



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-5581-TDI/544

**ANÁLISE COMPARATIVA DE IMAGENS MULTISSENSORES  
(TM / LANDSAT E SAR / ERS-1) E MULTITEMPORAIS,  
NA REGIÃO DE GUAÍRA, SP**

**Darcton Policarpo Damião**

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelo Dr. Hermann Johann Heinrich Kux,  
aprovada em fevereiro de 1994.

**INPE**  
São José dos Campos  
Abril de 1994

528.871

DAMIÃO, P.D.

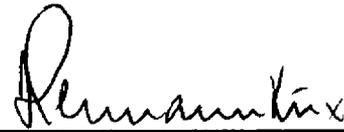
Análise comparativa de imagens multissensores (TM/Landsat e SAR/ERS-1) e multitemporais na região de Guaira, SP. -- Darcton Policarpo Damião. -- São José dos Campos : INPE, 1994.

120p. - (INPE-5581-TDI/544)

1. Imagens de satélites. 2. SAR. 3.ERS-1. I. Título.

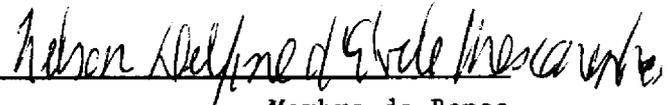
Aprovada pela Banca Examinadora  
em cumprimento a requisito exigido  
para a obtenção do Título de Mestre  
em Sensoriamento Remoto

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux



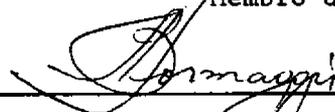
Orientador/Presidente

Dr. Nelson Delfino d'Ávila Mascarenhas



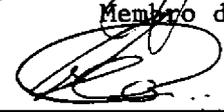
Membro da Banca

Dr. Antonio Roberto Formaggio



Membro da Banca

Dr. Luciano Vieira Dutra



Membro da Banca

Dr. David Fernandes



Membro da Banca  
- Convidado -

Candidato: Darcton Policarpo Damião

São José dos Campos, 23 de fevereiro de 1994



## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

*Aos meus pais, Damião e Rita,*  
pela dedicação com que motivaram os meus passos desde muito cedo;

*À minha esposa, Cláudia,*  
pelo amor e afeto com os quais ilumina a nossa relação;

*Aos meus filhos, Alexandre, André Luiz e Ana Luiza,*  
pelas privações do convívio tão desejado e necessário.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelos conhecimentos a mim ministrados ao longo deste curso e pelo apoio prestado na condução da pesquisa em todos os sentidos;

Ao Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), em especial à Subdivisão de Imagens e Sensores (ACA-I) e todos os seus integrantes que, com a amizade, o reconhecimento e o apoio sempre incondicional, possibilitaram a conclusão deste trabalho;

À Terceira Força Aérea Estratégica (III FAE) e ao 1º/6º Grupo de Aviação (Recife-PE), pela atenção aos pedidos de aerolevante da área de estudo;

Ao Dr Hermann J. H. Kux, pela orientação esclarecedora, pelas valiosas sugestões, pelo companheirismo e pelo respeito com que acatou minhas idéias principais;

Aos amigos e companheiros no Projeto RADIM, Ulf Walter Palme e José Cláudio Mura, pela orientação, ensinamentos e comentários que muito me valeram para realizar esta dissertação;

Aos amigos Jussara de Oliveira Ortiz, Manoel Jimenez Ortiz e Marcos Leandro Kamierczak, pelo inestimável apoio prestado na fase final do trabalho;

Aos amigos Flávio Jorge Ponzoni, José Simeão de Medeiros e Heraldo Soares Caldeira, pelos ensinamentos e orientações acerca da estatística *Kappa*, fundamental na análise quantitativa conduzida neste estudo;

A Carlos Eduardo M. S. Pellegrino, amigo de longa jornada, pelas horas de sono perdidas em frente ao computador, para adequar os testes estatísticos a este trabalho em particular.



## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar e comparar dois conjuntos de imagens adquiridos em datas próximas por sistemas sensores diferentes e em duas estações climáticas opostas (seca e chuvosa). Para executar este trabalho de comparação, foram adotadas duas abordagens distintas: uma qualitativa, após as interpretações visuais das cenas com o auxílio de dados de campo e outra quantitativa, após a digitalização daquelas interpretações, na qual um método estatístico não paramétrico denominado *Kappa* foi utilizado e testado. Os resultados da primeira abordagem são ratificados pelos da segunda, demonstrando ser vantajosa a combinação de imagens multissensores, especialmente, se acompanhada de técnicas de processamento digital de imagens, como a análise por principais componentes e a transformação IHS. Outra conclusão do trabalho é a necessidade de se observar o menor lapso de tempo aplicável na aquisição das imagens de diferentes sensores. Além disso, é fundamental que seja realizado um registro entre estas imagens e que este registro seja tão preciso quanto praticável, tomando sempre como referência as imagens obtidas por sensores ópticos. Finalmente, a partir da análise dos resultados alcançados, percebe-se que as imagens SAR/ERS-1 empregadas aparentemente são mais sensíveis à permitividade dos alvos do que à rugosidade destes, ao contrário do esperado, talvez por uma imprecisão no pré-processamento das imagens.



COMPARATIVE ANALYSIS OF MULTISENSOR  
(TM/LANDSAT AND SAR/ERS-1) AND MULTITEMPORAL  
SCENES OF GUAÍRA REGION, SÃO PAULO STATE, BRASIL

ABSTRACT

The present work is intended to analyze and compare two data sets of different sensor systems, acquired in a short period of time and in two opposite seasons (winter and summer). To establish the comparison, two approaches were adopted: the first, qualitative, after visual interpretation of the data allied with information obtained from field work and, on the other hand, a quantitative approach, in which the *Kappa* coefficient was applied and tested, after the visual interpretation. The results of the first approach matched those obtained with the second ones, showing that merging multisensor imagery is a powerful technique, specially considering its use with some other approaches, like principal component and intensity-hue-saturation (IHS) transforms. One of the conclusions is that it's essential to avoid, as far as possible, large temporal gaps among the merging images. Furthermore, it's critical to make an efficient registration, taking into account that the reference image must be the one acquired by the optical sensor system. Finally, the analysis of main results showed that the SAR/ERS-1 scenes used in this work appear to be more sensitive to permitivity than to roughness, contrary to what was expected. Perhaps, this is because of an imprecise pre-processing of the images.



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	xv
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xix
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u> .....	1
1.1 - Objetivo do trabalho .....	2
1.2 - Apresentação do trabalho .....	2
<u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u> .....	3
2.1 - Histórico .....	3
2.2 - Princípios básicos do radar.....	5
2.3 - Características da radiação eletromagnética na faixa das microondas.....	7
2.4 - Radar aerotransportado de visada lateral (SLAR) .....	12
2.4.1 - Radar de abertura real (RAR) .....	13
2.4.2 - Resolução espacial no RAR.....	15
2.4.3 - Radar de abertura sintética (SAR).....	19
2.4.4 - Resolução espacial no SAR.....	19
2.5 - Equação radar .....	25
2.5.1 - Equação radar para o RAR .....	30
2.5.2 - Equação radar para o SAR .....	31
2.6 - Comportamento espectral de alvos radar.....	34
2.6.1 - Seção transversal radar ( $\sigma$ ) e coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^o$ e $\gamma$ ) .....	35
2.6.2 - Influência da rugosidade .....	37
2.6.3 - Influência da permitividade .....	38
2.7 - Características da imagem radar.....	39
2.7.1 - "Speckle".....	41
2.7.2 - Efeitos relacionados à geometria.....	41
2.7.2.1 - Linha de visada .....	41
2.7.2.2 - Sombreamento ("shadowing").....	42
2.7.2.3 - Encurtamento ("foreshortening") .....	43
2.7.2.4 - Inversão ("layover").....	44
2.7.3 - Efeitos de movimento .....	45
2.7.3.1 - Variação de velocidade.....	45

2.7.3.2 - Desvio lateral ou vertical.....	45
2.7.3.3 - Guinada da plataforma ("yaw").....	45
2.7.3.4 - Arfagem da plataforma ("pitch").....	45
2.7.3.5 - Rolamento da plataforma ("roll").....	46
<b><u>CAPÍTULO 3 - O SATÉLITE ERS-1: DESCRIÇÃO TÉCNICA</u></b> .....	<b>47</b>
3.1 - A órbita.....	49
3.2 - A plataforma.....	50
3.3 - Controle de atitude e órbita.....	51
3.4 - Comando e controle de bordo.....	51
3.5 - Telemetria e manipulação de dados dos instrumentos.....	52
3.6 - Os instrumentos científicos.....	53
<b><u>CAPÍTULO 4 - MATERIAL E MÉTODOS</u></b> .....	<b>57</b>
4.1 - Área de estudo.....	57
4.1.1 - Climatologia da região de Guaira.....	59
4.1.2 - Descrição pedológica do município de Guaira.....	62
4.2 - Material.....	62
4.3 - Métodos.....	64
4.3.1 - Seleção da área de estudo.....	65
4.3.2 - Trabalhos de campo.....	67
4.3.3 - Operações no SITIM.....	67
4.3.3.1 - Registro imagem x mapa.....	69
4.3.3.2 - Registros imagem x imagem.....	70
4.3.3.3 - Transformação IHS e análise por principais componentes.....	70
4.3.4 - Operações no SGI.....	73
4.3.4.1 - A estatística <i>Kappa (K)</i> .....	74
<b><u>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</u></b> .....	<b>79</b>
5.1 - Processamento dos dados.....	79
5.2 - Análise qualitativa da interpretação visual das imagens.....	86
5.3 - Análise quantitativa da interpretação visual das imagens.....	93
<b><u>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u></b> .....	<b>97</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>103</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Elementos básicos de um sistema radar .....	9
2.2 - Efeito de nuvens na transmissão das microondas do espaço para a superfície...	10
2.3 - Efeito da chuva na transmissão das microondas do espaço para a superfície ....	11
2.4 - Penetração dos sinais radar na vegetação, em função da umidade e do ângulo de incidência.....	12
2.5 - Penetração dos sinais radar no solo, em função do conteúdo volumétrico de água, da frequência e do tipo de solo .....	13
2.6 - Classificação dos sensores de microondas .....	15
2.7 - Ilustração de imageamento radar com visada lateral .....	16
2.8 - A ambigüidade no imageamento radar com visada vertical .....	17
2.9 - O imageamento com visada lateral e suas dimensões básicas .....	18
2.10 - Parâmetros de resolução da imagem radar.....	19
2.11 - Exemplo de resolução RAR com os parâmetros: $h=7.5$ km, $\tau=100$ ns e $\beta_h = 3$ mrad ( $0.17^\circ$ ).....	21
2.12 - Concepção de uma rede sintética radar .....	23
2.13 - Valores de $\sigma^\circ$ para várias classes de alvos a 9.375 GHz .....	41
2.14 - Ilustração de superfícies lisa (a) e rugosa (b).....	42
2.15 - Geometria típica de um sistema SLAR.....	44
2.16 - Efeito da linha de visada no sombreamento radar .....	46
2.17 - Sombreamento ("shadowing").....	47
2.18 - Encurtamento ("foreshortening") .....	48
2.19 - Inversão ("layover").....	48
2.20 - Distorções causadas por efeitos de movimento da plataforma não compensados .....	50
3.1 - O satélite ERS-1 .....	53
3.2 - Operação SAR no modo <i>imagem</i> .....	59
4.1 - Área de estudo, na composição de cores verdadeiras TM 3 (R), 2 (G), 1 (B) ..	62
4.2 - Distribuição das precipitações pluviométricas no período de 1956 a 1985 .....	63
4.3 - Cálculo da evapotranspiração potencial na estação meteorológica de Barretos (SP) - período 1961/78.....	64
4.4 - Balanço hídrico edafológico com precipitação média e evapotranspiração média (potencial e real) na região de Guaira (SP).....	65

4.5 - Balanço hídrico edafológico com precipitação com probabilidade de ocorrência de 75% e evapotranspiração média (potencial e real) na região de Guaira (SP) .....	65
4.6 - Diagrama de fluxo dos dados nas diversas etapas do trabalho.....	70
5.1 - Imagens SAR/ERS-1 antes (à esquerda) e após (à direita) a aplicação do filtro adaptativo de Frost (5 x 5) .....	85
5.2 - Composições TM 4 (R), 5 (G), 3 (B).....	86
5.3 - Composições TM 4 (R), PC1 (G), C (B), antes (à esquerda) e após (à direita) a transformação IHS, na qual a banda TM4 modulou a intensidade (I), a PC1 o matiz (H) e a C saturação (S) .....	88
5.4 - Composições MSA e MSB com diferentes distribuições RGB.....	89
5.5 - Contraste entre composições TM e MS .....	91
5.6 - Vista ampliada das composições TM e MS .....	93
5.7 - Imagens SAR de agosto e dezembro de 1992.....	94
5.8 - Composição multitemporal das imagens SAR de ago/92 (R) e dez/92 (B).....	96

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Missões orbitais SAR.....	8
2.2 - Designação de bandas e frequências.....	14
4.1 - Distribuição das precipitações pluviométricas - período 1956/85.....	68
4.2 - Cálculo da evapotranspiração potencial na estação meteorológica de Barretos (SP) - período 1961/78.....	77
4.3 - Balanço hídrico edafológico - precipitação média.....	80
4.4 - Balanço hídrico edafológico - precipitação 75%.....	80
4.5 - Cálculo da evapotranspiração potencial na estação meteorológica de Barretos (SP) - período 1961/78.....	81
5.1 - Classes analisadas no estudo comparativo.....	90
5.2 - Dados dos histogramas das imagens SAR.....	95
5.3 - Matriz de erros da comparação entre imagens multissensores - estação seca ...	98
5.4 - Resultados da estatística <i>Kappa</i> (total - ago/92).....	98
5.5 - Matriz de erros da comparação entre imagens multissensores - estação chuvosa.....	99
5.6 - Resultados da estatística <i>Kappa</i> (total - nov-dez/92).....	99



## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a_{hs}$  - "Aperture illumination taper factor" associado à antena sintetizada  
 $a_{hr}$  - "Aperture illumination taper factor" associado à antena real  
 $a_B$  - "Pulse taper factor"  
 $a_i$  - área iluminada pelo feixe radar,  $m^2$   
 $A_e$  - área efetiva da antena ( $A_r = A_t$ ),  $m^2$   
 $A_t$  - área efetiva de coleta da antena de transmissão,  $m^2$   
 $A_r$  - área efetiva de coleta da antena de recepção,  $m^2$   
 $A_s$  - área efetiva de recepção do alvo,  $m^2$   
 $A_k$  - área iluminada pelo sistema radar,  $m^2$   
 $A_i$  - área projetada perpendicularmente ao feixe da antena,  $m^2$   
 $\beta_h$  - Largura horizontal do feixe radar, mrad (ou graus)  
 $\beta_v$  - Largura vertical do feixe radar, mrad (ou graus)  
 $\beta_{hr}$  - Largura horizontal do feixe radar da antena física do SAR, mrad (ou graus)  
 $\beta_{hs}$  - Largura horizontal do feixe radar da antena sintetizada, mrad (ou graus)  
 $B$  - Largura de banda, KHz  
 $c$  - Velocidade da luz,  $3 \cdot 10^8$  m/s  
 $D_e$  - Densidade de potência no eco do radar,  $W/m^2$   
 $D_i$  - Densidade de potência para uma antena isotrópica,  $W/m^2$   
 $D_{ni}$  - Densidade de potência para uma antena não-isotrópica,  $W/m^2$   
 $E_r$  - Campo elétrico recebido de um alvo extenso, N/C (ou V/m)  
 $E_{r_i}$  - Campo elétrico recebido de um alvo pontual, N/C (ou V/m)  
 $\varepsilon^*$  - Permitividade complexa absoluta  
 $\varepsilon'$  - Constante dielétrica  
 $\varepsilon''$  - Fator de perda por calor  
 $\varphi_i$  - Fase associada com o processo de espalhamento de um alvo pontual  $i$   
 $\Delta\varphi_r$  - Mudança de fase associada à abertura real  
 $\Delta\varphi_s$  - Mudança de fase associada à abertura sintética  
 $f_a$  - Fator de perda por absorção  
 $F$  - Figura de ruído recebida, dB  
 $\varphi$  - Ângulo de depressão, graus  
 $\theta$  - Ângulo de incidência, graus  
 $G$  - Ganho da antena ( $G_t = G_r$ )  
 $G_i$  - Ganho da antena para um alvo pontual  
 $G_t$  - Ganho da antena de transmissão

$G_r$	- Ganho da antena de recepção
$G_s$	- Ganho de espalhamento na direção do receptor
$h$	- Altura de vôo, m
$\lambda$	- Comprimento de onda, m
$K$	- Constante de Boltzmann, $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K
$K$	- Coeficiente de análise discreta multivariada
$l$	- Comprimento da antena, m
$L$	- Comprimento da antena real ou sintética, m
$L_p$	- Comprimento da antena sintetizada, m
$L_F$	- Fator de perda associado ao sistema
$N_s$	- Número de pulsos da antena sintética
$P$	- Potência re-irradiada na direção do radar, W
$P_t$	- Potência transmitida, W
$P_r$	- Potência recebida, W
$P_m$	- Potência média, W
$P_{mt}$	- Potência média transmitida, W
$P_{tmáx}$	- Potência máxima transmitida, W
$P_{ti}$	- Potência transmitida, considerada a partir de um alvo pontual, W
$\overline{P_r}$	- Potência média recebida, considerada a partir de um alvo extenso, W
$\overline{P_{ri}}$	- Potência média recebida, considerada a partir de um alvo pontual, W
$r_a$	- Resolução em azimute, m
$r_t$	- Resolução transversal, m
$r_{LV}$	- Resolução na linha de visada, m
$r_{ap}$	- Melhor resolução alcançável, m
$R$	- Distância na linha de visada, m
$R_t$	- Distância na linha de visada para a antena de transmissão, m
$R_r$	- Distância na linha de visada para a antena de recepção, m
$R_0$	- Distância na linha de visada, considerado um alvo perpendicular à antena, m
$R_i$	- Distância exata entre o radar e o alvo pontual, m
$s$	- Erro padrão
$S_n$	- Razão sinal/ruído
$S_{n1}$	- Razão sinal/ruído para um pulso isolado
$S_{nNs}$	- Razão sinal/ruído para todos os pulsos
$\sigma$	- Seção transversal radar, $m^2$
$\sigma_i$	- Seção transversal radar para um alvo pontual, $m^2$

- $\sigma^{\circ}$  - Coeficiente de retroespalhamento  
 $\gamma$  - Coeficiente de retroespalhamento (para uma área projetada)  
 $\Delta t$  - Diferença de tempo entre emissão e recepção do pulso radar, ns  
 $\tau$  - Duração do pulso radar, ns  
 $T_0$  - Temperatura de referência, 290 K  
 $T_p$  - Período de repetição de pulso, ns  
 $u$  - Velocidade da plataforma, m/s  
 $V_{s1}$  - Voltagem recebida para um pulso isolado, V  
 $V_{sNs}$  - Voltagem recebida para todos os pulsos, V  
 $Z$  - Desvio padrão normal



## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto tem evoluído de uma maneira peculiar, como ferramenta a serviço da ciência, a cada vez que um novo sistema sensor ou uma nova técnica, ou ambos, são implementados na comunidade científica. Tal evolução tem ocorrido, com especial vigor, desde os primeiros sensores orbitais, começando pelo lançamento do primeiro Satélite de Tecnologia em Recursos Terrestres (ERTS), em 1972, mais tarde rebatizado como o primeiro da série Landsat. Desde então, estudos envolvendo os recursos terrestres, renováveis ou não, experimentaram grandes avanços quando do advento de sensores como o TM (Landsat 4 e 5), HRV (SPOT 1 e 2) e SAR (Seasat, SIR-A e SIR-B), bem como das técnicas que foram sendo criadas para a otimização de uso destes sensores.

As missões envolvendo o emprego de radares imageadores tiveram curtíssima duração, mas ainda que efêmeras, provaram a grande utilidade do desse tipo de sensor para o sensoriamento remoto, apesar da relativa escassez de dados obtidos comparativamente aos satélites ópticos. Uma das utilidades verificadas foi a eliminação de um dos fatores limitantes no estudo de recursos renováveis e de áreas cultivadas, que é a disponibilidade de dados em função da ausência, total ou parcial, de cobertura de nuvens, quando a discriminação de uso da terra se torna ótima. Apesar desta limitação ter sido em parte suprimida com o advento da visada "off-nadir" na série SPOT, além da possibilidade de uso conjunto de imagens TM-Landsat e SPOT para a mesma região, foram os sistemas imageadores radar os responsáveis pela obtenção de dados de extensas regiões tropicais que apresentam uma pronunciada falta de informações. Nestas regiões, as imagens radar mostraram ser de grande valia, graças a algumas vantagens irrefutáveis em relação aos sensores ópticos. Por se tratar de um sistema ativo (gera sua própria radiação), independe da luz solar e, por isso, pode ser empregado tanto no período diurno quanto no noturno, sem detrimento do desempenho. Devido ao comprimento de onda utilizado, de ordem centimétrica, a atmosfera terrestre torna-se transparente a este tipo de radiação, não importando, portanto, as condições meteorológicas vigentes por ocasião do imageamento. Estas duas características mencionadas acima, em particular, tornam os radares imageadores ferramentas ideais para o sensoriamento remoto de áreas onde a cobertura perene de nuvens é fator impeditivo à utilização de sistemas sensores ópticos.

Atualmente, com o lançamento de satélites equipados com sensores de microondas e com vida útil prevista de vários anos, existe uma grande expectativa sobre o que pode ser feito e aperfeiçoado com técnicas de sensoriamento remoto, usando-se dados obtidos por estes sistemas sensores.

### 1.1 - OBJETIVO DO TRABALHO

Com base nesta expectativa, vislumbrou-se a oportunidade de se efetuar uma avaliação objetiva de várias características próprias de uma imagem radar obtida a partir do sensor SAR do ERS-1, tomando por referência o sensor TM (Landsat), com a finalidade de analisar e comparar dois conjuntos de imagens adquiridos, em datas próximas, por sistemas sensores diferentes em duas estações climáticas opostas (seca e chuvosa), e verificar, finalmente, a capacidade de ambos em separar feições de uma cena, identificando, a partir de então, as condições nas quais os diferentes sensores se completam.

### 1.2 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Mesmo não sendo um trabalho inédito envolvendo radares imageadores, consideramos a cultura sobre "SAR e aplicações" ainda incipiente no país e, portanto, merecedora de um maior detalhamento das variáveis a serem consideradas ao estudar as imagens radar. Tendo isto em mente, optamos pela apresentação de um capítulo inicial sobre fundamentação teórica de sistemas radar (Capítulo 2) numa forma didática, no sentido de facilitar o entendimento de algumas considerações posteriores acerca dos resultados apresentados no presente estudo. A revisão da literatura pertinente é efetuada no decorrer do trabalho, ou ainda, quando da discussão dos resultados alcançados, nos Capítulos 4 e 5.

A despeito de já terem sido publicados no exterior, desde a década de 60, um grande número de trabalhos tratando do assunto *radar*, no Brasil muito pouco tem sido escrito a respeito, de forma que os termos utilizados para descrever as técnicas e a teoria utilizadas na área são apresentados geralmente na língua inglesa. Em função disso, a maioria dos termos técnicos originários do idioma inglês foram traduzidos - alguns poucos deixaram de sê-lo, dada a dificuldade em se encontrar um similar de uso corrente na língua portuguesa - visando a profusão destes termos empregando o idioma português, sem que se percam seus reais significados.

## CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos que norteiam o funcionamento dos radares de abertura real e de abertura sintética, além de considerações relativas aos parâmetros envolvidos nas interações alvo-radiação.

### 2.1 - HISTÓRICO

Em 1886, o físico alemão Heinrich Hertz conduziu o primeiro experimento envolvendo frequências de microondas, testando experimentalmente a teoria eletromagnética de Maxwell. Nestes testes, Hertz demonstrou que vários objetos, metálicos e não-metálicos, podiam refletir radiação numa frequência de aproximadamente 200 MHz. A primeira demonstração de um radar como um detetor de navios, entretanto, foi feita por Hülsmeier em 1903.

Ainda que Hülsmeier tivesse obtido, já em 1904, a patente por sua idéia, foi somente a partir de 1922 que ela veio a ser desenvolvida como uma ferramenta apropriada para a detecção de navios e aeronaves, por A. H. Taylor e outros pesquisadores no Laboratório de Pesquisas da Marinha dos Estados Unidos (NRL).

Com o início da 2ª Grande Guerra, os radares tiveram um impulso definitivo. Nesta época, radares aerotransportados já estavam sendo desenvolvidos e, embora o objetivo desses radares fosse a detecção de outras aeronaves e navios, após estudos realizados no Laboratório de Radiação do MIT (Massachusetts Institute of Technology), imagens do solo já podiam ser obtidas através de radar.

O termo RADAR deriva das palavras "RADio Detection And Ranging". Este nome reflete a ênfase colocada, nos primeiros experimentos, num dispositivo que pudesse detectar a presença de um alvo e medir sua distância. Inicialmente, foi concebido para detectar incursões de aeronaves hostis e ainda, para direcionar as defesas anti-aéreas. Muito embora os radares modernos possam extrair mais informações do alvo, a medição de distância é ainda uma de suas funções mais importantes.

Skolnik (1980) cita que o termo radar foi a palavra-código oficialmente adotada pela Marinha americana em novembro de 1940, após designações tais como *equipamento de eco rádio* ("radio echo equipment"). Porém, o Exército, que realizou

trabalhos pioneiros no desenvolvimento do radar, denominou-o *procura de posição por rádio* ("radio position finding"), até adotar o termo radar em 1942. O mesmo ocorreu no ano seguinte com os ingleses que trocaram a sigla RDF por radar. Na França e na Alemanha, o termo era anteriormente conhecido por DEM ("détection électromagnétique") e "funkmessgeraet", respectivamente. Hoje em dia, o termo radar é quase mundialmente aceito.

As primeiras imagens radar foram produzidas utilizando-se um tipo denominado "B-scan", que apresentava uma imagem de formato retangular com grandes distorções, devido às relações não lineares do sistema de coordenadas adotado: distância do alvo para a aeronave num eixo e ângulo entre o alvo e a direção de vôo da aeronave no outro eixo. Essas distorções foram parcialmente corrigidas com o desenvolvimento do radar PPI ("Plan Position Indicator"), que consiste de uma antena rotativa acoplada a um transceptor. A expressão *posição plana* ou *planificada* significa que alvos separados verticalmente são apresentados em um mesmo plano horizontal, sem que a separação vertical seja representada.

Segundo Ulaby *et al.* (1981), na década de 50, foi desenvolvido um novo tipo de radar, o *radar aerotransportado de visada lateral* (SLAR), que proporcionava uma resolução espacial mais fina, face à possibilidade de se utilizar antenas bem mais longas, já que estas eram fixadas paralelamente à fuselagem da aeronave. Enquanto a varredura nos radares B-scan e PPI era obtida pela rotação da antena, o que limitava seu tamanho, no SLAR, um feixe fixo posicionado lateralmente à aeronave e o movimento da mesma na direção de vôo proporcionavam essa varredura. O resultado era então gravado em uma longa faixa de filme.

Ainda segundo Ulaby *et al.* (1981), o primeiro sistema do tipo que hoje é conhecido como *radar de abertura sintética* (SAR - "Synthetic Aperture Radar"), foi desenvolvido por Wiley, em 1952, e era chamado de sistema "Doppler beam-sharpening". Durante o final da década de 50 e o início da década de 60, desenvolvimentos sigilosos envolvendo sistemas radar de abertura sintética foram conduzidos na Universidade de Michigan e em várias companhias dos EUA. Somente em 1961 surgiram trabalhos ostensivos descrevendo esse novo tipo de radar, também utilizado como um radar de visada lateral. A capacidade em obter uma dimensão de pixel em azimute independente da distância do radar e bem menor que aquela alcançável com um SLAR cuja antena fosse tão pequena quanto aquela utilizada pelo SAR, fez com que

este último tornasse viável o conceito de radares imageadores orbitais com boa resolução espacial.

De acordo com Leberl (1990), uma motivação considerável para as pesquisas com imageamento ativo em microondas visando aplicações em Geociências, derivam das imagens de satélites radar, especialmente os resultados obtidos pelas missões radar da NASA. Os primeiros dentre estes projetos, segundo Leberl, foram o Experimento de Sondagem Lunar Apollo (ALSE) na missão Apollo-17, em 1972 e o satélite Seasat em 1978. Outros projetos SAR incluem o primeiro lançamento de um ônibus espacial ("Shuttle") com uma carga útil radar (SIR-A), em 1981 e o subsequente SIR-B em 1984. Atualmente, há três missões SAR orbitais de longa duração prevista, que são o ERS-1 (1º Satélite Europeu de Sensoriamento Remoto), o JERS-1 (1º Satélite Japonês para estudo de Recursos Terrestres), além do satélite ALMAZ, lançado pela ex-União Soviética. Este último teve sua vida útil encerrada em outubro de 1992. As atenções da comunidade científica para o próximo satélite imageador operando nas microondas, estarão voltadas para o projeto canadense RADARSAT, com lançamento previsto para meados de 1995. A exploração da superfície coberta de nuvens do planeta Vênus pela missão Magellan da NASA, tem sido outra grande motivação para pesquisas com radares imageadores.

A Tabela 2.1 mostra algumas das missões orbitais SAR, previstas para ter longa duração, realizadas e a serem realizadas, detalhando desempenho e parâmetros como polarização, frequência, comprimento de onda e ângulo de incidência. A missão Seasat, realizada em 1978, teve duração de apenas 100 dias, aproximadamente, por ter apresentado, segundo a NASA, problemas de funcionamento que levaram à sua desativação. Deve-se observar que, desde então, a missão ERS-1 foi a primeira na geração de dados orbitais na banda C, constituindo-se portanto, no marco inicial da aquisição de experiência a partir de imagens orbitais com este comprimento de ondas.

## 2.2 - PRINCÍPIOS BÁSICOS DO RADAR

O radar é basicamente um sistema eletrônico para a detecção e localização de alvos. Seu princípio de funcionamento baseia-se na comparação entre um sinal conhecido, que é por ele enviado, e o eco dele decorrente. Assim sendo, o radar é utilizado como uma forma de se estender os sentidos humanos, em especial a visão. O valor dele porém, não reside na substituição dos nossos olhos, mas em sua

complementação, executando tarefas que estes não podem cumprir. Se os olhos podem detalhar melhor os objetos, inclusive reconhecendo-lhes cores de maneira sofisticada, o radar pode vê-los sob determinadas condições que seriam impraticáveis para a visão humana. Entretanto, seu maior atributo é a capacidade de medição precisa da distância do objeto.

**TABELA 2.1 - MISSÕES ORBITAIS SAR**

SISTEMAS	Seasat	ALMAZ	ERS-1	JERS-1	LACROSSE	RADARSAT
País	EUA	Rússia	Europa	Japão	EUA	Canadá
Início	16/06/78	31/03/91	16/07/91	11/02/92	13/12/88	1995
Vida útil	3 meses	1,5 ano	2-3 anos	2 anos	–	5 anos
Frequência	L (1,2 GHz)	S (3 GHz)	C (5,3 GHz)	L (1,2 GHz)	X (9,5 GHz)	C (5,3 GHz)
Polarização	HH	HH	VV	HH	HH	HH
Âng. Incid.	23°	30° - 60°	23°	39°	Variável	10° - 60°
Comp. Onda	23 cm	10 cm	5,6 cm	23 cm	3 cm	5,6 cm
Resolução (y)	25 m	15 m	26 m	18 m	> 1m	9-100 m
Resolução (x)	25 m	15 m	28 m	18 m	> 1m	10-100 m
Altura de Voo	800 km	300 km	785 km	568 km	275 km	800 km
Larg. de Faixa	100 km	20-45 km	100 km	75 km	Variável	Variável
Antena	10 m	15 m	10 m	12 m	8 x 2 m	15 m

Sendo um sistema de sensoriamento remoto ativo, o radar possui sua própria fonte de energia para obter uma imagem. De acordo com Ulaby *et al.* (1981), o termo *radar* é aplicável a qualquer sistema ativo de rádio com um transmissor capaz de iluminar uma superfície ou objeto que, ao refletir ou espalhar o sinal de volta ao sistema, terá algumas de suas propriedades medidas por um receptor.

Um radar clássico se baseia na transmissão e recepção de pulsos situados na faixa centimétrica do espectro eletromagnético<sup>1</sup>, sendo os sinais de retorno analisados a fim de se medir sua intensidade, intervalo de tempo e fase. O princípio básico é simples: emissão, recepção e correlação entre os sinais transmitido e recebido (normalmente utiliza-se uma mesma antena para transmissão e recepção).

<sup>1</sup> - Para observação terrestre, os comprimentos de onda ( $\lambda$ ) utilizados situam-se entre 3 mm e 30 cm.

A Figura 2.1 apresenta os elementos essenciais de um sistema radar.

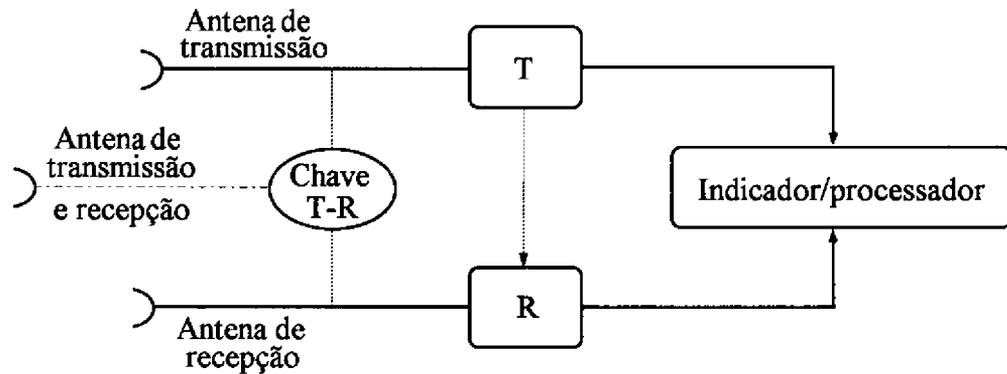


Fig. 2.1 - Elementos básicos de um sistema radar.

FONTE: Adaptada de Ulaby *et al.* (1981), p. 34.

### 2.3 - CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA FAIXA DAS MICROONDAS

De acordo com Ulaby *et al.* (1981), em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ), a radiação eletromagnética (REM) na faixa das microondas possui uma característica bastante peculiar, que é o seu poder de penetração em determinados tipos de materiais, sob certas condições.

Esta característica, entre outras, tornou o uso dos sensores que operam nesta faixa do espectro muito atraente e talvez a melhor razão para isso seja a capacidade de penetrar nuvens ou até mesmo chuva. Essa capacidade de penetração também pode ser observada em materiais que apresentam baixos valores de permitividade (vide 2.6.3), como a areia seca, por exemplo.

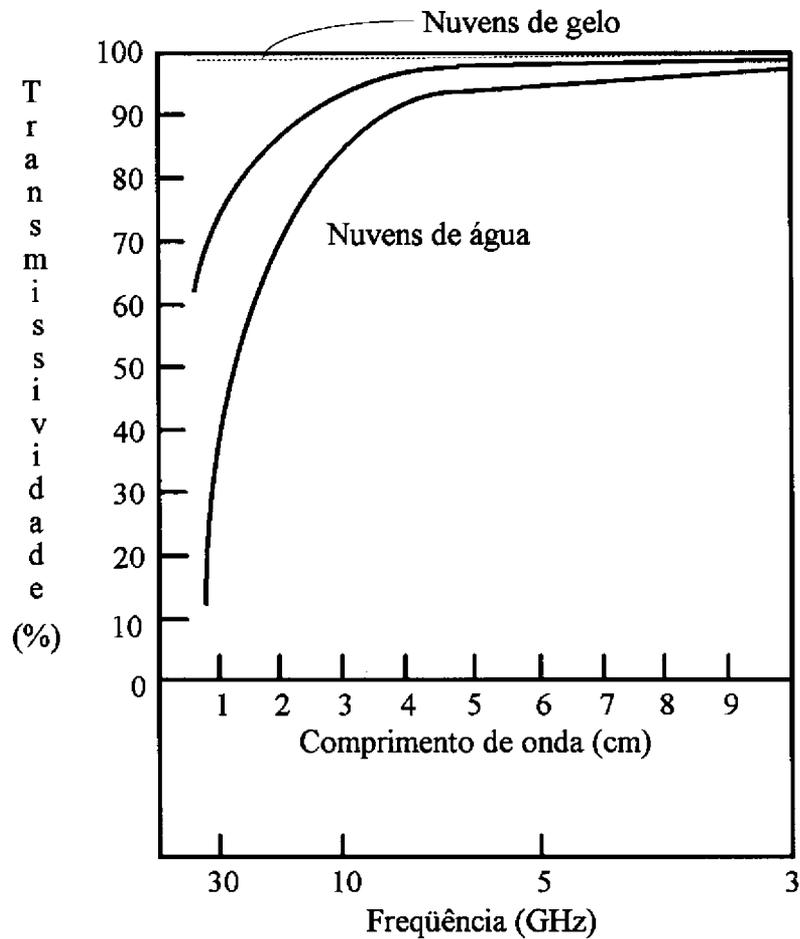


Fig. 2.2 - Efeito de nuvens na transmissão das microondas do espaço para a superfície.

FONTE: Adaptada de Ulaby *et al.* (1981), p. 2.

Entretanto, a transparência atmosférica é certamente o maior atributo da REM nesta faixa do espectro eletromagnético. A Figura 2.2 ilustra bem esta propriedade, ao mostrar o efeito de nuvens na transmissão da REM entre o espaço e o solo. Nuvens de gelo, que sejam densas o suficiente para obscurecer o solo, impossibilitando o uso de fotografias aéreas, não têm quase nenhum efeito sobre as microondas. As nuvens de chuva, por sua vez, têm um efeito significativo somente a partir de  $\lambda$  inferiores a 2 cm, sendo esse efeito realmente forte com  $\lambda$  inferior a 1 cm. A chuva possui um efeito maior que aquele provocado pelas nuvens mas, como mostra a Figura 2.3, esse efeito é desprezível em  $\lambda$  superiores a 4 cm, tornando-se considerável apenas em  $\lambda$  menores que 2 cm.

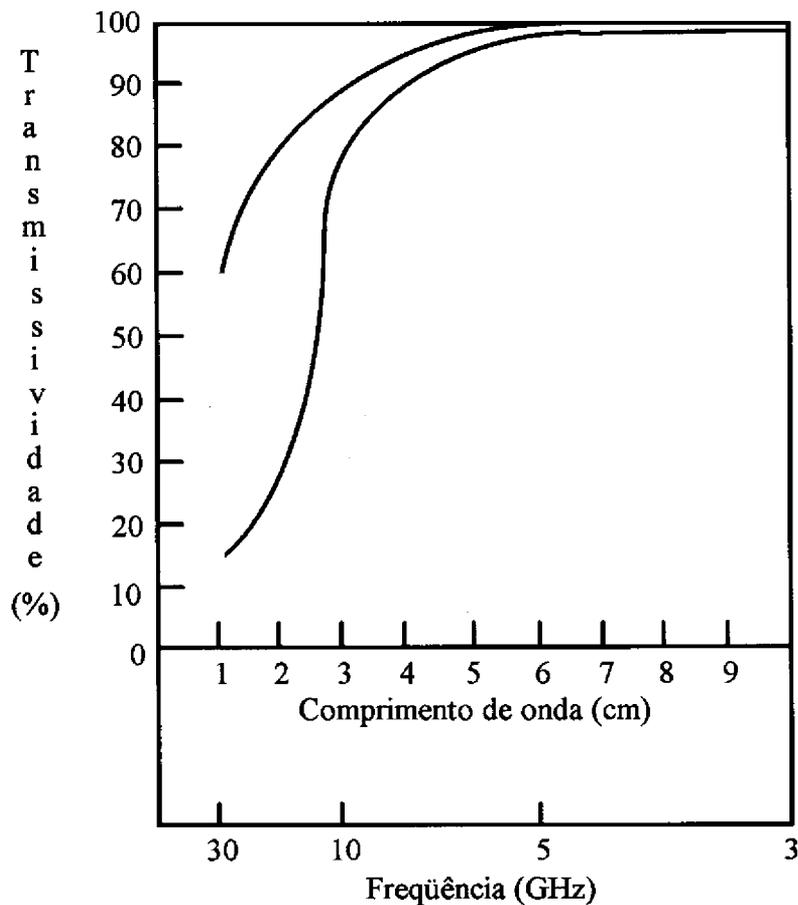


Fig. 2.3 - Efeito da chuva na transmissão das microondas do espaço para a superfície.

FONTE: Adaptada de Ulaby *et al.* (1981), p. 3.

Além da transparência atmosférica, existem outros motivos que tornam o sensoriamento remoto na faixa de microondas interessante. Um deles é que, também na vegetação, a penetração das microondas é mais profunda que a radiação óptica. Como se pode observar na Figura 2.4, os  $\lambda$  maiores penetram bem mais que os  $\lambda$  menores. Desta forma, os  $\lambda$  menores nos dão informações acerca das camadas superiores da vegetação, enquanto os  $\lambda$  maiores nos dão informações das camadas inferiores e do solo. Neste caso porém, não é somente o  $\lambda$  que influencia, mas também o grau de umidade existente, a densidade da vegetação e o ângulo de incidência da REM. Estas relações também são mantidas quando se trata de solo, sendo o grau de umidade, neste caso, de extrema importância, como mostra o gráfico da Figura 2.5.



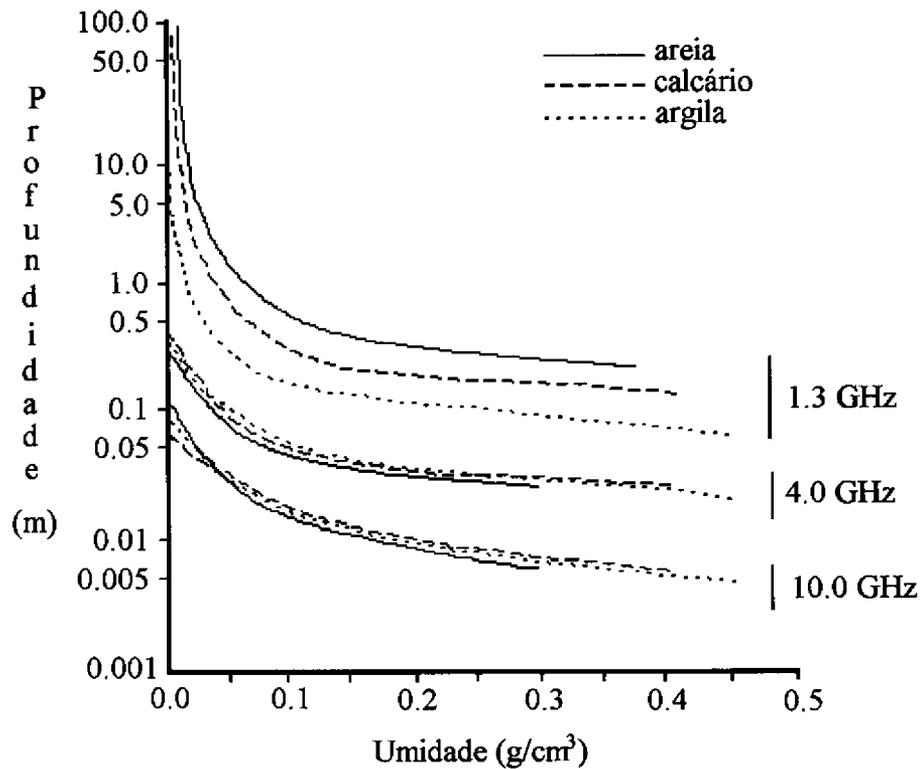


Fig. 2.5 - Penetração dos sinais radar no solo, em função do conteúdo volumétrico de água, da frequência e do tipo de solo.

FONTE: Adaptada de Ulaby et al. (1981), p. 4.

Não há uma definição categórica sobre o espectro de microondas, mas existe um razoável convencionamento de que ele se estenda ao longo das bandas designadas internacionalmente por UHF, SHF e EHF, desde 300 MHz até 300 GHz (comprimentos de onda de 1 m até 1 mm). No início do desenvolvimento dos radares, foi criado um esquema de designação por letras das bandas radar, para ser utilizado como um código, por motivos estratégicos militares. Entretanto, este esquema continuou a ser adotado nos tempos de paz, provavelmente por hábito e pela necessidade de uma nomenclatura mais curta e descomplicada. As letras mais freqüentemente adotadas hoje em dia, para a designação das diversas bandas de microondas, são apresentadas na Tabela 2.2.

**TABELA 2.2 - DESIGNAÇÃO DE BANDAS E FREQUÊNCIAS**

BANDA	FREQ. (GHz)	COMP. DE ONDA (cm)	BANDA	FREQ. (GHz)	COMP. DE ONDA (cm)	BANDA	FREQ. (GHz)	COMP. DE ONDA (cm)
P	0.225 a 0.39	133 a 77	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	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	19.0 a 7	K	10.9 a 36.0	2.75 a 0.83	W	56.0 a 100.0	0.54 a 0.30

#### 2.4 - RADAR AEROTRANSPORTADO DE VISADA LATERAL (SLAR)

Os sensores de microondas aerotransportados são classificados em dois grandes grupos: os sensores ativos e os passivos (Figura 2.6). Embora a maioria das aplicações em sensoriamento remoto esteja voltada aos radares imageadores, há três categorias distintas de sistemas radar: imageadores, escaterômetros e altímetros (estes últimos, não-imageadores). Neste trabalho, trataremos apenas da primeira categoria, que atualmente diz respeito aos radares aerotransportados de visada lateral (SLAR).

A definição de SLAR engloba dois tipos de radar imageador:

1) **Sistema radar de abertura real.** Comumente definido pela sigla SLAR, este sistema é o mais simples e sua resolução em azimute é uma função da distância entre o radar e o alvo (linha de visada). Por ter a sigla SLAR um caráter geométrico e abrangente (engloba os dois tipos), optamos por adotar no presente trabalho a sigla RAR ("Real Aperture Radar"), por ser esta mais correta em seu conteúdo, muito embora, vale lembrar, a sigla SLAR seja frequentemente adotada para definir este tipo de radar.

2) **Sistema radar de abertura sintética.** Trata-se de um sistema que, através de gravações e processamento dos sinais de retorno, cria uma antena virtual centenas de vezes maior que seu tamanho físico. Possui uma boa resolução em azimute, a qual independe da distância entre radar e alvo (de 1 a 2 m para sistemas aerotransportados e de 5 a 50 m para sistemas orbitais). Também utiliza visada lateral e a sigla usada para defini-lo é SAR ("Synthetic Aperture Radar").

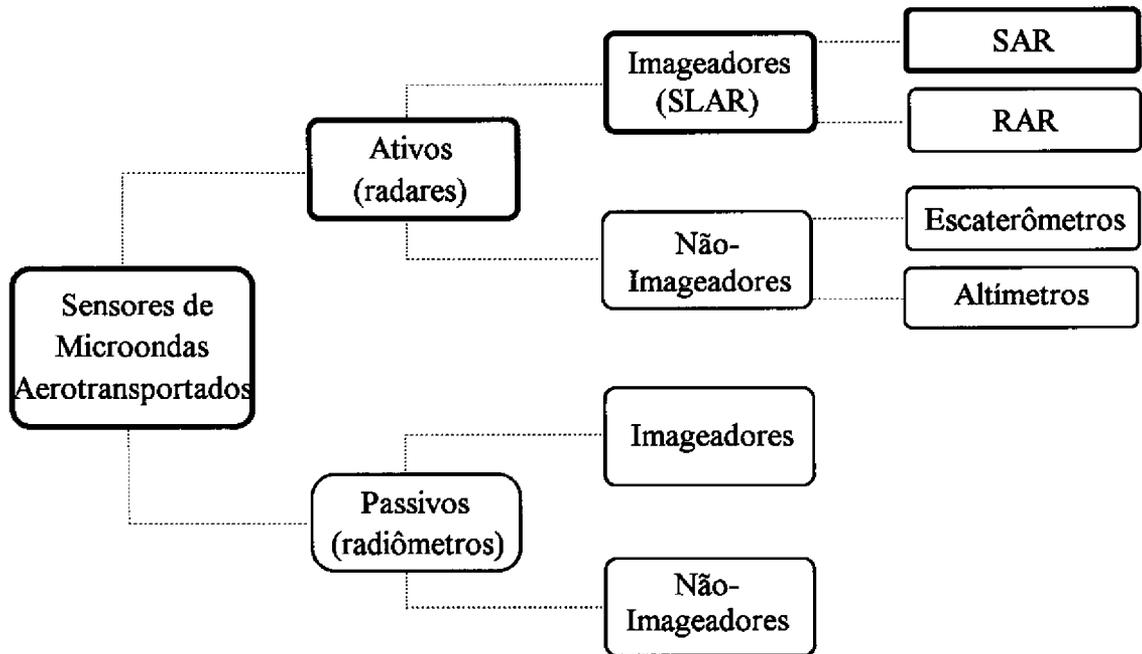


Fig. 2.6 - Classificação dos sensores de microondas.

#### 2.4.1 - RADAR DE ABERTURA REAL (RAR)

Nos radares aerotransportados de visada lateral, a antena é disposta de forma a direcionar seus pulsos perpendicularmente à linha de vôo, produzindo um feixe largo verticalmente e estreito horizontalmente, como ilustra a Figura 2.7. A imagem é produzida com o movimento da aeronave em relação à área a ser imageada. Um pulso curto é transmitido do radar, da linha de visada mais próxima até a mais distante, numa sequência de transmissões e recepções de pulsos. Assim sendo, uma linha isolada de intensidade modulada (conforme a potência de retorno do pulso) aparece no osciloscópio e é transferida através de lentes para um filme que tem a forma de uma tira que se move em sincronismo com o movimento da aeronave. No momento em que a aeronave tiver se movido uma largura de feixe à frente, o sinal de retorno virá de uma faixa no solo diferente. Estes sinais modulam a intensidade da linha no CRT (tubo de raios catódicos) e produzem uma imagem diferente numa linha do filme adjacente à linha original. À medida que a aeronave se move, uma série destas linhas é imageada no filme e o resultado é 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 da rota sejam mantidas tão próximas uma da outra quanto possível. Como a dimensão ao longo da rota é determinada por uma medição de tempo e esta medição é associada com a linha de visada, o mapa é ligeiramente distorcido, face à diferença entre a linha de visada e a distância no solo (vide 2.4.2). Em alguns sistemas radar, esta distorção é removida através de uma correção apropriada. Entretanto, isto só se aplica exatamente, caso os pontos estejam dispostos numa superfície quase plana, o que não acontece em áreas montanhosas, onde essa correção pode resultar em distorções excessivas (Ulaby *et al.*, 1981).

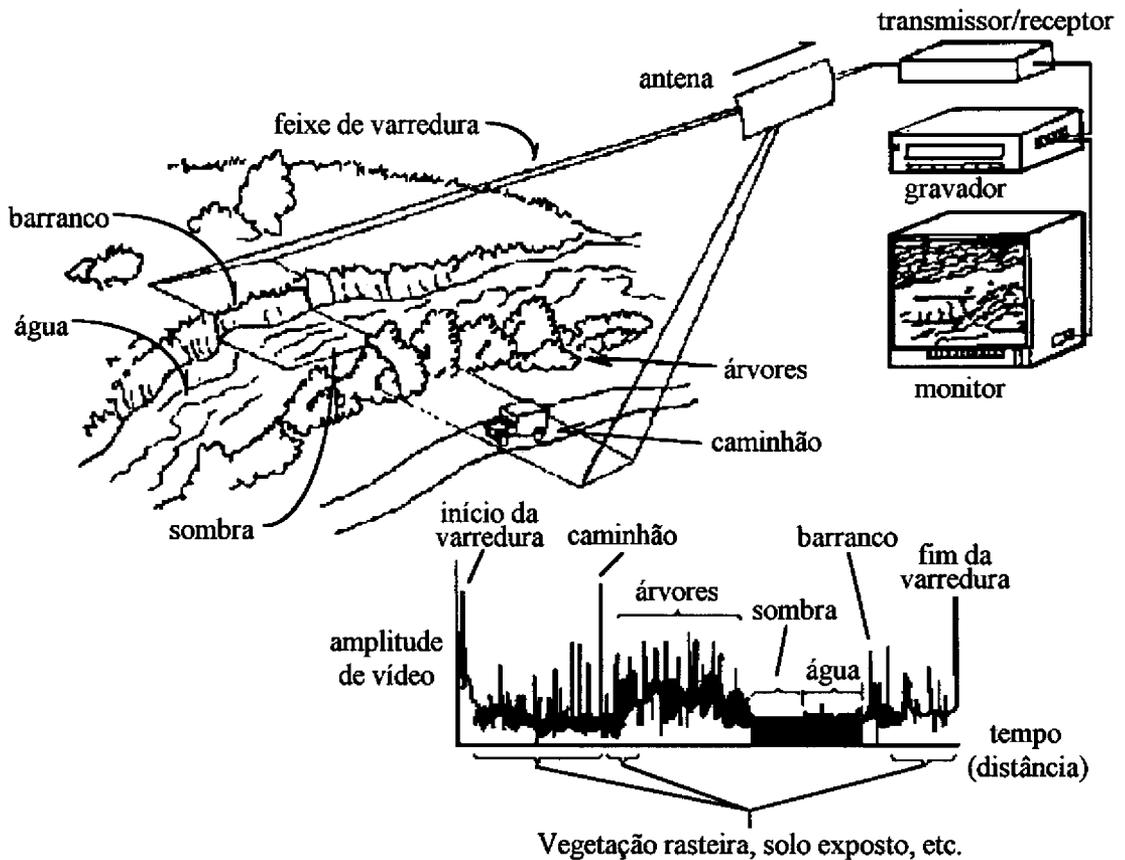


Fig. 2.7 - Ilustração de imageamento radar com visada lateral.

### 2.4.2 - RESOLUÇÃO ESPACIAL NO RAR

No cálculo das resoluções dos sistemas radar, a geometria de aquisição utilizada constitui um fator preponderante. Enquanto sensores ópticos gravam uma faixa de terreno fotograficamente - seja quadro a quadro, seja linha a linha - os radares imageadores processam seus dados em função do tempo decorrido entre o sinal de ida e o eco dele decorrente. Esta condição, como ilustra a Figura 2.8, gera, para os radares imageadores, um problema insolúvel de ambigüidade de distâncias e intervalos de tempo.

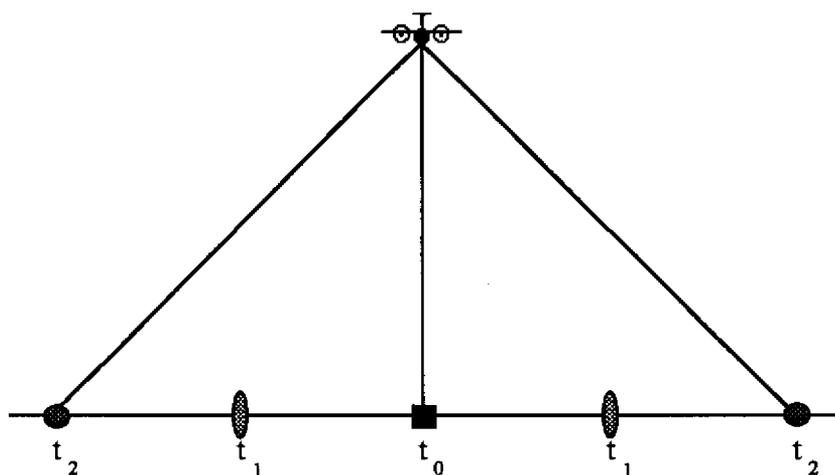


Fig. 2.8 - A ambigüidade no imageamento radar com visada vertical.

Desta forma, a visada lateral - utilizada por alguns sistemas sensores ópticos mas, por outros motivos que não ambigüidade - é empregada por radares imageadores para a solução de tal problema (Figura 2.9). Assim, ecos provenientes de diferentes alvos na superfície não têm suas posições confundidas em função da recepção simultânea dos mesmos pelo sistema sensor.

Neste tipo de geometria, são definidas duas dimensões básicas e dois ângulos: linha de visada ("slant range"), distância no solo ("ground range"), ângulo de depressão ( $\varphi$ ) e ângulo de incidência ( $\theta$ ).

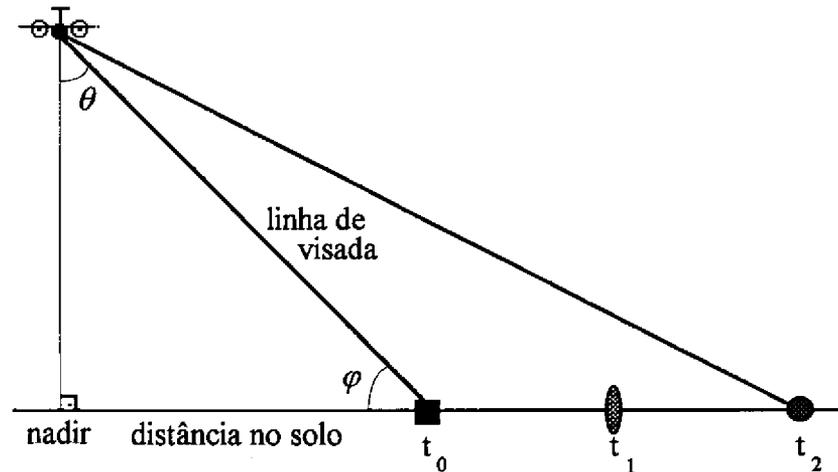


Fig. 2.9 - O imageamento com visada lateral e suas dimensões básicas.

A determinação da distância no solo depende apenas do conhecimento prévio da geometria do sistema, como se pode notar na Figura 2.9. A determinação da linha de visada ( $LV$ ), entretanto, é feita a partir da diferença de tempo entre a emissão e a recepção do pulso radar ( $\Delta t$ ), considerada a velocidade da luz ( $c$ ), como se segue:

$$LV = \frac{c\Delta t}{2}$$

Um radar de visada lateral proporciona três tipos distintos de resolução: resolução na linha de visada ("slant range resolution"), resolução transversal ("cross-track" ou "ground range resolution") e resolução em azimute ("along-track" ou "azimuth resolution"). A Figura 2.10 mostra a geometria detalhada para a determinação dessas resoluções.

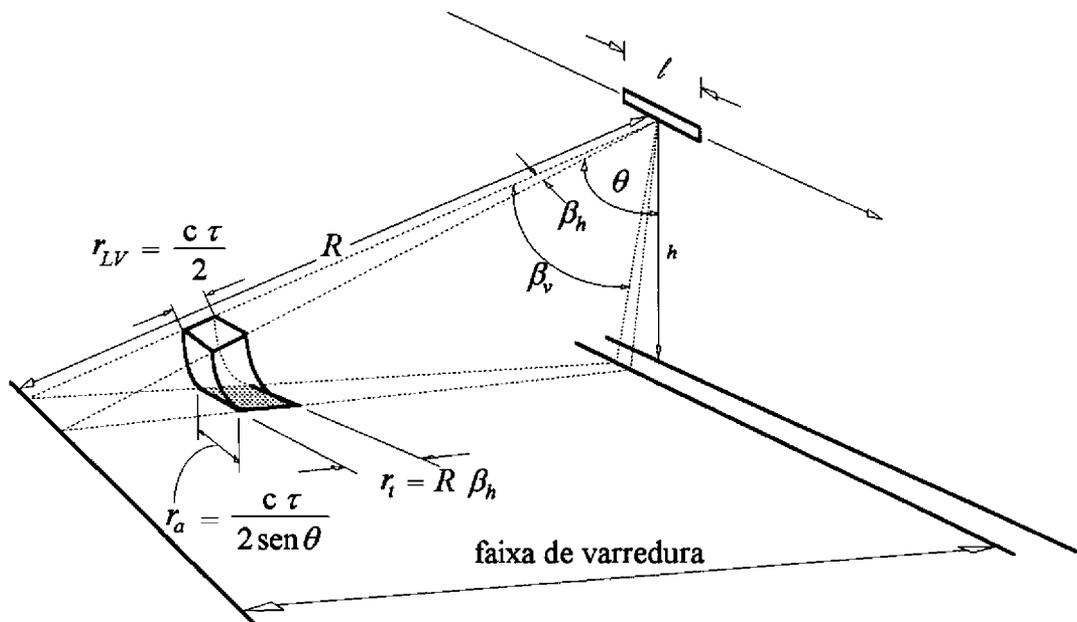


Fig. 2.10 - Parâmetros de resolução da imagem radar.

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

Num sistema de abertura real, a resolução está vinculada a dois parâmetros principais: largura horizontal do feixe ( $\beta_h$ ) e duração do pulso ( $\tau$ ). A largura horizontal do feixe é dada em radianos e é aproximadamente o valor da razão entre o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e o comprimento da antena ( $l$ ) utilizados, como se segue:

$$\beta_h \cong \frac{\lambda}{l} (\text{rad}),$$

A resolução em azimute ( $r_a$ ) é igual ao arco correspondente a  $\beta_h$ , em função da distância da linha de visada ( $R$ ) e é dada por:

$$r_a = R\beta_h$$

Como  $R = h/\cos\theta$  (onde  $h$  é a altura de vôo), tem-se:

$$r_a = \frac{\beta_h h}{\cos\theta}. \quad (2.1)$$

Como se pode observar facilmente, quanto mais distante o sensor, maior será o arco correspondente e, conseqüentemente, pior a resolução em azimute.

Conforme Ulaby *et al.* (1982), num pulso de duração  $\tau$ , a resolução na linha de visada é dada por:

$$r_{LV} = \frac{c\tau}{2}.$$

A resolução transversal ( $r_t$ ) nada mais é que a projeção da resolução na linha de visada ( $r_{LV}$ ) no solo, e é dada por (Ulaby *et al.*, 1982):

$$r_t = \frac{c\tau}{2 \operatorname{sen} \theta}. \quad (2.2)$$

Assim sendo, quanto mais curta for a duração do pulso, melhor será a resolução transversal. A restrição na obtenção deste pulso, porém, está no fato de que, quanto mais curto ele for, maior será a potência de pico exigida para o sistema, para manter-se a mesma potência média.

Verifica-se, de acordo com a Figura 2.10, que  $r_t$ , sendo função do ângulo de incidência, não terá o mesmo valor para diferentes linhas de visada.

Por causa dos parâmetros  $\operatorname{sen} \theta$  e  $\operatorname{cos} \theta$ , as resoluções em azimute e transversal são função do ângulo de incidência ( $\theta$ ) e, conseqüentemente, da linha de visada. Assim sendo,  $r_t$  é degradada nas distâncias menores, enquanto  $r_a$  é degradada nas distâncias maiores. Isto faz com que a forma do pixel seja alongada na direção transversal ("cross-track") para pequenas distâncias e na direção longitudinal ("along-track") para longas distâncias. Portanto, ao se especificar a resolução de um RAR, pode-se utilizar a largura de feixe e a resolução na linha de visada para descrever o desempenho do sistema, ao invés de determiná-la como sendo de *alguns metros*. Note-se, a partir das Equações 2.1 e 2.2, na Figura 2.11, que o pixel de menor área ( $r_a \cdot r_t$ ) ocorre sempre a  $45^\circ$ .

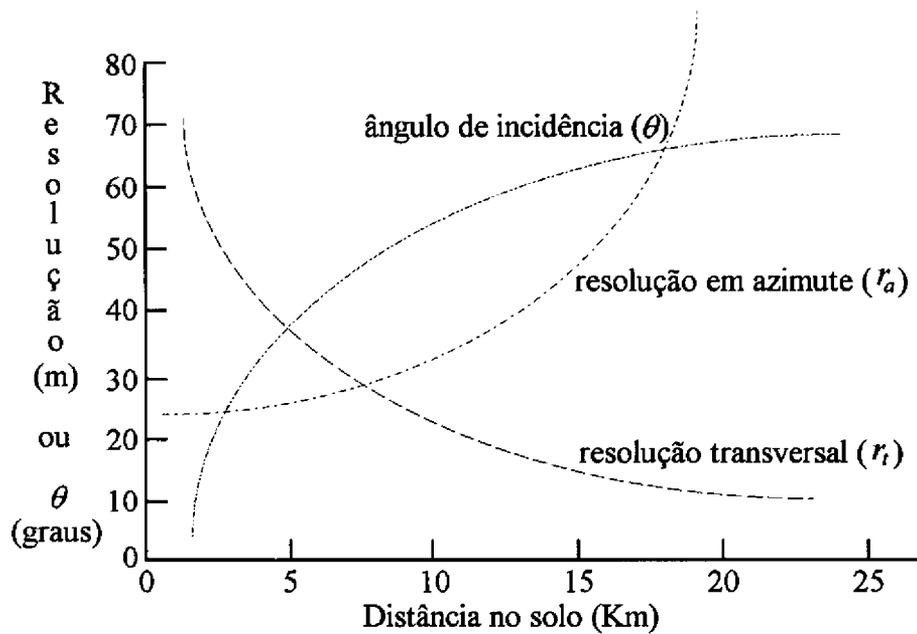


Fig. 2.11 - Exemplo de resolução RAR com os seguintes parâmetros:

$$h = 7.5 \text{ km}, \tau = 100 \text{ ns} \text{ e } \beta_h = 3 \text{ mrad } (0.17^\circ).$$

FONTE: Adaptada de Ulaby *et al.* (1982), p. 572.

#### 2.4.3 - RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR)

Basicamente, a diferença entre SAR e RAR reside no método de processamento dos dados brutos. No SAR, uma longa antena efetiva é utilizada, porém, sintetizada pelo processamento do sinal, ao invés da aplicação de uma antena fisicamente longa. O resultado obtido é, paralelamente à redução física da antena, a melhora na resolução em azimute. Além disso, esta resolução é independente da distância, o que faz com que o SAR possa ser utilizado tanto em aeronaves quanto em espaçonaves, sem que se comprometa a resolução azimutal.

#### 2.4.4 - RESOLUÇÃO ESPACIAL NO SAR

As resoluções no SAR, transversal e em azimute, são calculadas de formas distintas daquelas utilizadas para o RAR. Ainda que a resolução transversal do RAR se aplique em princípio ao SAR, ela não é usualmente adotada, já que os sistemas de abertura sintética utilizam, em geral, pulsos de frequência modulada ("chirpped

pulses") a fim de obter uma melhor resolução transversal sem, entretanto, ter que recorrer a pulsos muito curtos.

Neste caso, temos a seguinte resolução transversal:

$$r_t = \frac{c}{2B \text{sen } \theta},$$

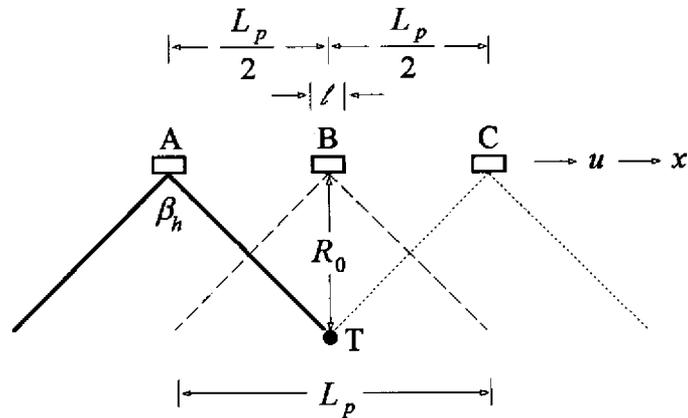
onde  $B$  é a largura de banda do pulso modulado linearmente em frequência e que pode ser tão larga quanto necessária, sem que para isso seja requerida uma grande potência de pico, quando a técnica de modulação de frequência é utilizada.

O cálculo da resolução em azimuth, por sua vez, é feito de uma forma bastante distinta daquela vista para o RAR. Para determinar  $r_a$  quantitativamente, Ulaby *et al.* (1982) fazem uso de duas abordagens: do ponto de vista do estreitamento do feixe por efeito Doppler e do ponto de vista da antena sintetizada, sendo esta última utilizada neste trabalho para explicar o cálculo de  $r_a$ .

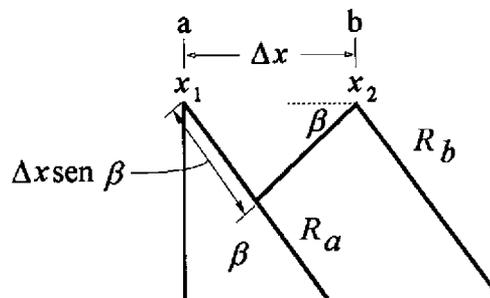
A Figura 2.12 (a) mostra três posições diferentes da antena de um sistema radar: A, B e C. Na posição A, o feixe da antena começa sua varredura sobre o alvo (T). Na posição B, a antena está no través deste alvo e na posição C, o feixe está prestes a encerrar a varredura pelo alvo. Assim sendo, o comprimento máximo de uma rede discreta de antenas, com abertura  $\beta_{hr}$ , que podem observar simultaneamente um alvo pontual, é dado por:

$$L_p = \beta_{hr} R_0,$$

onde  $\beta_{hr}$  é a largura horizontal do feixe da suposta antena real.



(a) Feixes da antena iluminando o alvo T



(b) Dois elementos adjacentes na rede

Fig. 2.12 - Concepção de uma rede sintética radar.

FONTE: Adaptada de Ulaby *et al.* (1982), p. 644.

O cálculo da largura de feixe da rede de antenas deve levar em conta a mudança de fase associada a um dado alvo, devido à trajetória de ida e volta percorrida pelo pulso entre a antena e o alvo. A Figura 2.12 (b) é um diagrama ilustrativo das variações de fase de dois elementos numa rede discreta de antenas. A largura de feixe é determinada pela mudança de fase relativa nas trajetórias entre o alvo e os elementos na rede. Dois elementos adjacentes numa rede, separados por uma distância  $\Delta x$  são mostrados, com porções dos raios  $R_a$  e  $R_b$  saindo desses elementos em direção ao alvo.  $R_a$  e  $R_b$  podem ser considerados paralelos entre si, já que os elementos estão bastante próximos um do outro, dada a distância que os separa do alvo. Assim sendo, a diferença em distância dos dois raios ao longo da rede é:

$$R_a - R_b = \Delta x \operatorname{sen} \beta.$$

A diferença de fase associada com esta distância é:

$$\Delta \varphi_r = k(R_a - R_b) = k \Delta x \operatorname{sen} \beta,$$

onde  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

Para a rede, deve-se considerar tanto o caminho de ida da radiação, como o de volta, para a variação de fase. Neste caso, temos:

$$\Delta \varphi_s = 2 k(R_a - R_b) = 2 k \Delta x \operatorname{sen} \beta.$$

Para a discreta de antenas de comprimento  $L$ , onde  $L$  é suficientemente longo para se ter uma largura de feixe pequena, o valor da abertura  $\beta$  do feixe associado com o primeiro nulo é dado por (Ulaby *et al*, 1982):

$$2 k L \operatorname{sen} \beta \cong 2 k L \beta = \pi.$$

Assim sendo, o valor de  $\beta$  associado ao primeiro nulo para a rede discreta de antenas é  $\beta_s = \pi/2kL$ . Essa rede discreta, por ser sintetizada a partir de uma única antena de abertura angular  $\beta_{hr}$  recebe o nome de antena sintética. A separação entre os elementos da rede sintética é dada por  $\mu \cdot T_p$ , onde  $\mu$  é a velocidade linear de deslocamento da antena e  $T_p$  é o período de repetição de pulsos transmitidos.

Para uma antena real de comprimento  $L$ , o valor de abertura  $\beta$  associado ao primeiro nulo é dado por:

$$\beta = \frac{\pi}{kLB}.$$

O fator 2 de diferença entre  $\beta$  da antena de abertura real e de abertura sintética deve-se ao fato de que, na antena de abertura real considera-se apenas a

irradiação em um único sentido, ao passo que na antena de abertura sintética, que é um sistema coerente, considera-se a irradiação nos dois sentidos (de ida e volta).

Desta forma, a largura do feixe da antena de abertura sintética é a metade da largura do feixe da antena de abertura real, de mesmo comprimento.

Por esta razão, a largura de feixe  $\beta_{hs}$  para a antena sintética é:

$$\beta_{hs} = \frac{\lambda \alpha_{hs}}{2L},$$

onde  $\alpha_{hs}$  é o "aperture illumination taper factor" associado à antena sintética. Caso a antena seja uniformemente iluminada, então  $\alpha_{hs} = 0.88$  (Ulaby *et al.*, 1981, cap. 3). Entretanto, a maioria das antenas, reais ou sintéticas, não têm iluminação uniforme, tendo usualmente o valor de  $\alpha_{hs}$  maior que 0.88. Normalmente, assume-se este valor como sendo igual a 1, visando a simplificação dos problemas. Porém, deve-se ter em mente que as antenas, reais e sintéticas, têm um fator  $\alpha_h$  superior a 1 na maior parte das vezes.

Utilizando a Equação 2.1 para a largura de feixe da antena sintética, a resolução em azimute é obtida como se segue:

$$r_a = \beta_{hs} R = \frac{\lambda R \alpha_{hs}}{2L}, \quad (2.3)$$

Esta expressão não leva em conta o comprimento total  $L_p$  da antena sintética utilizada. Caso todo o potencial de comprimento  $L_p$  seja utilizado, a melhor resolução possível ( $r_{ap}$ ) para o SAR é dada por:

$$r_{ap} = \frac{\lambda R \alpha_{hs}}{2L_p} = \frac{\lambda \alpha_{hs}}{2\beta_{hr}}, \quad (2.4)$$

Temos então, que a resolução alcançável é inversamente proporcional à largura de feixe da antena real utilizada no SAR. A largura de feixe é:

$$\beta_{hr} = \frac{a_{hr}\lambda}{\ell},$$

onde  $a_{hr}$  é o "aperture illumination taper factor" para a antena real e  $\ell$  é o seu comprimento. Este valor de  $\beta_{hr}$  pode ser substituído na Equação 2.4 para se obter a resolução potencial sintética em termos de comprimento da antena real e do "aperture illumination taper factor". Assim, temos:

$$r_{ap} = \frac{\lambda a_{hs} \ell}{2 a_{hr} \lambda} = \left[ \frac{a_{hs}}{a_{hr}} \right] \cdot \left[ \frac{\ell}{2} \right]. \quad (2.5)$$

Considerando-se que os "aperture illumination taper factors" são geralmente iguais tanto para a antena sintética quanto para a antena real, o resultado usual fica sendo:

$$r_{ap} \cong \frac{\ell}{2}.$$

Assim, temos que a melhor resolução sintética potencial é a metade do comprimento da antena real. Ela é independente, ao mesmo tempo, da distância em relação ao alvo e do comprimento de onda. O motivo pelo qual ela é independente da distância está no fato de que o comprimento potencial da antena sintética  $L_p$  é diretamente proporcional à distância, ou seja, quanto maior a distância, maior o arco da abertura. O motivo pelo qual há independência em relação a  $\lambda$  é similar: se  $\lambda$  é maior, o comprimento da antena sintética potencial é maior e o resultado final é que a resolução se mantém igual, já que a largura de feixe sintética equivalente também se mantém igual. Podemos fazer um contraste com a resolução em azimute de uma antena real:

$$r_{ar} = \beta_{hr} R = \frac{a_{hr} \lambda R}{\ell},$$

onde a resolução tem valores maiores quando se aumenta  $\lambda$  ou  $R$ .

A melhor resolução alcançável para um SAR, tendo uma antena fixada à aeronave ou espaçonave voando em linha reta, é aquela apresentada na Equação 2.5. Embora a melhor resolução possível seja obtida utilizando-se a total abertura sintética

disponível ( $L_p$ ), isso normalmente não é utilizado, às vezes por causa da complexidade do radar, às vezes por causa da necessidade de múltiplas amostras independentes. Assim sendo, quando uma abertura menor é utilizada, a resolução é aquela dada pela Equação 2.3.

## 2.5 - EQUAÇÃO RADAR

Equação radar é o nome dado à relação fundamental entre as características do radar, do alvo e do sinal recebido pelo sensor (Ulaby *et al.*, 1982). Embora haja uma forma fundamental, esta equação pode ser apresentada de várias formas, em função do tipo de radar utilizado (RAR ou SAR) e ainda, do parâmetro tomado como referência. Apresentamos a seguir algumas dessas formas.

Conforme Skolnik (1980), se considerarmos a potência de pico transmitida pelo radar como sendo  $P_t$  e se utilizarmos uma antena omnidirecional (isotrópica), a potência por unidade de área a uma distância  $R$  do radar é igual à potência transmitida dividida pela área da superfície  $4\pi R^2$  de uma esfera imaginária de raio  $R$ . Assim sendo, temos:

$$D_i = \frac{P_t}{4\pi R^2},$$

onde  $D_i$  é a densidade de potência para uma antena isotrópica.

A potência de pico  $P_t$  representa a potência média da portadora de rádio-freqüência.

Radares porém, usualmente se utilizam de antenas não-isotrópicas, para canalizar o máximo da potência transmitida  $P_t$  para alguma direção em particular. Neste caso, o ganho  $G_t$  de uma antena é uma medida da potência que é aumentada na direção do alvo se comparada com a potência que seria irradiada por uma antena isotrópica. O ganho pode ser definido como a razão da máxima intensidade irradiada da antena em questão, pela intensidade irradiada por uma antena isotrópica, sem perda, com a mesma potência de entrada.

Desta forma, a densidade de potência no alvo a partir de uma antena direcional com ganho  $G_t$  é:

$$D_{ni} = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2},$$

onde  $D_{ni}$  é a densidade de potência para uma antena não-isotrópica.

O alvo intercepta uma porção da potência irradiada e parte dessa potência é re-irradiada na direção do radar. Temos assim o parâmetro  $\sigma$ , que é a seção transversal radar do alvo e é dimensionado em termos de área (m<sup>2</sup>). Tal parâmetro é uma característica intrínseca ao alvo e representa o tamanho como é visto pelo radar. Assim sendo, para uma dada área, que é definida por  $\sigma$ , temos agora a potência  $P$  re-irradiada na direção do radar, definida da seguinte forma:

$$P = \frac{P_t G_t \sigma}{4\pi R^2},$$

Como o sinal retorna ao radar, a densidade de potência do eco no radar fica sendo:

$$D_e = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi R^2)^2},$$

onde  $D_e$  é a densidade de potência do eco no radar.

A antena do radar, porém, detecta apenas parte da potência deste eco. Se a área efetiva de coleta da antena de recepção é  $A_r$ , a potência  $P_r$  do eco que chega ao radar é:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi R^2)^2}. \quad (2.6)$$

Temos assim, a forma fundamental da equação radar. Note-se que dois parâmetros importantes da antena são o ganho de transmissão e a área de recepção. A teoria das antenas nos fornece a seguinte relação entre o ganho da antena e a área efetiva:

$$G_t = \frac{4\pi A_t}{\lambda^2}, \quad \text{ou} \quad G_r = \frac{4\pi A_r}{\lambda^2}.$$

Ora, se assumirmos que a antena de transmissão é a mesma que a de recepção (normalmente é o caso), temos  $G_t = G_r = G$  e  $A_t = A_r = A_e$ . Substituindo estas relações na Equação 2.6, temos:

$$P_r = \frac{P_t A_e^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 R^4} \quad \text{ou} \quad P_r = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}, \quad (2.7)$$

onde duas formas são apresentadas, uma em termos de ganho da antena e outra em termos de área da antena.

Neste caso, o radar é dito monostático, pois a antena de transmissão é a mesma de recepção. Caso o radar fosse bistático (antenas distintas para transmissão e recepção), teríamos a seguinte equação:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2}. \quad (2.8)$$

Deve-se ter sempre em mente que, quando ( $G_t = G_r = G$ ,  $A_t = A_r = A_e$  e  $R_t = R_r = R$ ) é aplicável, a Equação 2.8 também é válida para radares monostáticos.

As Equações 2.7 e 2.8 são gerais tanto para alvos pontuais como para alvos extensos. Em outras palavras, a seção transversal de radar ( $\sigma$ ) não foi definida em relação a qualquer característica de tipos de alvo nem de algum alvo em particular. Quando se utiliza um sistema radar em sensoriamento remoto, pretende-se estudar alguma área específica e desta forma, um modelo específico para o espalhamento de área se mostra apropriado.

O modelo fundamental de espalhamento de área utilizado na determinação da equação radar é baseado na premissa de que a área observada a qualquer instante consiste de vários alvos pontuais de espalhamento cujas localizações são essencialmente aleatórias. As amplitudes do sinal eco, devido a esses alvos pontuais, também podem ser consideradas aleatórias independentes. Assume-se usualmente que nenhuma amplitude isolada seja comparável com o sinal total recebido, ou seja, nenhum difusor isolado é

considerado dominante. Considera-se também, que as fases dos ecos são variáveis aleatórias independentes.

Considerando válido o princípio de superposição de potência dos  $n$  refletores pontuais, dentro de uma célula de resolução, a potência recebida fica:

$$P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{P_t G_i^2 \sigma_i}{R_i^4} \quad (2.9)$$

$P_{ti}$  está incluída no somatório, da mesma forma que  $G_i$  e  $R_i$ , devido ao fato de que a potência que ilumina diferentes partes da área pode não ser a mesma, como não serão suas distâncias do radar. Além disso, desde que diferentes difusores estão em direções ligeiramente diferentes em relação ao radar, eles podem experimentar ganhos diferentes.

O próximo passo no procedimento é reescrever a seção transversal radar do subalvo pontual, considerado para um alvo extenso:

$$\sigma_i = \frac{\sigma_i \Delta A_i}{\Delta A_i} \quad (2.10)$$

O numerador desta equação simplesmente representa a magnitude da seção transversal radar multiplicada pela área associada no solo. Define-se então o coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^o$ ) como a média dos valores de seção transversal de radar por unidade de área, dado por:

$$\sigma^o = \left\langle \frac{\sigma_i}{\Delta A_i} \right\rangle \quad (2.11)$$

O coeficiente de retroespalhamento é um parâmetro que caracteriza, convenientemente, alvos extensos homogêneos.

Com a Equação 2.11 aplicada à 2.9, tem-se a potência média recebida:

$$\bar{P}_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{P_t G_t^2 \sigma^\circ \Delta A_i}{R_i^4}. \quad (2.12)$$

Caso a condição que permite o uso de  $\sigma^\circ$  seja satisfeita, pode-se passar ao limite do somatório, substituindo-o numa integral, como segue:

$$\bar{P}_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \int_{a_i} \frac{P_t G_t^2 \sigma^\circ dA}{R^4}. \quad (2.13)$$

onde  $a_i$  é a área relativa a uma célula de resolução.

Esta é a forma da equação radar para alvos extensos e a forma mais largamente utilizada para radares de sensoriamento remoto.

Convém notar porém, as limitações nesta forma de equação radar:

- 1) É necessária a existência de muitos difusores pontuais numa região, definida pela célula de resolução, para que a integral da Equação 2.13 seja válida.
- 2) É necessária ainda, a existência de muito mais difusores na área total iluminada pela antena, para que seja considerado um alvo extenso.
- 3) É necessária a validade do princípio de superposição de potência, para os ecos dos refletores pontuais.

Assim por exemplo, se a área iluminada tem somente uns poucos metros e contém um grande ponto de espalhamento (tal como um carro) que tenha dois ou três centros principais de espalhamento, o retorno será dominado pelo automóvel e aquela noção de coeficiente de retroespalhamento não se aplicará. Por outro lado, uma área do mesmo tamanho coberta de grama, provavelmente conteria um número de difusores pontuais mais do que suficiente para permitir o uso do coeficiente de retroespalhamento. Assim sendo, deve-se ter muito cuidado ao utilizar este conceito para se assegurar de sua aplicabilidade em qualquer caso particular.

### 2.5.1 - EQUAÇÃO RADAR PARA O RAR

A equação radar desenvolvida anteriormente é aplicável a alvos extensos. Normalmente, é este o caso na utilização de um RAR, para cuja geometria típica (Figura 2.10), a Equação 2.13 se torna:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma^\circ}{(4\pi)^3 R^4} \cdot [R\beta_h] \cdot \left[ \frac{c\tau}{2 \sin \theta} \right], \quad \text{ou} \quad P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma^\circ \beta_h c \tau}{2(4\pi)^3 R^3 \sin \theta}, \quad (2.14)$$

onde  $P_r$  e  $P_t$  são as potências recebida e transmitida,  $G$  é o ganho da antena,  $\sigma^\circ$  é o coeficiente de retroespalhamento e a área iluminada é definida pelo produto  $r_a \cdot r_r$ , utilizando-se os valores das Equações 2.1 e 2.2.

Freqüentemente, a potência média transmitida é utilizada, ao invés da potência de pico. Para uma taxa de repetição de pulso  $f_p$  (pulsos·s<sup>-1</sup>), a potência média é:

$$P_{mt} = P_t \tau f_p, \quad (2.14a)$$

de forma que a Equação 2.14 pode ser escrita como:

$$P_r = \frac{P_{mt} G^2 \lambda^2 \sigma^\circ \beta_h c}{2(4\pi)^3 R^3 f_p \sin \theta}. \quad (2.14b)$$

Entretanto, ao estudar-se sistemas radares, interesse maior é dedicado à razão sinal/ruído do que ao nível de potência recebida. Essa razão é dada por (Ulaby *et al*, 1982):

$$S_n = \frac{P_r}{kT_0BF}, \quad (2.15)$$

onde  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T_0$  é a temperatura de referência (290 K),  $B$  é a largura de banda do receptor e  $F$  é a figura de ruído do receptor.  $kT_0BF$  representa a potência de ruído térmico, na saída do receptor.

Com a Equação 2.14b aplicada à 2.15, obtém-se:

$$S_n = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma \beta_h c \tau}{2(4\pi)^3 R^3 k T_0 B F \sin \theta} \quad (2.16)$$

Vemos, desta forma, a equação radar para o RAR, apresentada entretanto, em termos de razão sinal/ruído.

### 2.5.2 - EQUAÇÃO RADAR PARA O SAR

Embora possa ser escrita de muitas outras formas, a equação radar para o SAR pode ser expressa da mesma forma que para o RAR.

A Equação 2.14, que define a potência recebida pelo RAR em termos de largura do feixe e comprimento de pulso, pode ser reescrita em termos das resoluções azimutal e transversal  $r_a$  e  $r_t$ , como segue:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma^0 r_a r_t}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.17)$$

Caso seja desejável, podemos escrever, do mesmo modo como para o RAR, esta equação em termos de razão sinal/ruído. Assim, temos:

$$S_{n1} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma^0 r_a r_t}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 B F} \quad (2.18)$$

Note-se que a razão sinal/ruído para um pulso isolado é denotada por  $S_{n1}$ . No SAR, entretanto, ocorre uma integração coerente do sinal e desta forma, é necessário que se faça um somatório da razão sinal/ruído de todos os pulsos utilizados na construção da antena sintética (Ulaby *et al*, 1982).

Como o número de pulsos da antena sintética é  $N_s$ , obtém-se:

$$S_{nNs} = N_s S_{n1} \quad (2.19)$$

Para se utilizar este resultado no sentido de se modificar a Equação 2.18, poderíamos expressar  $N_s$  em termos de parâmetros de sistemas radar. Note-se primeiramente, que  $N_s$  é simplesmente a razão entre o comprimento da antena sintética e a distância percorrida no intervalo de dois pulsos. Ou seja:

$$N_s = \frac{L}{uT_p} + 1 \cong \frac{L}{uT_p},$$

sendo  $L$  o comprimento da antena sintética,  $u$  a velocidade e  $T_p$  o período de repetição do pulso. Como  $L$ , por si só, não é um parâmetro fundamental do sistema, utilizamos a Equação 2.3 para relacioná-lo a  $r_a$ , onde:

$$r_a = \frac{\lambda R a_{hs}}{2L},$$

obtendo-se:

$$N_s = \frac{\lambda R a_{hs}}{2r_a u T_p}. \quad (2.20)$$

A combinação da Equação 2.20 com as Equações 2.19 e 2.18 nos fornece, após  $N_s$  pulsos, a seguinte razão sinal/ruído:

$$S_{nN_s} = \frac{P_t G^2 \lambda^3 a_{hs} \sigma^o r_t}{2(4\pi)^3 R^3 k T_0 B F u T_p}. \quad (2.21)$$

Esta equação tem algumas conseqüências bastante interessantes. Observa-se, por exemplo, que a razão sinal/ruído é independente de  $r_a$ . Ou seja, pode-se efetuar um processamento visando a melhor resolução alcançável ( $r_{ap}$ ) ou uma resolução mais pobre, sem que  $S_{nN_s}$  seja mudado. De fato, é possível demonstrar que isto equivale à expressão utilizada para o RAR na Equação 2.16. Ou seja, não seria necessário qualquer processamento de abertura sintética, caso um pulso apenas ( $N_s = 1$ ) permitisse a obtenção da resolução de abertura real. Isto significa dizer que a potência requerida para o SAR é independente de  $r_a$  e é determinada apenas pela resolução transversal  $r_t$ . Por outro lado, a complexidade do processador é determinada pelo grau de refinamento

de  $r_a$ . Assim sendo, se é desejável obter pixels de área constante, deve-se estabelecer um compromisso entre a potência transmitida e a complexidade do processador, através do comprometimento entre  $r_a$  e  $r_t$ , observando-se a manutenção do produto final.

Como a compressão de pulsos é normalmente utilizada no SAR, a potência média é mais importante que a potência de pico. Para um pulso retangular, consideramos a duração de pulso como sendo  $\tau$ . Para qualquer outra forma de pulso, podemos encontrar uma duração  $\tau_p$  equivalente, lembrando que a energia no pulso com a forma considerada, pode ser comparada com a energia de um pulso retangular equivalente, da seguinte forma:

$$P_{t\max} \tau_p = \int P_t(t) dt .$$

Utilizando-se esta definição para  $\tau$ , pode-se substituir a potência de pico  $P_t$  das Equações 2.17 e 2.18 e, particularmente da Equação 2.21, por:

$$P_t = \frac{P_m}{\tau_p f_p}, \quad (2.22)$$

onde  $f_p$  é a razão de repetição de pulso e  $P_m$  é a potência média. Ao substituirmos 2.22 na Equação 2.21, devemos observar que  $f_p T_p \equiv 1$ . Podemos ainda, relacionar a largura de banda da Equação 2.21 a  $\tau_p$ , definindo um "pulse-taper factor"  $\alpha_B$  correspondente aos "aperture-taper factors"  $\alpha_h$  e  $\alpha_v$ . Utilizando este fator, encontramos a relação entre  $B$  e  $\tau_p$  ou entre  $B$  e as resoluções na linha de visada ( $r_{LV}$ ) e transversal ( $r_t$ ), como sendo:

$$B = \frac{\alpha_B}{\tau_p} = \frac{\alpha_B c}{2r_{LV}} = \frac{\alpha_B c}{2r_t \sin \theta} \quad (2.22a)$$

Substituindo estas relações na equação 2.21, a expressão final obtida para a razão sinal/ruído é:

$$S_{n/s} = \frac{P_m G^2 \lambda^3 \alpha_{hs} \sigma^o r_t}{2(4\pi)^3 R^3 k T_0 F u \alpha_B} \quad (2.23)$$

Observe-se que a razão sinal/ruído é fortemente afetada pelo ganho, pelo comprimento de onda e pela distância.

Nos casos onde é importante encontrar a razão sinal/ruído para um dado sistema, a Equação 2.23 é a forma mais conveniente de equação radar. Entretanto, em muitos casos é necessário encontrar a potência média requerida para valores específicos de razão sinal/ruído e de outros parâmetros do sistema. Para o SAR, é ainda mais conveniente que se use a área da antena do que o ganho, porque os componentes individuais desta área estão relacionados com a resolução e a largura da faixa de varredura. A área efetiva  $A_e$  para uma antena com ganho  $G$  é:

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

Se, ao invés do ganho, utilizamos a área efetiva da Equação 2.23, obteremos para a potência média requerida, a seguinte relação:

$$P_m = \frac{S_{mNs} 8\pi R^3 k T_0 F u \lambda a_B L_F}{A_e^2 \alpha_{hs} \sigma^{\circ} r_t} \quad (2.24)$$

Aqui, um importante fator adicional, o fator de perda  $L_F$ , é incluído. Este fator se deve a perdas do sistema e ao fato de que o ganho não é o mesmo em todas as partes do feixe como ocorre no centro deste.

Embora a Equação 2.24 possa ser considerada a forma final para se expressar a equação radar em termos de  $P_m$ , a equação radar para o SAR é apresentada sob diferentes formas por outros autores. A forma de equação radar a ser utilizada será definida pelas aplicações desejadas ou as preferências individuais, de acordo com os vários parâmetros disponíveis para um determinado problema radar.

## 2.6 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS RADAR

No desenvolvimento da equação radar, podemos observar uma série de parâmetros envolvidos em sua definição. Com exceção do parâmetro  $\sigma$  (ou  $\sigma^{\circ}$  - vide 2.6.1), todos os outros dizem respeito ao sistema radar utilizado. Somente a seção

transversal radar ou o coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ) referem-se ao alvo, determinando portanto, o comportamento deste alvo frente a um sistema radar.

A partir da compreensão de que a interação entre a REM na faixa das microondas e os alvos se dá de forma inteiramente distinta daquela existente para a radiação óptica, estaremos aptos a entender porque o resultado do imageamento por radar é tão diferente daqueles obtidos por sensores ópticos. O parâmetro  $\sigma$  (ou  $\sigma^0$ ) define o comportamento dos alvos radar, determinando a *assinatura espectral* desses alvos. A descrição deste parâmetro e dos fatores que o influenciam é o assunto da seção seguinte.

#### 2.6.1 - SEÇÃO TRANSVERSAL RADAR ( $\sigma$ ) E COEFICIENTE DE RETROESPALHAMENTO ( $\sigma^0$ e $\gamma$ )

Ao interceptar um feixe de REM proveniente de um sistema radar, todo alvo pode ser caracterizado por três fatores comuns: uma área efetiva de recepção do alvo ( $A_s$ ), um ganho  $G_s$  de espalhamento na direção do receptor e um fator de perda por absorção  $f_a$ . A área efetiva de recepção do alvo ( $A_s$ ), em geral diferente de sua área real, pode ser entendida como a área do feixe incidente cuja potência seria totalmente removida, se assumíssemos que a potência do restante do feixe se mantivesse ininterrupta. A área efetiva  $A_s$  é função da orientação relativa do alvo com o feixe incidente, de forma que  $A_s$  se aplica somente na direção deste, enquanto o ganho  $G_s$  se aplica na direção do receptor, em função das características de espalhamento do alvo. O terceiro fator, o fator de perda por absorção  $f_a$ , leva em conta que o alvo, não sendo um isolante ou um condutor perfeito, absorve parte da radiação incidente, re-irradiando o restante em várias direções.

O produto da área efetiva  $A_s$  pelo ganho  $G_s$ , corrigido para o fator de perda  $f_a$ , define a seção transversal radar. Ou seja:

$$\sigma = A_s G_s \cdot (1 - f_a).$$

A seção transversal radar é uma característica do alvo e tem dimensões de área ( $m^2$ ). Ao analisá-lo isoladamente na equação radar, uma questão que surge é se as variáveis para o alvo, sistema de transmissão e recepção e rota de propagação são

variáveis independentes. Ou seja,  $\sigma$  é definido somente pelo alvo, ou consiste numa função dos meios pelo qual este alvo é medido? Segundo Ruck *et al.* (1970), os únicos parâmetros do sistema transmissor/receptor que afetam a seção transversal radar são: frequência, forma de onda transmitida, o caráter da frente de onda do campo incidente caso o alvo esteja próximo ao sistema e a polarização do sinal radar. Para todos esses parâmetros porém, a seção transversal ainda é função apenas do alvo *per se*, desde que qualquer frente de onda pode ser decomposta numa combinação linear de ondas planas, qualquer forma de onda pode, similarmente, ser decomposta nas suas componentes de frequência e  $\sigma$  é único para uma frequência e uma polarização particulares. Assim sendo, a seção transversal radar pode ser determinada por superposição a partir de uma combinação linear das respostas de ondas planas, frequências e polarizações.

Como já foi mencionado,  $\sigma$  tem dimensões de área ( $m^2$ ). Porém, geralmente encontramos objetos que são maiores que o feixe radar (alvos extensos). Desta forma, o retorno deve ser definido relativamente a uma unidade de área ( $1 m^2$ ): como um coeficiente de refletividade. Para tanto, duas definições são comuns:  $\sigma^0$  e  $\gamma$ , que são respectivamente a seção transversal radar por unidade de área e a seção transversal radar por unidade de área projetada ou simplesmente, coeficientes de retroespalhamento (de Loor, 1983). Desta forma, temos:

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A_k}, \quad \gamma = \frac{\sigma}{A_i}, \quad \sigma^0 = \gamma \cos \theta,$$

onde  $A_k$  é a área iluminada pelo sistema radar,  $A_i$  é a área projetada perpendicularmente ao feixe da antena na posição do alvo e  $\theta$  é o ângulo de incidência (a partir da nadir).

O gráfico apresentado na Figura 2.13 ilustra os valores dos coeficientes de retroespalhamento observados para várias classes de alvos, em função do ângulo de incidência.

Se o alvo radar tem seu comportamento caracterizado pelo coeficiente de retroespalhamento, este por sua vez, é afetado pelas características do alvo. A influência maior se deve às características geométricas, pois objetos isolados podem aparecer de maneiras bem distintas, conforme o ângulo no qual são imageados. Além da geometria do alvo, o coeficiente de retroespalhamento também é fortemente influenciado por duas

outras propriedades, também intrínsecas ao alvo, que são: rugosidade e permitividade, como veremos a seguir.

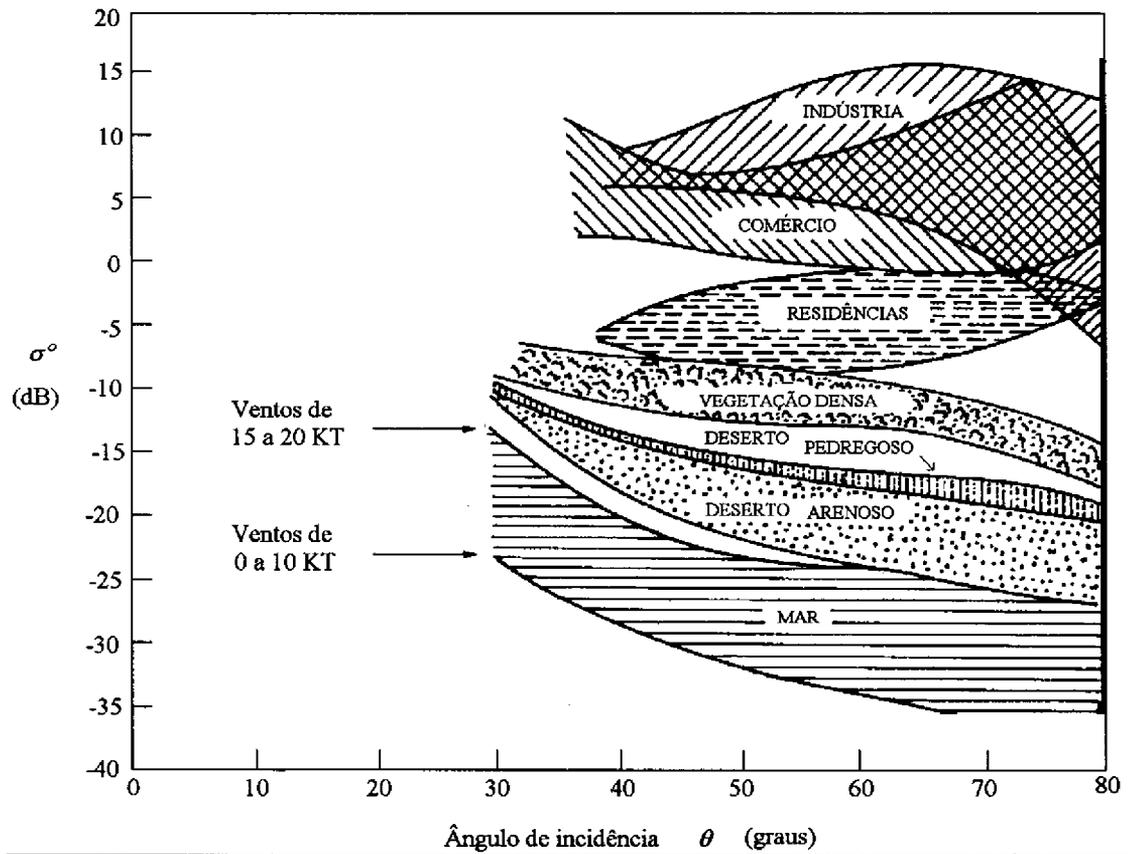


Fig. 2.13 - Valores de  $\sigma^\circ$  para várias classes de alvos a 9.375 GHz.

FONTE: Adaptada de Ulaby *et al.* (1982), p. 910.

### 2.6.2 - INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE

Conforme se observa na Figura 2.14, o retroespalhamento da onda possui uma forte dependência do microrelevo na superfície do terreno. Eletromagneticamente, uma superfície é considerada suave se sua variação em altura for muito menor que o comprimento de onda da REM. Uma superfície assim, é chamada de superfície especular (Ulaby *et al.*, 1981). Quando ocorre o oposto, a superfície é considerada rugosa, o que

nos leva a perceber que a rugosidade é uma noção relativa, uma função do comprimento de onda (Lichtenegger e Dallemund, 1989).

Um bom exemplo da influência da rugosidade no retroespalhamento pode ser observada nos limites entre água e terra. Superfícies líquidas tendem a ser suaves, refletindo boa parte da energia na direção oposta ao radar, com pouco espalhamento de volta em sua direção. A terra, por outro lado apresenta, geralmente, uma superfície bem mais rugosa e composta de elementos com geometrias diversas. Em geral, o retroespalhamento da água é bem mais fraco e homogêneo que o da terra, o que resulta em áreas bastante escuras nas imagens radar (Lichtenegger e Dallemund, 1989).

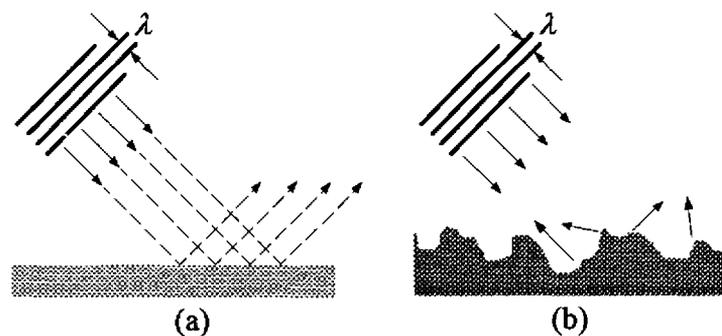


Fig. 2.14 - Ilustração de superfícies lisa (a) e rugosa (b).

FONTE: Leberl (1990), p. 65.

### 2.6.3 - INFLUÊNCIA DA PERMITIVIDADE

Na faixa das microondas, a refletividade (ou emissividade) de um determinado alvo é extremamente dependente da sua permitividade. Ela define a interação energia-matéria que o caracteriza e portanto, é uma característica inerente ao alvo.

Existem diversas maneiras de se conceituar ou definir a permitividade. Expressa, por exemplo, a relação entre a radiação no vácuo e no meio considerado, definindo para este meio um índice de refração, analogamente ao conceito de índice de refração na faixa do visível (Lei de Snell).

Para meios sem absorção, temos um dielétrico (isolante) ideal (sem absorção). Como a maioria dos alvos considerados não são dielétricos ideais, define-se a permitividade como sendo uma variável complexa:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (\text{permitividade complexa absoluta})$$

onde  $\varepsilon'$  é a constante dielétrica (quantidade de energia armazenada na forma de campo elétrico) e  $\varepsilon''$  é o fator de perda (quantidade de energia armazenada sob a forma de calor).

A partir do conhecimento da permitividade, pode-se, através das equações de eletromagnetismo, determinar a refletividade/emissividade do alvo e a capacidade de penetração da onda no meio, entre outras coisas. Na maioria dos casos,  $\varepsilon^*$  é função da frequência (exemplo típico é a água).

O grau de umidade tem uma influência direta nas propriedades elétricas do objeto alvo (solo, vegetação) e o coeficiente de retroespalhamento cresce com a permitividade do alvo, em consequência, com a umidade. Uma superfície de solo úmido resulta num espalhamento mais forte que a mesma superfície seca.

A penetração da onda, por sua vez, é inversamente proporcional ao conteúdo de água. Além disso, ela é também função do comprimento de onda (em geral, quanto maior o comprimento de onda, maior será a penetração).

## 2.7 - CARACTERÍSTICAS DA IMAGEM RADAR

Para a interpretação de uma imagem radar, devem ser levados em conta alguns fatores que afetam seriamente esta tarefa. A imagem radar tem uma visada em perspectiva (Figura 2.15) e os sinais de retorno são gravados em seqüência ao longo do tempo e produzem a componente transversal ("cross-track") da imagem; a dimensão azimutal ("along-track") é derivada ao movimento da plataforma na direção de vôo (Lichtenegger e Dallemand, 1989).

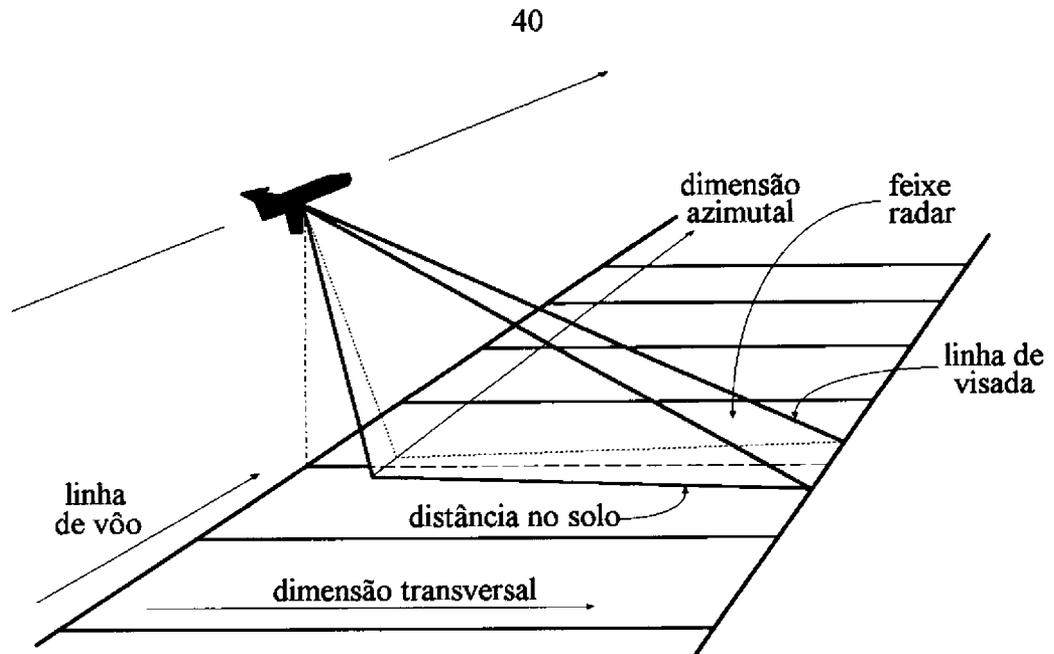


Fig. 2.15 - Geometria típica de um sistema SLAR.

Segundo Lichtenegger e Dallemand (1989), o imageamento SAR é obtido a partir de uma visada oblíqua mas, quando corrigido para linha de visada e distância no solo, se apresenta como numa visada vertical. Entretanto, efeitos topográficos de obliquidade não são removidos, o que significa dizer que limites de feições, como florestas por exemplo, e suas sombras continuarão a existir como feições distorcidas, independentemente das correções geométricas. Em áreas montanhosas, portanto, efeitos como *encurtamento* e *inversão* não podem ser removidos pelos meios usuais. A correção geométrica é normalmente conduzida de modo a "amarrar" o imageamento a uma base cartográfica e o método adequado de correção geométrica para imagens SAR em áreas planas requer a identificação de pontos de controle, que devem ser escolhidos com critério.

O comprimento de onda utilizado no sistema radar é também um parâmetro importante do imageador e afeta o resultado obtido na interpretação da imagem, particularmente em aplicações relacionadas à vegetação. Geralmente, a penetração no dossel será tanto maior quanto maior for o comprimento de onda (Lichtenegger e Dallemand, 1989).

### 2.7.1 - "SPECKLE"

Para se extrair das imagens informações úteis relacionadas a alguns parâmetros temáticos da superfície, é importante o entendimento de aspectos do radar que dificultam a análise da imagem, de tal forma que a influência temática seja claramente separada das influências oriundas do mapeamento radar (Lichtenegger e Dallemund, 1989).

Segundo Suits (1983), duas ondas são ditas coerentes entre si, se há uma relação regular ou sistemática entre suas amplitudes. Por outro lado, são ditas incoerentes (não-coerentes), se suas amplitudes estão relacionadas de forma aleatória.

Radares e lasers normalmente utilizam ondas monocromáticas na iluminação de seus alvos. As ondas refletidas por dois alvos próximos um do outro são altamente coerentes, de tal forma que a interferência provocada pelas ondas refletidas faz com que a imagem gerada por este tipo de sensor possa algumas vezes indicar nenhum sinal recebido desses dois alvos e por outras, quatro vezes o sinal médio de um dos dois alvos (dependendo da posição do sensor em relação aos alvos). Por esta razão (coerência das ondas), imagens radar têm, inerentemente, uma aparência granulada ("speckle").

O "speckle" é usualmente considerado como um ruído multiplicativo para o intérprete treinado em imagens tomadas a partir de ondas incoerentes, que não apresentam tal feição. Entretanto, as características do "speckle" têm um significado, já que o sinal médio recebido de uma dada direção não depende apenas da refletividade de várias partes do alvo mas, também - para ondas coerentes - do arranjo destas partes em relação ao sensor. Estes detalhes não são determináveis, mas podem ser revelados através da análise do "speckle".

### 2.7.2 - EFEITOS RELACIONADOS À GEOMETRIA

#### 2.7.2.1 - LINHA DE VISADA

O radar produz imagens baseado na linha de visada e não na distância no solo. A conversão da imagem para a dimensão real (distância no solo) pode ser feita ao custo da interpolação de dados, que irá afetar os dados estatisticamente (Lichtenegger, 1990).

Além disso, diferenças de altura da vegetação e do terreno provocam tonalidades claras (alta refletividade) nas feições voltadas para o feixe radar e sombras naquelas voltadas para o outro lado. Como se pode notar na Figura 2.16 as sombras radar de objetos com a mesma altura crescem com o aumento da linha de visada, ou seja, com o aumento do ângulo de incidência (Lichtenegger e Dallemand, 1989).

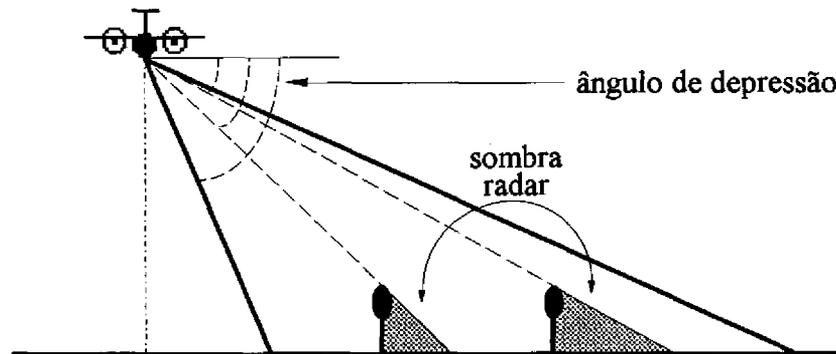


Fig. 2.16- Efeito da linha de visada no sombreamento radar.

#### 2.7.2.2 - SOMBREAMENTO ("SHADOWING")

A intensidade do pulso de retorno depende dos ângulos de depressão, incidência e da permitividade do alvo iluminado. Uma encosta perpendicular ao feixe radar possui maior refletividade que uma encosta com a face paralela ao mesmo. Portanto, será registrada numa tonalidade mais clara. Uma encosta mais íngreme que o ângulo de depressão provoca sombras radar (ausência de informação) na imagem, como pode ser visto na Figura 2.17 (Lichtenegger e Dallemand, 1989).

Em função do sombreamento radar, imagens SLAR se apresentam como uma fotografia de pequena escala e baixa elevação solar. O usuário porém, deve ser cuidadoso pois, apesar das aparências, as duas imagens são totalmente diferentes. Com o SLAR, observa-se o alvo como ele é *visto* pela REM, o que não ocorre quando observamos fotografias no espectro visível. É imperativo que todo intérprete compreenda essas diferenças, além do que, deve se lembrar que nas fotografias aéreas normalmente podem ser obtidas informações das áreas sombreadas, enquanto nas imagens radar as sombras não contêm qualquer informação. O preenchimento dessas

lacunas pode ser resolvido pelo princípio da visada dupla, ou seja, obtenção de imagens a partir de duas direções diferentes de visada. Adicionalmente, obtendo-se imagens sob perspectivas distintas, o volume de dados disponíveis é aumentado, revelando informações (especialmente feições lineares) que não são aparentes numa imagem de visada simples (Lichtenegger e Dallemand, 1989).

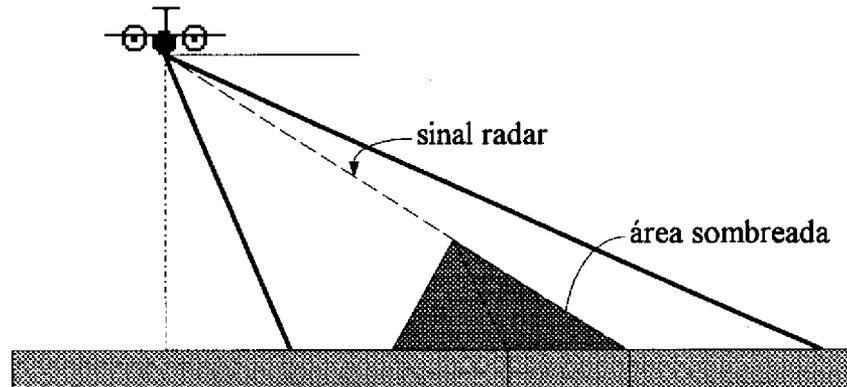


Fig. 2.17 - Sombreamento ("shadowing").

### 2.7.2.3 - ENCURTAMENTO ("FORESHORTENING")

O sombreamento não é o único efeito relacionado à variação de altura no terreno. Se a superfície fosse perfeitamente plana, elementos mais próximos do ponto subnadir seriam iluminados pelo feixe radar e refletiriam o sinal antes daqueles elementos mais afastados. Os sinais, portanto, seriam refletidos progressivamente no tempo da menor para a maior linha de visada. Todavia, se um elemento da superfície está mais elevado que os elementos vizinhos, ele irá interceptar o pulso radar mais cedo e será mostrado na imagem radar mais próximo do ponto sub-nadir do que realmente está. A Figura 2.18 mostra como este efeito provoca um encurtamento ("foreshortening") aparente, no plano da imagem radar, das encostas cuja parte inclinada está voltada para o radar, ou seja, a encosta  $\overline{AB}$  aparece encurtada na imagem como  $\overline{A'B'}$  (Lichtenegger e Dallemand, 1989).

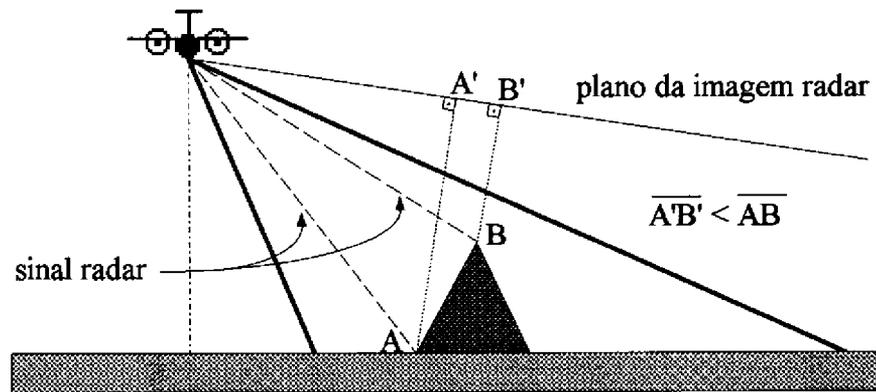


Fig. 2.18 - Encurtamento ("foreshortening").

#### 2.7.2.4 - INVERSÃO ("LAYOVER")

O plano da imagem radar na Figura 2.18 é uma projeção em ângulo reto da conversão entre distância do alvo e localização do mesmo na imagem resultante, a qual chamamos de imagem na linha de visada. Para casos extremos de encurtamento (Figura 2.19), a ordem de elementos de superfície na imagem radar é inversa àquela no solo, ou seja,  $B'$  está mais próximo que  $A'$ , enquanto  $A$  deveria ser mapeado antes de  $B$  para um posicionamento correto. A este efeito dá-se o nome de inversão (Lichtenegger e Dallemand, 1989).

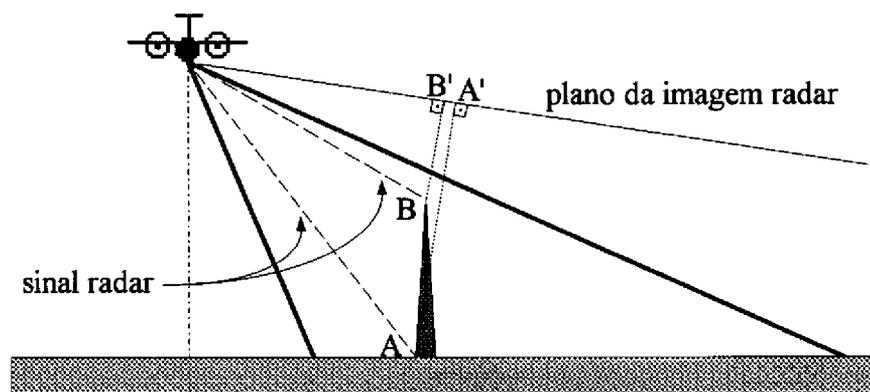


Fig. 2.19 - Inversão ("layover").

### 2.7.3 - EFEITOS DE MOVIMENTO

Além dos efeitos relacionados à geometria, podem ocorrer, durante a formação da imagem radar, efeitos decorrentes de movimentos não compensados da plataforma, especialmente ao nível aerotransportado. As plataformas orbitais são bem mais estáveis, além de não sofrerem os efeitos da turbulência na atmosfera terrestre.

A Figura 2.20 ilustra o efeito das quatro primeiras distorções comentadas. Se as distorções são adequadamente percebidas pelo sistema de navegação da plataforma, correções poderão ser implementadas no sentido de minimizar os efeitos dessas distorções.

#### 2.7.3.1 - VARIAÇÃO DE VELOCIDADE

Quando a velocidade de avanço do filme não está adequadamente sincronizada com a velocidade da aeronave, o resultado é um *estiramento* ou uma *compressão* não linear, conforme se aumenta ou diminui a velocidade da aeronave em relação ao filme, no sentido azimutal ("along track").

#### 2.7.3.2 - DESVIO LATERAL OU VERTICAL

Se houver um desses movimentos da aeronave em relação à linha de vôo pretendida, distorções curvilíneas ocorrerão, tornando uma linha reta e paralela à direção de vôo (tal como uma estrada, por exemplo) numa linha sinuosa.

#### 2.7.3.3 - GUINADA DA PLATAFORMA ("YAW")

O efeito de guinadas é a distorção da direção relativa entre diferentes pontos, conforme o posicionamento destes em relação à linha de vôo. Guinadas extremas, como a de uma curva, podem distorcer completamente uma imagem.

#### 2.7.3.4 - ARFAGEM DA PLATAFORMA ("PITCH")

Um movimento de arfagem da plataforma irá mover a intersecção do feixe radar com o solo, para a frente ou para trás da posição situada lateralmente ao ponto

subnadir. O efeito provocado é similar àquele proveniente da variação de velocidade em terrenos planos.

#### 2.7.3.5 - ROLAMENTO DA PLATAFORMA ("ROLL")

O rolamento lateral da plataforma produz o efeito de mudança de ganho da antena em diferentes pontos da imagem, modulando, conseqüentemente, a escala de cinza da imagem.

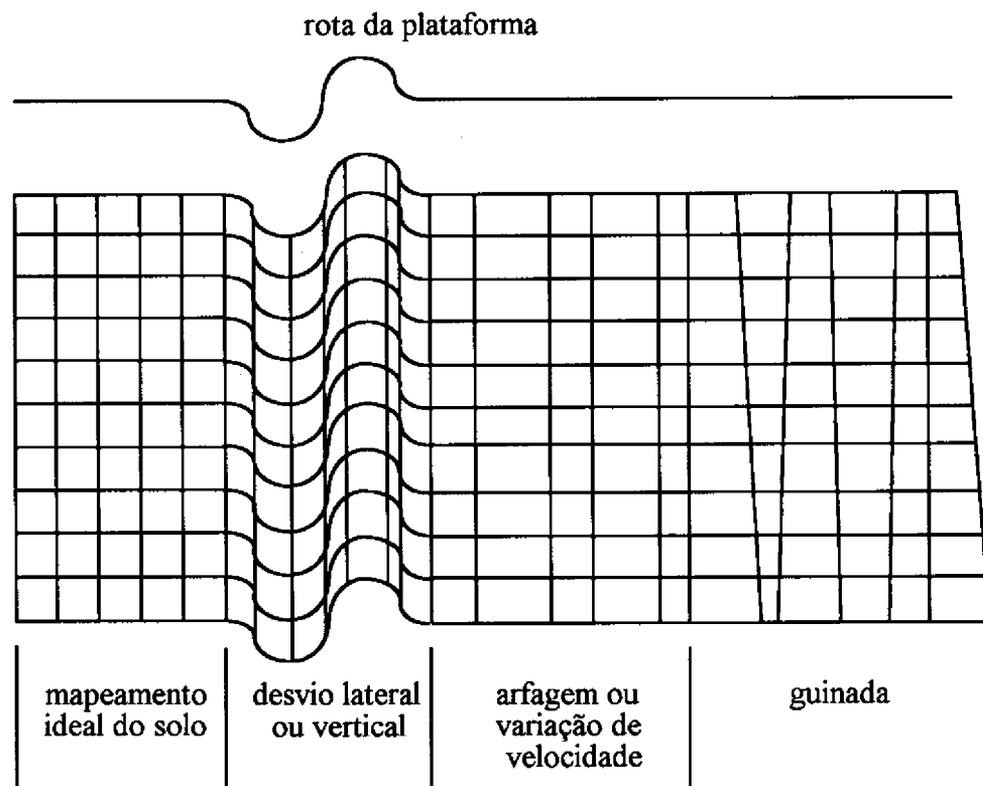


Fig. 2.20 - Distorções causadas por efeitos de movimento da plataforma não compensados.

FONTE: Adaptada de Ulaby *et al.* (1982), p. 618.

### CAPÍTULO 3

#### O SATÉLITE ERS-1: DESCRIÇÃO TÉCNICA

Este trabalho parte do princípio de que o satélite Landsat 5 é suficientemente conhecido e, portanto, dispensa qualquer explanação mais detalhada. Entretanto, devido à razoável proximidade de seu lançamento, realizado em 1991, o satélite ERS-1 é motivo de uma breve descrição técnica, baseada no trabalho de Francis *et. al.* (1991), visando a disponibilidade de material de consulta acerca deste sistema.

O Primeiro Satélite Europeu de Sensoriamento Remoto (ERS-1), foi concebido no fim da década de 70 e início da década de 80 como uma plataforma orbital capaz de efetuar medições das propriedades da superfície e da atmosfera terrestre, ambos com um alto grau de precisão e numa escala global. Para cumprir todas estas medições, executando-as globalmente, a qualquer hora do dia e independentemente de cobertura de nuvens, os principais constituintes da carga útil do ERS-1 são sensores de microondas ativos, ou seja, radares.

Para atender a cobertura global requerida, o ERS-1 está disposto numa órbita polar com uma altitude média de aproximadamente 780 km. Nesta altitude, toda a energia disponível para os pulsos radar se faz necessária, a fim de prover iluminação suficiente da superfície terrestre para se produzir ecos detetáveis. Para tanto, conforme se verifica na Figura 3.1, grandes antenas são necessárias para a captação desses sinais de retorno, o que implica nas grandes dimensões do satélite, que pesa cerca de 2.300 Kg, sendo que apenas a carga útil pesa 1.000 Kg e consome cerca de 1 kW de potência elétrica quando em operação total. As antenas têm um comprimento superior a 10 m e a estrutura principal de suporte da carga útil tem uma base de 2 x 2 m e mede aproximadamente 3 m de altura. Para suprir a carga útil com energia elétrica, controle de atitude e órbita, assim como gerenciamento operacional do satélite, um módulo - derivado do programa francês SPOT - está atrelado à carga útil. Esse módulo é equivalente, em termos de dimensões, à própria carga útil e está equipado com um painel solar de 12 x 2,4 m.

Dentre os sensores a bordo do ERS-1, o maior deles, o Instrumento de Microondas Ativo (AMI) é capaz de, no modo *imagem*, produzir imagens radar de uma faixa de 100 km da superfície terrestre. Este modo, também chamado de modo do *Radar de Abertura Sintética (SAR)*, é o único disponível para os usuários brasileiros, através do

INPE, e será detalhado mais adiante, nesta seção. Em função do alto consumo de energia e da alta taxa de geração de dados, que não podem ser armazenados a bordo, o modo *SAR* é utilizado somente regionalmente, por períodos de aproximadamente 10 minutos por órbita.

Este mesmo instrumento (AMI) possui configurações alternativas de medição, chamadas de modo *vento* (escaterômetro), no qual a velocidade e a direção do vento na superfície do mar podem ser medidas numa faixa de 500 km, e modo *onda* (SAR), que produz pequenas imagens radar a intervalos de 200 km. Estas podem ser utilizadas para gerar um espectro de ondas no oceano, mostrando a energia destas como função da direção e do comprimento da onda.

Um segundo instrumento, o Radar Altimetro (RA), pode executar medições altamente precisas da altura de vôo do satélite acima do oceano, gelo e superfícies terrestres. O sucesso na utilização desses dados de altura depende da determinação precisa da órbita do satélite, a partir dos sistemas de navegação a bordo da plataforma. Estes sistemas são: um Retro-Refletor Laser (LRR) - instrumento passivo utilizado para medir distâncias por laser a partir de sistemas baseados no solo - e o Equipamento de Medição Precisa de Distância e Variação de Distância (PRARE) - sistema de medição bidirecional de distâncias por microondas que utiliza pequenas estações, dedicadas exclusivamente para tal, na superfície terrestre.

Outro instrumento da carga útil é o Radiômetro de Varredura em Azimute e Sonda de Microondas (ATSR), que consiste de duas partes. A primeira delas produz imagens da superfície do mar através de um radiômetro de varredura na região do infravermelho, que permite medições precisas da temperatura da superfície. A outra parte é um radiômetro passivo de microondas, o qual é utilizado na determinação do conteúdo de vapor d'água na coluna da atmosfera terrestre sob o satélite.

A grande quantidade de dados gerada por esses instrumentos é transmitida para a superfície pelo Subsistema de Manipulação e Transmissão de Dados dos Instrumentos (IDHT). Ele inclui dois gravadores de alta capacidade, para armazenar os dados que vão sendo coletados enquanto o satélite está fora de visada das várias estações de terra.

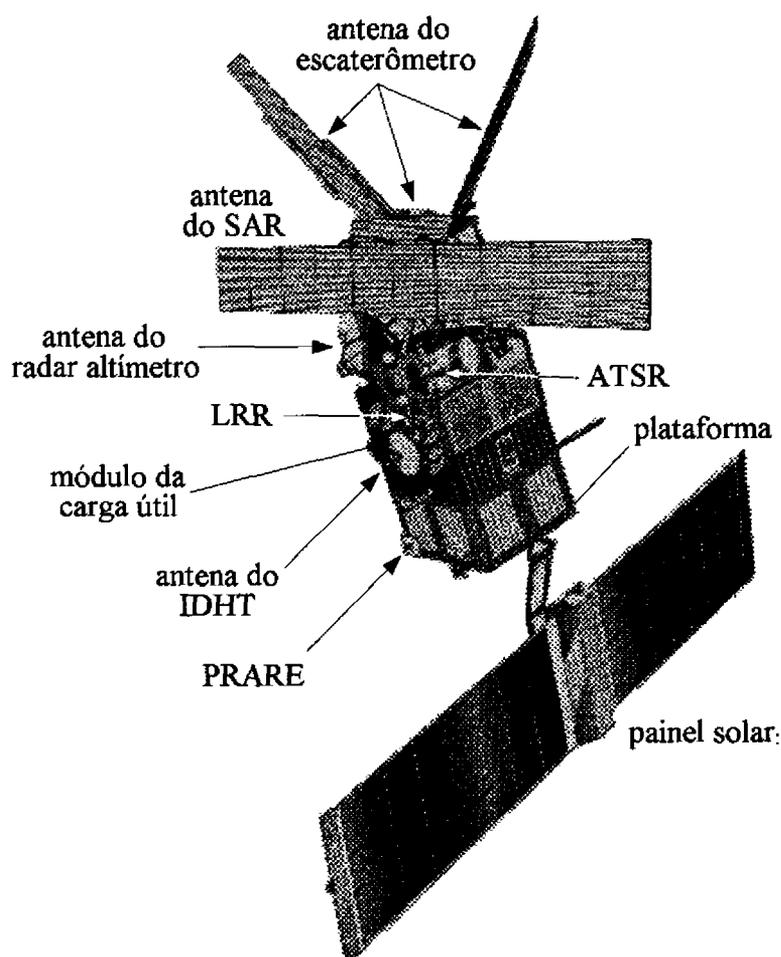


Fig. 3.1 - O satélite ERS-1.

### 3.1 - A ÓRBITA

O ERS-1 utiliza uma órbita polar, também chamada de órbita retrógrada, inclinada em relação ao equador em  $98.5^\circ$ , a uma altitude média de 780 km, possibilitando a visibilidade de todas as áreas do planeta à medida em que este gira sob a órbita do satélite. A inclinação é tal que a precessão da órbita, irá se opor exatamente à revolução anual da terra em torno do sol. Conseqüentemente, o plano orbital manterá sempre sua posição relativa ao sol, cruzando o equador na rota descendente aproximadamente às 10:30 h (horário local). Em função disto, as condições de iluminação constante ao longo do ano são extremamente favoráveis ao ATSR. Além

disso, beneficia também o próprio satélite quando, por exemplo, faz com que o painel solar necessite girar em torno de apenas um eixo, normal ao plano da órbita, a fim de manter o correto alinhamento com o sol.

Para cumprir um padrão que permita o recobrimento terrestre após um certo número exato de dias, o ERS-1 é capaz de modificar sua altitude de vôo em alguns quilômetros. Em função disso, três padrões de cobertura podem ser utilizados, com periodicidade de 3, 35 e 176 dias, tendo cada órbita, a duração aproximada de 100 minutos.

### 3.2 - A PLATAFORMA

A plataforma abriga o PRARE, além de suprir a maioria dos serviços requeridos para a operação do satélite e da carga útil, o que inclui controle de altitude e órbita, suprimento de energia, monitorização e controle de estado da carga útil, telecomunicações com as estações de terra para recepção de telecomando e telemetria dos dados da carga útil e da plataforma. A plataforma foi modificada em relação àquela utilizada no programa SPOT, para atender às necessidades específicas da missão ERS-1.

A performance do painel solar teve de ser aumentada, em relação àquela que lhe serviu de base, para suportar a demanda dos sensores de microondas do ERS-1. Tal melhora foi obtida inicialmente, pelo aumento da área efetiva do painel (e da força correspondente) em cerca de 66%. Em segundo lugar, foram utilizadas células solares mais eficientes, que produzem cerca de 12% a mais de energia.

O painel solar consiste de duas superfícies de 5,8 m x 2,4 m, nas quais estão montadas um total de 22.260 células solares. Durante os 66 minutos da fase iluminada de cada órbita, este painel provê energia elétrica para todos os sistemas a bordo, além de carregar as baterias da espaçonave, localizadas num compartimento cilíndrico ligado à plataforma, de forma a abastecer a carga útil durante os 34 minutos restantes em que o satélite fica em eclipse. As quatro baterias de níquel-cádmio (NiCd) são dimensionadas para permitir operações da carga útil independentemente da posição do satélite na órbita, suprindo energia durante as 14 eclipses que irão ocorrer a cada dia, utilizando uma capacidade combinada de 96 Ah. O gerenciamento preciso do ciclo de carga e descarga é conduzido pelo Computador de Bordo (OBC), com possibilidade de intervenção de terra, se necessário.

### 3.3 - CONTROLE DE ATITUDE E ÓRBITA

O ERS-1 é um satélite estabilizado em três eixos, tomando a terra como referência. O eixo vertical ("yaw") é direcionado perpendicularmente a um elipsóide de referência, levada em conta a forma da terra. A direção do eixo transversal ("pitch") oscila suavemente durante cada órbita a fim de mantê-lo orientado perpendicularmente ao vetor de velocidade composta no solo, já considerada a rotação terrestre, visando assistir a operação do AMI. Os erros residuais de atitude não devem ultrapassar de 0,06° em cada eixo.

O ERS-1 possui diversos sensores de atitude. A referência de arfagem ("pitch") e rolamento ("roll") é obtida através de um dos dois sensores infravermelhos de horizonte, que são redundantes e operam continuamente. Já a referência para o eixo vertical ("yaw"), é obtida uma vez a cada órbita através de um dos sensores solares de *campo estreito*, também redundantes, que apontam para o sol cada vez que o satélite cruza o limite dia/noite. Outra referência é obtida a partir de uma plataforma inercial, com um conjunto de três giroscópios, cada um com "backup" redundante. Finalmente, há dois sensores solares de *campo aberto* para uso nos estágios iniciais de aquisição de atitude, e na condição de segurança, quando o satélite está voltado para o sol. Os meios principais para controle de atitude são dados por um conjunto de giroscópios. O satélite possui ainda, vários jatos propulsores para controle de atitude, que são utilizados em diferentes combinações a fim de manter e modificar a órbita do satélite e para ajustar sua atitude durante operações não nominais.

### 3.4 - COMANDO E CONTROLE DE BORDO

O ERS-1 transporta um grande número de programas que funcionam através de diferentes processadores disponíveis na plataforma e na carga útil. Na plataforma, o Computador de Bordo (OBC) incorpora todas as funções básicas necessárias para a condução da missão. Além disso, cada um dos sistemas componentes da carga útil (AMI, RA, ATSR e IDHT) contém de forma descentralizada, suas próprias Unidades de Controle de Instrumento (ICU). Estes cinco computadores são ligados ao Gerenciador de Dados de Bordo (OBDH). O PRARE, como *passageiro* da plataforma, não se constitui num usuário do OBDH. Esta arquitetura adotada faz com que os ICU's aliviem do OBC as várias e detalhadas tarefas relacionadas a operações e configurações internas dos instrumentos. Todos os processadores de bordo são programáveis em vôo e

várias das características de operação são controladas por tabelas de parâmetros variados.

Há dois tipos de funções de gerenciamento de tempo conduzidas a bordo, que são chamadas de programa de eventos e datação de medições. O tempo é referenciado a um relógio operado pelo OBC, provendo sinais de tempo com resolução de 4 ms e correlacionados ao Tempo Universal Coordenado (UTC) pela estação de Kiruna (Suécia). Os eventos são programados por associação de tempo para cada macrocomando. A datação de medições também é executada pelos ICU's, os quais escreverão o código binário de tempo apropriado, transcrito do seu relógio para o cabeçalho de cada fonte de dados.

### 3.5 - TELEMETRIA E MANIPULAÇÃO DE DADOS DOS INSTRUMENTOS

Há dois sistemas de telemetria e manipulação de dados dos instrumentos. As necessidades da plataforma são apoiadas por um sistema clássico de Telemetria, Telecomando e Controle (TTC), operando na banda S. Este sistema de baixa taxa de dados (2 kbit/s) é utilizado na transmissão de formatos ICU para fins de manutenção. Os dados científicos, por outro lado, dada a alta taxa de bits envolvida, não podem utilizar esta ligação, motivo pelo qual, a carga útil inclui o IDHT, que permite transmissão em tempo real de dados do AMÍ no modo *imagem*, possibilitando um serviço regional para estações de terra, além de gravações e telemetria globais para outros sensores.

Os instrumentos geram dados sob a forma de *pacotes-fonte*, que constituem uma divisão lógica de telemetria do ponto de vista do instrumento. Entretanto, estas não são a unidade fundamental no que diz respeito à transmissão para o solo, para a qual outra divisão em *quadros de transporte* é feita. Esta última é menor que a de *pacotes-fonte* e, em adição a esta, contém informações para controle de erro de sincronismo e transmissão. A estrutura *pacotes-fonte*, desta forma, é reamostrada a partir de *quadros de transporte* nas estações de terra.

Três esteiras de dados são transmitidas do IDHT. A primeira contém os dados de alta taxa do AMÍ (modo *imagem* - ver 3.2.1.6), com dados auxiliares e uma cópia dos dados de telemetria da banda S, a uma taxa total de 105 Mbit/s. Este canal possui uma ligação na banda X dedicada a ele. Os outros sensores têm seus dados combinados, novamente com uma cópia dos dados da banda S e informação das

efemérides do satélite, num canal de taxa de dados comparativamente baixo, operando a 1.1 Mbit/s, que é gravado continuamente a bordo. Este gravador reproduz a uma velocidade de 13.6 vezes a velocidade de gravação (no sentido inverso para economizar tempo de retorno da gravação), quando sobre as estações de terra, para formar a terceira esteira de dados, a 15 Mbit/s.

O gravador foi planejado para acumular uma órbita completa de dados contínuos de taxa baixa (1.1 Mbit/s) numa fita magnética de 3.000 ft x 1/4", que lhe confere uma capacidade de gravação de 6.5 Gbit. Quando envia dados para estações situadas em grandes latitudes, como a de Kiruna (Suécia), o painel solar pode causar uma rápida ocultação da ligação, face à geometria do sistema. Nas passagens onde isto ocorre, o planejamento de comandos de bordo inclui uma pausa antes da ocultação, um suave retorno da fita e reativação do "playback" após a ocultação.

### 3.6 - OS INSTRUMENTOS CIENTÍFICOS

Para abrigar os instrumentos científicos, à exceção do PRARE (situado na plataforma), existe o Módulo da Carga Útil, que é dividido em duas partes: (1) o Módulo de Eletrônica da Carga Útil (PEM) e (2) a Estrutura de Suporte de Antenas (ASS). Ao todo, são cinco instrumentos científicos que constituem a carga útil do ERS-1, a saber:

- 1) **Radar Altimetro (RA).** É um radar de pulso com visada nadir, projetado para medições precisas de ecos dos oceanos e superfícies de gelo. Possui dois modos de medição, otimizados para medições de oceanos e de gelo, respectivamente.
- 2) **Radiômetro de Varredura em Azimute e Sonda de Microondas (ATSR).** Consiste de dois sensores:
  - a) **Radiômetro Infravermelho (IRR),** cujo objetivo primário é medir, em termos globais, a Temperatura da Superfície do Mar (SST) para fins de pesquisas climáticas. Sua precisão absoluta é melhor que 0,5 K quando tomadas médias sobre áreas de 50 km x 50 km, assumindo-se que 20% dos pixels da área estejam livres de cobertura de nuvens. Para os pixels (1 km x 1 km) livres de coberturas, a precisão relativa é de 0,1 K.
  - b) **Radiômetro de Microondas (MWR),** que tem como objetivo principal a medição do conteúdo integrado de água atmosférica (vapor a líquido) para

auxiliar no cálculo de sinais do RA. O MWR possui dois canais, operando em 23.8 e 36.5 GHz, cada qual com uma largura de faixa de 400 MHz. O instrumento opera com visada nadir, utilizando uma antena "offset". A calibração a bordo é realizada por comparação da temperatura interna (quente) e do espaço (fria).

- 3) **Retro-Refletor Laser (LRR)**. Dispositivo passivo utilizado como alvo por estações laser baseadas em terra. Seu princípio de operação é a medição do tempo de viagem de pulsos laser refletidos por um painel de cubos montados na superfície da plataforma que permanece voltada para a terra.
- 4) **Equipamento para Medição Precisa de Distância e Variação de Distância (PRARE)**. Sistema de posicionamento do satélite que mede a distância e a variação de distância para "transponders" baseados nas estações de solo, com alta precisão.
- 5) **Instrumento de Microondas Ativo (AMI)**. Dois radares distintos estão incorporados no AMI:
  - a) **Escaterômetro**, para operação no modo *vento*, onde emprega três antenas para gerar feixes radar direcionados  $45^\circ$  à frente, perpendicularmente e  $45^\circ$  para trás, considerando-se a direção de vôo da plataforma. Estes feixes iluminam continuamente uma faixa de 500km de largura à medida que o satélite se move ao longo de sua órbita. Cada faixa possibilita a medição do retroespalhamento radar da superfície do mar numa malha de 25km .
  - b) **Radar de Abertura Sintética (SAR)**, para operação nos modos *imagem* e *onda*. Apresenta requisitos operacionais tais que, cada modo necessita disponibilidade para operar independentemente. Entretanto, os modos *vento* (escaterômetro) e *onda* podem ser operados conjuntamente, no também chamado modo *vento/onda*. A operação do SAR no modo *onda* produz imagens de 5 km x 5 km a intervalos de 200 km ao longo da trajetória, as quais podem então ser interpretadas para se produzir um espectro das ondas. A relativamente baixa taxa de dados permite gravação dos dados a bordo, e dessa forma, uma amostragem global é obtida. No modo *imagem*, utilizado neste estudo, o SAR adquire linhas de imageamento de alta resolução espacial, numa faixa de 100km à direita da rota do satélite (Figura 3.2). A antena de 10 m de

comprimento, paralela à rota, direciona um faixa radar estreito sobre a faixa imageada na superfície terrestre. A imagem é construída a partir da diferença de tempo e potência dos sinais de retorno, os quais dependerão da geometria, rugosidade e propriedades dielétricas da superfície e sua distância do satélite (ver Capítulo 2). A operação no modo *imagem* exclui outros modos de operação do AMI, e limita o tempo de operação a 10 minutos por órbita. A taxa de dados de 100 Mbit/seg é alta demais para permitir armazenagem a bordo, de forma que as imagens são adquiridas somente nas áreas de recepção das estações de terra.

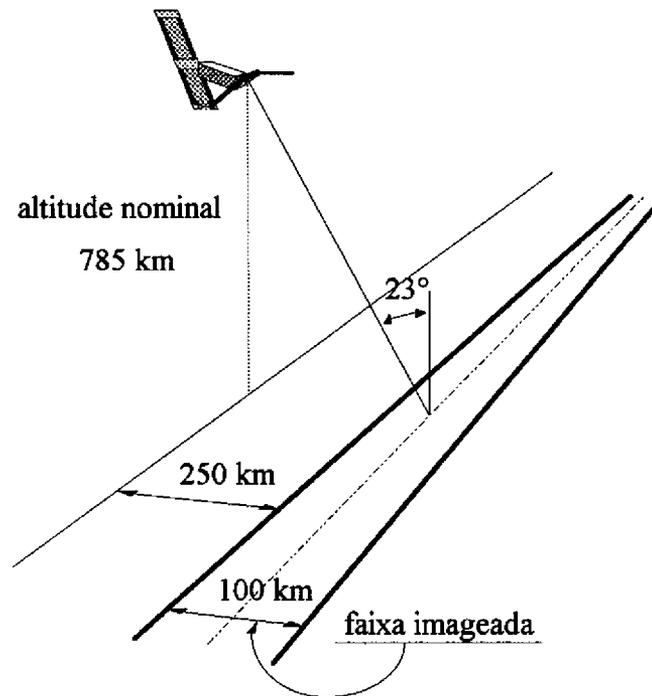


Fig. 3.2 - Operação do SAR no modo *imagem*.



## CAPÍTULO 4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os procedimentos metodológicos aplicados na obtenção dos resultados utilizados na análise comparativa dos produtos dos sensores SAR/ERS-1 e TM/Landsat 5, além da descrição e detalhamento dos materiais empregados ao longo da pesquisa.

### 4.1 - ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 4.1) situa-se na região norte do estado de São Paulo, no município de Guaira, entre as latitudes 20°12'S e 20°23'S as longitudes 048°13'W e 048°25'W. A escolha desta área é devida, além dos aspectos considerados na Seção 4.3.1, a cinco fatores principais:

- 1) Apresenta topografia predominantemente plana, o que reduz os efeitos relacionados à geometria radar (vide Seção 2.7.2) e facilita o registro de imagens;
- 2) Por constituir em área-teste de Projeto Piloto do ERS-1 no Brasil, viabiliza a aquisição de imagens;
- 3) Possui uma localização relativamente próxima a São José dos Campos, o que facilita a realização dos trabalhos de campo;
- 4) Trata-se de uma localidade (Guaira-SP) onde a prática da irrigação é antiga existindo, portanto, um bom controle de uso do solo, o que auxilia na determinação da verdade terrestre;
- 5) Finalmente, foi a área que apresentou, considerando-se os itens acima comentados, o melhor compromisso de periodicidade entre os sensores analisados, tendo sido possível obter imagens com apenas 10 (dez) dias de defasagem em agosto/92 (TM/Landsat de 20/08/92 e SAR/ERS-1 de 30/08/92) e de 18 (dezoito) dias de defasagem em dezembro/92 (TM/Landsat de 24/11/92 e SAR/ERS-1 de 13/12/92).

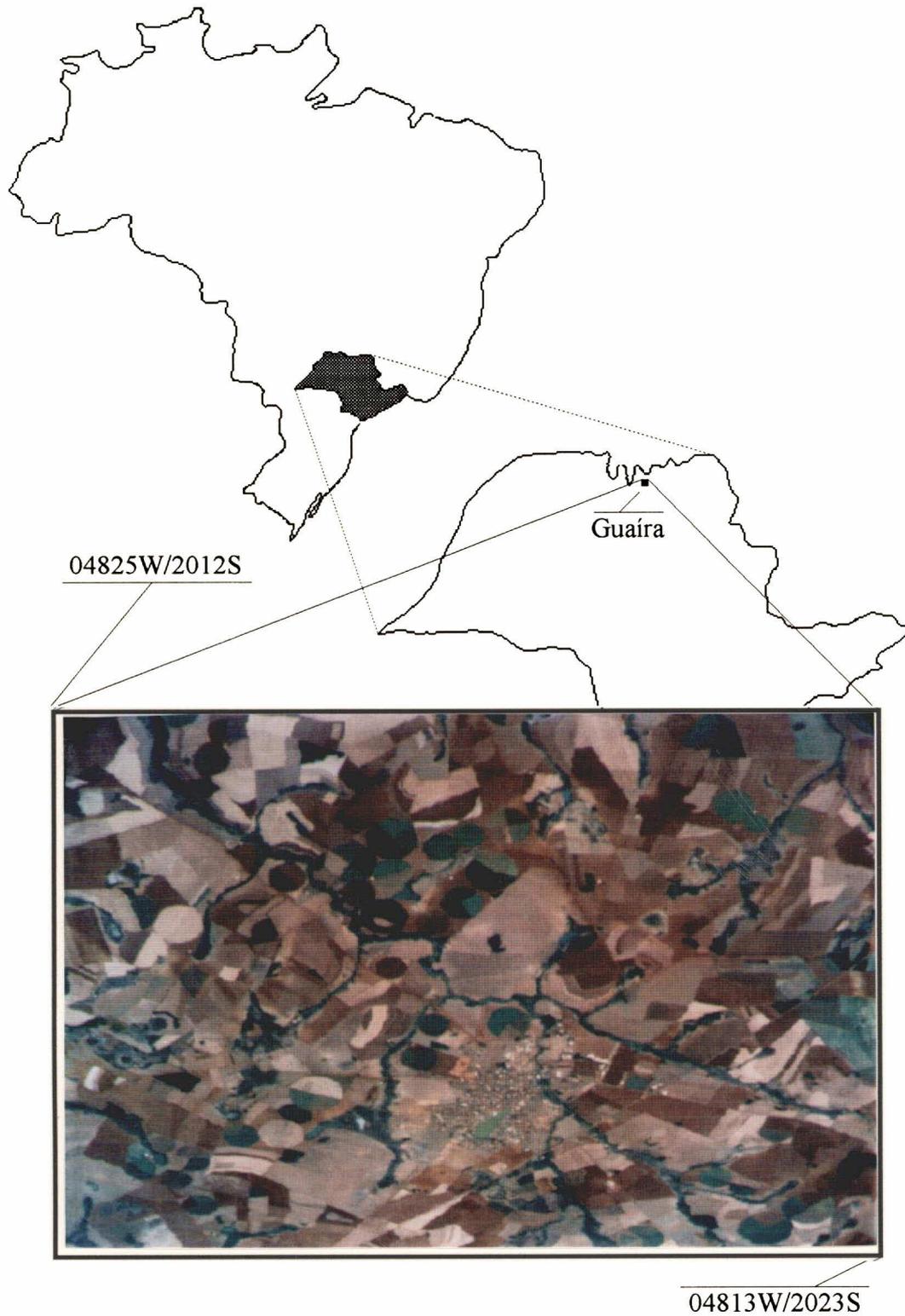


Fig. 4.1 - Área de estudo, na composição de cores verdadeiras TM 3 (R), 2 (G) e 1 (B).

#### 4.1.1 - CLIMATOLOGIA DA REGIÃO DE GUAÍRA<sup>1</sup>

O clima do município de Guaira, classificado por Saad (1987) segundo o método de Thornthwaite (FIDERJ, 1978), é úmido, com grande deficiência de água no inverno, mesotérmico, e megatérmico (pouca variação da temperatura durante o ano).

Em termos de precipitação pluviométrica, como pode se constatar através da Figura 4.2 e da análise efetuada por Saad (1987), a região possui dois períodos bem caracterizados: um chuvoso, com as precipitações bem distribuídas, e outro seco (junho, julho, agosto) quando praticamente não ocorrem chuvas. No caso deste estudo, até a época de passagem do ERS-1, a precipitação em dez/92 estava acumulada em 13.2 mm, enquanto não houve qualquer precipitação em ago/92.

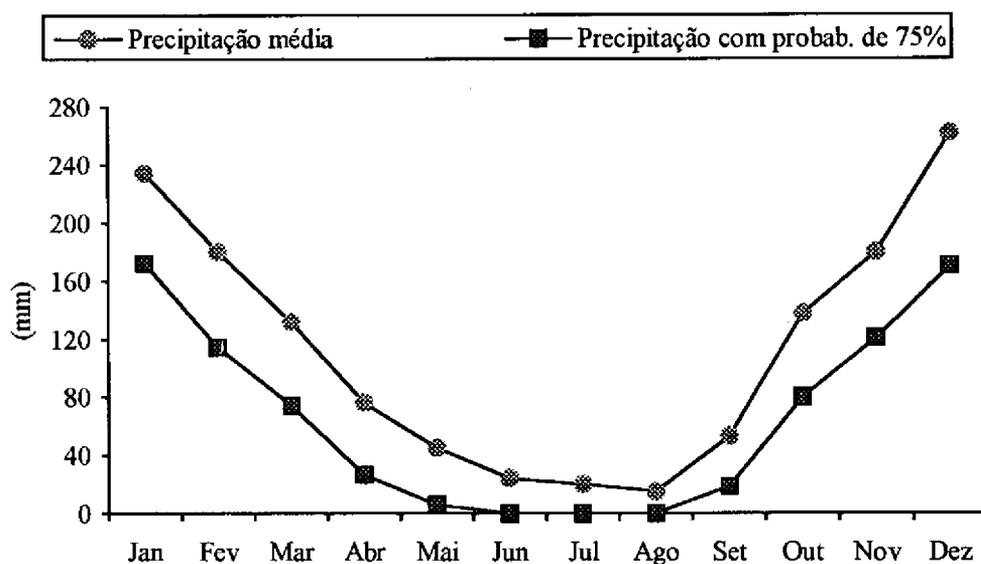


Fig. 4.2 - Distribuição das precipitações pluviométricas no período de 1956 a 1985.

FONTE: Adaptada de Saad (1987), p.5.

<sup>1</sup> - Nesta seção, não serão tratados dados de Temperatura do ar, Umidade relativa e Ventos, por não constituírem fatores de influência direta no resultado do processamento das imagens.

Conforme se verifica também na Figura 4.3, gerada a partir dos dados disponíveis no estudo de Saad (1987), a evapotranspiração potencial média anual (somatório dos valores de cada mês) para a região é de 998 mm, apresentando uma amplitude de 73 mm entre os períodos de maior e menor índices (agosto, 127 mm e fevereiro, 54 mm, respectivamente).

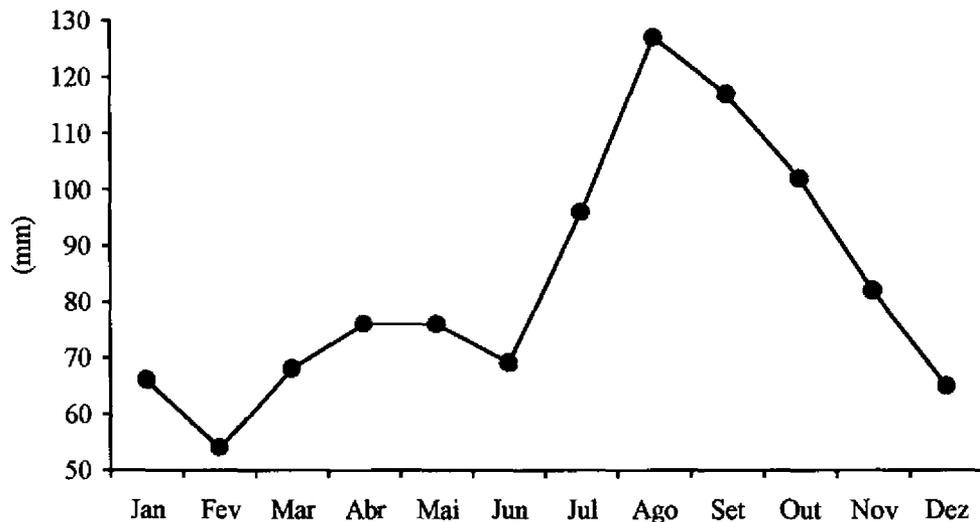


Fig. 4.3 - Cálculo da evapotranspiração potencial na estação meteorológica de Barretos (SP) - período 1961/78.

FONTE: Adaptada de Saad (1987), p.9.

Saad (1987) efetuou o balanço hídrico com os valores médios mensais de precipitação e evapotranspiração para uma capacidade de armazenamento de água de 100 mm e dois valores de precipitação (média mensal e média mensal com 75% de probabilidade). Estes dados estão representados nas Figuras 4.4 e 4.5.

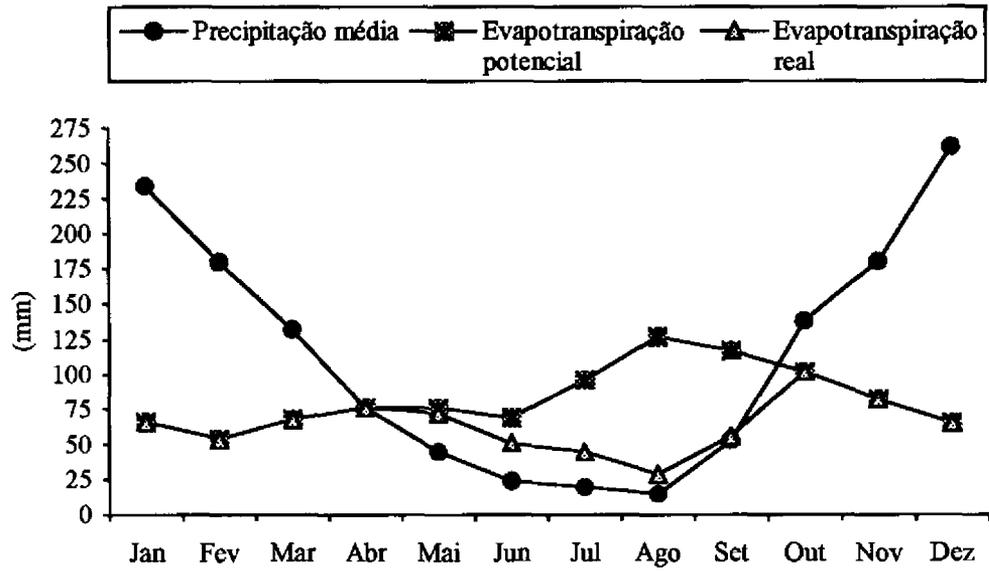


Fig. 4.4 - Balanço hídrico edafológico com precipitação média e evapotranspiração média (potencial e real) na região de Guairá (SP).

FONTE: Adaptada de Saad (1987), p.14.

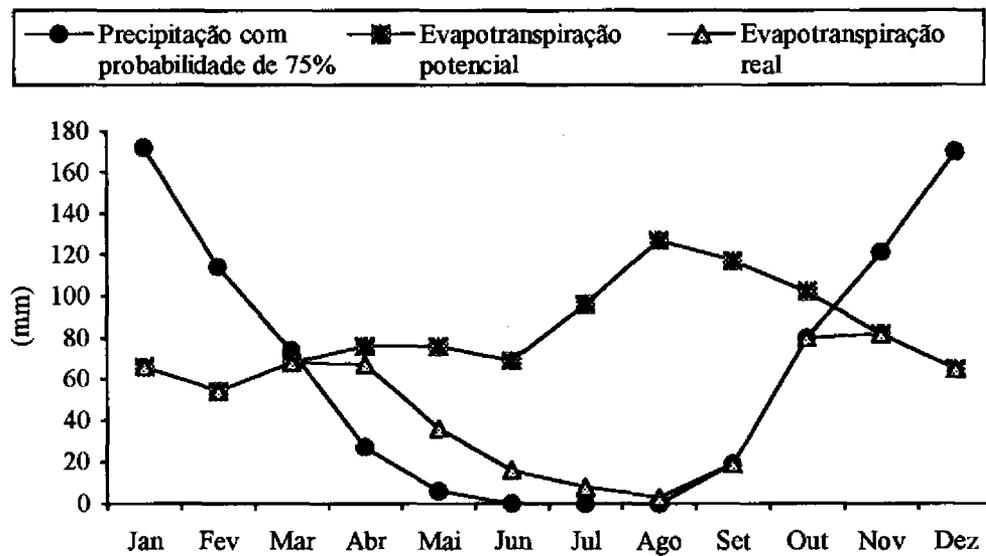


Fig. 4.5 - Balanço hídrico edafológico com precipitação com probabilidade de ocorrência de 75% e evapotranspiração média (potencial e real) na região de Guairá (SP).

FONTE: Adaptada de Saad (1987), p.15.

#### 4.1.2 - DESCRIÇÃO PEDOLÓGICA DO MUNICÍPIO DE GUAÍRA

De acordo com Saad (1987), o município é constituído em sua grande maioria (90%) por solos da unidade pedológica **Latossolo Roxo**. Estes solos apresentam as seguintes características gerais: são muito intemperizados, profundos, bem drenados, porosos, tendendo para ácidos, relevo plano a suave ondulado, baixas capacidades de troca de cátions e saturação de bases. Suportam altas intensidades de cultivo, evidenciando boa potencialidade agrícola. As características mais importantes que definem estes solos são a presença do horizonte B latossólico e o aumento do teor de argila dos horizontes superiores em relação aos inferiores, provocado por um processo de aluviação.

Trata-se de solos derivados de rochas eruptivas básicas, possuindo como característica comum, além das já mencionadas, um teor de óxido de ferro elevado ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 18\%$ ) e cor mais vermelha (matiz 2,5 YR). Entretanto, segundo Oliveira e Menk (1980), a cor deve ser eliminada como característica para conceituação básica destes solos, já que podem ser encontrados Latossolos Roxos do matiz 5 YR até 7,5 YR, bem mais claros.

No município de Guaira existem diferentes unidades do Grupo Latossolo Roxo, conforme estudo de Oliveira e Menk (1980), observando-se na região e em especial na área de estudo, a presença de uma unidade característica, denominada Una. Esta variedade caracteriza-se por apresentar médios e altos teores de ferro total, porém amarelados, restritos a zonas de embaciamento ou depressões superficiais.

Outro grupo de solos de expressão no município refere-se aos Hidromórficos (Gleizados), localizados predominantemente nas planícies aluvionais e várzeas dos principais cursos d'água.

#### 4.2 - MATERIAL

Os materiais utilizados nesta pesquisa são listados a seguir e alguns parâmetros das imagens e cartas empregadas são apresentados na Tabela 4.1.

## 1) Produtos TM/Landsat:

- a) Composição colorida em papel, falsa cor natural, bandas 3, 4 e 5, escala 1:100.000, órbita/ponto 221/74, quadrante E, de 20/08/92;
- b) Dados digitais em fitas CCT de 6250 bpi, órbita/ponto 221/74, quadrante E, de 20/08/92 e 24/11/92.

## 2) Produtos SAR/ERS-1:

- a) Imagem geocodificada em papel, escala 1:250.000, de 30/08/92;
- b) Dados digitais em fitas CCT de 6250 bpi, 16 "bits", 8 "looks" (SARGIC's - geocodificada, de 20 x 20 km), de 30/08/92, órbita 5880 e de 13/12/92, órbita 7383.

## 3) Mapas:

- a) Carta topográfica, escala 1:50.000: folha SF-22-X-B-III-3, Guaira, IBGE 1972;
- b) Carta pedológica semi-detalhada do estado de São Paulo, folha SF-22-X-B-III, Guaira, IGC-SP 1992.

## 4) Fotografias 35 mm coloridas, relativas ao trabalho de campo.

## 5) Dados pluviométricos relativos aos meses de agosto e dezembro de 1992, extraídos do Escritório Regional de Guaira do Instituto Agrônomo de Campinas.

## 6) Dados referentes às culturas presentes nos pivôs de irrigação e adjacências, obtidos em entrevistas com os agricultores por ocasião do trabalho de campo.

## 7) Estação de trabalho SUN SPARC II, utilizada para a leitura e janelamento das imagens originais, em fitas CCT.

## 8) Microcomputador tipo AT 486 DX33, empregado no registro, composição e tratamento digital das imagens avaliadas.

## 9) Sistema Interativo de Tratamento de Imagens (SITIM) e Sistema Geográfico de Informações (SGI), ambos na versão 2.4, desenvolvidos pelo INPE.

TABELA 4.1 - DADOS DOS PRODUTOS UTILIZADOS

PRODUTO	DATA	ELEV/INCLID	ESCALA	DISTÂNCIA ENTRE PIXELS
Carta topográfica	1972	–	1: 50.000	–
Carta pedológica	1991	–	1: 100.000	–
Landsat/TM	20/08/92	39°	1: 50.000	30.0 m
Landsat/TM	24/11/92	55°	1: 50.000	30.0 m
ERS-1/SAR	30/08/92	23°	1: 50.000	12.5 m
ERS-1/SAR	13/12/92	23°	1: 50.000	12.5 m

#### 4.3 - MÉTODOS

O binômio avaliação/comparação de imagens presume uma igualdade de condições que permitam a obtenção de resultados, suficientemente confiáveis para a sustentação das conclusões alcançadas. Esta igualdade não é totalmente possível de se atingir, entretanto não pode ser perdida de vista. Levando isto em consideração, é imperativo que a defasagem temporal entre a obtenção de dados de sensores distintos seja a menor possível. Aschbacher e Lichtenegger (1990) apresentaram um estudo demonstrando a viabilidade de se efetuar a integração entre sensores ópticos e de microondas. O trabalho baseou-se em dados obtidos pelo HRV/SPOT e pelo SAR/SIR-A, tendo sido gerado ao final, um mapa de uso da terra derivado daqueles dados. Entretanto, ainda que tenha tido pouca influência nos resultados da pesquisa, face às características da área imageada, a defasagem de 5 anos entre as imagens (SIR-A, 1981 e SPOT, 1986) nos leva a duas possibilidades quando se trata de um estudo comparativo: (a) devem ser tomados cuidados especiais com a questão temporal na aquisição de dados ou (b) deve haver uma seleção criteriosa da área teste, em função da dinâmica desta área e dos temas que se deseja observar. Além disso, durante a aquisição das imagens, as condições meteorológicas precisam ser consideradas, especialmente precipitações e umidade superficial, pois estes parâmetros estão diretamente ligados ao comportamento dos alvos em relação à radiação das microondas. Finalmente, outro ponto relevante diz respeito à correlação espacial entre as imagens analisadas, desde que as cenas estejam sendo comparadas na forma digital.

Para ilustrar os passos adotados neste trabalho, foi adotado o método de planejamento de sistemas apresentado por Gane (1988). O diagrama de fluxo de dados da Figura 4.6 mostra a seqüência das etapas seguidas.

#### 4.3.1 - SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A seleção da área de estudo foi conduzida a partir da observação prévia de três aspectos:

- 1) **Definição das classes temáticas**, de forma a limitar a análise a tipos de alvos já conhecidos, a fim de facilitar o entendimento dos resultados obtidos.
- 2) **Observação dos períodos seco e chuvoso**. Sendo a permitividade uma das características que mais influencia e modifica o estado físico de alvos naturais quando se considera o imageamento radar, e estando a permitividade diretamente ligada ao grau de umidade presente nos alvos (vide Seção 2.6.3), o contraste em termos de umidade do solo ao longo do ano tornou-se um atributo desejável.
- 3) **Proximidade entre passagens Landsat e ERS-1**. A disponibilidade de imagens com o menor intervalo de tempo entre as passagens de ambos sistemas sensores foi considerada, tendo em vista a maior probabilidade de alterações na natureza física dos alvos à medida em que aumenta o lapso temporal entre as observações destes alvos, especialmente em quando se trata de ambientes tão dinâmicos como áreas onde se pratica a agricultura irrigada.

Tomando por base os aspectos acima mencionados e considerando os fatores listados na Seção 4.1, foi selecionada a região de Guaira-SP como área de estudo. A etapa seguinte foi dedicada à aquisição das imagens.

Foram selecionadas inicialmente as passagens de 30/08/92 e 13/12/92 para o ERS-1 e de 05/09/92 e 10/12/92 para o Landsat, tendo sido programado e realizado, um trabalho de campo preliminar, visando o reconhecimento da área nas datas das primeiras passagens previstas. Nas datas escolhidas para o Landsat, entretanto, as condições meteorológicas eram desfavoráveis, o que fez com que se optasse pelas passagens de 20/08/92 e 24/11/92.

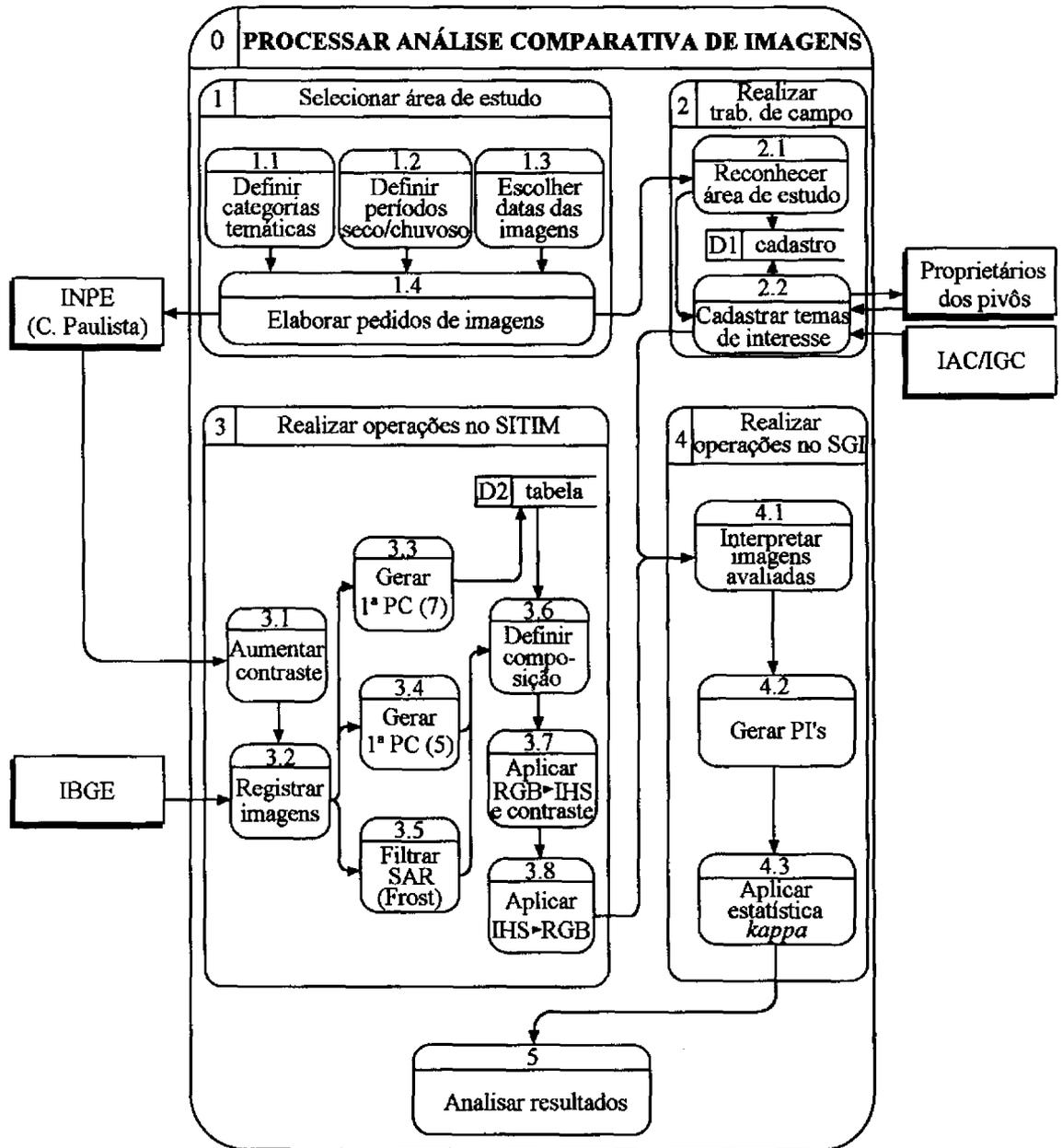
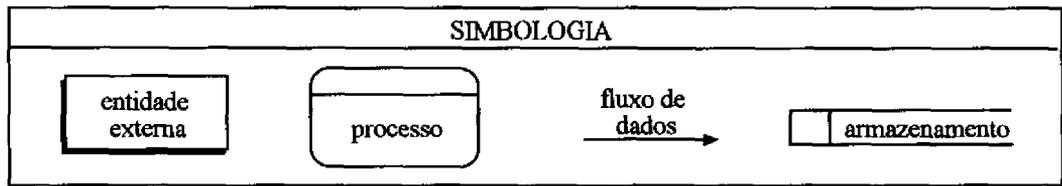


Fig. 4.6 - Diagrama de fluxo dos dados nas diversas etapas do trabalho.

#### 4.3.2 - TRABALHOS DE CAMPO

Foram realizados dois trabalhos de campo. O primeiro, visando o reconhecimento da área de estudo e o seguinte para possibilitar o levantamento da verdade terrestre, através de fotografias e cadastramentos de informações obtidas dos próprios agricultores da região.

O primeiro trabalho foi feito no período de 27/08/92 a 05/09/92, durante as passagens do ERS-1 e do Landsat (inicialmente prevista para 05/09/92 e depois modificada para 20/08/92). Nesta oportunidade foram colhidas impressões sobre duas possíveis áreas de estudo, Rio Claro e Guaira, ambas no estado de São Paulo, tendo a escolha da área recaído sobre Guaira pelos motivos já mencionados anteriormente. A dificuldade em controlar os dados, bem como a topografia acidentada, eliminou a região de Rio Claro da escolha. Observou-se, mais tarde, quando da manipulação das imagens, uma boa quantidade de pivôs de irrigação na região de Guaira, com culturas bem variadas ao longo do ano. Estes pivôs foram escolhidos, em função da diversidade e do controle exercido sobre eles, como foco de maior atenção das análises conduzidas no estudo.

No segundo trabalho, realizado no período de 13/09/93 a 17/09/93, foram feitas visitas a cada um dos agricultores proprietários dos pivôs de interesse, de posse de um questionário-padrão, e também ao campo, *in loco*, onde foram fotografadas as feições típicas de cada pivô. Assim, foi possível levantar a verdade terrestre para as diferentes datas consideradas.

Para a realização da análise comparativa entre as imagens, as mesmas foram processadas em ambiente SITIM ou SGI, segundo os procedimentos descritos a seguir.

#### 4.3.3 - OPERAÇÕES NO SITIM

De acordo com Crósta (1992), a quase totalidade das imagens de sensoriamento remoto apresenta uma distribuição de níveis de cinza comprimida numa porção relativamente reduzida do intervalo radiométrico disponível (0-255, por exemplo) por vários motivos, mas principalmente, porque os sistemas sensores são projetados para captar uma vasta gama de valores de reflectância ou retroespalhamento dos vários tipos

de alvos existentes na superfície terrestre. Em geral, esta capacidade dos sensores é muito superior à variação apresentada pelos alvos das cenas imageadas.

Por este motivo, as imagens de satélite vistas da forma como são adquiridas pelos sensores, aparecem visualmente com baixo contraste. Uma vez que o sistema visual humano só consegue discriminar cerca de 30 tons de cinza - desde que devidamente distribuídos num intervalo radiométrico - e considerando o baixo contraste inerente às imagens orbitais, torna-se necessário, para que as informações contidas nestas imagens possam ser extraídas por um analista humano, que o histograma comprimido seja expandido a fim de ocupar todo o intervalo radiométrico disponível. Para tanto, utiliza-se a operação conhecida como aumento de contraste. Por este motivo, tanto as imagens SAR como as imagens TM, tiveram seus contrastes aumentados linearmente no presente trabalho.

Foram utilizados produtos SAR no padrão de processamento SARGIC's, no qual a imagem é referenciada à superfície terrestre. Pelo fato de serem processadas com 8 "looks" (valor nominal), as imagens SAR utilizadas neste trabalho dispensam a filtragem do "speckle" (vide Seção 2.7.1). O aumento do número de "looks" (no mínimo 1 e no máximo 8 para as imagens ERS-1) reduz o ruído provocado pelo "speckle" na imagem, à custa da degradação em sua resolução espacial, tratando-se, portanto, de um compromisso a ser avaliado em cada caso. Em função disso, nelas foi aplicado somente o filtro de Frost (Frost *et. al.*, 1982), por ser este um filtro adaptativo, que preserva a estrutura de bordas, segundo Dutra *et al.* (1993).

Por outro lado, a comparação de imagens multissensores e/ou multitemporais exige um registro prévio entre ambas. Seja para interpretação visual, seja para uma análise digital, é com base numa referência espacial comum a todas as imagens consideradas, que poderemos avaliá-las segundo os mesmos critérios.

Como observado por Welch (1987), dados de sistemas sensores ópticos (TM) e de microondas (SIR-B) apresentam resolução, geometria e interpretabilidade variadas. Para se ter noção do potencial de produtos multissensores, este autor mostra ser necessária a criação de um banco de dados "raster", a partir do qual, o produto resultante tenha sua interpretabilidade melhorada com base em técnicas de tratamento digital de imagens. Isto significa dizer que as imagens devem estar organizadas segundo o mesmo padrão, ou seja, registradas umas às outras.

No caso específico deste estudo, como há também o interesse em quantificar alguns dados além da interpretação propriamente dita, foi necessário georreferenciar as imagens a uma mesma base cartográfica para possibilitar a entrada dos dados num sistema geográfico de informações, o SGI.

Desta forma, foram realizados, através do SITIM, dois tipos de registros: imagem x mapa (I x M) e imagem x imagem (I x I), como veremos a seguir.

#### 4.3.3.1 - REGISTRO IMAGEM X MAPA

Conforme demonstrado por Welch (1987), a abordagem mais eficiente consiste em registrar a imagem de melhor resolução espacial a um mapa, para que seja em seguida adotada como referência nos registros I x I a serem praticados com as demais. Este é o método adotado por Chavez *et al.* (1988), quando utilizam uma imagem SPOT como referência para uma cena do TM, num estudo onde comparam o conteúdo de informações espectrais destes sensores para três diferentes áreas-teste em Phoenix, Arizona.

Por outro lado, Jensen (1986) lembra que um registro, para ser efetivo, necessita de pontos de controle (PC's) com um alto grau de precisão e devidamente distribuídos no terreno. Por este motivo, em função da dificuldade em correlacionar feições apresentadas na imagem ruidosa (com *speckle*) do SIR-B com detalhes do mapa utilizado no registro em seu trabalho, Welch (1987) se valeu da imagem TM para registrá-la ao mapa, e, em seguida, utilizá-la como referência no registro I x I TM/SIR-B. Para tanto, o pixel de 12.5 m da imagem SIR-B foi reamostrado para os 30 m da imagem TM.

No caso de Guaira, uma região naturalmente dotada de poucos PC's, dada a sua topografia e condição rural, a diferença de datas entre a edição do mapa (1972) e a passagem do satélite (1992) e a conseqüente modificação na paisagem, reduzem ainda mais o número de pontos. Isto torna praticamente impossível o registro empregando a imagem de melhor resolução espacial (SAR, cujo tamanho do pixel é de 25 x 25 m, contra 30 x 30 m do TM), que, no entanto, é crítica em termos de apresentação de feições pontuais notáveis.

De acordo com Welch e Ehlers (1988), a geometria de aquisição (visada lateral), o "speckle" inerente e as disparidades na apresentação das feições da imagem

radar e do mapa, tornam difícil a determinação de PC's, especialmente em áreas rurais e de florestas. Mesmo rodovias bem definidas, continuam os autores, raramente são registradas com erros inferiores a 3 pixels. Finalmente, concluem que os erros planimétricos maiores apresentados no registro I x M para a imagem SIR-B, demonstraram que a melhor resolução espacial deste sensor em relação ao TM é um falso indicador da qualidade geométrica das imagens SIR-B.

Com efeito, devido a esta dificuldade com a imagem SAR, a imagem TM da primeira data foi utilizada neste registro, tomando por referência um mapa na escala 1:50.000 (IBGE, 1972). Não obstante, os erros planimétricos resultantes deste registro foram excessivamente altos (vide Seção 5.1).

#### 4.3.3.2 - REGISTROS IMAGEM X IMAGEM

Utilizando o registro I x I, podemos comparar efetivamente os dados multissensores e verificar seus níveis de complementaridade. Este sinergismo foi demonstrado por Rebillard e Evans (1983), através do registro de imagens Landsat, Seasat e SIR-A, visando o mapeamento geológico de dois tipos bastante diferentes de terreno.

Neste trabalho foram realizados três registros deste tipo. O primeiro referenciou a imagem SAR de agosto à cena TM já registrada, tomando esta por base. Em seguida, o mesmo foi feito para a TM de dezembro, sempre tomando a cena TM de agosto como referência. Por fim, a imagem TM de dezembro serviu de base para o registro da imagem SAR, também de dezembro. Este procedimento, de variar o mínimo possível a imagem-referência, visou tão somente minimizar os erros planimétricos, que são cumulativos.

Antes de efetuar os registros, porém, foi necessário *recortar* as imagens, caso contrário em alguns casos, devido à diferença no tamanho e na localização espacial das imagens, seria impossível visualizar ambas na mesma *janela* do SITIM.

#### 4.3.3.3 - TRANSFORMAÇÃO IHS E ANÁLISE POR PRINCIPAIS COMPONENTES

No estudo conduzido por Welch e Ehlers (1988), um banco de dados multissensores cartográfico digital de geometria e resolução espacial excelentes foi

obtido através do registro de imagens TM (referência) e SIR-B, após a aplicação da transformada IHS (intensidade, matiz, saturação). Afirmam os autores que, para maximizar as informações de imagens multissensor, é necessário utilizar técnicas diferentes da tradicional composição RGB (vermelho, verde, azul) e sugerem três alternativas:

- 1) Adicionar uma imagem simples a cada um dos outros planos, visando melhorar a resolução final;
- 2) Aplicar análise por principais componentes (APC) ou transformadas de realce por decorrelação; e
- 3) Utilizar transformadas IHS.

Segundo Welch e Ehlers, das três abordagens, a técnica IHS proporciona definição superior quando imagens com muito ruído ou com baixa resolução espacial, geradas por sensores SAR ou infravermelho termal são combinadas com conjuntos de dados de melhor resolução, como as TM/Landsat, por exemplo.

O emprego da APC, também conhecida como transformação por principais componentes, é justificado por Chavez *et al.* (1988), na medida em que estes autores recomendam que, frente ao grande volume de dados de sensoriamento remoto disponíveis hoje em dia, torna-se crítico que o usuário desta ferramenta combine dados multissensores que sejam mais complementares que redundantes. O mesmo afirma Crósta (1992) ao postular que a APC é apropriada no tratamento de imagens produzidas por sistemas sensores com um alto número de bandas espectrais. Neste caso, pode-se através da 1ª PC, concentrar em uma única imagem a informação comum a todas as bandas envolvidas na análise.

Horgan *et al.* (1992) abordaram novos métodos para tornar mais eficiente o uso de imagens SAR na classificação de uso-da-terra, utilizando imagens SAR/SIR-A e MSS/Landsat. Os métodos incluem *Análise por Principais Componentes* para as componentes MSS e *Aumento Linear de Contraste* para a banda SAR. Na avaliação das classificações, a composição multissensores apresentou 78% de acerto, enquanto que, isoladamente, o percentual variou de 39 a 66% na imagem SAR, atingindo 70% na imagem MSS, sempre mais eficiente na classificação. Conclusão semelhante havia sido apresentada por Li e Ulaby (1980), ao afirmarem que a combinação de sensores radar e

ópticos é superior a qualquer um deles separadamente, numa classificação de culturas combinando dados MSS/Landsat e radar FM-CW/MAS ("University of Kansas Microwave Active Spectrometer").

Para realizar a análise comparativa entre produtos dos sensores TM/Landsat e SAR/ERS-1, proposta neste trabalho, decidiu-se pelo uso da transformada IHS aliada à análise por principais componentes. Deste modo, à melhor utilização do espaço de cores, soma-se o melhor aproveitamento do espaço de atributos.

Para efetuar a composição multissensores, optou-se pela separação das duas bandas com os menores graus de correlação entre as sete bandas disponíveis (seis bandas TM e uma SAR). Para tanto, mostrou-se suficiente a aplicação, ao conjunto de bandas, de uma transformação por principais componentes, cuja matriz de coeficientes de correlação, apresentada na Tabela 4.2, revelou as bandas C (SAR) e TM 4, nesta ordem, como as mais decorrelacionadas do grupo. A estas duas, foi somada uma terceira que consistiu da primeira principal componente das outras cinco bandas restantes.

O objetivo dos procedimentos mencionados é simplesmente construir um triplete de bandas dotado de baixa correlação entre seus componentes. Ao mesmo tempo, este triplete reúne mais informações que uma composição RGB tradicional, na medida em que agrupa dados de todas as bandas disponíveis no estudo.

**TABELA 4.2 - MATRIZ DE COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS TM 1, 2, 3, 4, 5, 7 E C (SAR)**

BANDA	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 7	C (SAR)
TM 1	1.00	-	-	-	-	-	-
TM 2	0.87	1.00	-	-	-	-	-
TM 3	0.76	0.83	1.00	-	-	-	-
TM 4	0.45	0.50	0.15	1.00	-	-	-
TM 5	0.77	0.79	0.68	0.58	1.00	-	-
TM 7	0.75	0.78	0.86	0.24	0.86	1.00	-
C (SAR)	-0.20	-0.20	-0.34	0.15	-0.19	-0.32	1.00

O novo conjunto de bandas, agora denotadas por TM4, PC1 e C - banda 4 do TM, primeira principal componente das bandas 1, 2, 3, 5 e 7 do TM e banda C do SAR - respectivamente, foram distribuídas no padrão RGB, nesta ordem, tendo sido

aplicado às mesmas uma transformação  $RGB \Rightarrow IHS$ , adotando a técnica apresentada por Welch e Ehlers (1988), onde ressaltam que o emprego da transformada IHS demonstrou ser bastante eficiente na extração de feições cartográficas da composição SIR-B/TM, na qual as bandas TM 4 e 3 foram utilizadas para modular as componentes de intensidade e matiz, enquanto a imagem SIR-B modulava a saturação.

A partir da transformada IHS, um aumento de contraste foi aplicado à composição, no sentido de melhor utilizar o *espaço de atributos* das imagens. Em seguida, foi feita uma transformação inversa  $IHS \Rightarrow RGB$ , para permitir a interpretação dos resultados da composição, uma vez que os monitores de vídeo dos sistemas de processamento de imagens trabalham somente no sistema de coordenadas RGB. O produto nesta fase satisfaz os requisitos para a análise visual dos resultados, atendendo parte do objetivo proposto para o trabalho. Entretanto, para a quantificação dos dados, tornou-se necessário o emprego do SGI, como mencionado a seguir.

#### 4.3.4 - OPERAÇÕES NO SGI

Dado o grande volume de dados necessários, a integração Sensoriamento Remoto/Sistemas de Informações Geográficas é essencial para a efetiva monitorização de recursos renováveis e não renováveis (Goodenough, 1987). No mesmo sentido, Welch (1987) aponta a disponibilidade do formato digital de dados ("raster"), a rápida evolução dos sistemas computacionais e o aumento na demanda por bancos de dados cartográficos, como fatores de motivação para que os cartógrafos, em geral, considerem cada vez mais, novos meios de integração de tecnologias envolvendo bancos de dados e as técnicas de Sensoriamento Remoto como um todo.

Neste trabalho foi empregado o SGI, através do qual, alguns planos de informação (PI's) puderam ser elaborados, contendo desde dados auxiliares e de referência até os dados relativos às imagens a serem comparadas. Assim sendo, estes dados foram agrupados em PI's de execução e auxiliares.

Para realizar este procedimento, os primeiros PI's de execução gerados foram os de referência (PI RF), onde foram digitalizados polígonos envolvendo as áreas relativas aos temas selecionados para a pesquisa. Na execução desta tarefa, os contornos e as classes foram definidos tomando-se por base a composição TM 4, 5, 3 e, principalmente, as informações obtidas no trabalho de campo.

A mesma tarefa de digitalização foi realizada para os PI's de execução seguintes, contendo as composições TM4, PC1, C finais, obtidas após as transformações inversas IHS  $\Rightarrow$  RGB (PI MS).

Este procedimento foi cumprido para as duas datas consideradas, agosto (A) e novembro/dezembro (B), num total de quatro PI's, incluindo os dois de referência.

Finalmente, foram elaborados os PI's auxiliares de solos (PI SL) e localização (PI LC), a partir das cartas pedológica e topográfica, respectivamente (vide Seção 4.2, item 3).

#### 4.3.4.1 - A ESTATÍSTICA KAPPA

Para a comparação entre os PI's RF e MS, a estatística *Kappa* foi aplicada aos pares formados pelo PI MS com o PI RF para as duas datas, gerando os resultados numéricos a serem analisados, a fim de se verificar a complementaridade obtida pela composição de imagens TM/Landsat com imagens SAR/ERS-1, conforme o objetivo inicial do trabalho.

A estatística *Kappa* é um método não paramétrico do grupo de técnicas de análise discreta multivariada. O coeficiente *K* (*Kappa*), desenvolvido por Cohen (1960), visto em Bishop *et al.* (1975) e em Fleiss (1981) e utilizado por Medeiros (1987) e Ortiz (1993), mede a relação da probabilidade de concordância relativa entre as classes de uma matriz de erros. Segundo Congalton *et al.* (1983), a estatística *Kappa* pode ser utilizada também para avaliar, separadamente, a concordância entre as classes dentro de cada matriz. Esta possibilidade é apresentada também por Fleiss (1981).

Segundo Congalton, uma matriz de erros é a distribuição dos dados de duas classificações em colunas - normalmente atribuídas aos dados da classificação de referência - e linhas - atribuídas aos dados da classificação a ser comparada. Os pontos onde há concordância entre as classificações e que determinarão o grau de dependência entre si, ficam dispostos na diagonal principal (vide Tabelas 5.3 e 5.5 no Capítulo 5).

A vantagem da estatística *Kappa* em relação à análise de variância (ANOVA), por exemplo, é que a primeira utiliza-se de todos os dados disponíveis na matriz em questão e não apenas dos elementos da diagonal principal. Além disso, o

emprego da ANOVA assume que as diversas classes da matriz de erro são independentes, requerendo também que os dados sejam distribuídos segundo uma curva normal. Esta condição, no entanto, é rara em dados de sensoriamento remoto, que em geral, apresentam dependência entre si. A técnica de análise discreta multivariada, ao contrário, não assume que as categorias são independentes, nem necessita de transformação nos dados, como ocorre na utilização da ANOVA, quando de sua normalização (Congalton *et al*, 1983).

O cálculo do valor de  $K$  é apresentado na Equação 4.1, a seguir:

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}, \quad (4.1)$$

onde  $P_o = \sum_{i=1}^k P_{ii}$  e  $P_e = \sum_{i=1}^k P_i P_i$ , conforme a Tabela 4.3.

**TABELA 4.3 - MODELO LITERAL DA MATRIZ DE ERROS NORMALIZADA**

		IMAGEM REFERÊNCIA				
		CLASSE	1	2	...	$k$
IMAGEM COMPARADA	1	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	...	P <sub>1k</sub>	P <sub>1.</sub>
	2	P <sub>21</sub>	P <sub>22</sub>	...	P <sub>2k</sub>	P <sub>2.</sub>
	.	.	.	...	.	.
	.	.	.	...	.	.
	.	.	.	...	.	.
	$k$	P <sub>k1</sub>	P <sub>k2</sub>	...	P <sub>kk</sub>	P <sub>k.</sub>
	TOTAL	P <sub>.1</sub>	P <sub>.2</sub>	...	P <sub>.k</sub>	1

FONTE: Adaptada de Fleiss (1981), p. 218.

O valor de  $K$  pode ainda ser definido individualmente por classe, conforme a Equação 4.2, apresentada por Medeiros (1987), modificada de Fleiss (1981):

$$K_i = \frac{2(a \cdot d - b \cdot c)}{p_1 \cdot q_2 + p_2 \cdot q_1}, \quad (4.2)$$

onde  $a, b, c, d, p_1, p_2, q_1$  e  $q_2$  são os parâmetros determinados para cada classe, definidos na Tabela 4.4.

TABELA 4.4 - PARÂMETROS DA EQUAÇÃO 4.2

CLASSIFICAÇÃO COMPARADA	CLASSIFICAÇÃO DE REFERÊNCIA			
		Classe desejada	Todas as outras	$\Sigma$
	Classe desejada	$a$	$b$	$p1$
	Todas as outras	$c$	$d$	$q1$
$\Sigma$	$p2$	$q2$	1	

FONTE: Adaptada de Fleiss (1981), p. 213.

O valor de  $K$  irá definir o grau de dependência entre duas classificações - uma de referência e outra a ser comparada - presentes numa matriz de erro. Para tanto, são formuladas duas hipóteses: na primeira, para  $K \leq 0$ , temos total independência e na segunda, para  $K = 1$ , temos total dependência, ou seja, estrita igualdade entre as classificações. Visando uma avaliação qualitativa dos valores encontrados para  $K$ , estes foram agrupados subjetivamente por Landis e Koch (1977), conforme a Tabela 4.5.

Para testar a hipótese nula, na qual há independência entre as classificações consideradas, utiliza-se o desvio padrão normal  $Z$  (Rosenfield, 1986), onde se tem a aceitação desta hipótese para valores de  $Z < 1.95$  e, conseqüentemente, sua rejeição para valores de  $Z \geq 1.95$ , aplicando-se um nível de teste ( $\alpha$ ) = 5%. Resultados de  $Z$  superiores a 1.95 traduzem portanto, que os valores de  $K$  obtidos para uma determinada classificação em relação a uma outra de referência são significativos para um intervalo de confiança arbitrário de 95%.

O cálculo de  $Z$ , para testar a hipótese nula mencionada acima, é feito da seguinte forma:

$$Z = \frac{K}{s(K)}, \quad (4.3)$$

onde o erro padrão  $s(K)$  é dado por:

$$s(K) = \frac{1}{(1 - P_e) \cdot (n)^{1/2}} \cdot \left[ P_e + P_e^2 - \sum_{i=1}^k P_i P_i (P_i + P_i) \right]^{1/2}.$$

**TABELA 4.5 - QUALIDADE DA CLASSIFICAÇÃO ASSOCIADA A UM VALOR  
DE KAPPA**

<b>K</b>	<b>QUALIDADE</b>
$\leq 0.00$	PÉSSIMA
0.00 - 0.20	RUIM
0.20 - 0.40	RAZOÁVEL
0.40 - 0.60	BOA
0.60 - 0.80	MUITO BOA
0.80 - 1.00	EXCELENTE



## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

A discussão dos resultados obtidos ao longo de todo o processo de análise das imagens foi dividida em três partes principais: (1) processamento das imagens, onde são discutidos os passos relevantes em direção à análise propriamente dita, (2) análise qualitativa da interpretação visual das imagens, de onde se pôde extrair o maior número de informações e (3) análise quantitativa da interpretação visual das imagens, a fim de fundamentar estatisticamente algumas das observações anteriores.

Estes procedimentos foram adotados para os dois conjuntos de imagens estudados (agosto e novembro/dezembro de 1992). Estes conjuntos, a partir daqui denominados de TMA e TMB, definem as composições TM 4 (R), 5 (G), 3 (B) de agosto e novembro/92, respectivamente, e MSA e MSB que, da mesma forma, definem as composições multissensores - após a transformação IHS - formadas pelas bandas TM4 (R), PC1 (G), C (B) de agosto e dezembro/92, respectivamente.

As imagens TM/Landsat e SAR/ERS-1 analisadas no estudo, constituem um conjunto bastante heterogêneo quanto às suas características geométricas e radiométricas. As diferenças geométricas, aqui atribuídas às resoluções espaciais, orientação das órbitas e geometrias de aquisição distintas, dificultam notadamente o trabalho de preparação para o registro das imagens a uma referência comum. Já as diferenças radiométricas, tornam a interpretação dessas imagens uma tarefa ainda de pouco domínio.

#### 5.1 - PROCESSAMENTO DOS DADOS

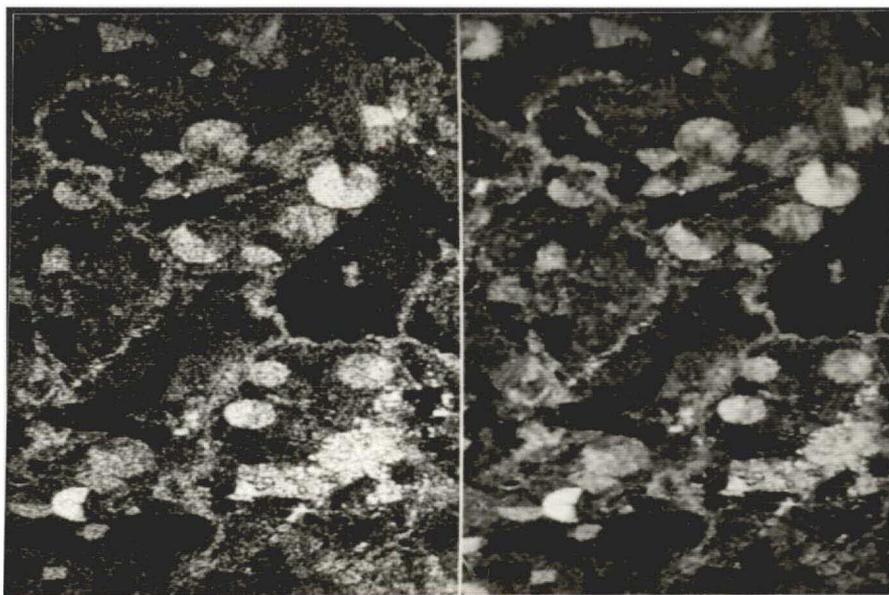
Os registros, conduzidos após o recorte das imagens originais para uma janela de aproximadamente 20 x 20 km, foram o primeiro passo no processamento dos dados, no sentido de viabilizar a análise do conjunto de imagens considerado.

Conforme mencionado na Seção 4.3.3.1, foi necessário utilizar a cena TM da primeira data para o registro I x M (Landsat A x Mapa), por questões de dificuldade na obtenção de pontos de controle nas imagens SAR, teoricamente mais indicadas para servirem de referência nos registros I x I posteriores. Ocorre porém, que a dificuldade em obter PC's que referenciassem a cena TM ao mapa, fez com que os erros

planimétricos resultantes deste registro (3.474 pixels) fossem maiores que aqueles toleráveis (0.83 pixel, ou 25 m) para a escala utilizada. É bem verdade que estes erros podem ser refinados por meio da repetição dos passos seguidos no registro, de maneira a se obter um erro final igual à combinação dos erros individuais ( $\sqrt{x^2 + y^2}$ ). No entanto, como o objetivo deste registro se resumiu a viabilizar a entrada de dados no SGI, a fim de possibilitar a aplicação da estatística *kappa*, a ordem de grandeza dos erros planimétricos neste caso foi desprezada. Maior atenção foi dispensada aos erros nos três registros I x I (ERS-1 A x Landsat A = 0.773, Landsat B x Landsat A = 0.613 e ERS-1 B x Landsat B = 0.778 pixel, respectivamente), estes sim, fundamentais para a análise do conjunto de imagens. Ao final, os erros apresentados foram plenamente satisfatórios e o artifício do refinamento por repetição tornou-se desnecessário neste caso.

A etapa seguinte no processamento dos dados foi a filtragem da imagem SAR. A esperada preservação de bordas na imagem SAR após a filtragem foi alcançada, como pode ser observado na Figura 5.1 (a e b), que apresenta as imagens SAR de agosto e dezembro/92 antes e depois da aplicação do filtro adaptativo de Frost.

A seguir, através da Análise por Principais Componentes, foram definidas as bandas utilizadas nas composições que tomaram parte na análise comparativa. Como referência na comparação, foi escolhida a composição TM 4 (R), 5(G), 3(B), apresentada na Figura 5.2 (a e b), por constituir um triplete bastante utilizado no estudo de alvos agrícolas. Nesta composição não foi realizado qualquer tipo de tratamento além do aumento linear de contraste. Vale ressaltar que não se pretende com isso, definir tal distribuição de cores feita na composição TM para este trabalho como sendo a melhor aplicável para estes tipos de alvos. O que se pretendeu foi, isto sim, a fixação da composição-referência quanto à sua distribuição de cores, variando-se apenas a composição multissensores, no sentido de tornar mais simples e objetivas as discussões acerca dos resultados alcançados.



(a) - 30/08/92.

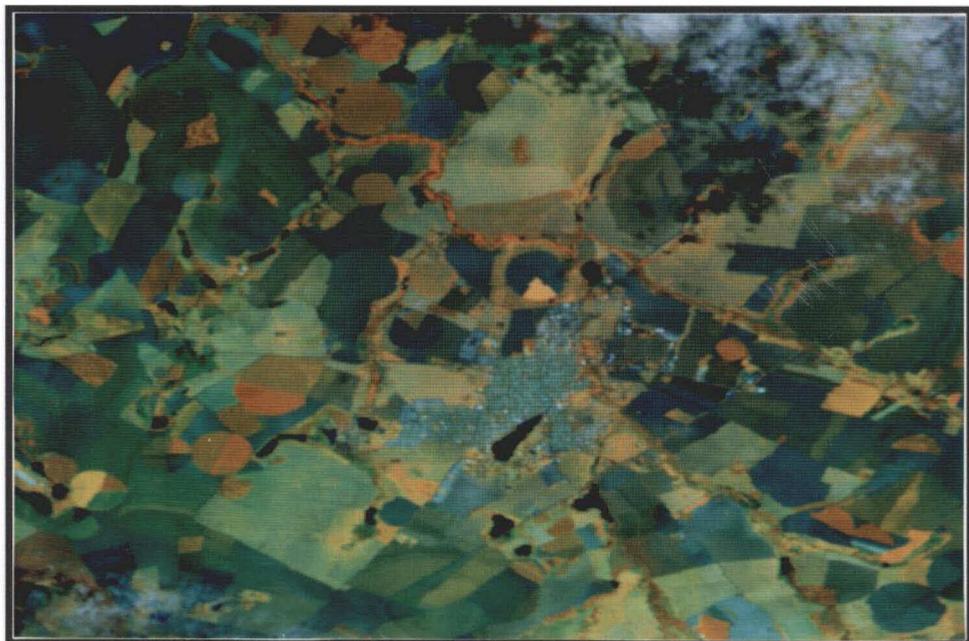


(b) - 13/12/92.

Fig. 5.1 - Imagens SAR/ERS-1 antes (à esquerda) e após (à direita) a aplicação do filtro adaptativo de Frost (5 x 5).



(a) - TMA.



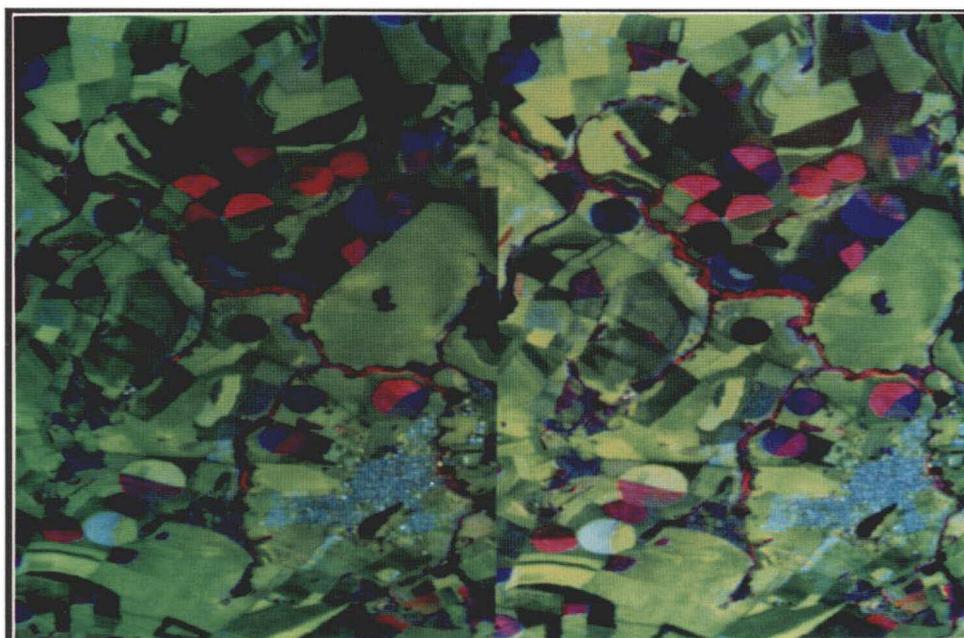
(b) - TMB.

Fig. 5.2 - Composições TM 4 (R), 5(G), 3(B).

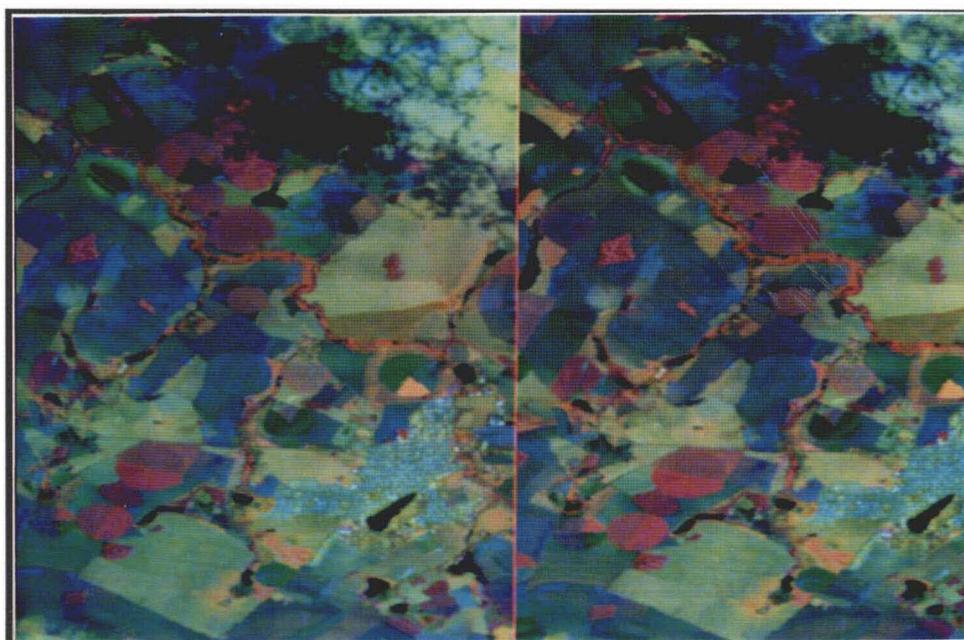
A composição multissensores, por sua vez, foi submetida a uma transformação IHS, sem alterar, no entanto, o histograma da componente relativa à matiz (H), como pode ser observado na Figura 5.3 (a e b), onde a banda TM4 foi usada para modular a intensidade (I) e a C a saturação (S). Tal escolha, apresentada no capítulo anterior (vide 4.3.3.3), é justificada por Welch e Ehlers (1988) como ideal para minimizar o ruído da composição final, através do uso da componente SAR para modular a saturação, enquanto as bandas ópticas, que apresentam alta relação sinal/ruído, são empregadas na modulação da intensidade e matiz. Como, após a transformação IHS, foi utilizado somente o Aumento Linear de Contraste, e a componente PC1 apresentava seu espaço de atributos totalmente ocupado, a transformação IHS foi utilizada apenas parcialmente.

Para efeito de visualização no monitor, escolhemos manter, após a transformada IHS, a distribuição TM4 (R), PC1 (G) e C (B). Entretanto, pode-se ainda ressaltar algumas feições específicas pela simples variação na distribuição R, G, B para visualização da imagem. Neste caso, como ilustra a Figura 5.4 (a e b), dependendo da distribuição utilizada, as culturas apresentam níveis de gradação mais discretizados. Por outro lado, as áreas irrigadas estão mais realçadas, sendo que os contornos limites entre as diversas feições estão mais definidos. Em geral, na composição MSA, as classes *área urbana*, *solo irrigado* e *matas de galeria* tornam-se mais realçadas do fundo ("background"), qualquer que seja a distribuição de cores. Já na composição MSB, embora ocorra o mesmo em relação às classes mencionadas acima, esta composição apresenta ainda, várias manchas relativas à maior energia do eco radar nas áreas onde existe uma alta permitividade. Este comportamento se deve à grande quantidade de água excedente no solo da região durante o mês de dezembro (vide 4.1.1).

Isto significa dizer que, para áreas com características distintas daquelas observadas na região de Guaira, em função da classe que se quer ver realçada, pode-se utilizar outras distribuições RGB na busca por melhores resultados.

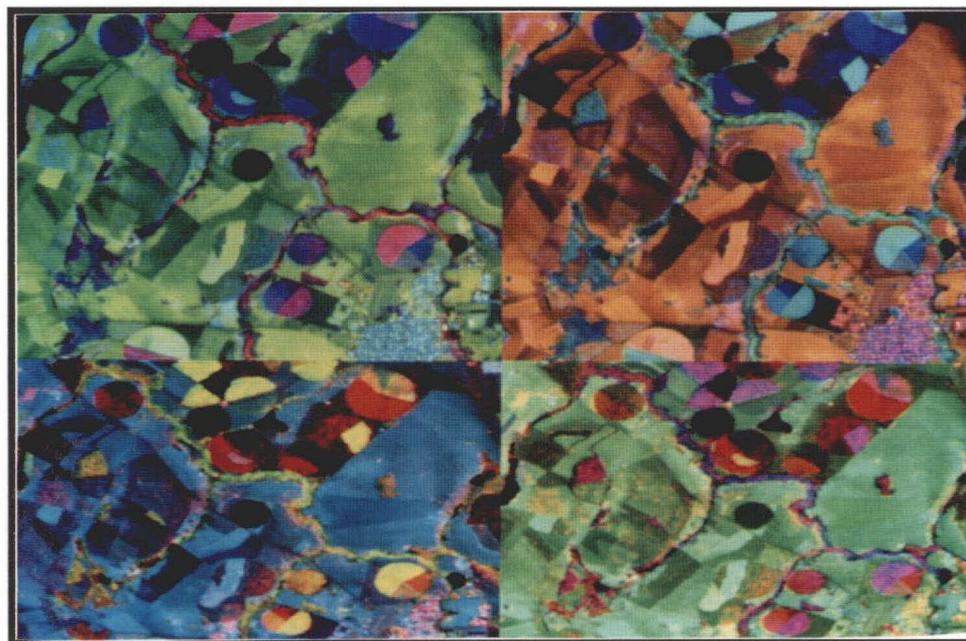


(a) - MSA.

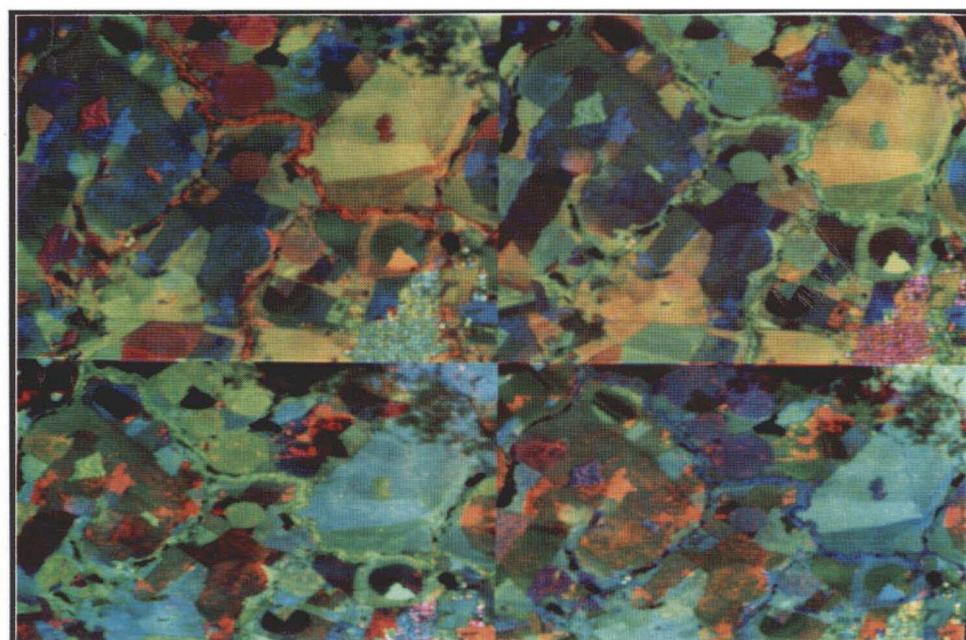


(b) - MSB.

Fig. 5.3 - Composições TM 4 (R), PC1 (G), C (B), antes (à esquerda) e após (à direita) a transformação IHS, na qual a banda TM4 modulou a intensidade (I) e a C, a saturação (S).



(a) - Composições MSA.



(b) - Composições MSB.

Fig. 5.4 - Composições MSA e MSB com diferentes distribuições RGB.

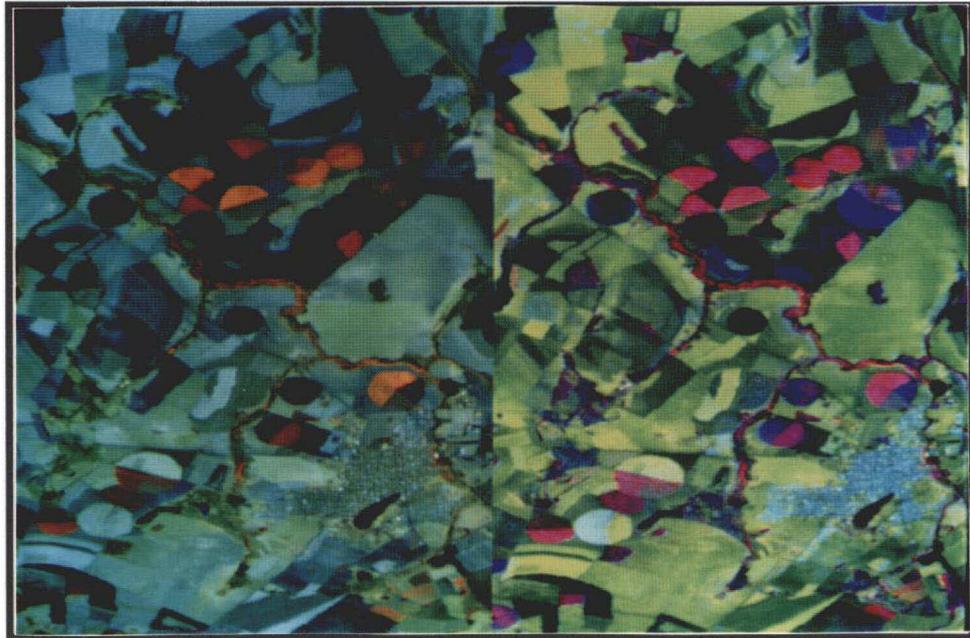
## 5.2 - ANÁLISE QUALITATIVA DA INTERPRETAÇÃO VISUAL DAS IMAGENS

Em termos gerais, face à utilização da transformada IHS, as composições multissensores apresentam maior nitidez. Os contornos das diversas feições mostram-se mais bem definidos, destacando-se as áreas urbanas, matas de galeria e áreas irrigadas, tanto nas composições MSA como nas MSB. A contribuição da componente SAR, entretanto, é diferente nas duas datas consideradas. Na primeira, a imagem SAR possui um peso maior no realce das feições destacadas acima, enquanto na segunda, houve maior influência das bandas TM4 e PC1, para as mesmas feições. Estas observações serão comentadas ainda nesta Seção e podem ser verificadas através da Figura 5.5 (a e b), onde são apresentadas as composições TMA e MSA (a), e as composições TMB e MSB (b).

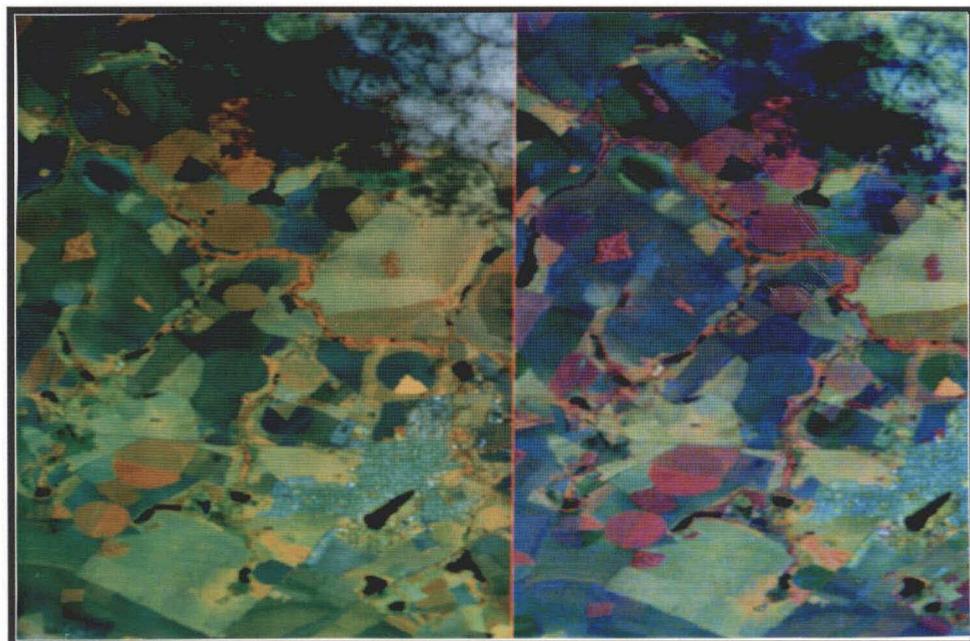
Na interpretação visual da área de estudo, foram selecionadas oito classes para serem digitalizadas na composição TMA e seis classes na composição TMB para, juntamente com os dados de campo, servirem de referência para a análise comparativa. As classes, selecionadas nas áreas dos pivôs de irrigação, a exceção de *matas*, *área urbana* e *outros*, são apresentadas na Tabela 5.1.

**TABELA 5.1 - CLASSES ANALISADAS NO ESTUDO COMPARATIVO**

TMA	TMB
Área urbana	Área urbana
Feijão	Mata
Mata	Milho
Milho	Soja
Palha	Solo exposto (SNI e SI)
Solo exposto (SNI e SI)	Outros
Tomate	-
Outros	-



(a) - TMA/MSA.



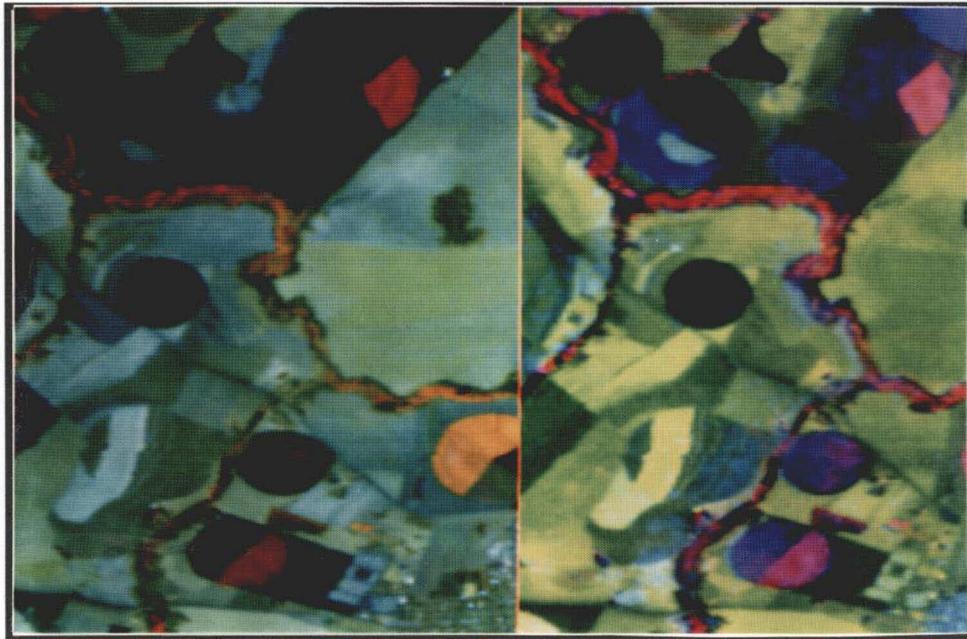
(b) - TMB/MSB.

Fig. 5.5 - Contraste entre composições TM e MS.

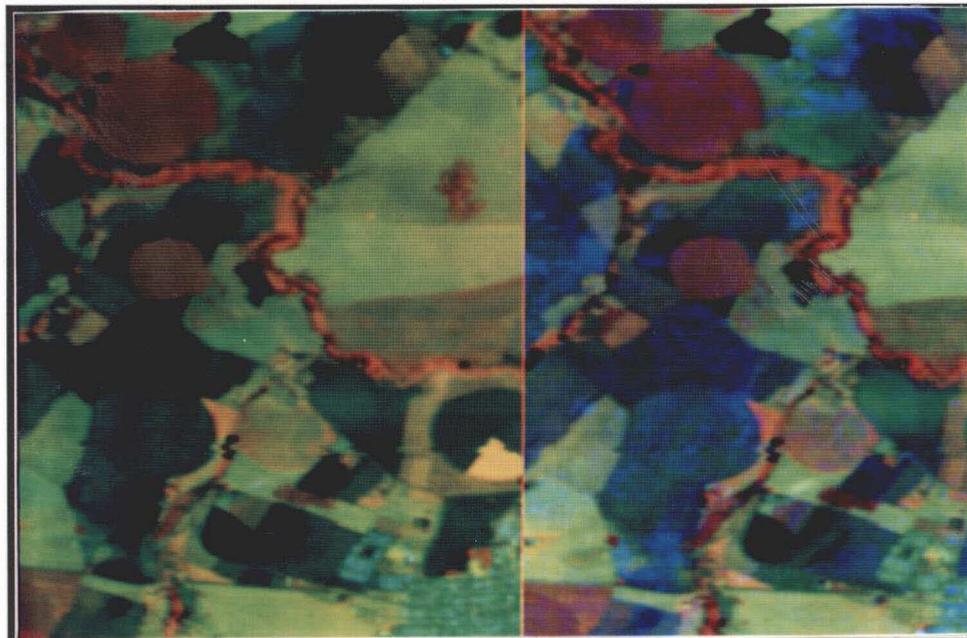
Nas composições MS (A e B), houve o acréscimo de uma subclasse à classe temática *solo exposto*, dividindo-a em *solo não irrigado (SNI)* e *solo irrigado (SI)*. Na Figura 5.6 (a e b), um exemplo destes temas é apresentado em ampliação e neste caso, a discriminação do solo exposto em duas subclasses está evidenciada através da coloração azulada nas áreas onde a presença de solo irrigado é notada. Nas demais classes, não foi notado qualquer efeito de degradação ou confusão na discriminação dos temas, provocada pelas composições MS (A e B). Houve isto sim, uma melhoria geral em termos de visualização dos temas da imagem, devido à maior quantidade de informações presentes em função do maior número de bandas envolvidas. Além disso, ocorreu uma melhor distribuição de cores provocada pela transformação IHS.

Ao combinarem as bandas TM2, TM7/Landsat com a banda SAR/ERS-1, Mendonça e Palme (1992) destacaram o realce proporcionado a diversas feições nas imagens resultantes pelos sistemas sensores radar, especialmente na discriminação de matas de galeria, em função do alto contraste observado na imagem SAR entre este tema e suas vizinhanças. A observação, correta em sua essência e confirmada em nosso estudo para a composição multissensor de agosto/92, inspirou-nos alguns cuidados quando não pudemos constatar os mesmos resultados na composição de novembro-dezembro/92.

Uma análise em separado das imagens SAR nas duas datas consideradas mostrou uma grande diferença entre ambas, especialmente nas áreas mais irrigadas, artificialmente ou não. Na imagem de agosto (Figura 5.7 a), período da seca, há um grande contraste hídrico na região, principalmente nas vizinhanças dos pivôs irrigados e dos cursos d'água. Nestas vizinhanças, a deficiência de água no solo faz com que boa parte do sinal radar seja absorvido, enquanto nos pivôs irrigados e nas várzeas dos cursos d'água, os parâmetros *rugosidade* (vegetação) e *permissividade* (umidade) aumentam o coeficiente de retroespalhamento dos alvos.

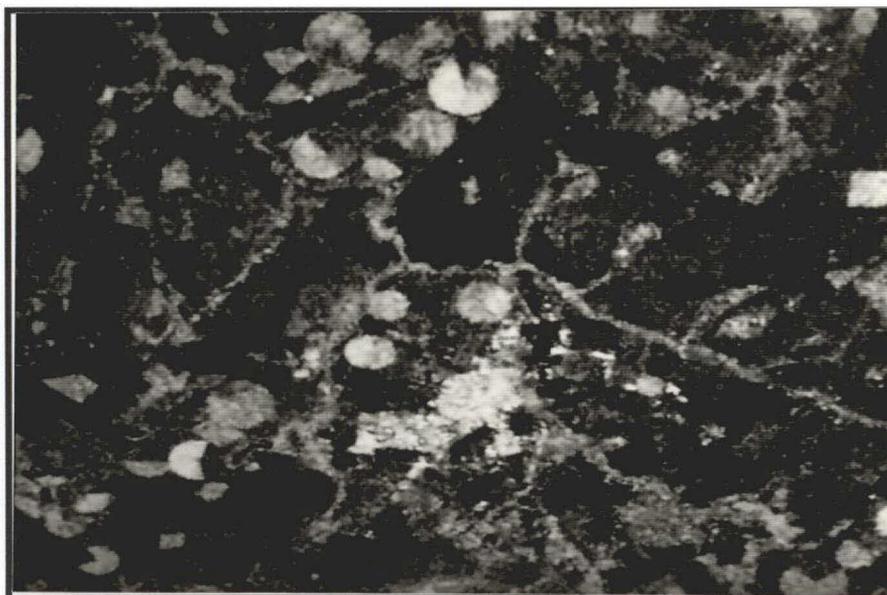


(a) - TMA/MSA.

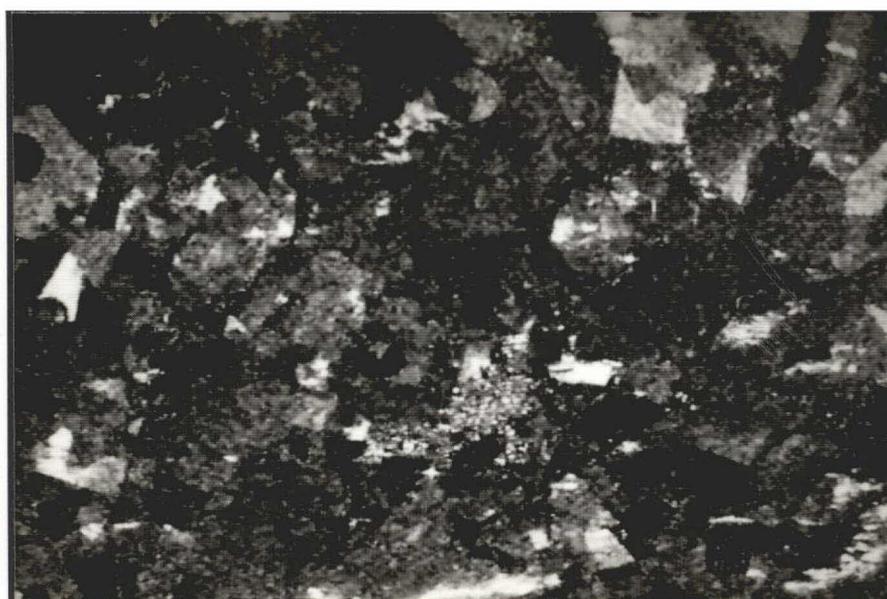


(b) - TMB/MSB.

Fig. 5.6 - Vista ampliada das composições TM e MS.



(a) - Agosto/92.



(b) - Dezembro/92.

Fig. 5.7 - Imagens SAR de agosto e dezembro de 1992.

Na imagem de dezembro (Figura 5.7 b), ao contrário, a banda C (SAR) influi muito pouco na resposta das culturas na composição MSB, por não haver nesta época do ano, um contraste hídrico significativo entre os pivôs/cursos d'água e as áreas sem irrigação artificial. Esta ausência de contraste para estas áreas se deve provavelmente, aos altos índices de precipitação que ocorrem em dezembro, gerando excesso de água no solo em toda a região. Além disso, é praxe entre os irrigantes não utilizar os sistemas de irrigação na estação chuvosa, visando a economia de energia elétrica, o que uniformiza o solo ainda mais em termos de umidade. Como a topografia é predominantemente plana, surgem trechos de solo saturados de água, ao contrário de agosto, quando estas áreas estão secas. Estranhamente, a imagem radar não apresenta grande influência na resposta das matas de galeria, onde a banda TM4 é claramente predominante (observe-se o vermelho puro desta classe na Figura 5.5) apesar de haver em qualquer época do ano, uma grande diferença entre as rugosidades das matas de galeria e das feições vizinhas. A área urbana, por sua vez, ainda apresenta retorno da componente radar, porém com uma influência maior da banda PC1. Em contrapartida, esta característica deixou clara a aplicabilidade da banda C na identificação de áreas alagadas ou com excedente de água.

A diferença entre as imagens SAR das duas datas foi ratificada com a análise de seus histogramas na condição original, antes da realização de qualquer tratamento no SITIM (Tabela 5.2). A distribuição de ambas é similar, do tipo "Rayleigh", mas a imagem de agosto apresenta média e variância inferiores àquelas apresentadas pela imagem de dezembro (40.66 contra 55.85, para as médias e 15.64 contra 25.52, para as variâncias, respectivamente). Estes resultados já eram esperados, pois o retroespalhamento do sinal radar é diretamente proporcional à permitividade dos alvos, superior na estação chuvosa.

**TABELA 5.2 - DADOS DOS HISTOGRAMAS DAS IMAGENS SAR**

IMAGENS SAR PARÂMETROS	SARGIC's (30/08/92)	SARGIC's (13/12/92)
Média	40.66	55.85
Menor nível de cinza	7	6
Maior nível de cinza	255	255
Nível de cinza mais populoso	34	47
Variância	15.64	25.52

Outra verificação da sensível mudança do padrão de resposta do eco radar entre ambas as datas foi possível após fazermos uma combinação multitemporal das duas imagens, atribuindo à imagem de agosto a cor vermelha (R) e à imagem de dezembro a cor azul (B). O resultado é apresentado na Figura 5.8, na qual observamos que as áreas onde há mais contraste entre as feições, como *área urbana*, *matas de galeria* e *pivôs irrigados*, a influência da imagem de agosto é maior. Em consequência, as feições de fundo e aquelas distribuídas aleatoriamente, mais em função da permitividade ligada ao excedente de água no solo e menos às classes temáticas nelas contidas, sofrem maior influência da imagem de dezembro.

De fato, resultados de um estudo multitemporal de detecção de mudanças utilizando imagens SAR conduzido por Cihlar *et al.* (1992), mostraram que as imagens obtidas ao longo do ciclo anual contêm informação do comportamento dinâmico de vários tipos de cobertura da superfície terrestre. No estudo, as classes que apresentaram a maior variação de comportamento foram vegetação e água, nesta ordem.

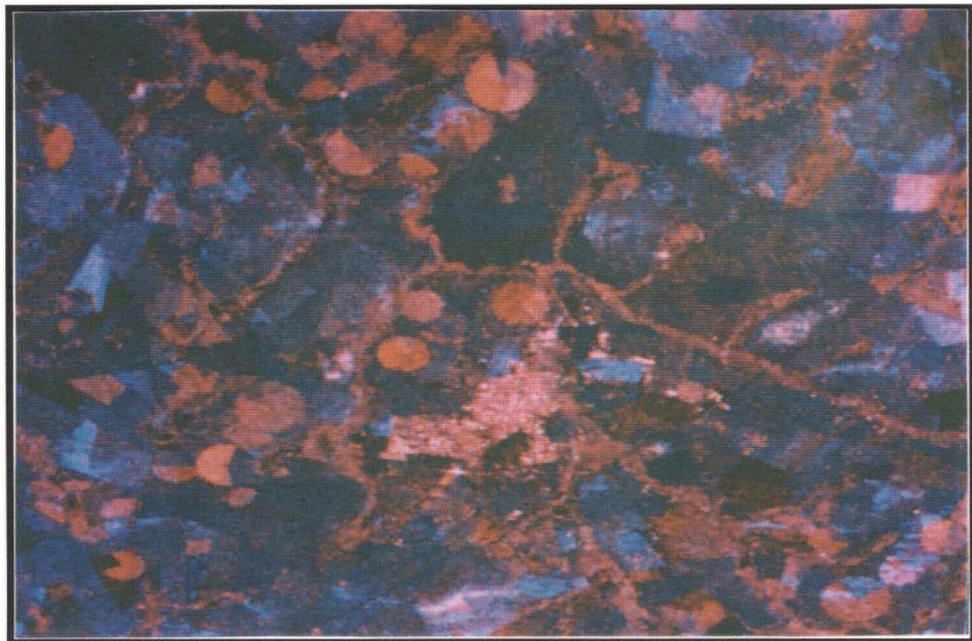


Fig. 5.8 - Composição multitemporal das imagens SAR de ago/92 (R) e dez/92 (B).

Além das áreas de interesse do estudo, nem todas as características apresentadas pela imagem radar de dezembro puderam ser explicadas. Haveria

necessidade de se coletar mais informações de campo visando melhorar o entendimento das relações alvo/sensor. Vale lembrar que, por não se tratar de alvos selecionados para o estudo proposto, não houve por outro lado, um controle maior sobre os mesmos.

### 5.3 - ANÁLISE QUANTITATIVA DA INTERPRETAÇÃO VISUAL DAS IMAGENS

A análise qualitativa mostrou ser interessante o uso de composições multissensores, na medida em que a discriminação das diversas classes é facilitada, sendo que, no caso dos solos, pode-se ainda visualizar uma subclasse adicional, quando estes se encontram irrigados. Contudo, julgamos pertinente verificar qual o nível de dependência entre as classes temáticas observadas nestas composições e naquelas formadas apenas pelo sensor TM/Landsat (neste caso, a composição TM 4, 5, 3). Para esta verificação, foi aplicada aos conjuntos analisados a estatística *Kappa* ( $K$ ), conforme proposto por Fleiss (1981), Congalton (1983) e apresentadas por Medeiros (1987), cujos resultados são discutidos a seguir.

Os valores de  $K$  e de  $Z$  foram estimados para os dois conjuntos de imagens considerados e são apresentados nas Tabelas 5.4 e 5.6. Nestes conjuntos, além das classes escolhidas para o estudo, foi incluída também para efeito de cálculo, a classe *fundo* ("background"), a fim de se evitar a omissão de diferenças de classificação na região de borda das diversas classes.

Os resultados obtidos, sem exceção, ratificam a análise qualitativa apresentada anteriormente. No que diz respeito à primeira data (ago/92), na estação seca, o resultado de  $K$  referente à matriz como um todo (0.837), indica que a composição multissensores possui alta dependência em relação à composição TM, segundo a avaliação subjetiva apresentada anteriormente na Tabela 4.4. Além disso, o valor de  $Z$ , superior a 1.95 indica que o valor de *Kappa* é significativo.

Observando-se na Tabela 5.3 os valores de  $K$  para cada classe isoladamente, são confirmadas as diferenças verificadas por ocasião da análise qualitativa da comparação. Existe uma forte dependência das culturas situadas no interior dos pivôs, das matas e da classe *outros* (valores de  $K$  acima de 0.91), enquanto que, para a classe *área urbana*, cujos limites foram melhor realçados pela componente radar da composição multissensores, a diferença de áreas nos dois conjuntos após a digitalização resultou num valor de  $K$  não tão alto (0.709). A diferença maior, entretanto, ocorreu na

classe *solo exposto*, pelo surgimento de uma subclasse no conjunto multissensores, dividindo aquela classe em *solo não irrigado* e *solo irrigado*. O resultado foi um valor nulo de *K* para a classe *solo irrigado*, que não existia na composição TM, e um valor mais baixo de *K* para a classe *solo não irrigado*, em função da transferência de grande quantidade de pontos causada pela divisão da classe original (*solo exposto*), como era de se esperar. O alto valor de *K* para a classe *fundo* (0.908) é devido principalmente à grande quantidade relativa de pontos atribuídos a esta classe.

**TABELA 5.3 - MATRIZ DE ERROS DA COMPARAÇÃO ENTRE IMAGENS MULTISSENSORES - ESTAÇÃO SECA**

COMPARAÇÃO DO "PIMS" COM O "PIRF" APÓS CLASSIFICAÇÃO VISUAL (AGO/92)										
Classe	Fundo	Tomate	Feijão	Milho	Palha	SI	SNI	Mata	A U	Outros
Fundo	3709852	793	714	770	929	2933	0	471	30497	133
Tomate	548	19826	2	80	87	90	0	13	0	0
Feijão	1046	57	23562	0	142	121	0	0	0	0
Milho	626	11	0	26263	8	242	0	0	0	117
Palha	706	103	1258	0	33369	479	0	0	0	0
SI	1535	8	21	53	38	34409	0	0	0	0
SNI	792	2068	246	131	186	32291	0	0	0	0
Mata	1446	10	0	0	0	28	0	19187	0	0
A U	1576	0	0	0	0	0	0	0	40347	20
Outros	175	0	0	6	24	59	0	0	297	9199
<i>K<sub>i</sub></i>	0.993880	0.911079	0.928899	0.962544	0.943987	0.644870	0.000000	0.951217	0.713576	0.956784

**TABELA 5.4 - RESULTADOS DA ESTATÍSTICA KAPPA (TOTAL - AGO/92)**

Limite inferior	<i>K</i>	Limite superior	Z (95%)	Índice
0.835755	0.836765	0.837775	14.16	excelente

Em relação à segunda data (nov-dez/92), na estação chuvosa, o mesmo fenômeno observado na estação seca, referente aos números estatísticos, se repetiu na sua essência. Entretanto, os valores de *K* (Tabela 5.5), foram sempre superiores numericamente desta vez, em razão da menor quantidade de classes examinadas e de áreas disponíveis para classificação, em razão da presença de nuvens em determinadas porções da cena.

**TABELA 5.5 - MATRIZ DE ERROS DA COMPARAÇÃO ENTRE IMAGENS MULTISSENSORES - ESTAÇÃO CHUVOSA**

COMPARAÇÃO DO "PIMS" COM O "PIRF" APÓS CLASSIFICAÇÃO VISUAL (NOV-DEZ/92)								
Classe	Fundo	Soja	Milho	SNI	SI	Mata	A U	Outros
Fundo	3778040	123	1823	613	0	832	2923	521
Soja	177	5623	30	85	0	0	0	84
Milho	1852	31	64391	332	0	70	0	60
SNI	981	23	445	23287	0	0	0	91
SI	494	0	1	5708	0	0	0	9337
Mata	885	0	1	0	0	18299	0	0
A U	9051	0	0	0	0	0	49168	373
Outros	935	0	11	138	0	0	221	22941
<i>K<sub>i</sub></i>	<i>0.997201</i>	<i>0.953132</i>	<i>0.965107</i>	<i>0.846954</i>	<i>0.000000</i>	<i>0.953421</i>	<i>0.886677</i>	<i>0.795830</i>

**TABELA 5.6 - RESULTADOS DA ESTATÍSTICA KAPPA (TOTAL - NOV-DEZ/92)**

Limite inferior	<i>K</i>	Limite superior	Z (95%)	Índice
0.890936	0.892435	0.893934	19.68	excelente



## CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nos últimos anos, devido à competição com outros sensores, a contribuição de dados radar, em especial dados SAR, para o uso da terra tem sido limitada. Todavia, novos conceitos, que incluem o emprego de imagens SAR de frequências múltiplas, multipolarizadas e com múltiplos ângulos de incidência, ampliaram e fortaleceram a singularidade das imagens radar.

Por tratar-se de um sistema sensor ainda muito pouco explorado, não está totalmente claro como os vários outros sensores ópticos podem ser comparados e quais seriam os benefícios decorrentes da combinação ou fusão de dados numa aplicação específica em dados da superfície terrestre. O fato é que o potencial para a combinação entre imagens, com análise apropriada dos dados e soluções utilizáveis, ainda está longe do seu limite, se compararmos ao uso individual e bem mais tradicional de sensores ópticos. Assim sendo, uma questão fundamental é saber se a combinação de dados multisensores pode acrescentar informações relevantes aos trabalhos científicos de sensoriamento remoto. Segundo a nossa percepção, a resposta a esta questão é afirmativa, quando consideramos os efeitos sinérgicos entre os diversos sensores demonstrados nos trabalhos citados neste estudo, além dos próprios resultados aqui obtidos.

Ao final deste trabalho, com os dados e os meios disponíveis para conduzi-lo, chegamos às seguintes conclusões:

- 1) Isoladamente, a componente radar da composição multissensores não apresentou resultados satisfatórios para a discriminação de culturas. Contudo, sob determinadas condições, estas e outras feições na área de estudo puderam ser melhor visualizadas graças a esta componente. Este comportamento se deve, basicamente, à capacidade das microondas em evidenciar as propriedades físicas dos alvos, ao passo que, os sensores ópticos, por operarem numa faixa bastante diferente do espectro eletromagnético, dispõem de um maior número de bandas e utilizarem uma geometria de aquisição distinta, ressaltam características de naturezas diferentes;
- 2) As composições multissensores confirmaram a ocorrência de sinérgico entre as imagens TM/Landsat e SAR/ERS-1. Este sinérgico pôde ser verificado no

surgimento da subclasse *solo irrigado*, ausente nas composições TM (A e B), junto com a preservação das demais classes observadas naquelas composições, sem qualquer prejuízo na interpretação das imagens;

- 3) As técnicas de Análise por Principais Componentes e Transformação IHS constituem uma solução interessante na combinação de imagens multissensores. Além de permitirem o agrupamento de um número maior de bandas para observação, aumentando a quantidade de informações disponíveis, possibilitam uma melhor visualização destas bandas;
- 4) É fundamental, num estudo deste tipo, a busca pelo menor espaço de tempo aplicável entre as imagens dos diferentes sensores, especialmente em áreas de intensa atividade agrícola como a que foi analisada no presente trabalho;
- 5) Também fundamental é o estudo *a priori* da climatologia da região e das condições meteorológicas vigentes por ocasião do imageamento. Os radares são extremamente sensíveis à variação de umidade na superfície imageada;
- 6) Os resultados obtidos nas duas datas consideradas permitem afirmar que o comportamento de alvos observados por sistemas radar não deve ser extrapolado para outras estações do ano. Permite ainda, supor que estes comportamentos não devem ser extrapolados sequer para regiões com alvos de natureza diferente e sob condições diferentes;
- 7) A interpretação, a partir de composições multissensores, de alvos sob cobertura de nuvens é possível, desde que acompanhada de um trabalho de campo criterioso e direcionado. Nestas circunstâncias, outros parâmetros além dos valores radiométricos observados são necessários;
- 8) Para combinar imagens multissensores, o registro destas a uma base cartográfica comum é essencial. Para tanto, tratando-se de imagens SAR/ERS-1, deve-se tomar sempre como referência a imagem do sensor óptico, ao qual estiver sendo combinada. A experiência mostrou ser impraticável o registro de imagem SAR/ERS-1 a um mapa de referência, principalmente se considerarmos mapas mais antigos e de regiões rurais;
- 9) Aparentemente as imagens SAR/ERS-1 são bem mais sensíveis à *permitividade* do que à *rugosidade* dos alvos. Enquanto se percebe, em ambas as datas, grandes

variações de resposta nas imagens relativas a mudanças de umidade nos alvos, o mesmo não acontece em relação à grande diferença de rugosidade entre algumas feições.

Apesar de considerarmos que o trabalho proposto tenha atingido seu objetivo, algumas ressalvas devem ser feitas no sentido de esclarecer que, salvo engano, o mesmo poderia ter sido conduzido com imagens mais nítidas. Estas ressalvas se baseiam nas nossas suspeitas de que as imagens SAR/ERS-1 não estejam "focadas" corretamente após o processamento da imagem bruta realizado no INPE, em Cachoeira Paulista-SP.

A imagem SAR torna-se "desfocada" quando, em seu processamento, não se consegue precisar a frequência Doppler de referência que determinará o endereçamento correto dos ecos de retorno recebidos pela antena. Em outras palavras, para que a imagem digital formada seja a expressão daquilo que está sendo observado na superfície, é preciso que a energia de retorno relativa às centenas de vezes em que um alvo é "visto" pela antena sintética (no ERS-1 são cerca de mil vezes) seja atribuída a um mesmo pixel. Quando a frequência Doppler de referência não é precisamente determinada, algumas destas observações da antena são atribuídas aos pixels vizinhos, "desfocando" a imagem. O resultado é uma perda, nas duas dimensões (transversal e longitudinal), da resolução espacial da imagem. Estas suspeitas não foram investigadas e, portanto, não estão confirmadas, uma vez que o pré-processamento da imagem radar não constitui objetivo deste trabalho. No entanto, os motivos que conduziram a estas suspeitas são enumerados abaixo, na expectativa de que possam vir a ser investigados:

- 1) As imagens SAR/ERS-1 de outros países, processadas no exterior, apresentam maior definição nos limites de pequenas feições, sendo possível discriminar áreas cultivadas de pequenas proporções. Em contrapartida, com as imagens recebidas para este trabalho, o mesmo não acontece. Um bom exemplo é a imagem de Rio Claro-SP (inicialmente considerada para área de estudo), na qual não é possível identificar alguns trechos sinuosos da rodovia Washington Luís com duas pistas duplas, ou ainda, discriminar os limites entre talhões de eucaliptos de um horto florestal (com árvores de cerca de 30 m de altura) e áreas de solo exposto ou canaviais. Igualmente, a imagem de Guaíra-SP aqui analisada, não permite distinguir alvos cuja diferença de rugosidade deveria ser determinante na sua discriminação;

- 2) Aparentemente as imagens SAR/ERS-1 não possibilitam distinguir variações na rugosidade dos alvos imageados, ao passo que se mostram sensíveis a variações de permitividade. A teoria nos ensina que os principais fatores do alvo que influenciam o retroespalhamento radar são a geometria do alvo, sua rugosidade e sua permitividade. Nas imagens de Guaira (agosto e dezembro/92) pudemos perceber a grande influência do parâmetro *geometria*, ao constatar o realce provocado pela área urbana desta cidade (vide Seções 5.1 e 5.2). A sensibilidade ao parâmetro *permitividade* está evidenciada na variação de contraste observada nas duas datas analisadas, nas quais os índices de umidade no solo variam sensivelmente (vide Seções 4.1.1, 5.1 e 5.2). O parâmetro *rugosidade*, entretanto, não se faz notar com a importância esperada. As matas de galeria, por exemplo, possuem uma rugosidade superior a qualquer feição circundante e, no entanto, não podem ser distingüidas na imagem SAR de dezembro/92. O mesmo ocorre na imagem de Rio Claro, comentada no item anterior, em relação ao horto florestal;
  
- 3) A justificativa que encontramos para explicar esta inversão na influência do sinal de retorno se baseia no "desfocamento" da imagem provocado pela imprecisão do processamento conduzido em Cachoeira Paulista. Ocorre que, num alvo extenso, a frequência espacial da rugosidade é bem superior àquela observada para a permitividade. Se há uma degradação da resolução espacial (neste caso, causada pelo "desfocamento" da imagem), a consequência imediata é a redução das frequências espaciais, tanto da rugosidade como da permitividade, que se fará sentir em maior grau na primeira. O resultado é uma degradação nas bordas das feições, onde ocorre a variação destes parâmetros. Quanto maior for o contraste nestes parâmetros para uma mesma situação, maior será a inversão em favor da permitividade.

Finalmente, julgamos conveniente apresentar algumas considerações gerais e também enumerar algumas recomendações, as quais entendemos como sendo úteis para a busca de um melhor entendimento do assunto em trabalhos futuros. Os itens discutidos a seguir não constituíram impedimento para se atingir o objetivo proposto neste trabalho. Da mesma forma, não cremos que a inobservância destes itens venha a se tornar um obstáculo intransponível à obtenção de melhores resultados, que permitam esclarecer ainda mais a interação entre dados gerados por diferentes sistemas sensores. O que pretendemos, com esta discussão, é tão somente antecipar aos próximos estudos uma parte da experiência adquirida na execução deste trabalho, visando mostrar os meios

e as condições que entendemos como viáveis e mais favoráveis na busca por resultados mais consistentes. Assim sendo, listamos as seguintes observações:

- 1) O trabalho envolvendo imagens multissensores exige, para sua condução apropriada, maior quantidade de tempo disponível, grande espaço em disco e, conseqüentemente, um sistema de tratamento inteiramente dedicado a este tipo de análise;
- 2) O uso do SITIM e do SGI neste trabalho atendeu ao objetivo proposto inicialmente. Entretanto, existem atualmente, "softwares" mais apropriados ao estudo de imagens radar, que permitem analisar outros parâmetros destas imagens, com diferentes tipos de abordagem;
- 3) A variação na distribuição de cores do padrão RGB após a transformação IHS pode apresentar resultados interessantes em outras regiões com diferentes classes de alvos. A simples mudança nesta distribuição evidencia uma gama de atributos distintos nas composições multissensores;
- 4) A transformação IHS deve ser explorada de forma mais abrangente, com o uso de filtros variados, outros tipos de realce (rotação da matriz, por exemplo) e variação na distribuição das componentes;
- 5) A possibilidade de classificação digital de imagens compostas TM/SAR deve ser testada numa cena com um número suficiente de áreas de treinamento. Também deve ser testado o efeito prático da obtenção de imagens-diferença entre os dois sistemas sensores;
- 6) A explicação mais precisa de todos, ou quase todos os fenômenos de uma cena, deve passar obrigatoriamente por uma maior quantidade de trabalhos de campo. Para realizar estudos fora de áreas melhor controladas, como os pivôs de irrigação, por exemplo, seria desejável o uso de fotografias aéreas na data da passagem do satélite, como aliás, estava programado para esta pesquisa (no dia do aerolevanteamento de Guaira e após ter realizado o de Rio Claro na data anterior, a aeronave "Bandeirante" do 1º/6º GAv, da FAB, ficou indisponível para o vôo e a missão teve de ser cancelada);
- 7) Todo o ciclo do processamento das imagens SAR/ERS-1 no INPE em Cachoeira Paulista deve ser investigado, a fim de se verificar o motivo pelo qual estas

imagens aparentam estar "desfocadas". Uma proposta para a realização deste trabalho é conduzir o mesmo tipo de processamento para as cenas deste estudo (a partir das HDDT originais), utilizando um processador diferente daquele empregado em Cachoeira Paulista (MDA - Canadá), como aquele disponível no DPI/OBT/INPE (DLR - Alemanha);

- 8) Finalmente, uma interessante pesquisa a ser realizada diz respeito à combinação de imagens multissensores sobre áreas parcialmente cobertas por nuvens. Para tanto, um eficiente trabalho de campo deve ser planejado e conduzido, visando a obtenção de resultados que permitam conclusões realmente esclarecedoras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aschbacher, J.; Lichtenegger, J. Complementary nature of SAR and optical data: a case study in the tropics. **Earth Observation Quarterly**, (31):4-8. Sept. 1990.
- Bishop, Y.; Fienberg, S.; Holland, P. **Multivariate analysis: theory and practice**. Cambridge, MA, MIT Press, 1975, 575 p.
- Chavez, P. S.; Bowell, Jr. Digital merging of Landsat TM and digitized NHAP data for 1:24000 scale image mapping. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 52:1637-1646, 1986.
- Chavez, P. S.; Bowell, Jr.; Bowell, J. A. Comparison of the spectral information content of Landsat Thematic Mapper and SPOT for three different sites in the Phoenix, Arizona region. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 54(12):1699-1708, Dec. 1988.
- Cihlar, J.; Pultz, T. J.; Gray, A. L. Change detection with synthetic aperture radar. **International Journal of Remote Sensing**, 13(3):401-414, 1992.
- Cohen, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and psychological measurement**, 20(1):37-46, 1960.
- Congalton, R. G.; Oderwald, R. G.; Mead, R. A. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 49(12):1671-1678, Dec. 1983.
- Crósta, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas, SP, IG/UNICAMP, 1992.
- de Loor, G. P. Introduction and some general aspects of image formation in radar remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, 1(1):3-18, June, 1983.

- Dutra *et al.* **Tutorial 1**. Curitiba, INPE, jun. 10-14, 1993. 25p.
- Fleiss, J. E. **Statistical methods for rates and proportions**. New York, John Willey, 1981, 321 p.
- Francis *et al.* The ERS-1 spacecraft and its payload. **ESA Bulletin: ERS-1 special issue**. (65):27-48, Feb. 1991.
- Frost, V. S.; Stiles, J. A.; Shanmugan, K. S.; Holtzman, J. C. A model for radar images and its applications to adaptative digital filtering of multiplicative noise. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, PAMI-4:157-166, 1982.
- Fundação Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Rio de Janeiro (FIDERJ). Diretoria de Geografia e Estatística. **Indicações climatológicas do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 1978.
- Gane, C. **Desenvolvimento rápido de sistemas**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, 1988.
- Goodenough, D. G. TM and SPOT integration with a GIS. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 54(2):167-176, Feb. 1988.
- Haydn, R.; Dalke, G. W.; Henkel, J.; Bare, J. E. Application of the IHS color transform to the processing of multisensor data and image enhancement. In: International Symposium on remote sensing of arid and semi-arid lands. Cairo, Egypt, Jan. 1982. **Proceedings**. Ann Arbor, Michigan, ERIM, 1982, p. 599-616.
- Horgan *et al.* Land use classification in central Spain using SIR-A and MSS imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 13(15):2839-2848, 1992.
- Jensen, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1986.

- Kahle, A. B.; Goetz, A. F. H. Mineralogic information from a new airborne thermal infrared multispectral scanner. *Science*, New York, 222:24-27, 1983.
- Landis, J.; Koch, G. G. The measurements of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(3):159-174, Mar. 1977.
- Leberl, F. W. **Radargrammetric image processing**. Norwood, MA, Artech House, 1990.
- Li, R. Y.; Ulaby, F. T. Crop classification with a Landsat/radar sensor combination. In: Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium. *s. l.*, 1980. **Proceedings**, *s. ed.*, 1980, p.78-87.
- Lichtenegger, J.; Dallemand, J. F. **Principles of radar imagery: lecture notes**. Rome, FAO/ESA, 1989.
- Lichtenegger, J. Radar image characteristics, processing and analysis. **UN/FAO/ESA Workshop on Microwave Remote Sensing Technology**, São José dos Campos, Brazil, Nov. 19-23, 1990.
- Medeiros, J. S. **Desenvolvimento metodológico para detecção de alterações da cobertura vegetal através da análise digital de dados MSS/Landsat**. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Fev. 1987. 127 p. (INPE - 4123 - TDL/262).
- Mendonça, M. A.; Palme, U. W. **Análise multissensor (Landsat TM / ERS-1) e multitemporal (Landsat TM) do uso do solo no sul do estado do Maranhão (área piloto - Riachão)**. (Trabalho de Especialização em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Nov. 1992. 37 p. Manuscrito.
- Oliveira, J. B.; Menck, J. R. F. **Latossolos roxos do Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agronômico, 1980. 132 p. (Boletim Técnico, 82).

- Ortiz, M. J. **Integração de sensoriamento remoto, sistema de informações geográficas e banco de dados, na identificação de culturas agrícolas da região de Guaira** (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Dez. 1993. 186 p. No prelo.
- Rebillard, P., Evans, D. Analysis of coregistered Landsat, Seasat and SIR-A images of varied terrain types. **Geophysical Research Letters**, 10(4):277-280, Apr. 1983.
- Rosenfield, G. H.; Lins, K. F. A coeficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 52(2):223-227, Feb. 1986.
- Ruck, G. T.; Barrick, D. E.; Stuart, W. D.; Kirchbaum, C. K. **Radar cross section handbook**. New York, Plenum Press, 1970. v.1
- Saad, A. M. **Apoio à agricultura irrigada do município de Guaira - São Paulo**. São Paulo, IPT, 1987. 59 p. (IPT n.1746.)
- Sabins, F. F. **Remote sensing: principles and interpretation**. 2.ed. New York, Freeman and Company, 1986.
- Skolnick, M. L. **Introduction to radar systems**. 2.ed. New York, McGraw-Hill, 1980.
- Suits, G. H. The nature of electromagnetic radiation. In: Simonett, D. S. ed. **Manual of remote sensing**. 2.ed. Falls Church, Virginia, American Society of Photogrametry, 1983. v.1, c.2. p.43-44.
- Ulaby, F. T.; Moore, R. K.; Fung, A. K. **Microwave remote sensing: active and passive**. v.1. Reading, MA, Addison-Wesley, 1981.

Ulaby, F. T.; Moore, R. K.; Fung, A. K. **Microwave remote sensing: active and passive.** v.2. Reading, MA, Addison-Wesley, 1982.

Welch, R. A. Integration of photogrammetric, remote sensing and database technologies for mapping applications. **Photogrammetric Record**, 12(70):409-428, Oct. 1987.

Welch, R. A.; Ehlers, M. Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 53:301-303, 1987.

Welch, R., Ehlers, M. Cartographic feature extraction with integrated SIR-B and Landsat TM images. **International Journal of Remote Sensing**, 9(5):873-889, 1988.