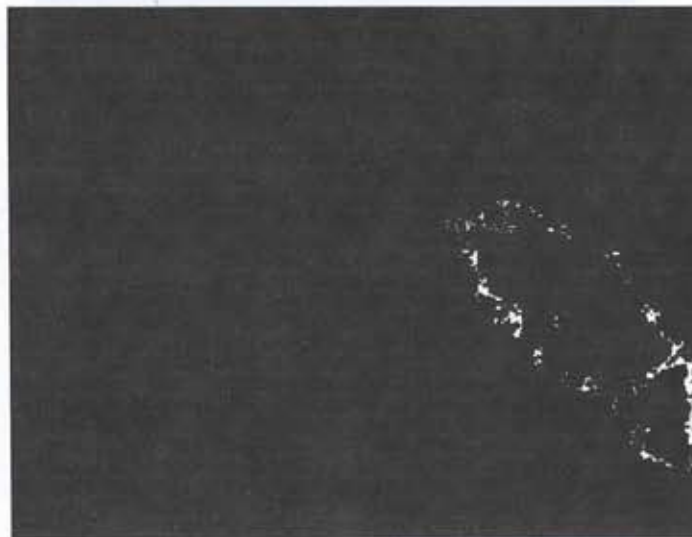


Fig. 4.23 - Imagem "diferença" gerada a partir das imagens das Figuras 4.21 e 4.22.

Após a realização da diferença entre as imagens, realizou-se a medida de área das imagens originais (IDL e SPRING), onde para cada coluna da imagem,



contabilizou-se o número de pixels e multiplicou-se pela correspondente área. A área de cada coluna é derivada da avaliação do tamanho do pixel, levando-se a sua projeção para o solo.

O resultado da medida é apresentado na Tabela 2.0, onde o percentual é calculado em relação à imagem gerada pelo software “SPRING”.

TABELA 2.0 - ÁREA DOS ALVOS

| Imagem:     | Area (m <sup>2</sup> ): | %    |
|-------------|-------------------------|------|
| “SPRING”    | 1325963,00              | -    |
| “IDL”       | 1269420,60              | 95,7 |
| “Diferença” | 56542,40                | 4,3  |

Para a correção das imagens apresentadas nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 (caso SLAR-INPE), foi necessária uma adaptação do algoritmo de correção radar, pois, como já exposto, os pixels/linha não eram os mesmos, bem como a altitude e a antena também diferiam da original. As imagens das Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 apresentam os resultados obtidos neste processo de correção radiométrica.

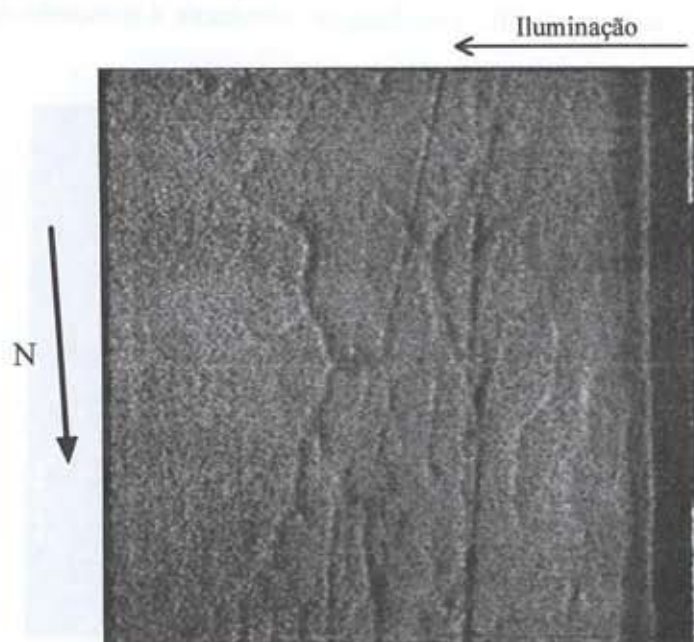


Fig. 4.24 - Imagem da Figura 3.4 corrigida pela equação radar.



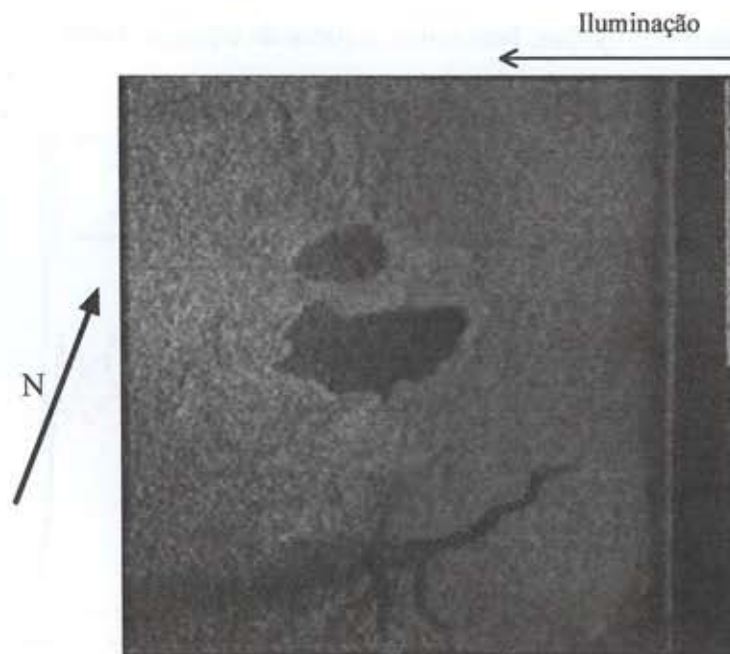


Fig. 4.25 - Imagem da Figura 3.5 corrigida pela equação radar.

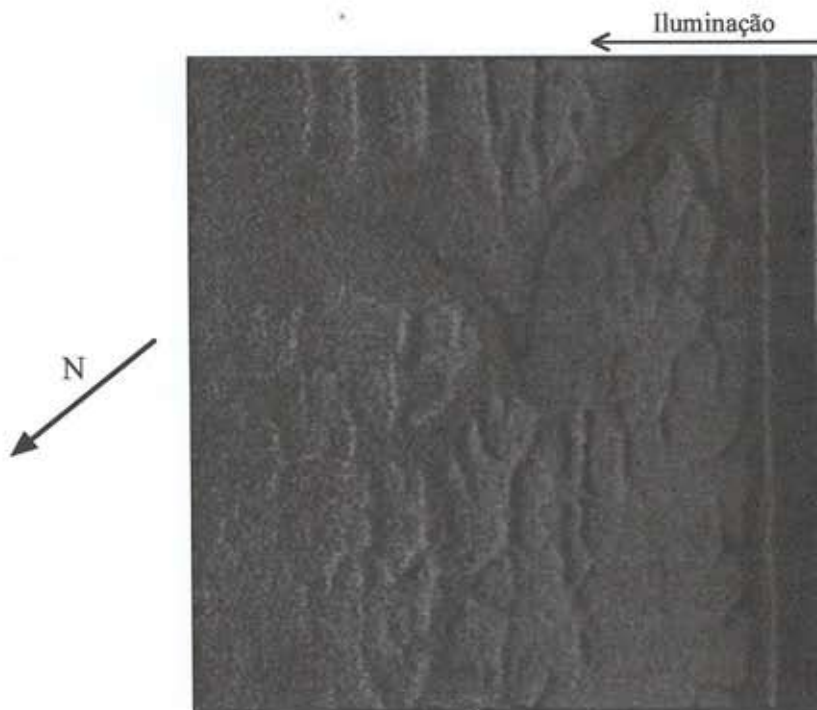


Fig. 4.26 - Imagem da Figura 3.6 corrigida pela equação radar.

Para a avaliação do resultado, realizou-se a média de colunas da imagem antes e depois da correção, optando-se por analisar o caso da correção da imagem da

Figura 4.24 por ser mais uniforme e homogênea, se comparada com as demais. A Figura 4.27 apresenta o gráfico das médias, bem como a curva da equação radar

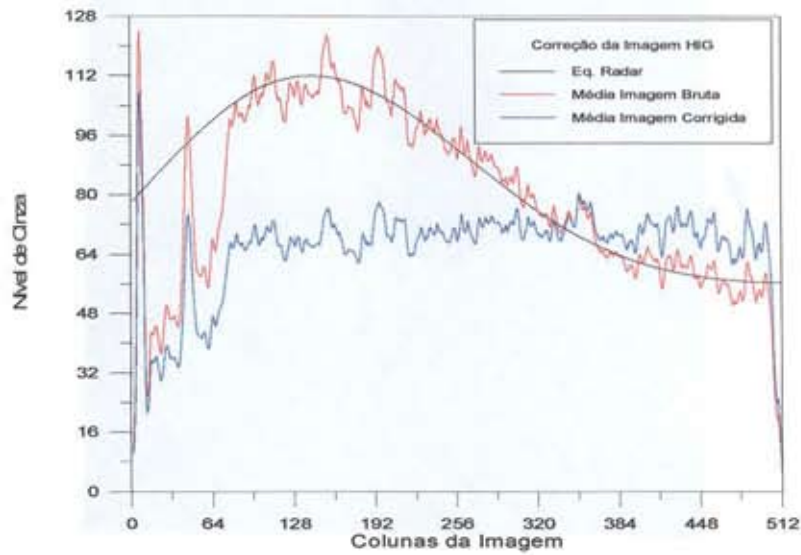


Fig. 4.27 - Média das colunas das imagens das Figuras 4.24 e 3.4.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS

Notou-se que os resultados obtidos pelo método da equação radar e pela correção polinomial foram bem próximos, denotando assim, que o método proposto é uma alternativa no processo de correção das imagens brutas, e principalmente para casos em que não se dispõe de áreas homogêneas para servir de calibração da função de correção polinomial do sistema SPRING 2.0.

Percebeu-se na segmentação da imagem corrigida pelo método proposto, que no início da faixa imageada (“near range”), aparecem mais classes discriminadas, fato não percebido pelo método polinomial, decorrente de diferentes níveis de correção aplicados. Isto se deve ao fato da equação radar não conseguir acompanhar a curva da média das colunas da imagem bruta em toda a extensão da imagem, conforme se verifica no gráfico da Figura 4.9. No restante da imagem, os resultados foram aceitáveis, podendo-se assim, utilizar a correção pela equação radar com um bom ajuste após a coluna 128 da imagem.

Utilizou-se um único tipo de segmentador (crescimento de regiões) para avaliar a capacidade das imagens corrigidas de fornecer um produto de saída. Outros segmentadores podem ser utilizados, como é o caso de um segmentador por textura, pois o ruído “Speckle” presente na imagem acarreta um número muito grande de segmentos, dificultando a separação dos alvos.

As medidas das áreas de derramamento realizadas, aparentemente se apresentaram com valores finais aceitáveis. Não foi possível confrontar os valores obtidos com os valores reais, devido ao fato de não se dispor de imagens de alvos conhecidos, ficando esta etapa para ser realizada posteriormente.

Deve-se levantar o diagrama de irradiação da antena utilizada pelo radar do INPE, pois apesar de ser uma réplica da utilizada pelo DLR, podem existir diferenças no ganho ou mesmo na distribuição da energia irradiada; assim, este procedimento poderia vir a melhorar a correção das imagens.

Neste trabalho, a ênfase foi dada na direção de um processamento “em solo”, mas uma vez que se disponha de um modelamento mais preciso, poderia ser implementado um processamento em “tempo real”, minimizando o tempo de processamento e facilitando o uso do sistema, pois assim seriam geradas imagens já corrigidas.

Alguns estudos podem ser realizados com o intuito de complementar e avaliar os trabalhos que já foram realizados. A equação radar desenvolvida para o caso particular permite inferir o valor de  $\sigma^0$ , possibilitando assim a obtenção de uma “imagem  $\sigma^0$ ”.

O presente trabalho documenta também a completa aquisição do conhecimento necessário para desenvolver, corrigir e utilizar imagens do radar de abertura real, em aplicação em Sensoriamento Remoto, particularmente na aplicação de monitoramento de desastres ambientais. Com esforço determinado, o INPE pode chegar também a desenvolver semelhante domínio na construção de radares de abertura sintética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bins, L.S.; Fonseca, L.M.G.; Erthal, G. J.; Ii, F.M. Satellite Imagery Segmentation: a region growing approach. [CD-ROM] In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8. Salvador, Bahia, 1996. **Anais São Paulo: Image Multimídia, 1996. Seção Comunicações-T205.**
- Chuvienco, E. **Fundamentos de teledetección espacial** . Madri, Rialp S.A, 1990.
- Crósta, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**, Campinas, SP, Unicamp, 1992.
- Curlander, J.C.; McDonough, R.N. **Synthetic aperture radar: systems and signal processing**. New York, NY, John Wiley & Sons, 1991.
- Dallemand, J.F.; Lichtenegger, J.; Raney, R.K.; Schumann, R. **Radar imagery: Theory and interpretation lecture notes**. Rome, FAO, 1993. 103p.
- de Loor, G. P. Introduction and some aspects of image formation in radar remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, 1(1):3-18, June, 1983.
- Eaves, L. J.; Reedy, E. K. **Principles of modern radar**, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1987.
- Fernandes, D.; Menchik, M.T.M. Simulação de imagens de radar de vigilância embarcado em aeronave. In: Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens 7. (SIBGRAPI-94), Curitiba, 1994. **Anais Curitiba, SBC/UFPR, 1994. p. 235-239.**
- Gama, F.F.; Interface de digitalização de imagens provenientes do radar de abertura real-INPE/DLR, In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, 7. Curitiba, Paraná, 1993. Apresentação oral.
- Gonzalez, R.C.; Woods R.E. **Digital Image Processing**, Reading, MA., Addison Wesley, 1992.
- Horn, R.; Moreira, A. **The Archimedes II - Experiment on oil slick detection over the north sea**. Wessling, DFVLR, 1988. 36p.
- Hovanessian, S.A. **Synthetic array and imaging radars**, Washington, Artech House, MA, 1980.

- Hsu, P.H. **Análise de Fourier**, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editôra Ltda, 1973.
- International Telephone and Telegraph Corporation (ITT) **Reference data for radio engineers**, 5.ed. Indianapolis, Howard W. Sams, 1968.
- Jasik, H. **Antenna engineering handbook**, New York, NY, McGraw-Hill Book, 1961.
- Kingsley, S.; Quegan, S. **Understanding radar systems**, Berkshire, McGraw-Hill Book, 1992.
- Krul, L.; de Loor, G. P. Experiments with microwave sensors. **International Journal of Remote Sensing**, **13**(6-7):1201-1216, May, 1992.
- Krul, L. Introduction to the use of radar in remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, **1**(1):159-178, June, 1983.
- Leberl, F.W. Photometric aspects of remote sensing with imaging radar. **Remote Sensing Reviews**, **1**(1):71-158, June, 1983.
- Lo, Y.T.; Lee S.W. **Antena handbook**, New York., NY, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- Moreira, J.R. **Compensação de movimento em tempo real de radares de abertura sintética em aeronaves de pequeno porte**, São José dos Campos, Instituto de Atividades Espaciais-Centro Técnico Aeroespacial, Fev., 1984.
- Niblack, W. **An Introduction to Digital Image Processing**, London, UK, Prentice-Hall, 1986.
- Pratt, W.K. **Digital Image Processing**, New York, NY, John Wiley-Interscience, 1978.
- Proakis, J.G.; Manolakis D.G. **Digital signal processing -Principles, Algorithms and Applications**, 2.ed., New York, NY, Macmillan, 1992.
- Reeves, G.R.; Anson, A.; Landen, D. **Manual of remote sensing**, Falls Church, Va, American Society of Photogrametry, 1975.
- Skolnik; M.I. **Radar Handbook**, 2.ed., New York, NY, McGraw Hill, 1990.
- Spiegel, M. R. **Estatística**, 2.ed., São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1984.
- Steinberg, B.D.; Subbaram, H.M. **Microwave Imaging Techniques**, New York, NY, John Wiley, 1991.

Trevett J.W. **Imaging radar for resources surveys**, London, Cambridge University Press, 1986.

Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive: Microwave remote sensing fundamentals and radiometry**. Norwood, MA, Artech House, 1981, v 1.

Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive: Radar remote sensing and surface scattering and emission theory**. Norwood, MA, Artech House, 1986, v. 2

Ulaby, F.T.; Dobson, M.C. **Handbook of radar scattering statistics for terrain**. Norwood, MA, Artech House, 1989.

Witte, F. **Archimedes Project - Remote Sensing of Oil Spills**, Oberpfaffenhofen, DFVLR, 1985, 27p.

Witte, F. **Diagramas de irradiação da antena do SLAR-X**, Oberpfaffenhofen, DLR, 1992, Comunicação pessoal.





**APÊNDICE -A****TABELA A.1 - ESPECIFICAÇÕES DO SLAR- INPE/DLR**

|   | <b>DLR</b>                                       | <b>INPE/DLR</b>                                  |
|---|--|--|
| Altitude da aeronave (h)  | 900 - 1050 m                                     | 1000 m   |
| PRF gravada   | 21,53Hz  | 21,53Hz  |
| Largura de pulso  | 50n-60ns   | 60 ns  |
| Frequência da portadora   | 9,39GHz  | 9,39GHz  |
| Comprimento da antena   | 3,6 m  | 3,6 m  |
| Ganho da antena   | 29,5 dB  | 29,5 dB  |
| Ângulo de abertura da antena                                    | ( $\phi_a$ ) : 9,25m rd<br>( $\phi_v$ ) : 45-50° | ( $\phi_a$ ) : 9,25m rd<br>( $\phi_v$ ) : 45-50° |
| Ângulo de depressão   | 15° a 20°  | 20°  |
| Velocidade da aeronave  | 46,25m/s   | 60,0 m/s   |
| Distância do primeiro pixel no solo                             | 400-500 m  | 400-500 m  |
| Faixa imageada em "slant range"                                 | 6144 m   | 6144m  |
| Potência de pico  | 20 KWatts  | 9KWatts  |
| Figura de ruído do receptor                                     | 8,6 dB   | 8,6 dB   |
| Frequência central do amplificador de "FI"                      | 70 Mhz   | 70 Mhz   |
| Range dinâmico do amplificador de frequência intermediária (FI) | -80 a 0 dBm                                      | -80 a 0 dBm                                      |
| Banda passante  | 34 MhZ   | 34 MhZ   |



**APÊNDICE -B**  
**SISTEMA SLAR - DLR**

O DLR utiliza o SLAR-RAR banda X, instalado em aeronaves de pequeno porte como o Cessna C207 e o Cessna C310, bem como em seu Dornier, cuja antena transmissora/receptora é instalada na parte inferior da fuselagem. A Figura B.1 apresenta a aeronave C310 e a Figura B.2 a aeronave Dornier, com a antena afixada em seu bojo.



Fig. B.1 - Aeronave C310 com a antena instalada.  
FONTE: Modificada de Witte (1985), p.12.



Fig. B.2 - Aeronave Dornier com a antena instalada.

O diagrama em blocos da Figura B.3 mostra o princípio de armazenamento dos dados em vô e a conversão para as fitas tipo CCT (Computer Compatible Tape). Os sinais de vídeo provenientes da saída do receptor são convertidos para a forma digital por meio de um conversor A/D (análogo-digital) em uma taxa de 50MHz, com uma resolução de 8 bits, em seguida os dados são estocados em um Buffer Formatador, que opera com 2048 “palavras” de 8 bits.

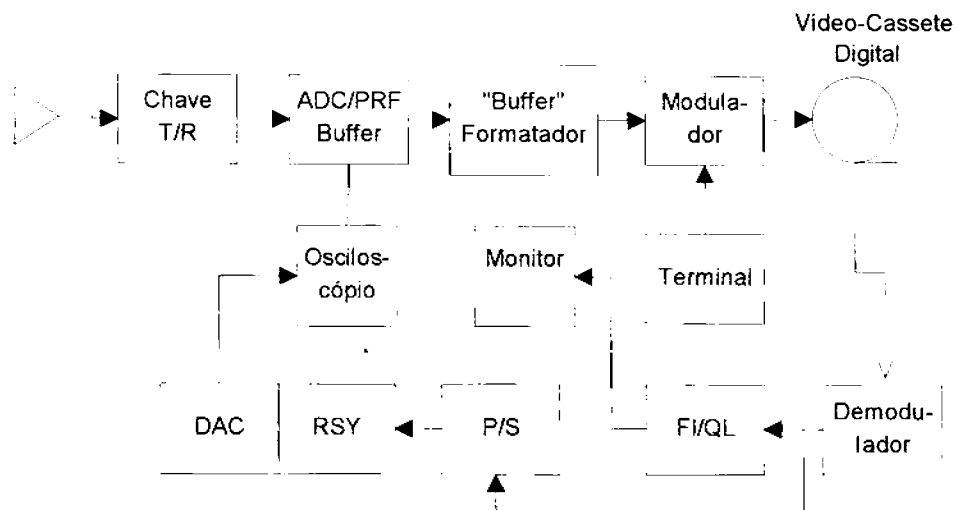


Fig B.3 - Diagrama em blocos do sistema - segmento aerotransportado.  
 FONTE : Modificada de Witte (1985), p.10.

Os sinais então passam pela unidade do “Modulador”, que converte as informações para um “pseudo sinal de vídeo” que, por sua vez, são gravados em um vídeo cassete padrão U-MATIC/profissional. Dados adicionais como posição, data, hora, dados de planilha de vô podem ser inseridos às imagens por meio de um terminal acoplado ao modulador, através de uma interface tipo “V24”, (Witte, 1985).

Os sinais modulados que são injetados no vídeo-cassete saem por uma saída especial, que demodula o sinal de entrada. Esta saída é utilizada para alimentar a unidade “FI/QL” (Quick-Look), permitindo ao operador visualizar as imagens geradas pelo radar em tempo real em um monitor.

A unidade P/S realiza a função de transformar o sinal digital de 8 bits paralelos para 8 bits seriais, em seguida estes dados seguem para um sincronizador de quadros (RSY), que sincroniza as informações de linha com os pulsos de PRF. A unidade conversora de digital para analógica (DAC), transforma os sinais digitais em analógicos, para serem visualizados em um osciloscópio (Witte, 1985). A Figura B.4 apresenta a montagem do sistema no interior da aeronave Cessna C310.

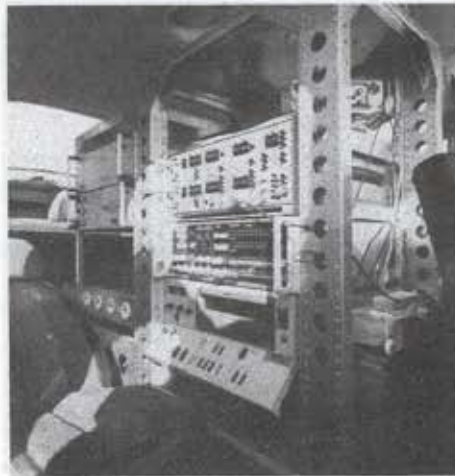


Fig B.4 - "Rack" do sistema instalado.

FONTE : Modificada de Witte (1985), p.12.

O diagrama em blocos da Figura B.5 mostra o segmento de solo, que compreende a restauração dos dados de vôo. Os dados são lidos pelo vídeo-cassete de solo, e em seguida os sinais são processados por demodulador, que gera três saídas. A primeira saída combinada com uma interface "V24" retira e apresenta as informações de vôo que o operador inseriu durante a missão. A segunda saída alimenta um "Quick Look", que permite visualizar as imagens armazenadas em um monitor de vídeo. A terceira saída de dados modulados passa por uma unidade de demodulação acoplada com uma interface DMA ("Direct Memory Access") que permite a comunicação com um computador LSI-11, bem como o tratamento e gravação em fitas CCT (Witte, 1985).

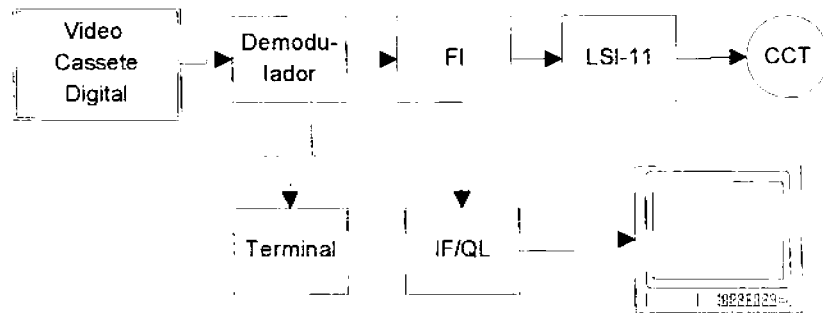


Fig B.5 - Diagrama em blocos do sistema - segmento solo.

FONTE : Modificado de Witte (1985), p.10.

Com as informações do Apêndice A, nota-se que a frequência de amostragem aplicada ao sistema (50Mhz), limitou o sistema em uma resolução espectral de imagens de até 25Mhz; isto se deve à Teoria da Amostragem que permite realizar esta avaliação (Pratt, 1978).

Analisando com mais detalhes o “Front End”, nota-se que existem vários subitens que concorrem para a definição da resposta em frequência do sistema de forma a interferir diretamente na resolução da imagem.

A antena recebe os ecos provenientes dos alvos que, por sua vez, foram iluminados por um sinal gerado por uma válvula Magnetron; para que não haja interferência entre os sinais transmitidos e os ecos recebidos é utilizada uma chave T/R (transmit/receive). Os sinais recebidos são, portanto, conduzidos para um amplificador de faixa de passagem espectral muito larga, e em seguida é aplicado um circuito misturador de frequências (“Mixer”) conjuntamente com um sinal estável chamado frequência de batimento; no caso específico foi utilizada 50Mhz, que causa o primeiro batimento de frequência.

Os sinais resultantes passam por um filtro passa-faixa, que limita a máxima frequência do sinal de vídeo, os sinais são reconstituídos, por sua vez, por um detetor de envoltória, obtendo o sinal de vídeo que será digitalizado pelo conversor A/D nas etapas posteriores. O diagrama da Figura B.6 apresenta os detalhes do “Front End” do radar INPE/DLR.

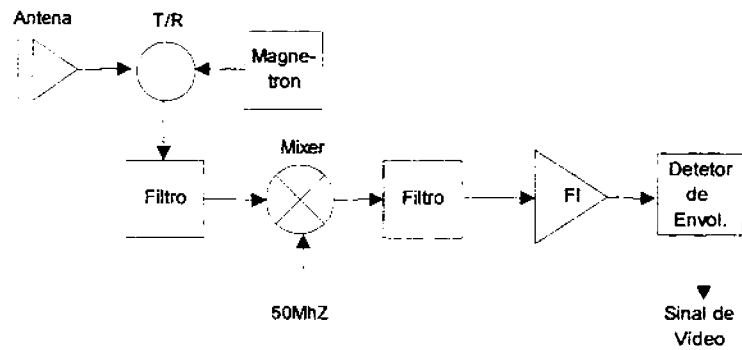


Fig B.6 - Diagrama em blocos do "Front End".

Os sinais recebidos passam por um filtro de FI, com comportamento passa-faixa, que no caso particular possui uma largura de faixa de 34Mhz.





**APÊNDICE -C**  
**PRINCIPAIS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS**

**TESTCOR.PRO**

```
f=ftarr(100)
;#####
;   Teste de Correlacao
;#####
;seleciona janela 0 com tamanho de 512 linhas x 128 colunas
window, XSIZE=512, YSIZE=128, 0

;abrindo imagem corner1 e associando a file 1
openr,1,'corner2.rar'

a= assoc(1,bytarr(512,128))
corner2=a(0)
close,1
aux=corner2(100:228,1:125)

M=TOTAL(aux)/N_ELEMENTS(aux)
aux=aux-M

window,2

result=FFT(FFT(AUX,-1)*CONJ(FFT(AUX,-1)),1)
      result=result/(max(result,i))
plot, result(0:20)

window,3
      plot,result(0:20)

oplot,(RESULT(0,0:20))
window,9
      plot,result(0:60)

end
```

RADI.PRO

```

; #####
; Programa de correcao radiometrica - V.: 1.0
; #####

; Abre janela IDL 1 para o grafico da curva de correcao.
window, 1

; "For" para colunas de 300 a 2048, com passo de 1 na equacao de correcao.
f1=fltarr(2048)
for i=0,2047 do begin

c=acos(975/(5043+(3*i)))

;funcao correcao
f1(i) = [(((((-0.0072*(72.5-c)^2)+(0.0042*(72.5-c))^2)*((cos(0.01745*c))^3)))]

endfor

; plotando de f1, janela 1
plot,f1, Color=5, Background=220, $
XTITLE = 'COLUNAS', $
YTITLE = 'NIVEL DE CORRECAO', $
YRANGE=[0,255]

; Abre janela IDL 2 para uma parte da imagem bruta.
window, XSIZE=512, YSIZE=512, 2

; abrindo imagem e associando a variavel 'f1'.
openr,1,'/home/fabio/ima_3'

; definicao da variavel "f2" = 2048x1024
f2=bytarr(2048,1024)
readu,1,f2
close,1

!order=1

f5=BYTE(congrid(f2,512,512))

; visualizacao o array "f5"
tv,f5

sum=fltarr(2048)

```

```

; "For" para zerar "sum"
for i=0,2047 do begin

    sum(i)=0.

endfor

; "For" para fazer medias das colunas 0->300
for i=0,2047 do begin

    for j=0,299 do begin
        sum(i)=sum(i)+f2(i,j)
    endfor

endfor
sum=sum/300.

window,10

; Plotando a media das colunas na janela window=1
plot,sum, Color=0, Background=220

!order=1

;Converte a imagem f2/byte em f3/float.
f3=fltarr(2048,1024)
f3=f2*1.

; Zera as colunas de f2 de 0 a 70. Alvos oceanicos
f3(0:70,*)=0.

; -----
; "For" de correcao da imagem
; -----

; Para a cena toda (coluna = 0->1024)
for j=0,1023 do begin

;Alvos oceanicos
for i=0,2047 do f3(i,j)=f3(i,j)/f1(i)

endfor

f3=BYTE(f3)
; "For" para fazer medias das colunas

sum2=fltarr(2048)

```

```
; "For" para zerar "sum2"
for i=0,2047 do begin

    sum2(i)=0.

endfor

for i=0,2047 do begin

    for j=0,299 do begin
        sum2(i)=sum2(i)+f3(i,j)
    endfor

endfor

sum2=sum2/300.

window,11

; Plotando a media das colunas
plot,sum2, Color=0, Background=220

; plotando de f1, janela 11
oplot,f1, Color=0

; plotando de f9, janela 11
oplot,f9, Color=0

; plotando SUM , na janela 11
oplot,sum, Color=0

; Abre janela IDL 3 para a imagem corrigida.
window, XSIZE=512, YSIZE=512, 3

f6=congrid(f3,512,512)

tv,f6

; fechando file 1
close,1
close,2
end
```

MEDE.PRO

```

; Device para nao haver corte nas janelas
device, retain=2

#####
;         mede.PRO ->> Versao do olha.PRO

;>>> Medida de áreas da imagem RADIM <<<

;OBS: idl_oil.dat -> segmentacao da imagem corrigida pelo IDL
;   spr_oil.dat -> segmentacao da imagem corrigida pelo SPRING
;
; (Rotinas inativas :Erosao/dilatacao,saida para arquivo TIFF,
;         Ajuste brilho/contraste
;         Data: 30-10-96
#####

;abrindo imagem "ima_1" e associando a file "1"
; openr,1,'idl\user_con\fabio\slar1.dat'

openr,1,'/home/fabio/idl/dutra/spr_oil.dat'

; imagem total de 2048x1402 (obs:Se usar REBIN ->multiplos de 1024)
a=bytarr(1981,1400,/NOZERO)

;le a imagem "1" para o vetor "a"
readu,1,a
close,1

; Invertendo matriz
!order=1
; Binarizando a
a=a ne 0b

; abre uma janela IDL 1 (imagem SPRING) com tamanho de 512 linhas x 512 colunas
window, XSIZE=512, YSIZE=512, 1

; Reamostra a imagem (necessita que a imagem seja multiplo de 2->rebin)

c=(congrid(a,512,512))

; visualizando c

tv,c*255

; ----->>> Salvando c para arquivo sprin.tif <<<-----
TIFF_WRITE,'sprin.tif',(c*255)
; fechando file 1

```

```

close,l
; _____

openr,l,'/home/fabio/idl/dutra/idl_oil.dat'
; Imagem total de 2048x1402 (obs:Se usar REBIN ->multiplos de 1024)
Y=bytarr(1981,1400,NOZERO)

;Le a imagem "1" para o vetor "a"
readu,l,y
close,l
!order=1

; Binarizando y
y=y ne 0b

; Abre uma janela IDL 2 (imagem IDL) com tamanho de 512 linhas x 512 colunas
window, XSIZE=512, YSIZE=512, 2

; Reamostra a imagem (necessita que a imagem seja multiplo de 2->rebin)

z=(congrid(y,512,512))

; visualizando z
;tvsci, z <50
tv,z*255
close,l

; ----->>> Salvando z para arquivo idl.tif <<<-----
TIFF_WRITE,'idl.tif',(z*255)
; fechando file 1
close,l

; _____

;d=fix(y)-a
; Modulo !!!
;d=d>(-d)

; Diferenca das imagens
d=y ne a

sd=replicate(1,3,3)
;d=erode(d,sd)
d=dilate(erode(d,sd),sd)

; Abre uma janela IDL 4 (imagem DIFERENCA) com tamanho de 512 linhas x 512 colunas
window, XSIZE=512, YSIZE=512, 4

```

```

; Reamostra a imagem (necessita que a imagem seja multiplo de 2->rebin)

e=(congrid(d,512,512))

; visualizando z
;tvsc1, z <50
tv,e*255

; ----->>> Salvando e para arquivo dif.tif <<<-----
TIFF_WRITE,'dif.tif',(e*255)
; fechando file 1
close,1

#####
; Funcao que descreve a variacao da area pela coluna da imagem

fl=ftarr(1981)

; "For" para colunas, com passo de 1 na equacao de correcao.
for i=0,1980 do begin

; Funcao descritiva:
;c=ftarr(1981)

c=(7587.-(3*i))

fl(i)=[(6.45*c)/(sqrt(((c)^2)+950625))]

endfor

; Abre janela IDL 6 para o grafico da curva de correcao.
window, 6

;plotando de fl, janela 6
plot,fl

; tempa = area imagem Spring
tempa=total(total(a ne 0,2,/DOUBLE)*fl)

print,tempa

; tempy = area imagem IDL
tempy=total(total(y ne 0,2,/DOUBLE)*fl)

print,tempy

; tempd = area imagem Diferenca
tempd=total(total(d ne 0,2,/DOUBLE)*fl)

```

```
print,tempd
```

```
; Finalizacao do programa  
end
```



**APÊNDICE - D**

W 59° 45'  
S 3° 00'

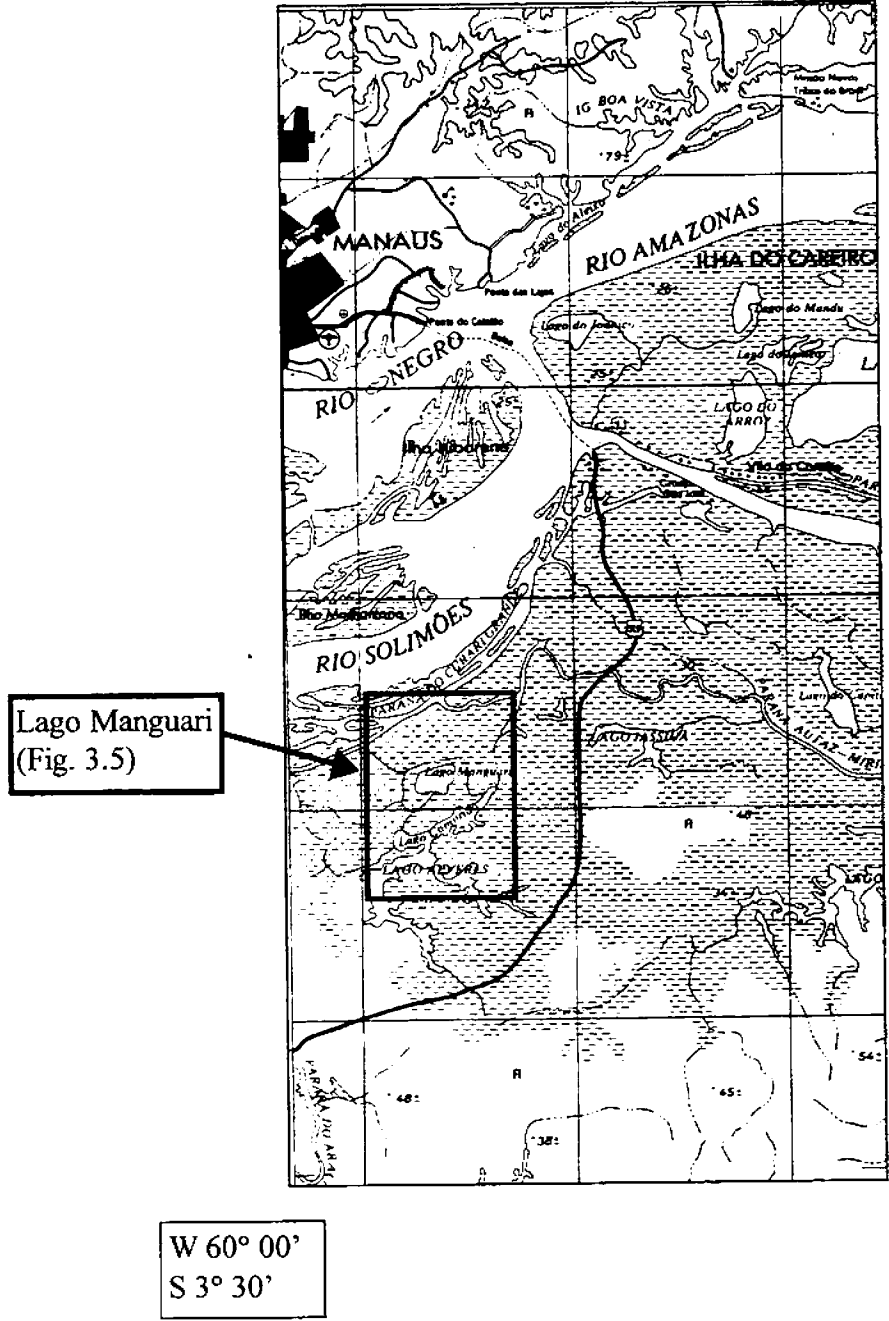


Fig. D.1 - Localização do Lago Manguari-AM.  
FONTE: Carta IBGE, Folha SA.21'-Y-C/MIR-116.

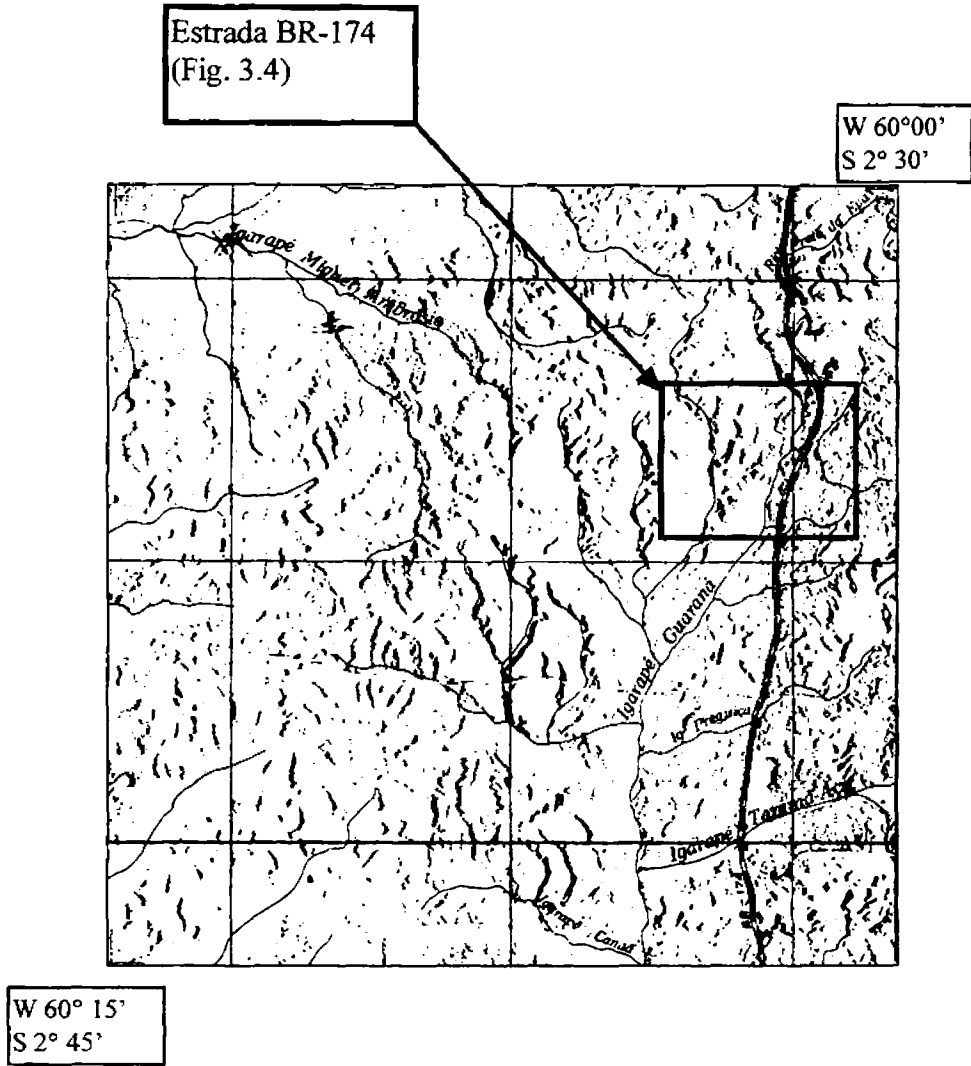


Fig. D.2 - Localização da estrada BR-174.

FONTE: Carta Imagem de Radar- SA.20-Z-B (Novo Airão).

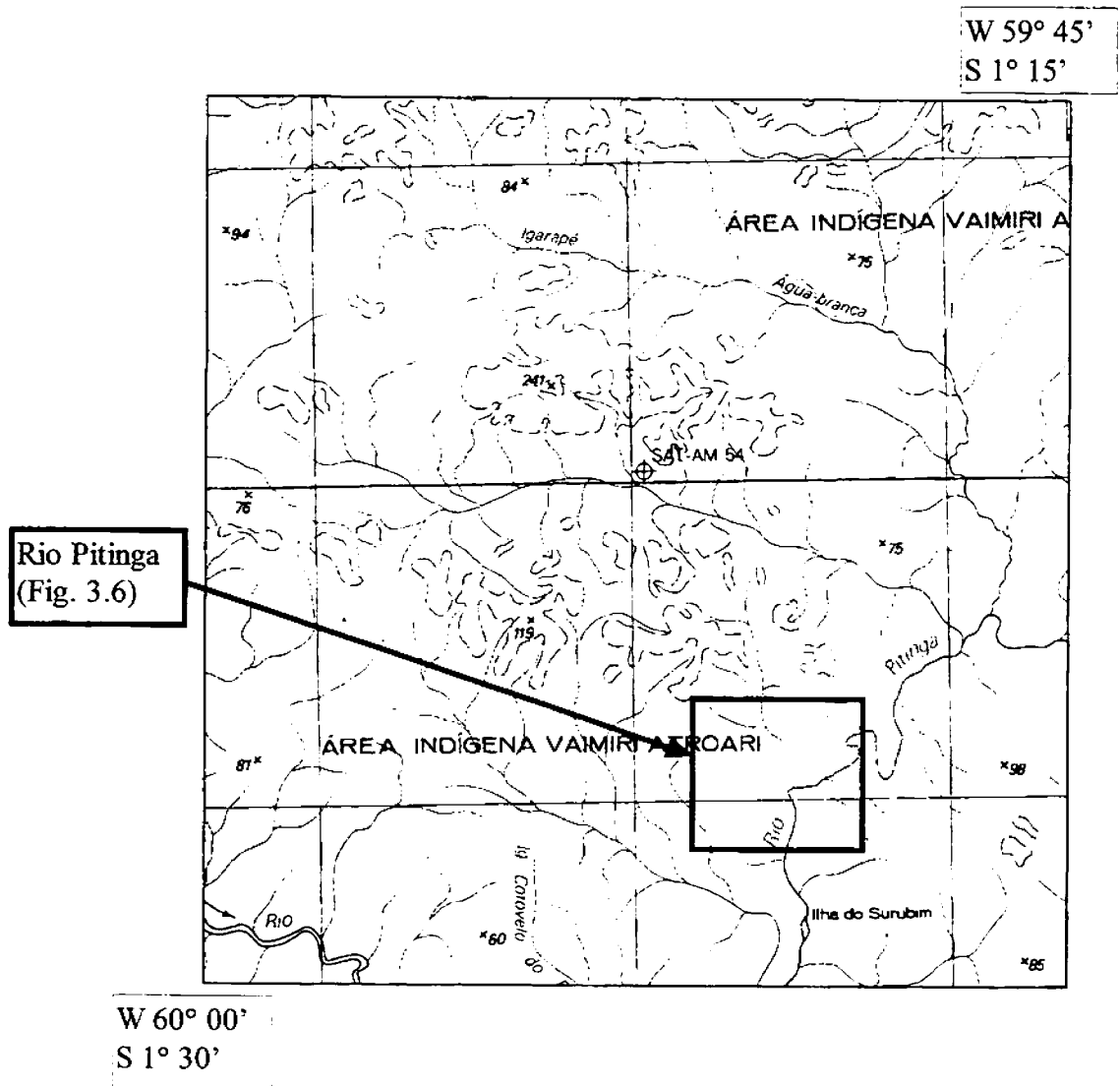


Fig. D.3 - Localização do Rio Pitinga.

FONTE: Carta IBGE, Folha SA.21-V-C/MIR-77

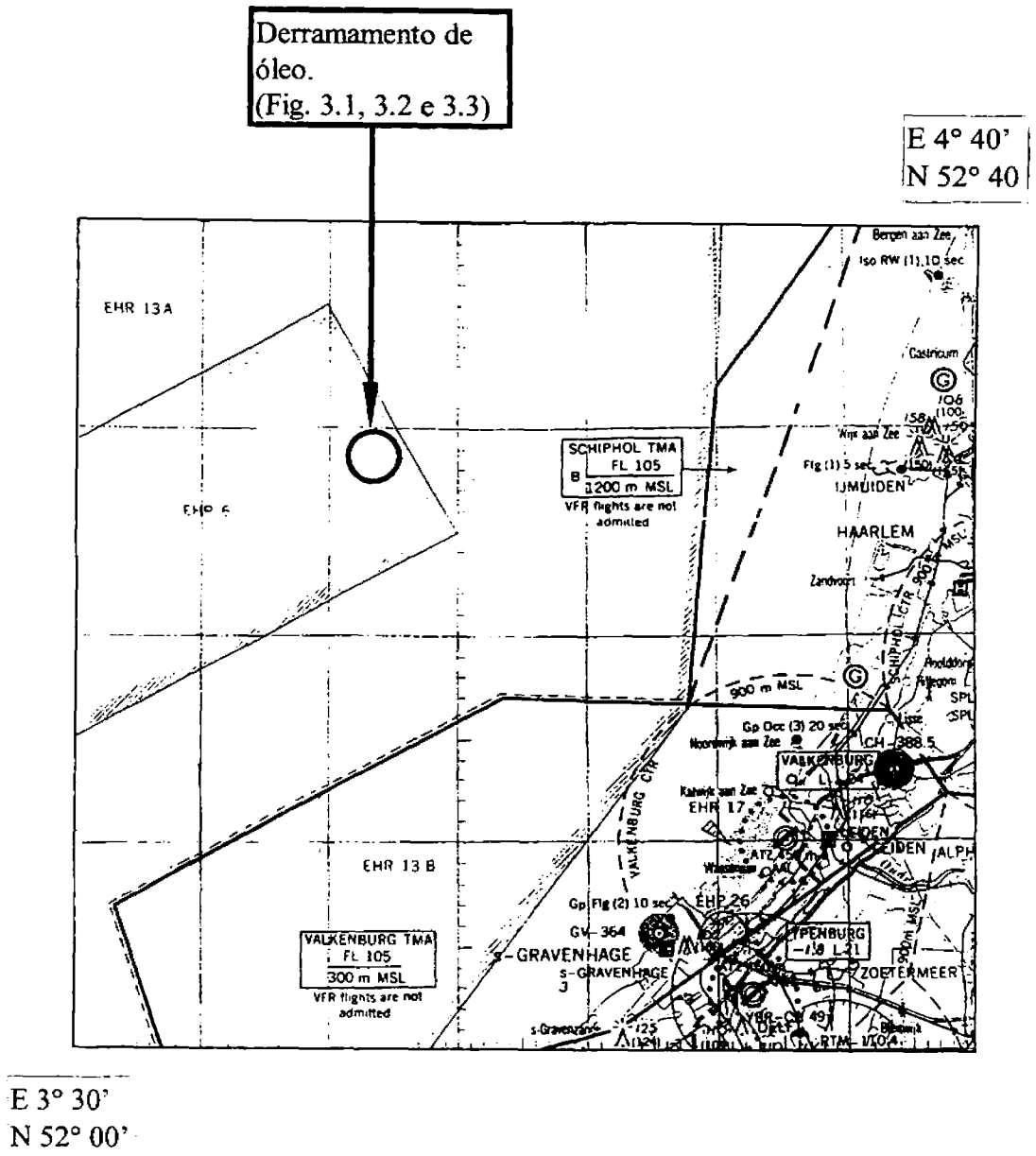


Fig. D.4 - Localização da área de derramamento de óleo, Mar do Norte /Holanda  
 FONTE: Modificada de Witte (1992), p. 27.