



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-5668-TDI/561**

**AVALIAÇÃO DOS DADOS DE RADAR (SAR) DO PROJETO  
SAREX'92 E ERS-1 EM MAPEAMENTO GEOLÓGICO NA  
REGIÃO DE SALOBO, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS**

Pedro Alberto Bignelli

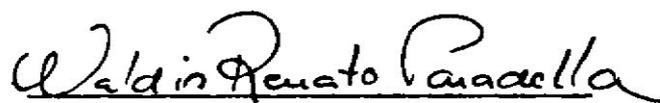
Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelo Dr. Waldir Renato Parandella, aprovada em novembro de 1994

INPE  
São José dos Campos  
1995

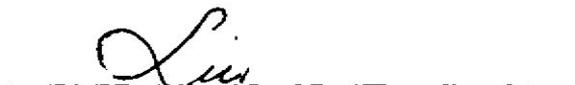


Aprovada pela Banca Examinadora  
em cumprimento a requisito exigido  
para a obtenção do Título de Mestre  
em Sensoriamento Remoto

Dr. Waldir Renato Paradella

  
Orientador/Presidente

Dr. Liu Chang Chiang

  
Membro da Banca

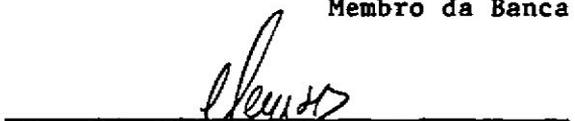
Dr. Paulo Veneziani

  
Membro da Banca

Dr. Luciano Vieira Dutra

  
Membro da Banca

Dr. Paulo Roberto Meneses

  
Membro da Banca  
- Convidado -

Candidato: Pedro Alberto Bignelli

São José dos Campos, 04 de novembro de 1994



**"NÃO BASTA SABER, É PRECISO APLICAR,  
NÃO BASTA QUERER, É PRECISO AGIR".**

**GOETHE**



**DEDICATÓRIA**

**À MINHA MÃE.**

**NICEA MONTEFELTRO BIGNELLI**



## AGRADECIMENTOS

Externo aqui meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

- Ao Dr. Waldir Renato Paradella pela orientação, incentivo e amizade constantes desde o início da composição desta dissertação.

- Aos Drs. Liu Chan Chiang e Paulo Veneziani pelo estímulo, apoio e colaboração no decorrer da elaboração deste trabalho de Mestrado.

- Ao amigo geólogo Ricardo Ribeiro Dias, pelo companherismo durante o curso e trabalho de campo.

- Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em especial a Dra. Thelma Krug nas atribuições de chefe da Divisão de Sensoriamento Remoto e Meteorologia Espacial (DSM), que forneceu todo apoio, colocando sua infra-estrutura à disposição, viabilizando a realização desta dissertação.

- Aos desenhistas Joaquim Godoy Filho, Silvio Pereira Coimbra e Ana Lucia Neves Oliveira, pelos mapas e ilustrações aqui apresentados, assim como pela amizade dedicada.

- Ao engenheiro Moacir Godoy Junior, chefe do Laboratório de Tratamento Digital de Imagens (LTID), extensivo aos operadores e programadores, e em especial a Julio Ricardo Lisboa de Aragão, pela paciência e amizade durante o processamento das imagens radar, parte importante deste trabalho.

- Aos amigos Maria Cristina dos Santos Varlez, Maria Etelvina Reno Dias Arbex, Ana Cristina Abrahão e Sidnei João Siqueira Sant'anna pela atenção e apoio dispensados.

- A Fernanda Aparecida Leite, pelo cuidadoso trabalho de digitação do texto e digitalização de mapas no transcorrer deste trabalho.

- A Celso Luiz Faria, pelos trabalhos fotográficos incluídos nesta dissertação de Mestrado.

- A todos amigos no INPE, pelo constante apoio e carinho que demonstraram durante o período do curso de Mestrado em Sensoriamento Remoto.

- A DOCEGEO, Distrito Pará, na pessoa do geólogo Ricardo Saueressig, pelo empenho indispensável no subsídio à realização dos trabalhos de campo na área de Salobo 3A.

- Ao Dr. Vernon H. Singhroy e Ronald W. Pietsch, pelas valiosas sugestões ao trabalho e à utilização do software PCI.

- Ao Dr. Francis J. Ahern por suas intervenções junto a CIDA ("Canadian International Development Agency") e CCRS ("Canadian Centre for Remote Sensing"), que possibilitaram os recursos para trabalhos de campo e infraestrutura da obtenção dos dados SAREX.

- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por fornecer subsídios na forma de bolsa de estudos para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho enfocou a avaliação de dados de radar (SAR) obtidos por aeronave (experimento SAREX'92) e orbital (imageamento ERS-1) no mapeamento geológico da região do Salobo, Província Mineral de Carajás. Os principais objetivos da investigação envolveram a análise visual e digital dos dados SAR na discriminação litológica e mapeamento estrutural, levando-se em consideração, os distintos parâmetros funcionais dos sensores e da geometria de aquisição dos dados (polarização, resolução, ângulos de azimute e de incidência e sentido de visada). A pesquisa buscou também, fornecer subsídios aos modelos geológicos conhecidos da área teste e à avaliação da performance do futuro imageamento pelo RADARSAT. A área de estudo, com o mais importante depósito de cobre do país, está localizada na borda noroeste da Província Mineral de Carajás na continuidade do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, de suposta idade arqueana. Os resultados da pesquisa mostraram que os mais importantes parâmetros de radar foram ângulos de incidência, de azimute e sentido da visada. Os dados de radar do SAREX mostraram-se valiosos no mapeamento geológico na escala de semi-detalhe. Os dados ERS-1 exibiram distorções relativas a efeitos de "layover" e "foreshortening" nas áreas de relevo acentuado. Contudo, informações geológicas significativas puderam ser obtidas com estes dados, para as áreas de relevo arrasado. As técnicas de realce digitais mostraram-se valiosas na extração de informações com significado geológico, para os dois conjuntos de dados SAR avaliados.



**EVALUATION OF THE RADAR (SAR) DATA OBTAINED FROM THE PROJECT SAREX 92 AND ERS-1 FOR GEOLOGICAL MAPPING IN THE SALOBO REGION, CARAJÁS MINERAL PROVINCE**

**ABSTRACT**

This work has focussed on the evaluation of airborne (SAREX'92) and orbital (ERS-1) SAR data in the geological mapping of the Salobo area, Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon Region). The main objectives of the investigation have encompassed visual and digital analysis of the SAR data in the lithological discrimination and structural mapping taking into account distinct sensor parameters and acquisition data geometry (polarization, resolution, incidence and azimuth angles and look direction). The research has also aimed at providing insights for the geological knowledge of the Salobo area and for the RADARSAT evaluation in this "difficult" tropical rain forest environment. The test-site is inserted in the Itacaiúnas Belt, a wide shear zone with probable Archean age and copper deposits, located in the northwest border of the Carajás Mineral Province. The results have shown that the most important radar parameters were incidence and azimuth angles and look direction. Airborne radar data from SAREX proved to be a valious tool for geological mapping at a semi-detailed scale. ERS-1 data has presented distortion problems related to "layover" and "foreshortening" affects in the high relief area. However, geological information could be extracted in the low relief regions. Digital enhancement techniques proved to be important in the extraction of information with geological meaning from both SAR dataset.



## SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
LISTA DE FIGURAS .....	xix
LISTA DE TABELAS.....	xxiv
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - Objetivo Geral.....	1
1.2 - Objetivos Específicos.....	2
<b>CAPÍTULO 2 - ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>3</b>
2.1 - Localização e Acesso.....	3
2.2 - Características Fisiográficas.....	4
2.3 - Arcabouço Geológico da Província Mineral de Carajás.....	5
2.4 - Unidades Litológicas e Caracteres Morfológicos do Duplex Salobo-Mirim.....	7
2.5 - Geologia Estrutural do Duplex Salobo-Mirim.....	12
<b>CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTOS DO IMAGEAMENTO POR RADAR.....</b>	<b>15</b>
3.1 - Introdução.....	15
3.2 - O Espectro Eletromagnético.....	15
3.3 - Interações Microondas/Superfícies e a Equação Radar.....	17
3.4 - Sistema de Radar.....	19
3.4.1 - RAR (Radar de Abertura Real).....	20
3.4.2 - SAR (Radar de Abertura Sintética).....	20
3.5 - Parâmetros do Sistema Radar.....	21
3.5.1 - Comprimento de Onda.....	21
3.5.2 - Polarização.....	22
3.5.3 - Calibração.....	22

3.5.3.1 - Calibração Radiométrica.....	22
3.5.3.2 - Calibração Geométrica.....	23
3.5.4 - Geometria do Imageamento por Radar.....	23
3.5.4.1 - Ângulo de Incidência.....	25
3.5.4.2 - Ângulo de Depressão.....	27
3.5.4.3 - Ângulo Azimutal.....	27
3.5.4.4 - Sentido de Visada.....	27
3.5.4.5 - Resolução.....	27
3.5.4.6 - Faixa de Recobrimento.....	28
3.6 - Parâmetros do Alvo.....	31
<b>CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS SENSORES UTILIZADOS NA INVESTIGAÇÃO.....</b>	<b>33</b>
4.1 - Sistema Convair SAR 580.....	33
4.1.1 - Aquisição de Dados.....	34
4.2 - ERS-1 SAR.....	38
4.2.1 - Aquisição de Dados.....	40
4.3 - Material de Análise Digital.....	41
4.3.1 - Sistema de Processamento de Imagens "PCI".....	41
4.3.2 - O "Software" SGI-INPE.....	42
<b>CAPÍTULO 5 - ABORDAGEM METODOLÓGICA DA INVESTIGAÇÃO.....</b>	<b>43</b>
5.1 - Introdução.....	43
5.1.1 - Produto CV 580 (SAREX).....	43
5.1.2 - Produto ERS-1.....	44
5.2 - Análise Visual.....	44
5.2.1 - Método de Fotointerpretação Lógico-Sistemático.....	46
5.3 - Análise Digital.....	49
5.3.1 - Introdução.....	49
5.3.2 - Pré Processamento dos Dados Digitais.....	50

5.3.2.1 - Correções Radiométricas.....	51
5.3.2.2 - Correções Geométricas.....	54
5.3.3 - Técnicas de Realce de Imagens.....	55
5.3.3.1 - Realce de Contraste.....	56
5.3.3.2 - Filtragens.....	57
5.3.3.3 - Operações Aritméticas.....	58
5.3.3.4 - Composições Coloridas das Imagens.....	58
<b>CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>59</b>
6.1 - Análise Visual dos Dados SAR CV 580.....	59
6.1.1 - Discriminação de Aspectos Gerais.....	59
6.1.2 - Discriminação Litológica.....	63
6.1.3 - Discriminação de Estruturas.....	69
6.2 - Análise Visual dos Dados do SAR ERS-1.....	70
6.2.1 - Discriminação de Aspectos Gerais.....	71
6.2.2 - Discriminação Litológica.....	73
6.2.3 - Discriminação de Estruturas.....	77
6.3 - Análise Digital das Imagens SAREX e ERS-1.....	79
6.3.1 - Introdução.....	79
6.3.2 - Pré Processamento de Calibração.....	79
6.3.3 - Processamentos de Imagens.....	81
6.3.3.1 - Introdução.....	82
6.3.3.2 - Realce de Contraste.....	82
6.3.3.3 - Filtragens.....	86
6.3.3.4 - Operações Aritméticas.....	88
6.4 - Avaliação da Influência dos Parâmetros Funcionais e de Visada dos Radares CV 580 e ERS-1 na Extração de Informações de Significado Geológico.....	94
6.4.1 - Introdução.....	94
6.4.2 - Parâmetros Funcionais.....	94
6.4.2.1 - Comprimento de Onda (Frequência).....	94

6.4.2.2 - Polarização.....	95
6.4.3 - Parâmetros de Visada.....	97
6.4.3.1 - Ângulo de Incidência.....	97
6.4.3.2 - Direção de Visada.....	100
6.4.3.3 - Resolução.....	105
6.4.4 - Parâmetros do Alvo.....	108
<b>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>109</b>
7.1 - Análise Visual de Produtos Fotográficos.....	109
7.2 - Análise Digital dos Dados SAR.....	110
7.3 - Avaliação dos Parâmetros Funcionais e de Visada.....	111
7.4 - Importância dos Parâmetros do Alvo.....	112
7.5 - Avaliação do Possível Desempenho do RADARSAT.....	112
7.6 - Contribuição ao Conhecimento Geológico na Área de Salobo.....	113
7.7 - Recomendações.....	113
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>115</b>

**APÊNDICE A - MAPA FOTOGEOLÓGICO DA ÁREA DE SALOBO (CARAJÁS)**

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
2.1 - Localização e acessos da área de estudo.....	3
2.2 - Perfil esquemático das Associações Geobotânicas para a região do Pojuca.....	5
2.3 - Mapa de Distribuição de Unidades Geológicas - Província Mineral de Carajás.....	8
2.4 - Mapa Lito estrutural do Duplex direcional Salobo-Mirim.e esquematização das zonas de cisalhamento formadoras deste Duplex : 1- zona de cisalhamento curvilínea; 2 - zona de cisalhamento retilínea; 3 - zona de cisalhamento secundária e 4 - zonas de cisalhamento transcorrentes tardias (4 <sub>1</sub> - direção NW-SE, 4 <sub>2</sub> - direção NNE-SSW, 4 <sub>3</sub> - direção NE-SW).....	9
3.1 - Espectro eletromagnético mostrando as janelas de transmissão atmosférica e a disposição das principais frequências utilizadas em RADAR.....	16
3.2 - Interação onda eletromagnética com superfície plana: Reflexão e Refração (a); Interação onda eletromagnética com superfície rugosa (b).....	17
3.3 - Configuração básica de um RADAR imageador.....	19
3.4 - Esquematização da interação de frequências disponíveis em sistemas RADAR com os estratos da cobertura vegetal. Banda X (3 cm), Banda C (6 cm) e Banda L (23 cm).....	22
3.5 - Geometria de imagem radar.....	24
3.6 - Elementos de visada do imageamento RADAR.....	25
3.7 - Típicas curvas de retroespalhamento das superfícies de acordo com o ângulo incidente.....	26
3.8 - "Foreshortening" (encurtamento de rampa).....	29
3.9 - Ilustração dos efeitos de "Shadowing" e "Layover": (A) entre os tempos 1 e 2, imagem obtida normal; (B) entre os tempos 2 e 3, o topo do platô e a área próxima a base do penhasco são sobrepostas caracterizando o "Layover"; (C) entre os tempos 4 e 5, caracteriza-se o "Shadowing", onde nenhum reflexo é obtido, pois o ângulo de declividade voltado ao radar é maior que o ângulo de depressão do feixe de microondas.....	30
4.1 - Modos de operação do SAR CV 580.....	33
4.2 - Áreas imageadas em Carajás e Tucuruí durante o Projeto SAREX'92 (A). Órbitas ERS-1 ascendente (B) e descendente (C).....	36
4.3 - Modo amplo SAREX.....	37
4.4 - Modo nadir SAREX.....	37

4.5 - Modo estreito SAREX.....	38
4.6 - ERS-1.....	39
4.7 - Modo SAR ERS-1.....	41
5.1 - Exemplo modo estreito SAREX.....	52
5.2a - Gráfico de potência da antena SAREX Banda C - largura de elevação da antena direcional (janela de transmissão) - 28° .....	53
5.2b - Exemplo modo estreito SAREX.....	53
6.1 - Típico padrão de elementos texturais de drenagem orientados segundo direções N60°W e N30°E na área Salobo-Pojuca - faixa BRA2.5 HH, escala aproximada 1: 50.000.....	60
6.2 - Ilustração de atributos gerais mapeáveis na faixa BRA2.2, escala aproximada 1: 50.000: 1- foz do rio Cinzento junto ao rio Itacaiúnas; 2- pista de pouso e 3- diferença na tonalidade e textura marcando a ocorrência da vegetação tipo G associada a aluviões, em contato com vegetação da classe F associada ao substrato rochoso do Complexo Xingu.....	61
6.3 - Visualização dos trechos desflorestados na faixa BRA2.2 HH; notar textura lisa e os contatos regulares que os limitam. Escala aproximada 1; 50.000.....	62
6.4 - Diferenças texturais, estruturais e de tonalidade entre as associações Xingu (E1) e Xingu (E2), na faixa BRA2.2 HH; escala 1: 50.000.....	64
6.5 - Distribuição de algumas das litologias discriminadas na área do Duplex Salobo-Mirim: C1- clorita xistos e metavulcânicas; C2 - xistos com formações ferríferas bandadas subordinadas; C31- formação ferrífera bandada; C4- clorita quartzo xisto; C5- quartzitos e E2- Associação Xingu (paragnaisses e anfíbolitos); no produto da faixa BRA2.2 HH; área Salobo, escala 1: 50.000.....	65
6.6 - Ocorrência do Grupo Rio Fresco no produto BRA2.2 HH com a delimitação das unidades faciológicas: G <sub>1</sub> - metarenitos; G <sub>2</sub> - metasiltitos; G <sub>3</sub> - metarenitos e metargilitos e G <sub>4</sub> - metassedimentos diversos intercalados, escala 1: 50.000.....	67
6.7 - Mapa Fotogeológico da Área Salobo (ERS-1).....	71
6.8 - Ilustração do produto ERS-1 quanto a extração de elementos texturais de drenagem: 1- leito do rio itacaiúnas na região da falha de Carajás; 2- efeitos combinados de "layover" e "foreshortening" prejudicando a visualização de tributários nas áreas de alto relevo e 3- aspectos das drenagens em trechos de relevo arrasado (unidades E <sub>1</sub> e E <sub>2</sub> ), escala 1: 100.000.....	72
6.9 - Ilustração demonstrando o prejuízo causado pelo ruído "speckle" na extração de feições dos acessos terrestres (1) e áreas desflorestadas (2), escala 1: 100.000.....	73
6.10 - Ilustração da área centrada em Salobo; notar o efeito "layover" e "foreshortening", e a impossibilidade de se discriminar as unidades C <sub>2</sub> , C <sub>3</sub> e C <sub>5</sub> , separadas nos produtos SAREX conforme mostrado na Figura 6.5. Escala aproximada 1: 100.000.....	75

6.11 - Diagrama em roseta de frequência absoluta para elementos estruturais do produto imagem SAR ERS-1.....	77
6.12 - Mostrando no exemplo da faixa BRA2.4 HH os efeitos da calibração implementada por fatores de correção do CCRS, escala aproximada 1: 200.000: (A) visualização dos dados brutos e histogramas da média de intensidade nas colunas; (B) visualização do dado calibrado e histograma da média de intensidade nas colunas.....	80
6.13 - Ilustração do exemplo da faixa BRA2.4 HH para os efeitos da correção por média móvel sobre os dados calibrados por fatores de correção do CCRS, escala aproximada 1: 200.000: (A) visualização do dado calibrado por fatores CCRS e histograma da média de intensidade nas colunas; (B) visualização do dado corrigido por média móvel e histograma da média de intensidade nas colunas.....	81
6.14 - Histogramas da imagem BRA2.2 HH, mostrando à esquerda os valores para o dado calibrado e à direita os valores da mesma imagem com ampliação não linear de contraste (método Driemann).....	83
6.15 - Histogramas de imagem BRA2.2 VV mostrando à esquerda os valores para o dado calibrado e a direita os valores da mesma imagem com ampliação linear de contraste.....	83
6.16 - Composição colorida de dados SAR, BRA2.2: canal 1 (vermelho) pol. HH com ampliação linear de contraste; canal 2 (verde) pol. VV com ampliação linear de contraste e canal 3 (azul) pol. HH com ampliação não linear de Drieman, escala aproximada 1: 20.000.....	84
6.17 - Composição colorida de dados SAR, BRA2.2: canal 1 (vermelho) pol. VV com equalização de histograma; canal 2 (verde) pol. VV com ampliação linear de contraste e canal 3 (azul) pol. HH com ampliação não linear de Drieman, escala aproximada 1:20.000.....	85
6.18 - Foto demonstrando a contribuição do uso do filtro adaptativo de Frost em imagens digitais de radar orbital ERS-1. A esquerda encontra-se o dado com aumento linear de contraste e a direita o mesmo dado com aplicação da filtragem 5X5, escala aproximada 1: 200.000.....	87
6.19 - Composição colorida dos dados ERS-1 filtrados; filtro Frost no canal vermelho, filtro Lee no canal verde e dado bruto no canal azul. Note a discriminação das unidades E <sub>1</sub> - Associação Xingu/1, E <sub>2</sub> - Associação Xingu/2 e A <sub>1</sub> - Depósitos aluvionares e correlatos, escala aproximada 1:200.000.....	88
6.20 - Histograma da operação de divisão do canal de polarização horizontal pelo canal de polarização vertical da imagem BRA2.2.....	89
6.21 - Histograma da operação de subtração do canal de polarização horizontal pelo canal de polarização vertical (imagem BRA2.2).....	89
6.22 - Composição colorida com canal gerado por operação aritmética. Canal vermelho BRA22 VV, Canal verde BRA22 HH e Canal azul HH-VV com ampliação de contraste não linear (Driemann), escala aproximada 1:200.000.....	90

6.23 - Área sobre Salobo obtida da imagem BRA2.4 HH escala aproximada 1: 50.000.....	91
6.24 - Área sobre Salobo obtida da imagem BRA2.5 HH, escala aproximada 1: 50.000.....	91
6.25 - Produto obtido da subtração entre as imagens BRA2.5 HH e BRA2.4 HH sobre área comum em Salobo, escala aproximada 1: 50.000.....	92
6.26 - Composição SAR colorida com visadas distintas sobre Salobo. Canal vermelho = subtração das imagens BRA2.5 HH e BRA2.4 HH; canal verde = imagem BRA2.5 HH e canal azul = imagem BRA2.4 HH. Escala aproximada 1: 50.000.....	93
6.27 - Composição SAR colorida com visadas distintas sobre Salobo. Canal vermelho = BRA2.4 HH; canal verde = imagem BRA2.5 HH e canal azul = subtração das imagens BRA2.5 HH e BRA2.4 HH. Escala aproximada 1: 50.000.....	93
6.28 - Histogramas mostrando a diferença de intensidade no retroespalhamento de radar para as polarizações: (a) polarização horizontal HH e (b) polarização vertical VV; faixa BRA2.2, do modo estreito (dado bruto corrigido for fatores de calibração CCRS).....	96
6.29 - Ilustração da diferença quanto ao retroespalhamento de radar para dupla polarização: (a) polarização vertical e (b) polarização horizontal; faixa BRA2.2, do modo estreito (dado bruto corrigido por fatores de calibração CCRS). Escala aproximada 1: 200.000.....	96
6.30 - Diagrama de Lung ilustrando a influência do efeito ângulo de incidência no coeficiente de retroespalhamento radar.....	97
6.31 - Ilustração da zona de cisalhamento curvilínea a norte de Salobo (Siqueira, 1990) vista sob o ângulo de incidência médio de 54° ("near range") na faixa BRA2.3 do Projeto SAREX. Escala aproximada 1: 50.000.....	99
6.32 - Ilustração da mesma área da Figura anterior sob ângulo de incidência médio de 73° ("far range") na faixa BRA2.4. Ressalta-se que em ambas faixas de recobrimento a direção de visada é N78°E. Escala aproximada 1: 50.000.....	100
6.33 - Ilustração mostrando na região Pojuca, alinhamento de relevo com direção geral N65°W (metasedimentos e metavulcânicas do Grupo Pojuca), visto sob a direção de visada da faixa BRA2.2 do modo estreito, correspondente a S40°W, ou seja sub ortogonal ao "trend" estrutural. Notar a clareza dos contatos e discriminação de estruturas. Escala aproximada 1:50.000.....	101
6.34 - Foto da mesma área da Figura anterior sob visada da faixa BRA2.4 modo nadir, ou seja N78°E. Atente a menor clareza das zonas marcadas por quebras negativas (contato). Escala aproximada 1: 50.000.....	102

6.35 - Ilustração da mesma região das fotos acima vista sob as características da faixa BRA2.5 do modo nadir, a qual apresenta direção de visada N78°W, sub paralela ao "trend" estrutural. Observa-se que a colina no centro da Figura passa ter contatos de difícil definição, assim como tornam-se praticamente invisíveis os alinhamentos de serras compostas por lentes de formação ferrífera bandada e rocha quartzítica pertencentes ao Grupo Pojuca. Escala aproximada 1: 50.000.....	103
6.36 - Diagrama de roseta representando a frequência absoluta de traços estruturais para a faixa de imageamento BRA2.2. Ângulo de visada S40°W.....	104
6.37 - Diagrama de roseta representando a frequência absoluta de traços estruturais nas faixas de imageamento BRA2.5 (N78°W) e BRA2.4 (N78°E)....	104
6.38 - Foto mostrando a performance da altíssima resolução SAR CV 580 (6X6 m) na mina de cobre Salobo - faixa BRA2.5 VV. Notar os pontos: 1- acampamento Salobo e 2- represamento do rio Salobo. Escala aproximada 1:50.000.....	106
6.39 - Foto mostrando o mesmo local acima sob resolução do SAR orbital ERS-1(25x25 m). Notar os mesmos pontos indicados. Escala aproximada 1:100.000.....	107



## LISTA DE TABELAS

	Pág.
4.1 - Especificações Técnicas do SAR CV 580.....	35
4.2 - Sistema Radar de Abertura Sintética ERS-1.....	40
5.1 - Pré Processamento Digital do Produto ERS-1 (segundo especificações do DGI/INPE).....	50
5.2 - Processamentos em Tempo Real SAR CV 580.....	50
6.1 - Complexo Xingu - Arqueano.....	63
6.2 - Grupo Salobo - Arqueano.....	65
6.3 - Grupo Pojuca - Arqueano.....	66
6.4 - Grupo Rio Fresco - Proterozóico.....	67
6.5 - Granito Carajás - Proterozóico Médio.....	68
6.6 - Coberturas Lateríticas Terciárias.....	68
6.7 - Coberturas Quaternárias.....	69
6.8 - Sistemas de Lineamentos Extraídos do Produto da Faixa BRA2.2.....	69
6.9 - Sistemas de Lineamentos Extraídos do Produto do SAR ERS-1.....	77



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A região Amazônica apresenta um grande potencial econômico, em especial no que se refere a recursos minerais. Entretanto, uma grande parcela deste território permanece ainda pouco conhecida devido principalmente à falta de acessos.

Conceitualmente, sabe-se que um dos objetivos básicos do sensoriamento remoto é prover dados de áreas inacessíveis com finalidade de se adquirir informações a um custo mais baixo.

No entanto, para a Amazônia, típico ambiente de floresta tropical úmida, a utilização de dados de sensores remotos, sempre tem sido problemática, particularmente os do espectro óptico (visível/infravermelho), devido principalmente ao fato da região permanecer comumente sob intensa e constante cobertura de nuvens.

Contudo, com o advento do imageamento por radar, a exploração da região espectral de microondas para estudos de recursos naturais, em áreas semelhantes à Amazônia, tem tido significativo impulso devido a capacidade do sensor radar imagear, sob qualquer condição meteorológica, independentemente de fonte iluminadora externa.

Outra razão, marca a utilidade do radar; o fato de que a informação disponível na região de microondas é diferente daquela encontrada nas regiões do visível/infravermelho, já que a resposta registrada para estes sensores advém das interações energia/matéria via transições eletrônicas e vibrações moleculares nas camadas superficiais do alvo, enquanto que, no intervalo de microondas, a interação é função das propriedades geométricas e dielétricas dos alvos estudados (Ulaby et al. 1982; Elachi, 1988).

Estas características atribuem ao sensor ativo de microondas - RADAR - grande sensibilidade quanto ao efeito topográfico, rugosidade superficial e umidade contida na superfície imageada. Estes fatores são importantes para estudos geológicos e geomorfológicos de uma região, pois possibilitam a caracterização do arcabouço topográfico e conseqüentemente a visualização de geo-estruturas e a discriminação de unidades litológicas.

#### 1.1 - OBJETIVO GERAL

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho; quanto ao mapeamento geológico, de diferentes dados de radar, obtidos a nível de aeronave durante o projeto SAREX ("South American Radar Experiment"), e a nível orbital através do ERS-1 ("Earth Remote Sensing Satellite-1"), sobre a Província Mineral de Carajás.

Deve ser salientado que a área teste, dentro da Província Carajás, tem seu centro na jazida cuprífera Salobo sendo escolhida, devido a sua importância geológica, facilidades de acesso e o volume atualizado de dados de campo disponíveis.

## 1.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos desta dissertação apresentar os resultados da análise visual dos produtos fotográficos gerados pelos recobrimentos dos sensores acima citados, assim como analisar digitalmente estes dados, avaliando os processamentos quanto a melhora na extração de dados geológicos.

Neste contexto são avaliados os parâmetros funcionais e de visada dos sensores radar, assim como, será estudada a importância dos parâmetros do alvo sob denso recobrimento de floresta tropical úmida.

Subordinadamente será avaliado o possível desempenho do RADARSAT (Satélite SAR Canadense), para mapeamento geológico em áreas similares à região teste.

Finalmente com base na interpretação fotogeológica dos produtos radar procurar-se a contribuir para o conhecimento geológico da área de estudo.

Desta forma, serão focalizadas no Capítulo 2, as principais características da área de estudo, enquanto que, os fundamentos do imageamento de radar estarão expostos no Capítulo 3. No Capítulo seguinte serão caracterizados os diferentes produtos abordados.

No Capítulo 5 estarão enfocadas as abordagens metodológicas das análises visual e digital das imagens disponíveis.

No Capítulo 6 serão abordados os resultados da análise visual quanto à discriminação de unidades litoestruturais. Também serão discutidos os resultados da análise digital e a avaliação dos parâmetros funcionais e de visada dos sensores estudados.

Finalmente, no Capítulo 7 serão expostas as conclusões relativas à extração de informações geológicas da área de estudo, levando-se em conta: (1) avaliação da análise visual comparativa entre os diversos produtos abordados; (2) a performance das técnicas de realce digital, e (3) a contribuição ao conhecimento geológico da área de estudo. Em adição, serão feitas recomendações visando a continuidade do trabalho com dados de sensores radar.



## 2.2 - CARACTERÍSTICAS FISIográficas

Geomorfologicamente a região como um todo encontra-se no Planalto Dissecado do sul do Pará, caracterizado por maciços residuais de topo aplainado, conjuntos de cristas e picos interpenetrados por faixas de terrenos rebaixados. As altitudes variam geralmente de 250 a 700 m. Estas feições estão deformadas por uma elevada densidade de vales encaixados e extensas escarpas adaptadas às falhas regionais (Projeto RADAMBRASIL, 1974).

Regionalmente a área é drenada pelo rio Itacaiúnas e por sua rede de afluentes dos quais destacam-se os rios Cinzento e Salobo.

O clima da área enquadra-se como pertencente a região climática quente, caracterizada por possuir altas temperaturas nas partes baixas e clima mesotérmico nas áreas serranas, onde as temperaturas são suavizadas pela altitude. A temperatura média oscila entre 19<sup>o</sup> e 31<sup>o</sup> C, com um período seco no inverno, de maio a outubro e um período úmido, bastante acentuado, com chuvas torrenciais no verão que vai de novembro a abril (Projeto RADAMBRASIL op. cit.).

Quanto à vegetação, dados do Projeto RADAMBRASIL (op. cit.), indicam enquadramento da área na região ecológica das florestas densas, o que significa floresta tropical chuvosa, de clima quente e úmido a superúmido; caracterizada por árvores de até 50 metros de altura que se sobressaem em relação ao estrato arbóreo uniforme. Paradella et al., (1994), indicam para a área de Pojuca à aproximadamente 60 Km à sudeste da área teste uma divisão mais completa de classes geobotânicas, as quais podem ser extrapoladas para área de Salobo, conforme segue, (Figura 2.2):

- a - Floresta tropical de relevo montanhoso com cobertura uniforme, nas ocorrências de coberturas lateríticas.
- b - Floresta tropical de relevo montanhoso com cobertura emergente, nas áreas da Formação Rio Fresco.
- c - Floresta aberta mista com marcada estratificação caracterizada por elementos emergentes (35m de altura), associada com gnaisses do Complexo Xingu em suas frações mais arrasadas e em restritos locais de ocorrência da Formação Rio Fresco.
- f - Floresta aberta latifoliada de relevo acidentado com predomínio de cipóais, nos domínios do Complexo Xingu, e
- g - Floresta aberta mista com dossel irregular e predomínio de palmeiras, nas áreas aluvionares;

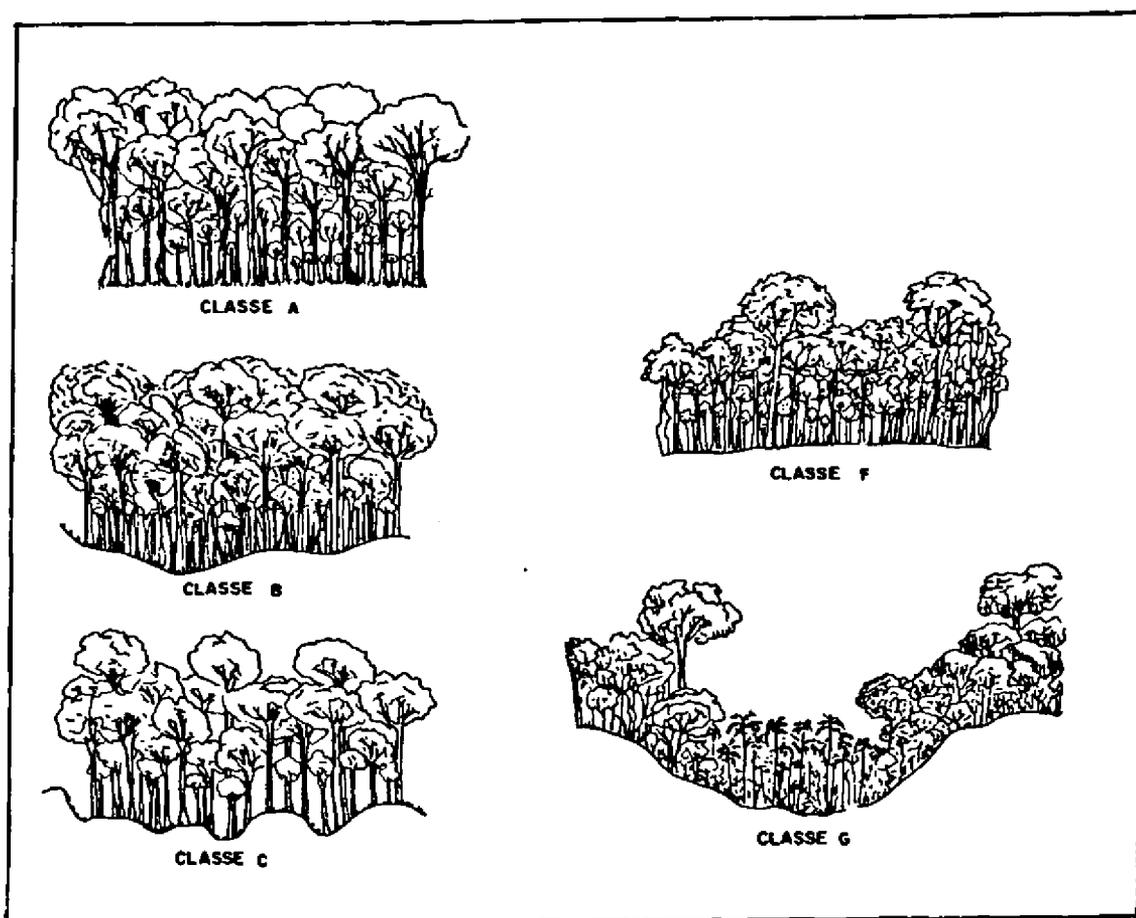


Fig. 2.2 - Perfil esquemático das Associações Geobotânicas para a região do Pojuca.

FONTE: Paradella et al., 1994.

### 2.3 - ARCABOUÇO GEOLÓGICO DA PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

Localizada no extremo ESE do Cráton Amazônico (Almeida, 1978), reconhece-se na Província Mineral de Carajás (Hirata et al. 1982), um núcleo granito-"greenstone", envolto por cinturões de gnaisses migmatizados, com granitóides e faixas de rochas supracrustais associadas, fortemente linearizadas. O conjunto destas unidades encontra-se localmente; encoberto por rochas sedimentares e vulcânicas, genericamente denominadas coberturas do Cráton Amazônico; e cortadas por granitos anorogênicos do Proterozóico Médio (Figura 2.3).

No domínio do núcleo granito-"greenstone", são individualizadas faixas de rochas supracrustais orientadas nas direções EW, NE-SW e NW-SE, contornando corpos de granitóides. Tais rochas supracrustais correspondem essencialmente à vulcânicas máficas e ultramáficas, além de restritos riolitos, dacitos e metassedimentos transformados em condições de fácies xisto verde. Esses conjuntos rochosos foram reunidos no Supergrupo Andorinhas (DOCEGEO, 1988).

As informações estruturais do Supergrupo Andorinhas descrevem zonas de cisalhamento oblíquas com caráter de cavalgamento, interpretadas por Souza et al. (1988), como produtos de transpressão, responsáveis pelo desenvolvimento de uma estrutura em flor

positiva. Os poucos dados geocronológicos para a citada área atestam idades dos processos termotectônicos para o final do Arqueano, conforme Dall'Agnoli et al. (1986).

O Cinturão que limita o núcleo granito-"greenstone" ao norte, denominado de Itacaiúnas por Hasui et al. (1984), engloba gnaisses tonalíticos e granodioríticos correlacionáveis ao Complexo Xingu, granulitos máficos e enderbitos atribuídos ao Complexo Pium, granitóides da Suite Plaquê e faixas de rochas supracrustais dos Grupos Sapucaia e Grão Pará de Araujo et al. (1988), e dos Supergrupos Andorinhas e Itacaiúnas da DOCEGEO (1988).

No Mapa de Distribuição de Unidades apresentado pela DOCEGEO (op. cit.), e baseado na caracterização de termos petrográficos em escala regional, o Supergrupo Itacaiúnas engloba os Grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Grão Pará, Igarapé Bahia e Buritirama, da base para o topo.

No geral, as unidades gnáissicas dos Complexos Pium e Xingu são caracterizadas por assembléias mineralógicas de fácies anfíbolito e granulito, e as unidades de rochas supracrustais do Supergrupo Itacaiúnas por assembléias de fácies xisto verde e localmente anfíbolito.

Com relação às estruturas impressas nos diferentes conjuntos rochosos supracitados, tem-se que a geometria do Cinturão inclui sistemas de cavalgamentos imbricados e sistemas transcorrentes sinistrais formados por zonas de cisalhamento dúctil, segundo Araujo et al. (1988).

Os dados geocronológicos disponíveis em Renne et al. (1988), indicam evolução Arqueana para o Cinturão Itacaiúnas, estando desta forma em desacordo com dados de Cordani e Neves (1982), que defendem a evolução do Cinturão no evento termo-tectônico Transamazônico.

Em termos de modelos geotectônicos para a região, destacam-se aqueles apresentados por Cordani e Neves (op. cit.) e Hasui et al. (1984). Os primeiros sugerem a existência de um núcleo Arqueano, envolvido por Cinturões Móveis (Maroni-Itacaiúnas, Rio Negro-Juruena e Rondoniano), instalados durante a atuação dos ciclos Transamazônico e Uruaçuano no Proterozóico Inferior-Médio.

Hasui et al. (1984), baseado em dados geológicos e geofísicos, individualizaram no embasamento do Cráton Amazônico vários lineamentos, aos quais se associam faixas de rochas granulíticas linearizadas, que limitam blocos crustais onde encontram-se terrenos granito-"greenstone". Essa organização antiga teria sido afetada por um evento distensivo citado em Siqueira e Costa (1991), que na região de Carajás foi responsável pela instalação da bacia preenchida por rochas vulcânicas englobadas no Grupo Uatumã, sedimentos clásticos atribuídos à Formação Rio Fresco e granitos associados.

As estruturas deste conjunto seriam representadas por falhas normais, orientadas segundo direção NW-SE e falhas transcorrentes NE-SW.

Na folha Serra de Carajás (DNPM/CPRM, 1991), os autores demonstraram que as unidades litológicas desenham um padrão lenticularizado, relacionado a um sistema imbricado de zonas de cisalhamento com caráter de cavalgamento oblíquo, que passa a um sistema transcorrente caracterizado por uma estrutura em flor positiva. Tais estruturas teriam sido produzidas a partir de um transporte de massas rochosas de SW para NE.

Ao norte da Serra de Carajás, Siqueira e Costa (1991), caracterizaram o Sistema Transcorrente Cinzento e demonstraram a existência de estruturas tipo duplex e rabo de cavalo ao longo de sua direção. A história cinemática deste Sistema envolveu transtensão seguida de transpressão e transtensão final em seu extremo oeste. As bacias, que se

instalaram ao longo do referido Sistema Transcorrente foram preenchidas por unidades vulcano-sedimentares (xistos máficos, formações ferríferas bandadas, quartzitos e gnaisses).

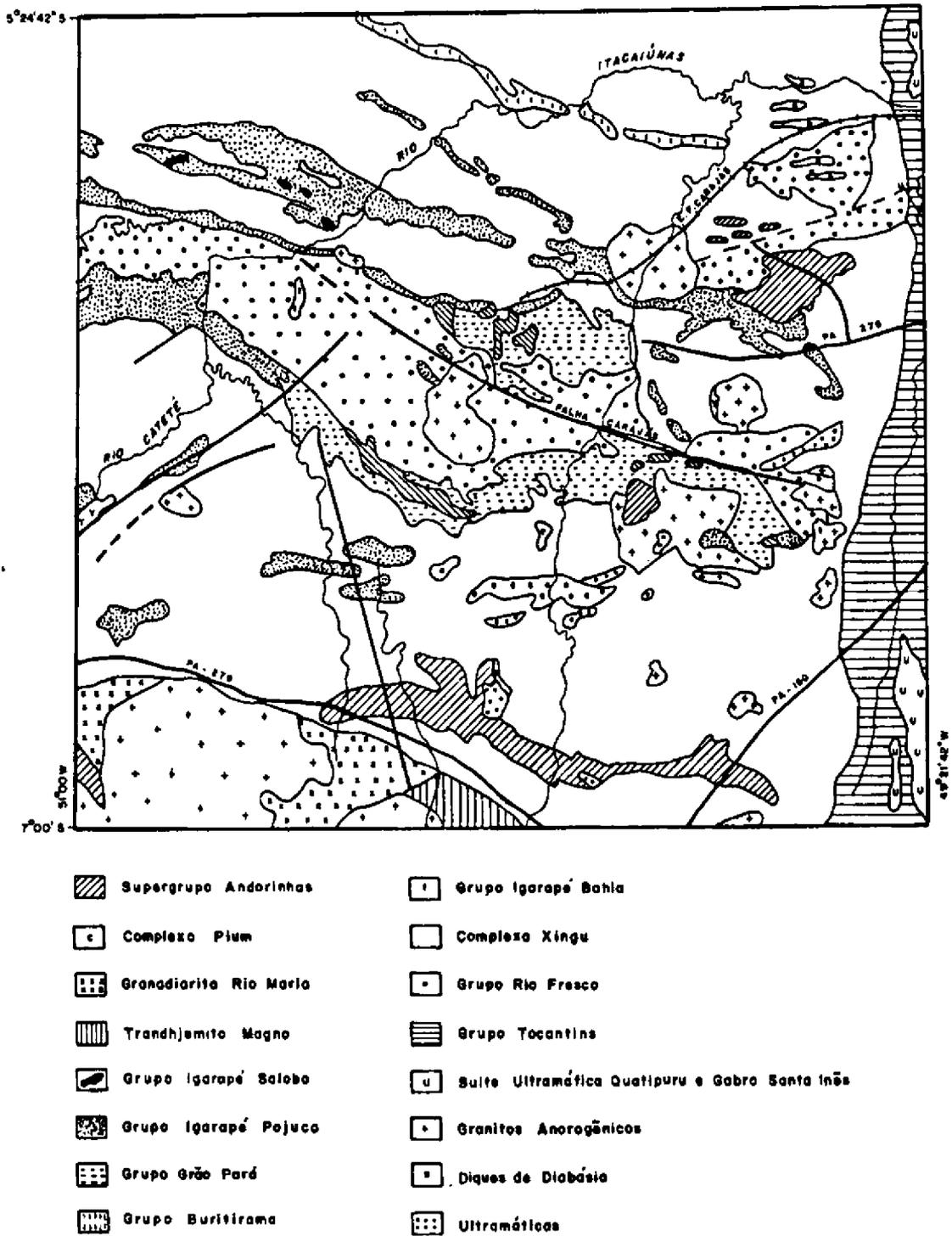
Os produtos litológicos do Fanerozóico na Província Mineral de Carajás restringem-se às coberturas Quaternárias, ligadas à instalação do sistema atual de drenagem, e às coberturas Terciárias, que compõem as superfícies lateríticas tabulares da região da Serra de Carajás conforme citado em DOCEGEO (1988).

#### **2.4 - UNIDADES LITOLÓGICAS E CARACTERES MORFOLÓGICOS DO DUPLEX SALOBO MIRIM**

A região do Salobo, a qual constitui pauta desta dissertação, corresponde a um Duplex assimétrico na extremidade oeste do Sistema Transcorrente Cinzento denominado Duplex Salobo-Mirim conforme Siqueira (1990).

O referido Duplex é formado por faixas e lentes de gnaisses e rochas supracrustais diversas, orientadas preferencialmente na direção WNW-ESE, conforme ilustra a Figura 2.4. O padrão de distribuição das unidades rochosas é decorrente da deformação não coaxial dominante, a qual impôs forte transposição e conseqüentemente, a imbricação generalizada dos corpos geológicos.

As relações estratigráficas entre os diversos tipos petrográficos são de difícil restauração dado que as regiões de contato são marcadas pela presença de rochas com alto grau de milonitização, conforme admitem Siqueira e Costa (1991). Considerando tais aspectos, são apresentados neste item dados mineralógicos, texturais e morfológicos, sendo que as rochas gnáissicas são atribuídas ao Complexo Xingu e as rochas supracrustais fazem parte do Grupo Salobo (DOCEGEO, 1988); além disso são mapeáveis intrusivas ácidas correlatas ao Granito Carajás e intrusivas básicas.



Fonte: DOCEGEO (1988)

Fig. 2.3 - Mapa de Distribuição de Unidades Geológicas - Província Mineral de Carajás

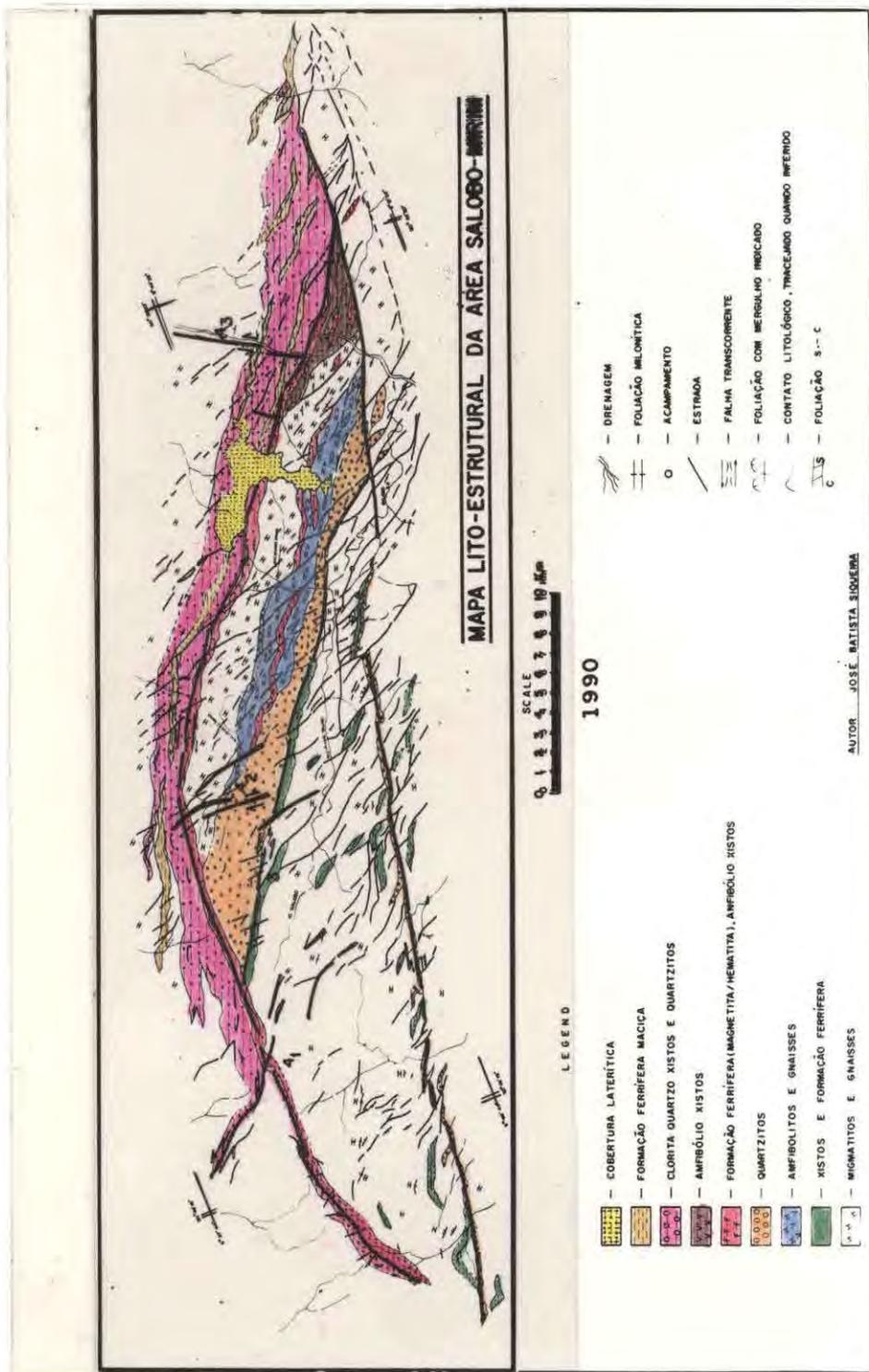


Fig. 2.4 - Mapa Lito estrutural do Duplex direcional Salobo-Mirim, e esquematização das zonas de cisalhamento formadoras deste Duplex: 1- zona de cisalhamento curvilínea; 2- zona de cisalhamento retilínea; 3- zona de cisalhamento secundária e 4- zonas de cisalhamento transcorrentes tardias (4<sub>1</sub> - direção NW-SE, 4<sub>2</sub> - direção NNE-SSW, 4<sub>3</sub> - direção NE-SW).

FONTE: Siqueira (1990).

## 1) Complexo Xingu

As rochas gnáissicas têm ampla distribuição na área estudada, ocupando as regiões imediatamente a norte e a sul das faixas de rochas supracrustais. Uma faixa regular de gnaisses também pode ser seguida na direção N70°E em meio ao domínio do Grupo Salobo de acordo com Siqueira e Costa (op. cit.).

As unidades rochosas do Complexo Xingu caracterizam-se pelo relevo pouco movimentado e grau de dissecação médio a alto. Ocupam áreas morfologicamente arrasadas, com morrotes baixos de topos convexos que em geral assumem formas de meia-laranjas, em menor proporção são encontrados morrotes de topos planos (Siqueira, 1990).

Algumas vertentes são ravinadas e com acumulações de colúvios. Os vales são do tipo abertos com fundos chatos em forma de U, e em função do gradiente topográfico relativamente baixo (< 10%), as drenagens da área, em busca do curso do rio Itacaiúnas, são sinuosas e meandranes (Siqueira op. cit.).

Neste contexto, os principais termos petrográficos caracterizados são: gnaisses granodioríticos, graníticos, dioríticos e tonalíticos, mais ou menos migmatizados, metassedimentos e anfíbolitos. Estas rochas são bandadas, de granulação média a grosseira, constituídas à base de plagioclásio, quartzo, biotita, muscovita, hornblenda e actinolita. A mineralização secundária é representada por clorita, epidoto, calcita, rutilo, zirconita e apatita, além de raros cristais de magnetita, grunerita e calcopirita.

Os arranjos texturais granoblásticos e granolepidoblásticos são dominantes e gradam nas faixas de deformação para feições protomiloníticas a miloníticas.

A associação mineral mais comum é definida por quartzo-plagioclásio-hornblenda-biotita, indicando estabilidade em condições térmicas na fácies anfíbolito. As feições migmatíticas são expressas através de estruturas "schollen" com tendência para acamada ou estromatítica; segundo Siqueira e Costa (op. cit.).

## 2) Grupo Salobo

As rochas supracrustais do referido Grupo são representadas por xistos (biotíticos), formações ferríferas bandadas, anfíbolio xistos, gnaisses anfíbolíticos, quartzitos e clorita-quartzo xistos.

Morfologicamente os clorita-quartzo xistos, formações ferríferas bandadas e os xistos (biotíticos) apresentam-se com relevo movimentado formando serras alinhadas, em função do controle estrutural local. Na parte central da estrutura do Duplex ressaltam-se as pendentes escarpadas e ravinadas, com colúvios balizando as faces voltadas para sul. Tais feições são observadas a norte, na região de passagem para o Complexo gnáissico, porém com raras acumulações de colúvio. Ocorrem entretanto, locais de topos planos, constituindo platôs com acumulações de crostas lateríticas ferruginosas. Toda rede de drenagem condicionada a esse pacote litológico, experimenta significativa influência do controle estrutural imposto ao relevo, destacando-se os vales encaixados na forma de V, (Siqueira, 1990).

Mineralogicamente os xistos biotíticos são constituídos a base de biotita, quartzo, almandina, plagioclásio, magnetita e grunerita. De acordo com a abundância relativa dos componentes minerais distingue-se a textura granolepidoblástica.

Os clorita-quartzo xistos são rochas que se intercalam aos anfibólio xistos, sendo caracterizados por uma textura nematoblástica nos termos com pouca biotita.

Por sua vez, as formações ferríferas bandadas ocorrem como lentes decamétricas, regulares, nos pacotes de xistos e gnaisses anfibolíticos. Com base na variação do conteúdo mineralógico distinguem-se três tipos de formações ferríferas.

As formações ferríferas constituídas por magnetita, fayalita, grunerita e greenalita estão associadas a xistos biotíticos, granatíferos ou anfibolíticos. Tratam-se de rochas penetrativamente foliadas exceto nos termos onde abunda magnetita, os quais tem aspecto maciço. A mineralogia acessória é definida por grafita, calcopirita e bornita, sendo que algumas frações são caracterizadas pela presença de ouro, molibdenita, safrolita, nicolita e pentlandita.

Outro conjunto de formação ferrífera é formado essencialmente por hematita/magnetita, grunerita e quartzo, exibindo bandamento composicional e ocorrendo associado aos gnaisses anfibolíticos. Hiperstênio, apatita e sulfetos são de ocorrência subordinada da mesma forma que as granadas intensamente cloritizadas.

O terceiro conjunto é composto por quartzo, hematita/magnetita e grunerita subordinada, associa-se aos quartzo-micaxistos tendo aspecto bandado; segundo Siqueira e Costa, (1991).

Os anfibólio xistos, gnaisses anfibolíticos e metabásicas, portadores ou não de mineralizações sulfetadas, são em geral bastante degradados no clima tropical, assumindo os níveis topográficos mais baixos ou sendo preservados em meia encosta quando protegidos por unidades mais resistentes à ação intempérica. Sua densidade de elementos texturais de relevo é baixa e algumas pendentes são ravinadas, sendo expressivas as acumulações de colúvio, fator esse, atenuador das pendentes topográficas (Siqueira, 1990).

Os anfibólio xistos são caracterizados pela associação mineralógica: grunerita, almandina, magnetita e quartzo, definindo texturas nematoblásticas e granonematoblásticas.

Por outro lado, os gnaisses anfibolíticos que definem uma faixa regular de direção NW-SE na parte central do Duplex, são rochas de granulação média compostas por plagioclásio, ortoclásio, hornblenda, leucóxênio, quartzo, epidoto e clorita, o plagioclásio exibe característica granoblástica, nos termos protomiloníticos de ocorrência deste conjunto rochoso (Siqueira e Costa op. cit.).

Finalmente os pacotes quartzíticos, que são rochas de granulação fina a grosseira compostas por sillimanita, muscovita, sericita e quartzo, apresentam texturas em moldura e fitada.

Morfologicamente este metassedimento destaca-se nas faixas protomiloníticas e miloníticas organizando serras alinhadas, com escarpas íngremes em função da forte inclinação das estruturas planares impressas (foliação milonítica, falhas e fraturas). As escarpas desenvolvidas são, em geral, ravinadas com raras acumulações de colúvio nos sopés. As pendentes topográficas são acentuadas no lado sul, em função do controle estrutural, sendo que seus valores médios atingem 70%. Ao norte, onde predominam pendentes mais suaves e acumulações mais expressivas de colúvio, podem-se seguir perfis da ordem de 20%. As drenagens comumente apresentam vales em forma de V. A nordeste e noroeste do vale do Igarapé Salobo os pacotes quartzíticos destacam-se em relação aos demais por apresentarem topos planos, chegando a definir platôs com cerca de 1,5 km<sup>2</sup>; conforme Siqueira (1990).

### **3) Intrusivas Ácidas**

As rochas intrusivas ácidas de idade de cerca de 2Ga. correlacionáveis ao Granito Central da Serra de Carajás estão representadas por microgranitos pórfiros compostos por feldspato potássico, plagioclásio e quartzo, sempre na forma de diminutos corpos circulares, conforme Farias e Meyer (1982).

### **4) Intrusivas Básicas**

As intrusivas básicas contém augita e plagioclásio, apresentam textura maciça e dispõem-se sob forma de diques irregulares por vezes direcionados de SW a NE, os quais foram datados, alcançando idades de 580 M. A., conforme Farias e Meyer (op. cit.).

## **2.5 - GEOLOGIA ESTRUTURAL DO DUPLEX SALOBO-MIRIM**

O Duplex Salobo-Mirim é formado por quatro zonas de cisalhamento distintas conforme ilustra a Figura 2.4, sendo que, a zona de cisalhamento curvilinear a norte, a zona de cisalhamento retilínea a sul e a zona de cisalhamento secundária se conectam entre si, enquanto que as zonas de cisalhamento transcorrentes tardias modificam localmente o arranjo geométrico das camadas litológicas nas direções NW-SE, NNE-SSW e NE-SW, conforme Siqueira e Costa (1991).

### **1) Zona de Cisalhamento Retilínea**

A referida zona de cisalhamento tem orientação geral E-W, alcança espessura de cerca de 2 km nas partes leste e central, sendo facilmente seguida através das frações lenticulares de quartzitos, formações ferríferas e xistos que aparecem no seu interior, em meio as litologias gnáissicas. Esse arranjo anastomosado dos corpos rochosos tem postura sub-vertical, é paralelo a foliação milonítica e denota movimento sinistral.

No interior das frações rochosas, a foliação pode ser identificada através de um bandamento composicional regular que grada a uma foliação de transposição ou xistosidade.

Instabilidades dentro da zona de cisalhamento, materializadas por ondulações centimétricas a quilométricas e desenhadas pela foliação milonítica, são frequentes. Outras instabilidades caracterizadas por dobras intrafoliares com eixos curvos ou retos são realçadas por frações de quartzito e veios de quartzo, segundo Siqueira e Costa (op. cit.).

## **2) Zona de Cisalhamento Curvilínea**

A zona de cisalhamento curvilínea marca a passagem das rochas supracrustais para o embasamento gnáissico na parte norte do Duplex, pode alcançar espessura de até 4,0 km em alguns trechos ao longo de sua direção e é realçada por faixas contínuas e descontínuas de quartzo clorita xistos, quartzitos, formações ferríferas e gnaisses.

A alternância regular dos diversos conjuntos rochosos define um bandamento composicional fortemente inclinado para sul e paralelo à foliação milonítica. Em todos os tipos litológicos são frequentes ondulações métricas a quilométricas da foliação milonítica, relacionadas à presença de lentes e "boudins" de corpos rochosos mais competentes.

A análise de critérios cinemáticos indica sistematicamente movimentação sinistral. Nesse caso, pode se classificar a zona de cisalhamento curvilínea como uma estrutura normal oblíqua com forte componente direcional associado, conforme Siqueira e Costa (op. cit.).

## **3) Zona de Cisalhamento Secundária**

A zona de cisalhamento secundária compõe a parte interna do Duplex, ajusta-se às zonas de cisalhamento principais e está instalada preferencialmente nos contatos entre os diversos conjuntos litológicos.

Na região centro-leste do Duplex esta zona de cisalhamento projeta-se através de unidades rochosas supracrustais alternadas com faixas de gnaisses, caracterizando um bandamento composicional regular, paralelo à foliação milonítica orientado na direção NW-SE e fortemente inclinado para SW. Na região centro-oeste do Duplex a zona de cisalhamento instalou-se no domínio das rochas gnáissicas, adquirindo orientação NE-SW nas adjacências da extremidade oeste da zona de cisalhamento curvilínea. Nessa região, a foliação milonítica é ressaltada regionalmente por frações lenticulares de xistos imersos na massa gnáissica.

A movimentação sinistral, deduzida a partir da análise de indicadores cinemáticos, permitem classificar a zona de cisalhamento secundária em normal oblíqua de acordo com Siqueira e Costa (op. cit.).

## **4) Zonas de Cisalhamento Transcorrentes Tardias**

As zonas de cisalhamento transcorrentes tardias constituídas por vários feixes orientados preferencialmente nas direções NW-SE, NE-SW e NNE-SSW; seccionam e deslocam as zonas de cisalhamento supra descritas que compõem a arquitetura do Duplex.

As zonas de transcorrência NW-SE têm ampla distribuição na área e variam desde poucos metros a até 10 km de extensão; sua movimentação, deduzida a partir do deslocamento dos corpos geológicos é essencialmente sinistral. As zonas orientadas na direção submeridiana (NNE-SSW) são pequenas e têm movimentação dextral. Por outro lado, as zonas NE-SW incorporam movimentação sinistral, a exemplo das zonas NW-SE.

Internamente estas zonas de transcorrência são formadas por uma foliação milonítica subvertical, que pode ser descrita como bandamento composicional ou xistosidade.

Até então, tais zonas de cisalhamento são interpretadas como transcorrências tardias ligadas ao binário sinistral E-W responsável pela formação do Duplex. Nesse sentido, as zonas NW-SE, NE-SW e NNE-SSW são classificadas por Siqueira e Costa (1991) como estruturas P, R, R', de Riedel, respectivamente.

## CAPÍTULO 3

### FUNDAMENTOS DO IMAGEAMENTO POR RADAR

#### 3.1 - INTRODUÇÃO

O termo RADAR é derivado da expressão "Radio Detection and Ranging", que denomina o dispositivo sensor capaz de, através das ondas de rádio, detectar alvos indicando sua posição e distância. Desta forma o termo RADAR é comumente utilizado para denominar todos sistemas ativos de microondas.

Os primeiros sensores foram desenvolvidos nas décadas de 20 e 30 por pesquisadores como Taylor, Young, Page, Watson Watt e Guthrie, com fins militares, no mapeamento de alvos durante a noite ou sob condições de nebulosidade. A sua utilização gerou a observação de outros alvos, não militares, os quais produziam retornos ou ecos específicos, que quando filtrados identificavam edifícios, florestas, campos agrícolas, etc, (Trevett, 1986).

Após a Segunda Guerra Mundial esta tecnologia passou a ser utilizada pela comunidade científica civil, que concluiu ser o RADAR uma nova maneira de "enxergar" a superfície terrestre, trazendo uma complementação aos dados adquiridos pelos sensores ópticos. Uma consequência desta observação foi o desenvolvimento de alguns sistemas de RADAR aerotransportados, os quais demonstraram efetivamente, o potencial deste sensor como um sistema de imageamento eficaz, especialmente em áreas com coberturas de nuvens.

Até o momento atual, o desenvolvimento tecnológico na área de microondas, permitiu que os sistemas aerotransportados, fossem adaptados a satélites ou ônibus espaciais, fato este que incrementou muito sua utilização multidisciplinar em sensoriamento remoto.

Devido às suas características particulares, o RADAR não grava normalmente aquilo observado pelo olho humano, apesar da imagem final, apresentar muitos elementos que nos capacitam a identificação do contorno e tamanho das formas naturais. Desta maneira o comprimento de onda, assim como, outras características de emissão e recepção, o processamento usado e características dos alvos podem afetar a eventual representação destes na imagem final, (Trevett, op. cit.).

Assim, serão analisados os fundamentos de um imageamento por RADAR para nortear as observações e conclusões desta dissertação.

#### 3.2 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

A Figura 3.1 mostra o espectro eletromagnético e a indicação de alguns comprimentos de onda no intervalo ultra-violeta-microondas. Também encontram-se ilustrados, segmentos específicos dos sistemas imageadores mais comuns, assim como o gráfico de transmissão atmosférica e a disposição das principais frequências utilizadas no imageamento por RADAR.

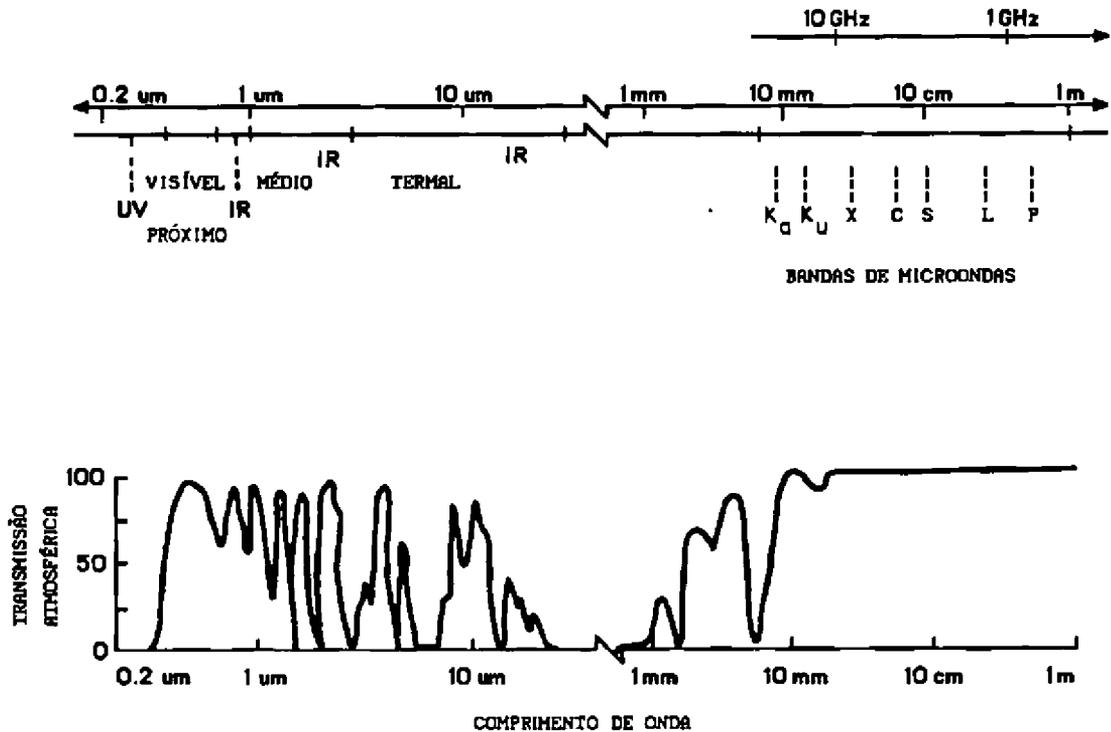


Fig. 3.1 - Espectro eletromagnético mostrando as janelas de transmissão atmosférica e a disposição das principais frequências utilizadas em RADAR.

FONTE: NASA (1988), p. 01.

A faixa ocupada pelas bandas de microondas (10 mm a 1 m) mostra uma larga janela de transmissão atmosférica, característica esta que torna possível ao RADAR imagear sob condições de intensa nebulosidade.

Radiação eletromagnética na faixa das microondas ocorre naturalmente, porém não é utilizada para produzir imagens, pois para a iluminação de alvos, faz-se necessário uma alta potência de energia, a qual deve ser gerada artificialmente pelo próprio instrumento imageador. Devido a esta capacidade de gerar sua própria fonte de onda eletromagnética, o sensor RADAR é denominado ativo, podendo inclusive imagear a superfície terrestre durante o período noturno, (Trevett, op. cit.).

### 3.3 - INTERAÇÕES MICROONDAS/SUPERFÍCIES E A EQUAÇÃO RADAR

O princípio interativo microondas/superfícies segue o pressuposto de que, qualquer interface que separe dois meios com diferentes propriedades eletromagnéticas, afetará uma onda de mesma natureza, incidente sobre ela. Considerando dois meios, um sendo o vácuo e o segundo com constante dielétrica qualquer, a onda eletromagnética interagirá com os átomos do meio dielétrico, os quais se tornarão pequenos osciladores emitindo ondas eletromagnéticas em todas as direções.

Se a superfície é perfeitamente plana, terá origem um campo de reemissão de duas ondas planas: uma no meio superior em ângulo igual ao de incidência  $\theta$  e a outra no meio inferior em ângulo  $\theta'$  dado por:

$$\theta' = \text{Arc Sen} (\text{Sen } \theta / \sqrt{\epsilon}) \quad (3.1)$$

onde  $e$  corresponde a base do logaritmo neperiano (2,71828).

Se a superfície é rugosa, então parte da energia é reemitida em várias direções, criando um campo de espalhamento, Figuras 3.2a e 3.2b, respectivamente.

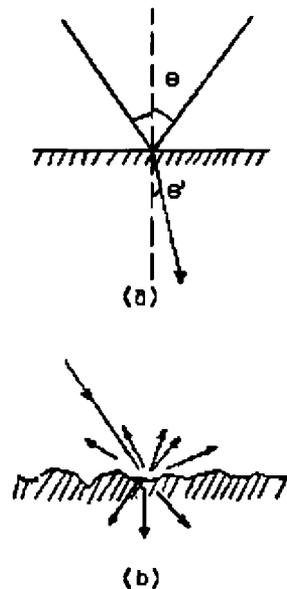


Fig. 3.2 - Interação onda eletromagnética com superfície plana: Reflexão e Refração(a); Interação onda eletromagnética com superfície rugosa (b).

FONTE: Elachi (1988), p. 38.

A quantidade de energia espalhada é dependente da magnitude da rugosidade, assim como, do comprimento de onda incidente. É de interesse para o imageamento por RADAR, a energia espalhada de volta à direção do sensor, caracterizada pelo coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ), que é dado pela razão entre energia recebida no sensor e energia que este teria recebido, se a superfície espalhasse isotropicamente.

A intensidade do retroespalhamento em direção ao sensor depende, portanto, da direção de visada, do ângulo de incidência local (dependente da declividade e rugosidade do terreno) e da constante dielétrica do objeto iluminado.

Com isso colocado, e supondo uma potência radar transmitida com antena unidirecional sobre uma unidade de área colocada a uma distância (D) do sensor, teremos a referida potência dada por:

$$P_T G_T / 4\pi R^2 \quad (3.2)$$

onde  $P_T$  é a potência transmitida,  $G_T$  ganho da antena unidirecional e  $4\pi R^2$  é a área da superfície de uma esfera imaginária de raio R.

O alvo interceptado por esta intensidade de potência re-irradia na direção da antena do RADAR, segundo seu parâmetro  $\sigma^0$  (coeficiente de retroespalhamento); assim a potência re-irradiada é equacionada por:

$$P_T G_T \sigma^0 / 4\pi R^2 \quad (3.3)$$

Como o sinal retorna ao RADAR, a intensidade da potência do eco é dada por:

$$P_T G_T \sigma^0 / (4\pi R^2)^2 \quad (3.4)$$

A antena de recepção captura apenas parte da potência do eco. Se a área efetiva de coleta da antena é A, então a potência do eco ( $P_R$ ) que chega é dada por:

$$P_R = P_T G_T \sigma^0 A / (4\pi R^2)^2 \quad (3.5)$$

Que é a forma fundamental da EQUAÇÃO do RADAR, (Elachi, 1988).

### 3.4 - SISTEMAS DE RADAR

A configuração normal de um RADAR imageador, esquematizado na Figura 3.3, consiste de um transmissor, um modulador, um receptor e um processador usualmente acoplado a uma unidade de saída (gravador). Os sistemas são normalmente desenvolvidos para que somente uma antena seja utilizada tanto como transmissora e receptora.

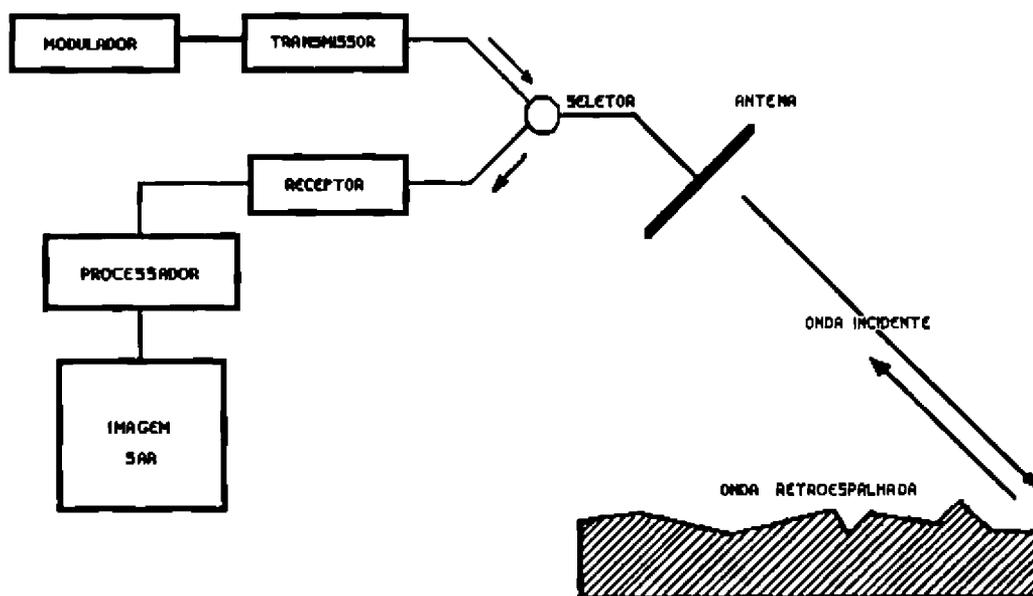


Fig. 3.3 - Configuração básica de um RADAR imageador.

FONTE: NASA (1988), p. 219.

A energia é transmitida pela antena na faixa de microondas sob forma de pulsos. Estes pulsos são produzidos a intervalos de tempo regulares (microsegundos), por um sincronizador e com uma potência padronizada por intermédio de um modulador. A energia destes pulsos é enviada perpendicularmente ao deslocamento da plataforma que transporta o sistema sensor. Esta energia é refletida pelo alvo imageado e retorna à antena, que nesse instante encontra-se sincronizada para recepção. A energia recebida é convertida, via processador, para a forma de um sinal elétrico passível de ampliação e registro em fitas magnéticas.

Ainda no contexto da figura acima, observa-se que o RADAR ilumina uma faixa da superfície em atitude oblíqua à plataforma, o que se denomina visada lateral (SLR). Tal fato fundamenta-se no objetivo de eliminar as ambiguidades causadas por pontos situados simetricamente à direita e à esquerda da antena, as quais seriam inevitáveis com a visada a nadir, já que os sinais dos dois pontos alcançariam a antena simultaneamente. Além disso, a visada lateral gera sombreamento dando às imagens aspecto tridimensional com a sensação de relevo, o que é de suma importância para o mapeamento geológico-geomorfológico.

Os radares imageadores são classificados segundo duas categorias: de abertura real (RAR) e de abertura sintética (SAR).

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

O RADAR de abertura real é assim denominado porque a resolução azimutal (RA); correspondente à menor distância entre pontos da superfície, separados ao longo da linha de deslocamento da plataforma do sensor, é determinada pela equação:

$$R_A = h\lambda / L\cos\theta \quad (3.6)$$

onde h é altitude da plataforma,  $\lambda$  comprimento de onda emitido, L comprimento da antena e  $\theta$  ângulo de abertura do feixe de microondas. De onde se conclui que estes radares apresentam a resolução limitada pelo tamanho da antena, já que este parâmetro não pode ser aumentado indiscriminadamente, devido aos efeitos aerodinâmicos inerentes a esta variação.

No entanto, pesquisas objetivando contornar esta limitação quanto a resolução azimutal originaram uma segunda geração RADAR denominada de Abertura Sintética.

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

O princípio básico do SAR foi desenvolvido por Carl Wiley em 1950, durante pesquisas para melhorar a resolução de radares aerotransportados. O cientista simulou uma antena de dimensão duzentas vezes maior que seu tamanho real, a partir de dados adquiridos ao longo da linha de deslocamento da plataforma RADAR com redundância de informações sobre um ponto (efeito Doppler), (Trevett, 1986).

Isto permite que após um processamento de focagem, que consiste na compressão destes dados, forme-se uma única projeção do alvo com aumento substancial da resolução em azimute.

O efeito Doppler, que é base deste procedimento, simula então uma antena dezenas de vezes maior a partir de dados gerados de várias pequenas antenas, com isto aumenta-se a resolução azimutal, agora equacionada por:

$$R_A = L/2 \quad (3.7)$$

onde L é o tamanho da antena original (Elachi, 1988).

### 3.5 - PARÂMETROS DO SISTEMA RADAR

Os principais parâmetros funcionais do sistema RADAR subdividem-se em dois grupos: 1- parâmetros instrumentais e 2- parâmetros de visada. Os primeiros são determinados pelo projeto do transmissor, receptor, antena e sistema de processamento de dados, estando incluídos aqui: comprimento de onda, polarização e calibração. Os segundos abrangem os ângulos de iluminação, direção de visada, resolução e faixa de recobrimento, sendo que estes estão relacionados principalmente a geometria de imageamento.

#### 3.5.1 - COMPRIMENTO DE ONDA

O espalhamento das ondas eletromagnéticas na superfície do alvo é fortemente dependente do comprimento de onda emitido (Ulaby et al. 1982). Com um dado comprimento de onda, a intensidade do retroespalhamento é governada por três mecanismos dependentes da cena: 1- volume de espalhamento e atenuação da cobertura da superfície, 2- superfície de espalhamento do substrato, 3- penetração da onda em sub-superfície.

Assim, a seleção dos canais de frequência, tem por base experiências anteriores e simulações tecnológicas; visando otimizar tamanho, peso e potência impostas à plataforma de transporte. Normalmente, esta seleção fica restrita a três bandas L, C e X com respectivamente 23,5; 5,7; e 3,1 cm de comprimento de onda, podendo estender-se a canais de banda P (75 cm) para a obtenção de maior penetrabilidade em alvos vegetais p.ex, ou de banda K (1 cm), para estudo de caracterização de micro relevo, já que tal comprimento de onda possibilita grande sensibilidade à rugosidade em superfícies.

A Figura 3.4 ilustra o comportamento das três principais bandas de frequências quanto ao retorno de informações em regiões com densa cobertura florestal. Nota-se que o comprimento de onda incidente tem interação com alvos proporcionais ao seu tamanho, isto é, a banda X (3 cm) interage logo na superfície do dossel com as folhas, as quais tem tamanho similar. A banda C, com cerca de 6 cm, proporciona uma maior penetração no dossel até níveis de galhos, enquanto que a banda L (23 cm), em circunstâncias especiais pode interagir até com o solo.

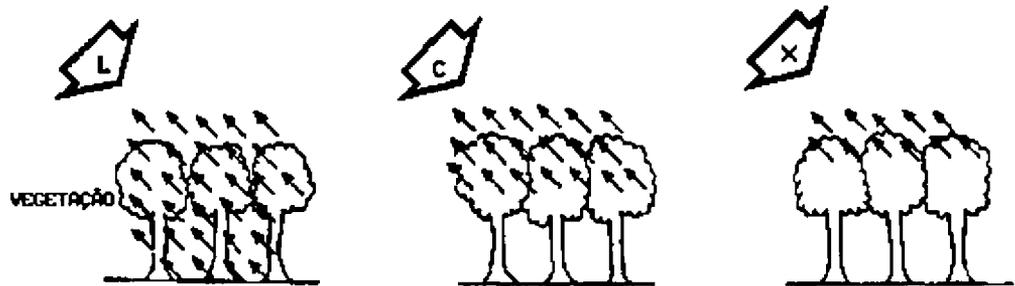


Fig. 3.4 - Esquemática da interação de frequências disponíveis em sistemas RADAR com os estratos da cobertura vegetal. Banda X (3 cm), Banda C (6 cm) e Banda L (23 cm).

FONTE: NASA (1988), p. 05.

### 3.5.2 - POLARIZAÇÃO

Da mesma forma que a frequência, os tipos de polarizações são escolhidos com base em experiências adquiridas anteriormente ou por intermédio de testes de simulação.

Nos radares de polarização igual, ou seja HH (emite horizontal, recebe horizontal) e VV (emite vertical, recebe vertical), fortes respostas ocorrem quando os espalhamentos estão orientados na mesma direção que a polarização da onda incidente. Um exemplo ilustrativo, encontra-se no fato do retorno de espalhamento das bancadas horizontais de uma área de mineração, apresentar-se mais intenso para a polarização HH que para uma polarização VV, (Paradella et al., 1993). Por outro lado, o retroespalhamento de polarização do tipo cruzada HV ou VH (emite horizontal, recebe vertical e vice-versa) resulta por exemplo do múltiplo espalhamento dentro de um volume difuso como dosseis de florestas.

### 3.5.3 - CALIBRAÇÃO

#### 3.5.3.1 - CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA

A calibração radiométrica de um radar estabelece uma relação entre a intensidade da imagem; obtida através de "corner reflectors" e o coeficiente de retroespalhamento da superfície imageada ( $\sigma^0$ ). A calibração relativa estabelece de forma precisa uma medida comparativa, enquanto que a calibração absoluta proporciona a exata medida do coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ). Para tanto, são coletados níveis de potência transmitida, ganho absoluto da antena e receptor. Destes dados se estabelece a constante K na relação:

$$I = K\sigma^n \quad (3.8)$$

onde I é a intensidade da imagem.

São quatro as razões principais para uma boa calibração radiométrica:

- 1) Parâmetros físicos dependentes de  $\sigma^0$  (umidade p.ex.);
- 2) Controle de parâmetros internos do instrumento (canais de polarização p.ex.);
- 3) Comparação de dados radar com outros dados de sensoriamento remoto inclusive os dos próprios instrumentos radar, e
- 4) Comparação de dados obtidos sob diferentes frequências.

### 3.5.3.2 - CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA

A calibração geométrica de uma imagem radar estabelece a relativa fidelidade da geometria da superfície dentro desta imagem e a exata localização dos alvos em uma grade cartográfica.

Tal calibração é de particular importância quando se incrementa o uso do radar, e faz-se necessário corrigir imagens, assim como montar mosaicos entre elas.

Para se obter uma boa calibração geométrica estão envolvidas várias rotinas de processamento de imagem tais como: correção do skew (inclinação) gerada pela geometria de coleta de dados, e correção da variação na resolução, causada por grandes diferenças topográficas dos alvos.

### 3.5.4 - GEOMETRIA DO IMAGEAMENTO POR RADAR

A imagem radar tem origem na iluminação de uma cena a partir de um ponto oblíquo de visada, o que lhe confere uma geometria específica. O radar "vê" a superfície de acordo com a linha inclinada medida entre a antena e o alvo ("slant range"). A projeção desta linha na horizontal corresponde a distância do ponto nadir do instrumento, e o alvo, mostrando a posição correta deste no plano de referência; o que se denomina "ground range", (Figura 3.5).

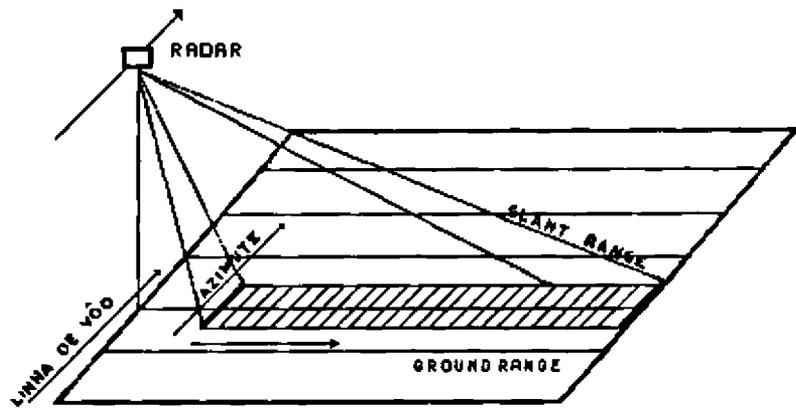


Fig. 3.5 - Geometria de imagem radar.

FONTE: Dallemand et al., (1993), p. 26.

O entendimento desta geometria de imageamento, assim como, da construção da imagem está baseado no conhecimento dos elementos de visada ilustrados na Figura 3.6: ângulo de incidência (ou visada), ângulo de depressão, ângulo azimutal, direção de visada, resolução e faixa de imageamento.

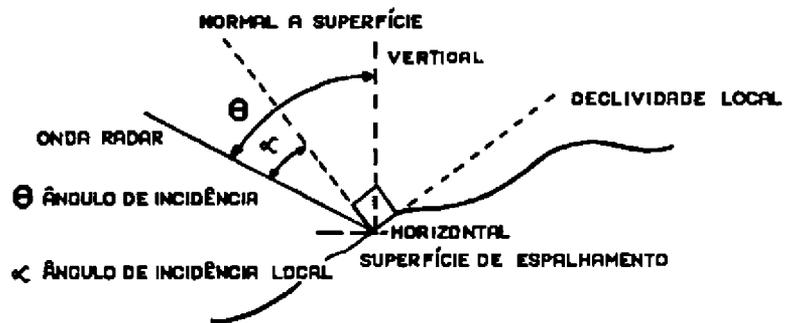
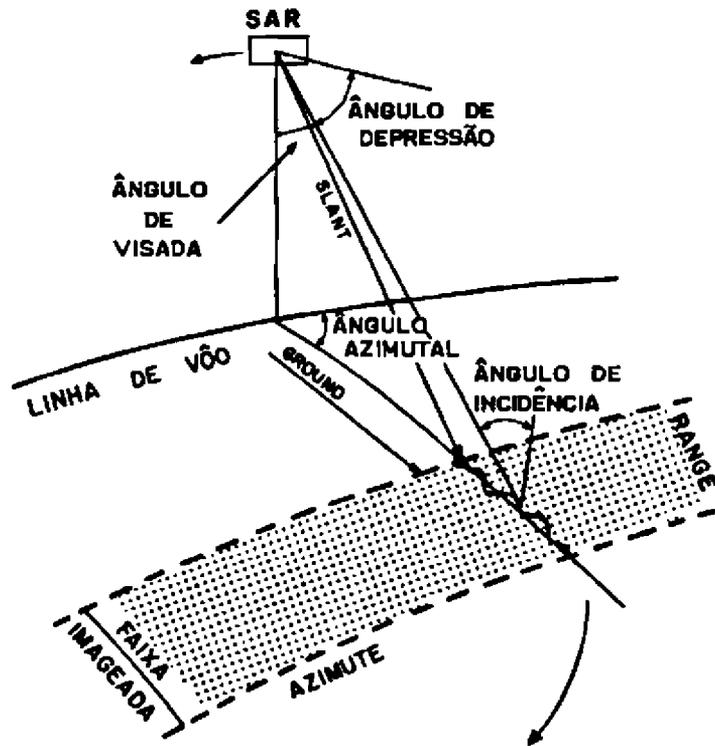


Fig. 3.6 - Elementos de visada do imageamento RADAR.

FONTE: Lowman et al., (1987), p. 57.

### 3.5.4.1 - ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

O ângulo de incidência é um parâmetro associado à antena, sendo determinado pela angulação de seu eixo principal com a linha do nadir ou com a normal de uma superfície plana imageada.

A capacidade de alterar o ângulo de incidência mostra-se vantajosa principalmente quanto a três aspectos:

- 1) caracterização de superfícies: dado um radar de frequência e polarização conhecidas a variação do ângulo incidente pode gerar boa quantidade de modelos de retroespalhamento para determinação de propriedades físicas da superfície (Figura 3.7).

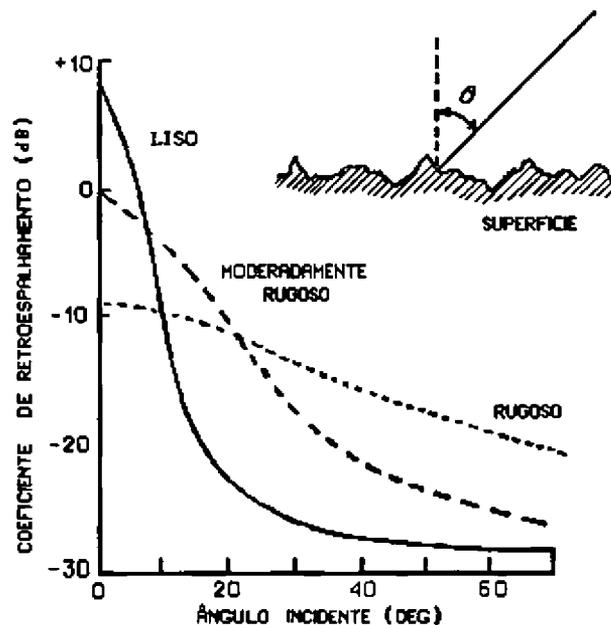


Fig. 3.7 - Típicas curvas de retroespalhamento das superfícies de acordo com o ângulo incidente.

FONTE: NASA (1988), p. 114.

Em geral, observa-se um rápido decréscimo no retroespalhamento com o incremento do ângulo de incidência, isto limitado aos ângulos de baixa magnitude. Nas angulações maiores, o nível de inclinação da curva mostra suave decréscimo com a incrementação do ângulo incidente. Além disso, o formato e magnitude do gráfico variam conforme a rugosidade da superfície e o volume geométrico.

Graham e Harris (1986), constataram que para imageamentos orbitais a discriminação do microrelevo em terrenos arrasados tem melhor performance quando o ângulo incidente encontra-se próximo ao nadir. Por outro lado, a detecção da rugosidade superficial em terrenos acidentados é realçada por ângulos de incidência de grande magnitude.

- 2) imagens com estereoscopia: O método de múltipla incidência angular é o preferido para a obtenção do efeito estereoscópico, tão importante na interpretação visual da topografia e conseqüente confecção de mapas. (Fielding et al., 1986).
- 3) Aumento de acesso do campo de visada (FOV): a acessibilidade do campo de visada (FOV) do radar aumenta significativamente com o incremento do ângulo incidente.

#### **3.5.4.2 - ÂNGULO DE DEPRESSÃO**

O ângulo de depressão é definido como o ângulo formado entre o plano horizontal da superfície imageada e o feixe microondas originado na antena. Na porção "near range", o ângulo de depressão é relativamente obtuso enquanto que, no "far range" é agudo. Para superfícies planas o ângulo de depressão é complementar ao ângulo incidente, o que não ocorre para superfícies irregulares onde o ângulo de incidência local não mantém esta relação com o ângulo de depressão, Sabins, 1986 em Werle (1988);

#### **3.5.4.3 - ÂNGULO AZIMUTAL**

À semelhança do ângulo de incidência, este também é um parâmetro ligado à posição do eixo maior da antena radar, sendo agora determinado pela angulação deste, com a linha de vôo da plataforma, conforme Figura 3.6. Múltiplos ângulos de azimute são conseguidos pela inclinação da antena de um lado a outro da plataforma radar. Tal capacidade se apresenta útil para adquirir dados próximos ou simultâneos com outros instrumentos de sensoriamento remoto, prover coberturas com maior repetitividade sobre áreas de interesse e complementar informações de propriedades de retroespalhamento da superfície.

#### **3.5.4.4 - SENTIDO DE VISADA**

Além das variações dos ângulos de incidência e azimute, há a possibilidade de se variar a direção de visada, ou seja variar, o feixe de microondas da esquerda à direita em relação ao nadir da plataforma, incrementando desta forma o número de geometria de visadas para estudos de feições geológicas ou monitoramento de regiões específicas por mais tempo.

Trata-se de um importante fator na interpretação de imagens radar, pois é bastante forte a relação entre a direção de visada e o retorno de brilho dos elementos texturais retilíneos da imagem, pois estes; se colocados ortogonalmente a visada terão aumentado o valor de retrobrilho, ocorrendo o oposto às estruturas paralelas a visada, que em casos de imageamento orbital tornam-se até invisíveis.

#### **3.5.4.5 - RESOLUÇÃO**

Corresponde a um parâmetro dependente do tamanho da antena e de seu avanço tecnológico, podendo ser diferenciada segundo duas direções: resolução em range e em azimute.

A resolução em range corresponde à menor distância discriminada entre dois pontos na direção transversal à linha de vôo. Os ecos correspondentes a dois pontos separados por uma distância R serão intercalados por um tempo T:

$$T = 2R/C \quad (3.9)$$

onde C é a velocidade da luz, e desde que o comprimento do pulso seja menor que 2R/C para que deste modo dois ecos não se sobreponham e apareça um único alvo.

Por outro lado, a resolução azimutal é correspondente à menor distância entre pontos da superfície, separados ao longo da linha de deslocamento da plataforma radar. A resolução em azimute depende de vários parâmetros, conforme visto na Equação (3.6).

Assim se conclui, que em radares de abertura real, a resolução é limitada pelo tamanho da antena. Criou-se então um sistema conhecido como Radar de Abertura Sintética (SAR), o qual se beneficia do deslocamento da plataforma radar, de acordo com o anteriormente explicado, simulando uma antena dezenas de vezes maior que a original, melhorando consequentemente a resolução em azimute.

#### 3.5.4.6. - FAIXA DE RECOBRIMENTO

O deslocamento da plataforma radar acarreta o imageamento de uma faixa contínua do terreno ao longo da linha de vôo. A largura desta faixa imageada (S) depende diretamente da altura do vôo (h), do comprimento da radiação emitida ( $\lambda$ ), da largura da antena (W) e da inclinação da visada ( $\theta$ ), segundo a relação:

$$S = h\lambda/W \cos^2\theta \quad (3.10)$$

Embora desejada, uma larga faixa de recobrimento é limitada por fatores instrumentais e um necessário equilíbrio com a resolução dos alvos. Tais limitações são contornadas através de técnicas de mosaicagem.

Tendo em vista o conhecimento básico de alguns dos principais parâmetros da geometria de imageamento de radar, torna-se importante observar que a obtenção da imagem sob uma visada oblíqua acarreta algumas distorções que se resumem nas maiores diferenças entre os produtos dos sensores ópticos e de microondas.

Estas distorções, denominadas efeitos de visada são subdivididas em três categorias: efeito "Foreshortening", efeito "Shadowing" e efeito "Layover":

##### 1) Efeito Encurtamento de Rampa ("Foreshortening")

A projeção do terreno em "slant range" inevitavelmente resulta em compressão ou "foreshortening" dos alvos voltados para a iluminação radar. Assim sendo, o comprimento de iguais declividades quando imageadas sob diferentes ângulos incidentes, apresentam-se variáveis ao longo da faixa imageada, conforme ilustra a Figura 3.8, onde o efeito de compressão se faz notar mais proeminente no lado proximal ("near range"), onde o ângulo

incidente é o mais agudo possível. Desta forma, sabe-se que o efeito de compressão é reduzido a partir do incremento do ângulo de incidência.

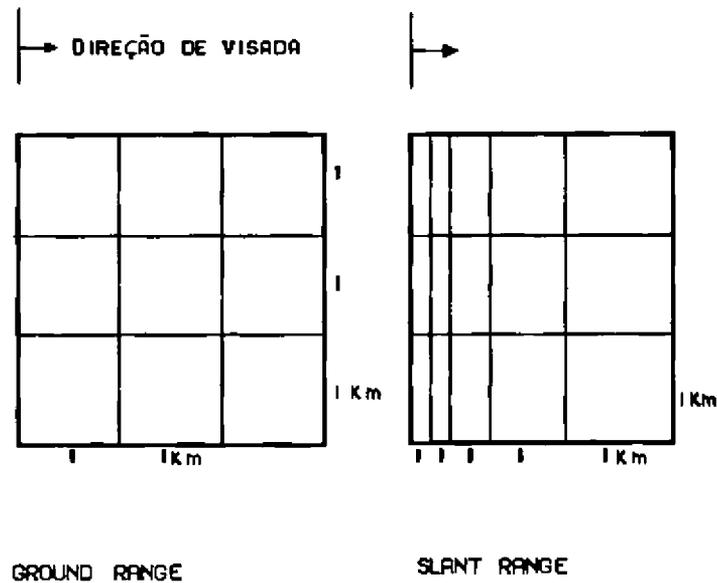


Fig. 3.8 - "Foreshortening" (encurtamento de rampa).

FONTE: Dallemand et al., (1993), p. 26.

## 2) Efeito Sombreamento ("Shadowing")

O efeito sombreamento ocorre na direção ortogonal a linha de vôo, portanto é um bom indicador da direção de visada do instrumento. A sombra é causada tanto por feições positivas como negativas de relevo, basta o ângulo da declividade, voltado ao instrumento radar, ser maior que o ângulo de depressão do feixe de microondas; logo trata-se de um efeito dependente tanto de fatores do instrumento (ângulo de depressão) como do terreno (magnitude da declividade).

Se o ângulo de declividade do lado oposto da encosta for menor que o ângulo de depressão, o sombreamento não ocorrerá, pois este lado será completamente iluminado pelo feixe microondas. Uma terceira hipótese pode ocorrer quando da igualdade dos dois ângulos, assim sendo, o feixe microondas estará rasante ("graze") ao lado oposto da encosta, que não apresentará sombra nem será iluminado, não sendo portanto gravado.

Devemos ressaltar que o recurso de sombreamento é importante para se ter uma sensação de relevo, no entanto, toda informação na área sombreada é informação perdida, conforme ilustrado na Figura 3.9, podendo ser recuperada somente com diferentes direções de visada.

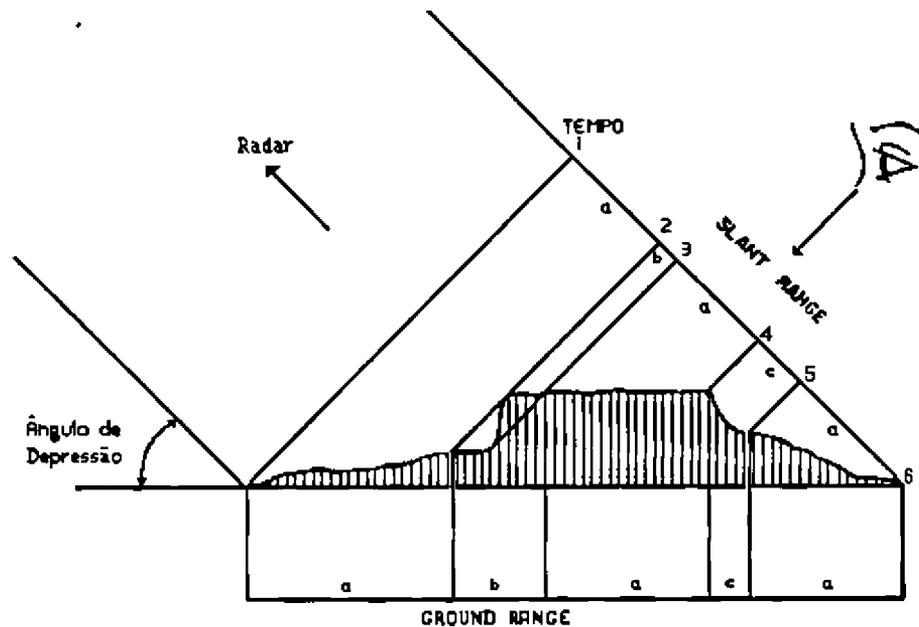


Fig. 3.9 - Ilustração dos efeitos de "Shadowing" e "Layover"

- A) entre os tempos 1 e 2, imagem obtida normal
- B) entre os tempos 2 e 3, o topo do platô e a área próxima a base do penhasco são sobrepostas caracterizando o "Layover".
- C) entre os tempos 4 e 5 caracteriza-se o "Shadowing" onde nenhum reflexo é obtido pois o ângulo de declividade voltado ao radar é maior que o ângulo de depressão do feixe de microondas.

FONTE: Dallemand et al. (1993), adaptado.

### 3) Efeito Deslocamento Proximal de Crista ("Layover")

O "Layover" ou distorção de elevação (Figura 3.9), tem origem na projeção simultânea das partes elevadas do relevo com as bases da declividade, devido a visada inclinada que faz com que o eco dos terrenos mais elevados e portanto mais próximos ao sensor radar, se sobreponham aos demais; resultando em um brilho anormal, consequência da mistura de "pixels". Esta sobreposição não pode ser separada ou corrigida por meio algum, resultando assim em perda de informação.

O "Layover" constitui-se na mais importante diferença entre imagens ópticas e de radar. Nos sensores ópticos, com visada a nadir, as projeções de terrenos mais elevados aparecem distantes do centro da imagem, caracterizando a distorção radial. No imageamento por radar, o efeito distorcivo de elevação "aproxima" do sensor, as feições de maior altitude.

### 3.6 - PARÂMETROS DO ALVO

Neste item são consideradas algumas características das superfícies imageadas que apresentam importantes relações com o resultado final do imageamento por radar. Os efeitos ligados diretamente ao alvo são três: efeito topográfico, efeito rugosidade e propriedades da constante dielétrica.

#### 1) Efeito Topográfico

Lowman et al., (1987), aponta como a principal característica do terreno, que influencia o retorno radar dos instrumentos SIR-B e SEASAT no Escudo Canadense, a topografia ou especificamente o efeito declividade, que é controlado pelo ângulo incidente local.

O imageamento por radar depende amplamente do efeito de sombreamento para realçar a topografia e estruturas geológicas. Como dito anteriormente, este efeito é causado quando a declividade do lado oposto à iluminação for maior que o ângulo de depressão conforme MacDonald e Waite, (1971).

Os radares aerotransportados tem caracteristicamente baixos ângulos de depressão, produzindo assim uma simulação de baixo ângulo de elevação solar, com excelente rendimento quanto a topografia. Nos imageamentos orbitais ocorre ao contrário, conseqüentemente, observa-se pouco efeito de sombreamento nas imagens. No entanto, constata-se um bom rendimento na detecção de feições topográficas por este tipo de radar. Desta forma é claro, que a base para esta boa performance é a variação do retroespalhamento, causada pelas mudanças dos ângulos de incidências locais, as quais se devem a expressão das variações microtopográficas do alvo, (Lowman et al., 1987).

#### 2) Efeito Rugosidade da Superfície

A rugosidade superficial é um importante parâmetro que influencia a resposta radar, sendo demonstrada principalmente pelas variações tonais expressas nas imagens finais.

O efeito rugosidade é função direta do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e ângulo de incidência ( $\theta$ ), sendo descrito, a partir do critério de Rayleigh; que considera superfície rugosa, ou seja, que espalha parte da energia recebida em direção ao sensor, aquelas que mantêm a relação:

$$h \geq \lambda/8 \cos\theta \quad (3.11)$$

onde  $h$  é a altura das irregularidades do terreno.

As superfícies que possuem ( $h$ ) abaixo deste limiar são consideradas lisas, ou seja, apresentam reflexão especular espalhando o feixe de microondas longe da antena

receptora, portanto não sendo registrada e comportando-se como ponto escuro no produto final, (Trevett, 1986).

Devido a extensa cobertura de floresta tropical, a análise do efeito rugosidade de superfície é bastante prejudicada, principalmente na área alvo onde são quase inexistentes, as ocorrências de exposição do substrato rochoso ao nível de observação dos sensores utilizados.

### 3) Propriedades da Constante Dielétrica

O complexo constante dielétrica é uma medida das propriedades elétricas dos materiais de superfície, ligados a permissividade e condutividade. Ambas propriedades são fortemente dependentes da composição química, estrutura e umidade contida, assim como os efeitos da constante dielétrica estão associados a frequência da energia que incide sobre o alvo. Materiais com constante dielétrica elevada (metais p. ex.) são representados por alto brilho, enquanto que baixas constantes possuem baixa resposta, (Ulaby et al., 1986).

A despeito da composição química, a constante dielétrica na natureza, está relacionada diretamente à umidade contida, que por outro lado controla também a penetrabilidade do feixe microondas na superfície, a qual é menor quanto mais úmido estiver o local de incidência.

O efeito constante dielétrica é pouco sentido em áreas como a floresta Amazônica pois, devido as abundantes chuvas e denso recobrimento vegetal, os diferentes tipos de alvo mantêm-se com alta taxa de umidade não gerando grandes diferenças perceptíveis quanto a este aspecto.

## CAPÍTULO 4

## CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS SENSORES UTILIZADOS NA INVESTIGAÇÃO

O item Caracterização dos Sistemas Radar Avaliados e Procedimentos de Análise; envolve a descrição dos instrumentos radar que geraram os produtos a serem analisados, assim como, suas geometrias de aquisição de dados. Inclui-se também aqui uma breve introdução ao conhecimento dos "software" PCI e SGI-INPE utilizados na correção de imagens, posterior análise digital e tratamento estatístico de dados geoespaciais, além dos fluxogramas dos procedimentos analíticos.

## 4.1. - SISTEMA CONVAIR SAR 580

O sistema CONVAIR 580 pertence ao Centro Canadense de Sensoriamento Remoto (CCRS), e se trata do instrumento radar de abertura sintética aerotransportado que operou durante o Projeto SAREX sobre a região da Amazônia Brasileira em meados do mês de abril de 1992.

O sistema SAR CV 580 operou de uma altitude média aproximada de 6 km usando três diferentes modos de imageamento; como ilustra a Figura 4.1.

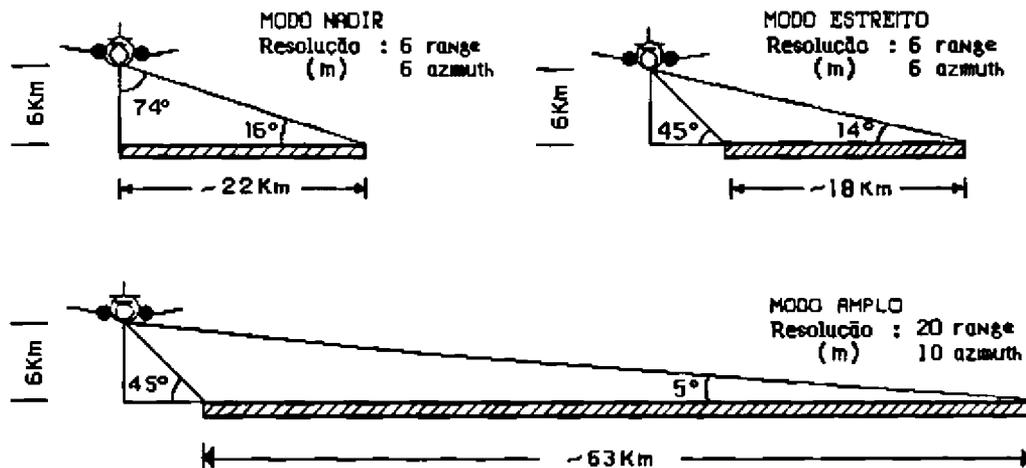


Fig. 4.1 - Modos de operação do SAR CV 580

FONTE: Wooding e Attema, (1992).

Este moderno sistema imageador possui várias opções para gravação de dados, porém durante o recobrimento sobre a Província de Carajás, apenas dois canais gravaram simultaneamente uma mesma faixa sob uma única frequência (banda C) e dupla polarização (HH, VV).

#### 4.1.1. - AQUISIÇÃO DE DADOS

O objetivo principal da missão SAREX foi simular o RADARSAT (SAR orbital Canadense banda C, polarização HH) com lançamento previsto para março de 1995; além de permitir uma comparação com dados do ERS-1 (SAR orbital da Comunidade Européia, banda C, polarização VV) que opera desde 1992. Para tanto, a maior parte dos dados foram adquiridos no modo nadir que inclui os menores ângulos de incidência, correspondentes a realidade da maioria dos sistemas adaptados a satélites. Detalhes sobre o RADARSAT podem ser vistos em Paradella et al., (1994).

Para o Brasil, o projeto SAREX programou 25 passagens abrangendo na Amazônia Legal quatro áreas testes, sendo três no Pará (Carajás, Tucuruí e Tapajós) e uma no Acre (Sena Madureira). As quatro áreas escolhidas correspondem a ambientes fisiográficos distintos e parcialmente representativos da diversidade da floresta tropical úmida. (Paradella, 1993).

Na Província Mineral de Carajás foram imageadas durante a missão, com alta resolução (6X6m), as áreas mineralizadas em cobre do Salobo e Pojuca, em ouro do Bahia e em ferro/mangânes, N1 e Azul. Além disso, um recobrimento regional com resolução mais baixa (10X20m) foi conduzido, abrangendo desde a Serra dos Carajás, até o limite norte da Hidroelétrica de Tucuruí, conforme ilustra a Figura 4.2.

Exceção feita a faixa BRA2.1, perdida por problemas técnicos, o sítio teste com centro na mina de cobre Salobo 3A foi recoberto pelo SAR CV 580 com as especificações técnicas expostas na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO SAR CV 580

PARÂMETROS	SISTEMA BANDA C
<b>TRANSMISSÃO</b>	
Frequência	5,30 GHz
Comprimento de onda	5,66 cm
Força irradiada	34 kw
Polarização	horizontal(HH) vertical(VV)
Frequência de repetição de pulso	2,44 Hz/m/s
Resolução	Alta (6X6m) Baixa (10X20m)
<b>RECEPÇÃO</b>	
Intervalo Dinâmico	30 dB
<b>ANTENA</b>	
Abertura em azimute	3°
Ângulo de Elevação	28°
Ganho	24 dB

FONTE: Wooding e Attema, (1992).

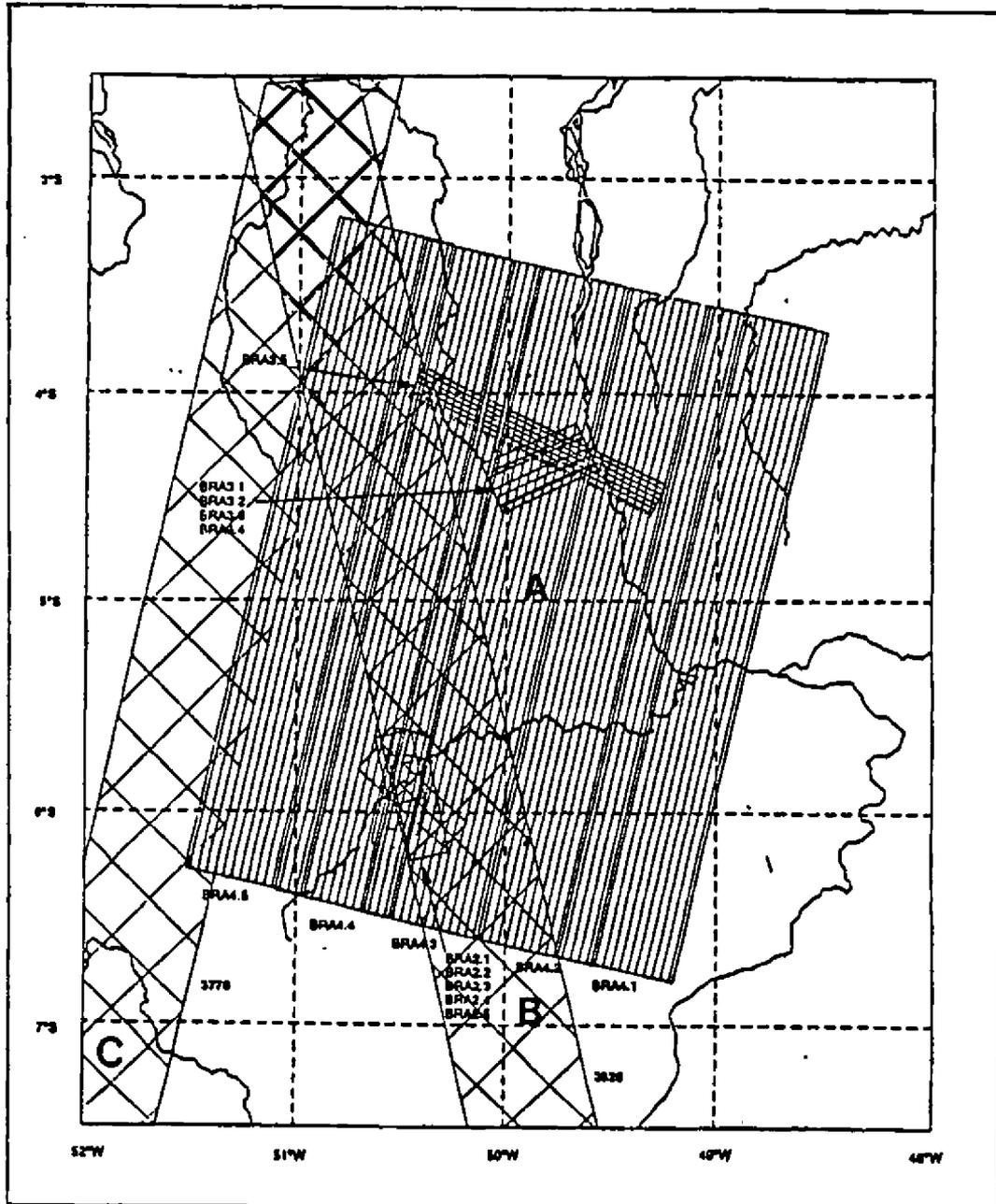


Fig. 4.2 - Áreas imageadas em Carajás e Tucuruí durante o projeto SAREX'92 (A). Órbitas ERS-1 ascendente (B) e descendente (C).

FONTE: Wooding e Attema, (1992).

Foram utilizadas três diferentes geometrias de imageamento sobre Salobo 3A, a saber:

- 1) Faixa de imageamento amplo BRA4.4 (detalhes Figura 4.3), com resolução de 10 X 20m e 63 km de largura, direcionada a N13°E, subparalela a órbita descendente do satélite orbital ERS-1, com visada para N78°W. Esta faixa abrange na região estudada uma área de 2.300 Km<sup>2</sup>.

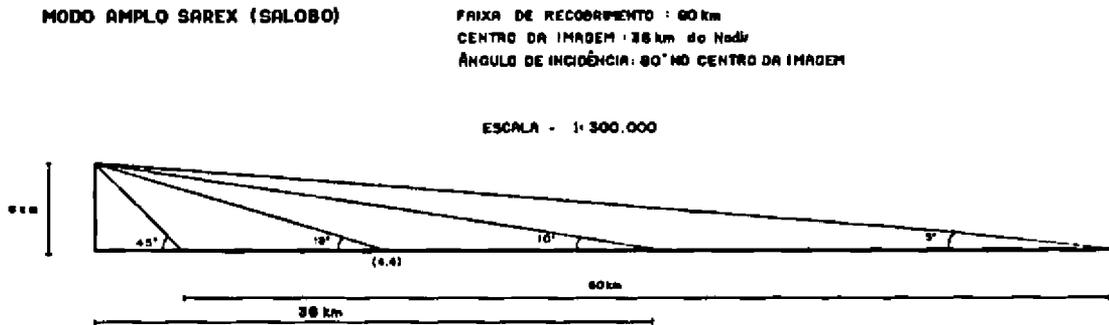


Fig. 4.3 - Modo amplo SAREX.

- 2) Faixas no modo nadir BRA2.3, BRA2.4 e BRA2.5 com resolução 6X6m e 22 km de largura de recobrimento, dispostas paralelas às órbitas ascendente N12°W (BRA2.3 e BRA2.4) e descendente N12°E (BRA2.5) do ERS-1; e cujas características, detalhadas na Figura 4.4, melhor se adaptam a simulação de radares orbitais. Este conjunto de imageamento recobriu a área estudada em toda sua extensão, ou seja, 2.500 Km<sup>2</sup>.

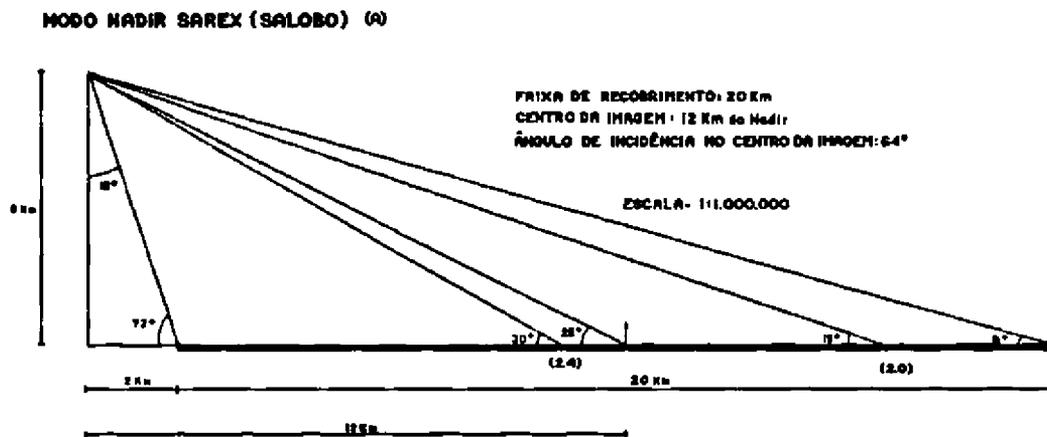


Fig. 4.4 - Modo Nadir SAREX.

- 3) Faixa modo estreito BRA2.2 (resolução 6X6m e 18 km de largura), cuja orientação de visada para S40°W possibilita investigar os efeitos da variação de ângulo azimutal no realce de estruturas regionais, discriminação litológica e caracterização de classes geobotânicas. (Figura 4.5). Esta faixa de recobrimento gerou o melhor produto analisado neste trabalho, possibilitando o mapeamento fotogeológico de cerca de 800 Km<sup>2</sup> da área teste.

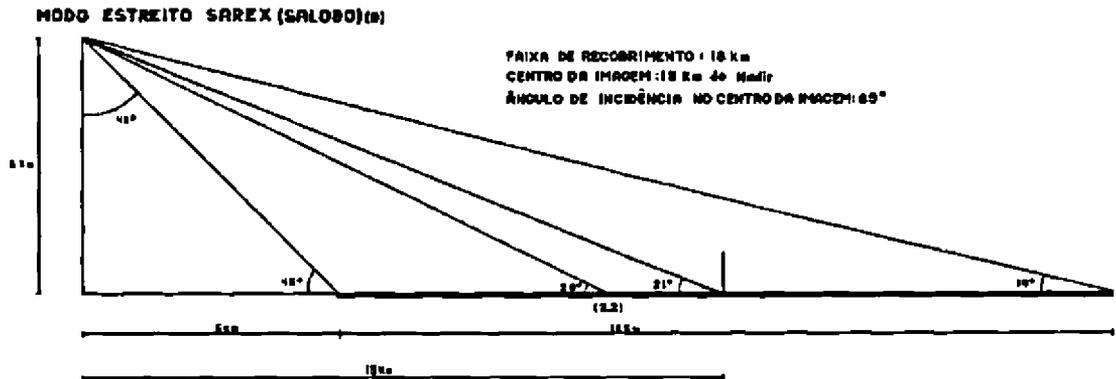


Fig. 4.5 - Modo Estreito SAREX.

#### 4.2 - ERS-1 SAR

O satélite SAR ERS-1 ("Earth Remote Sensing Satellite") pertencente a Comunidade Européia (Figura 4.6) foi lançado em julho de 1991.

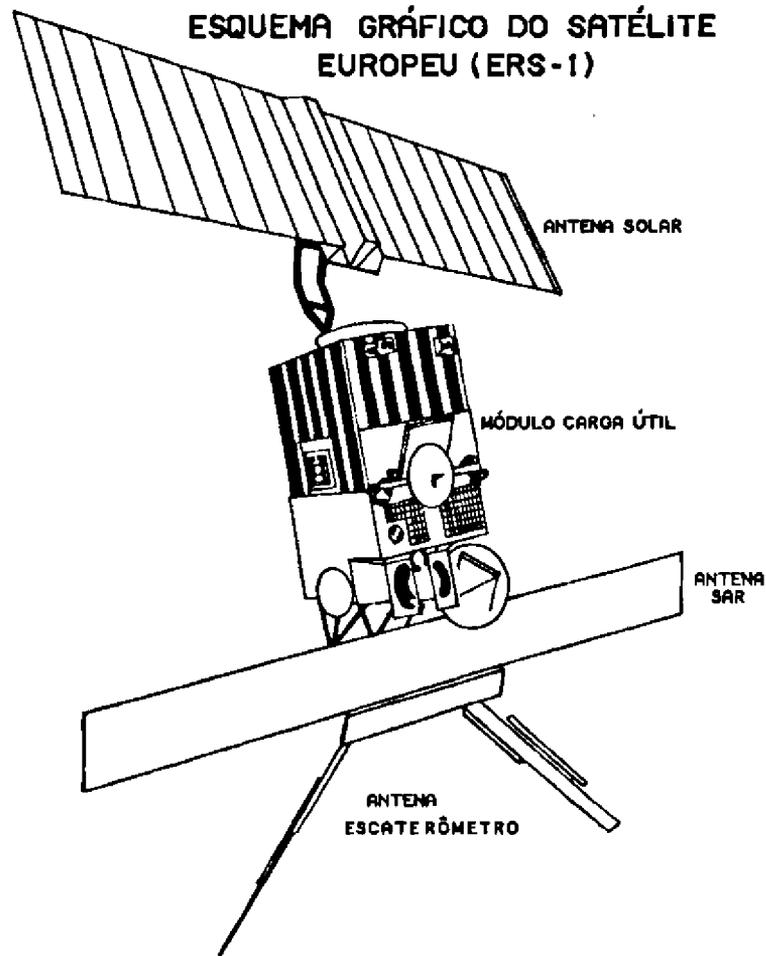


Fig. 4.6 - ERS-1.

FONTE: ESA, (1992).

A missão ERS-1 é principalmente dedicada às aplicações oceânicas e de estudos glaciológicos, para tanto, as características do radar de abertura sintética, listadas na Tabela 4.2, foram assim projetadas.

**TABELA 4.2 - SISTEMA RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA ERS-1**

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Inclinação Orbital	98,5° (ao Equador)
Altitude	nominal 785 km
Comprimento de onda	Banda C - 5,6 cm
Resolução Espacial (1 Look)	12 m em range 8 m em azimuth
Resolução Espacial (8 Looks)	25 m em range e azimuth
Largura da Faixa de Recobrimento	100 km
Ângulo de Depressão	65° a 70°
Intervalo Dinâmico	21 dB
Polarização	VV

FONTE: ESA, (1992).

Somados ao radar de abertura sintética, o sistema ERS-1, devido a sua característica multidisciplinar, traz diversos outros instrumentos, tais como, radar altímetro, radiômetro e escaterômetro que, por se tratarem de sensores não imageadores, não serão aqui reportados.

#### 4.2.1. - AQUISIÇÃO DE DADOS

A despeito das limitações causadas pela geometria de aquisição de dados ERS-1 ilustradas na Figura 4.7, uma série de imageamentos da crosta terrestre foram obtidos, inclusive sobre a Província Mineral de Carajás.

A imagem concernente à órbita descendente 4048 de 24 de abril de 1992, sobre a área teste Salobo 3A, foi gravada pela antena receptora do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE de Cuiabá (MT) e convertida em filme pelo laboratório deste Instituto em Cachoeira Paulista (SP).

Significativas informações geológicas podem ser interpretadas desta imagem; por este motivo, e também devido ao objetivo do projeto SAREX de comparar a performance do ERS-1 e simulações RADARSAT, foram incluídas neste trabalho análises visual e digital sobre o referido produto.

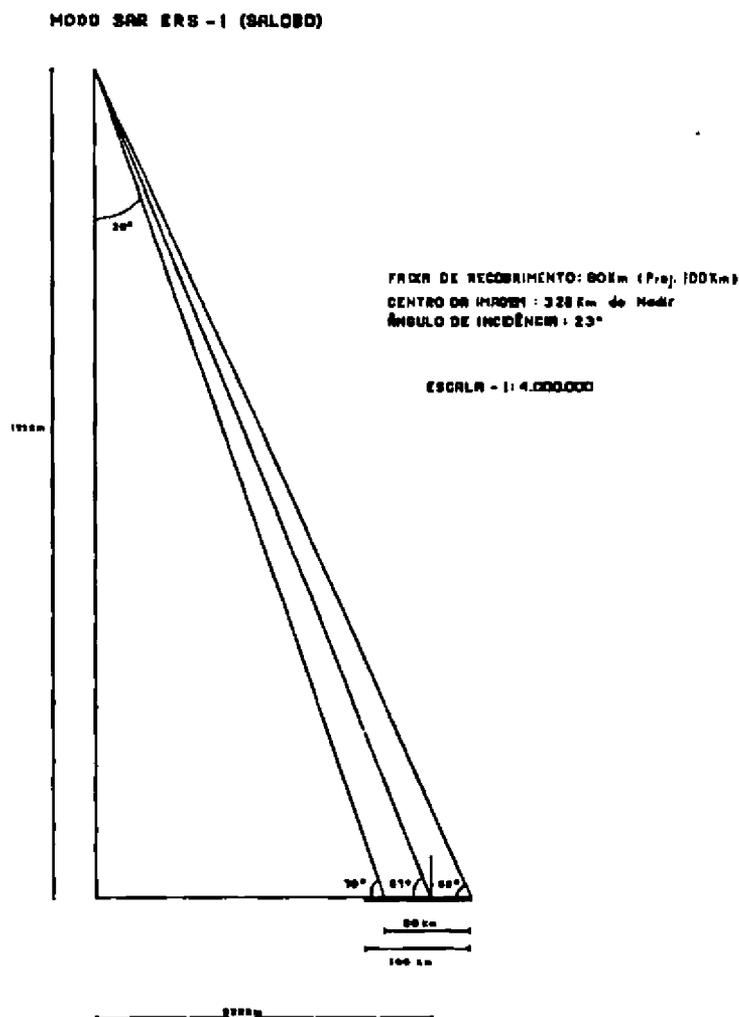


Fig. 4.7 - Modo SAR ERS-1.

### 4.3. - MATERIAIS DE ANÁLISE DIGITAL

#### 4.3.1 - SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS "PCI"

O "Software PCI" foi desenvolvido para manipular dados de sensoriamento remoto, dados digitais de elevação, dados de GIS, etc. As informações mais comumente manipuladas neste "software" são imagens de satélites como o LANDSAT, SPOT e ERS-1, assim como, as de radares e "scanners" multiespectrais aerotransportados (PCI, 1993).

Para estes produtos, o "software" apresenta vários programas que se estendem desde correções radiométricas e geométricas dos dados, passando por vários programas de

realce e manipulação de imagens (aumento de contraste, operações aritméticas e filtragens), programas de classificação de dados orbitais e aerotransportados, finalizados com programas de saída para mapas e cópias coloridas.

Um pacote de especial interesse para este trabalho, denominado "Radar Analysis Package" PCI, (1993), oferece substanciais algoritmos de correção e processamento de dados tais como: correção de padrão de antena (APC), conversão de "slant" para "ground range" (SRTOGR), filtragens (filtro adaptivo e de Lee), aumento de contraste (método Driemann) e um programa de análise textural (TEX).

O "software PCI" funciona em estações de trabalho "Unix" empregando sistemas "windows" através dos quais, a manipulação é feita utilizando-se uma interface denominada XPACE. O programa opera diretamente nas imagens que são armazenadas em bancos de dados conhecidos como PCIDSK. Para o caso do Projeto SAREX foram utilizados dados em 8 bits.

#### **4.3.2. - O "SOFTWARE" SGI-INPE**

Desenvolvido para manipular dados de Sistemas Geográficos de Informação o SGI-INPE, funciona entre outras formas, para gerar arquivos de saída na confecção de mapas multidisciplinares e diagramas estatísticos.

A este trabalho interessa um programa denominado "Analin"- análise de lineamentos, aqui utilizado para a análise estatística dos sistemas de cisalhamento da área teste e geração de diagramas tipo roseta para comparação da performance entre os diversos modos de imageamento por radar.

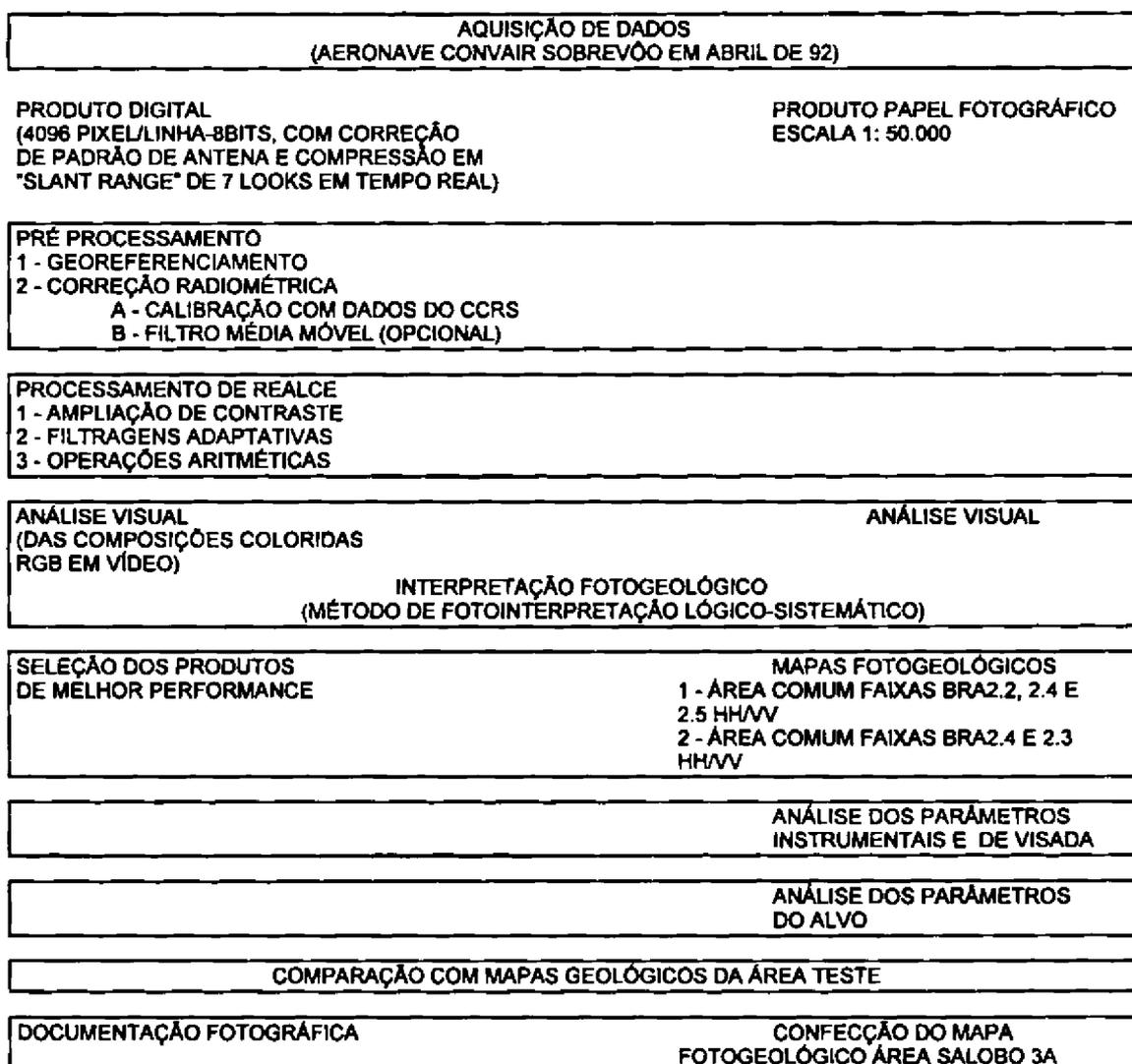
## CAPÍTULO 5

## ABORDAGEM METODOLÓGICA DA INVESTIGAÇÃO

## 5.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os procedimentos analíticos levados a cabo na avaliação comparativa dos produtos SAR CV580 (SAREX) e ERS-1, tanto no aspecto visual como no digital conforme ilustram os fluxogramas na sequência.

## 5.1.1 - PRODUTO CV580 (SAREX)



### 5.1.2 - PRODUTO ERS-1

AQUISIÇÃO DE DADOS (SATÉLITE ORBITAL ERS-1 EM ABRIL DE 92 ÓRBITA 4048)	
PRODUTO DIGITAL (4000 PIXEL/LINHA- 16BITS, COM CORREÇÃO DE PADRÃO DE ANTENA EM TEMPO REAL)	PRODUTO PAPEL FOTOGRÁFICO (ESCALA 1: 100.000, PROJEÇÃO "GROUND RANGE")
PRÉ PROCESSAMENTO (INPE) 1 - GEOREFERENCIAMENTO (PROJEÇÃO UTM) 2 - CORREÇÃO RADIOMÉTRICA - REDUÇÃO "SPECKLE"- "MULTLOOK" = 8 3 - PROJEÇÃO "SLANT"- "GROUND RANGE" SEM UTILIZAÇÃO DE DEM	
PROCESSAMENTO DE REALCE 1 - AMPLIAÇÃO DE CONTRASTE 2 - FILTRAGENS ADAPTATIVAS	
ANÁLISE VISUAL (DAS COMPOSIÇÕES COLORIDAS RGB EM VÍDEO)	ANÁLISE VISUAL  INTERPRETAÇÃO FOTOGEOLÓGICA (MÉTODO DE FOTOINTERPRETAÇÃO LÓGICO-SISTEMÁTICO)
SELEÇÃO DOS PRODUTOS DE MELHOR PERFORMANCE	MAPAS FOTOGEOLÓGICOS
	ANÁLISE DOS PARÂMETROS INSTRUMENTAIS E DE VISADA
	ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO ALVO
COMPARAÇÃO COM MAPAS GEOLÓGICOS DA ÁREA TESTE	
DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA	CONFEÇÃO DO MAPA FOTOGEOLÓGICO ÁREA SALOBO 3A

### 5.2 - ANÁLISE VISUAL

A interpretação de imagens SAR para mapeamento geológico - geomorfológico está baseada nas observações similares às usadas para interpretação de fotos aéreas, conforme citam Koopmans, (1985), Trevett, (1986) e Lillesand e Kiefer, (1987), entre outros. Logicamente leva-se em conta que os dois sistemas de coleta de dados são fundamentalmente diferentes com respeito à formação e geometria da imagem, e que a resposta de alvos, na região espectral de microondas é influenciada por parâmetros totalmente distintos dos que influenciam nas porções do visível e infravermelho próximo.

A visada lateral do RADAR é um artifício que resulta numa projeção oblíqua do terreno; na qual, a partir da altura do objeto e do ângulo de depressão que o mesmo é visto, forma-se o sombreamento que produz a impressão de relevo, essencial para a interpretação da morfologia; (Koopmans, 1985).

Analisando-se a área de Carajás onde o recobrimento florestal é muito denso, com ausência de exposição natural do substrato rochoso e ainda, considerando-se a umidade elevada e uniformemente distribuída, podemos concluir que o efeito topográfico é o parâmetro mais importante do alvo nestas condições, pois controla o retroespalhamento e conseqüentemente a tonalidade da imagem.

Desta forma, as variações tonais devidas ao efeito topográfico são as bases da interpretação geológica em regiões com as características da área teste.

Posto isto, o procedimento de análise visual das imagens envolve o reconhecimento de dois elementos: tonalidade e textura, sendo que a partir destes, identifica-se a distribuição espacial de unidades homólogas para se deduzir o modelo geológico tridimensional; (Koopmans, op. cit.).

### **1) Tonalidade**

A interpretação visual de imagens RADAR tenta inferir o significado das feições através da observação das variações tonais contidas neste produto, Simonett e Davis em Colwell, (1983).

Nas fotos aéreas, e imagens multiespectrais as mudanças tonais são relativas às características de reflexão do alvo em um intervalo relativamente amplo do espectro; enquanto que no RADAR estas variações correspondem à reflexão somente de um comprimento de onda específico.

Assim, a expressão tonal numa cena SAR é função direta da potência do eco emitido a partir da área alvo na superfície. Essa potência, equacionada no item 3.3, é função de inúmeros parâmetros sendo muito complexa a determinação de qual destes fatores especificamente causaram mudanças nos níveis de cinza.

Por esta razão, na interpretação de um produto SAR somente é possível uma aproximação relativa de um nível tonal discreto, não sendo portanto a tonalidade, isoladamente, utilizada na discriminação de zonas homólogas.

### **2) Textura**

O conceito de textura é discutida por Laur em Dallemand et al., (1993), a partir da definição de elemento textural que é a menor feição homogênea definida na imagem.

A princípio, define-se textura como padrão espacial ou frequência tonal, produzida por uma assembléia de elementos texturais, que varia conjuntamente a uma área particular; permitindo o delineamento de regiões homólogas com propriedades específicas.

A textura de uma imagem RADAR pode ser dividida em três componentes:

- a) micro-textura ou ruído "speckle": definido como um efeito incoerente de pequenos pontos refletivos distribuídos numa região homogênea, a qual, a princípio, não deveria apresentar variações tonais. Por aparecerem com brilho artificial, em relação a

circunvizinhança, este ruído causa uma interferência destrutiva resultando em uma textura "pipocada", que dificulta a interpretação visual.

- b) meso-textura: é a variação natural da média do retroespalhamento na mesma escala de um elemento de resolução ("pixel"), que tende a ser organizada e coerente.
- c) macro-textura: corresponde às variações no brilho RADAR que se estende por muitos elementos de resolução ("pixels"). Permite a identificação e delineamento de áreas, que são determinadas por contornos de relativa homogeneidade. Numa generalização, a macro escala pode ser considerada como um arranjo ordenado de feições, sendo que, este pode vir a ser descrito e agrupado em categorias quanto a orientação, espaçamento, densidade e uniformidade, conforme Simonett e Davis em Colwell (op. cit.).

O estudo qualitativo da tonalidade e da textura exige uma análise padronizada, ainda mais se tratando de um ambiente teste isento de conhecimento prévio. Para tanto, optou-se pelo método denominado Lógico-Sistemático de Soares e Fiori (1976), e adaptado para imagens orbitais por Veneziani e Anjos, (1982); que será brevemente discutido na sequência.

### 5.2.1 - MÉTODO DE FOTOINTERPRETAÇÃO LÓGICO - SISTEMÁTICO

O método Lógico Sistemático tem a preocupação de sistematizar um conjunto de conhecimentos e regras que permitam a análise lógica das imagens, envolvendo três processos:

- 1) Fotoleitura - reconhecimento e identificação dos elementos da imagem.
- 2) Fotoanálise - estudo das relações entre estes elementos, suas associações e ordenações;
- 3) Fotointerpretação - estudo do conjunto da imagem visando a descoberta e avaliação por métodos indutivos, dedutivos e comparativos do significado, função e relação dos objetos analisados e suas associações.

A fotoleitura envolve conhecimento de técnicas e processos de aquisição das imagens, constituindo-se numa fase de coleta de informações, nas quais estarão baseadas as fases seguintes.

Na análise de imagens radar, aplicada às geociências, interessa fundamentalmente os elementos naturais da paisagem, isto é, relevo e drenagem. Tais elementos, denominados elementos texturais repetem-se com forma, dimensão e tonalidade definidas, (Riverau 1972), em Veneziani e Anjos (1982). O conceito de textura, como visto, refere-se ao padrão de arranjo dos elementos texturais. Desta forma, na análise das imagens, pode-se separar diferentes graus de densidade de textura, ou seja, zonas de maior ou menor número de elementos texturais de um mesmo tipo por unidade de área. Outro conceito importante analisado, é a estrutura, isto é, o grau de organização quanto a disposição dos elementos, e a ordem de grandeza desta organização, quantificando assim a complexidade da forma, originada pela composição dos elementos.

O próximo passo na fotoanálise é definir zonas homólogas, que constituem-se em zonas de repetição dos elementos texturais com uma mesma organização. Definidas estas regiões, parte-se então para a análise das formas da rede de drenagem com objetivo de se obter informações especialmente quanto à estruturação geológica da área. As propriedades

mais importantes a serem analisadas são: densidade, angularidade, tropia (direção preferencial) e assimetria. Na sequência, são analisadas as formas de relevo, das quais, as mais importantes são as que representam ruptura de declive (quebras negativas), por constituírem limites definidos entre zonas homólogas. As principais propriedades de textura e estrutura do relevo são: densidade, assimetria e forma de encostas.

Caracterizadas as diversas formas de arranjo de relevo e drenagem, inicia-se a fase de fotointerpretação, quando podemos avalia-las e conseqüentemente estabelecer seu significado geológico.

A função principal desta fase é gerar um documento base com informações geológicas interpretadas, constituindo zonas limitadas representadas por rochas com propriedades similares.

Para a classificação destas, denominadas zonas fotolitológicas, recorre-se a aplicação de fatores conhecidos pelo intérprete, os quais controlam a textura e estrutura na imagem.

### **1) Fatores Morfológicos**

O clima condiciona o desenvolvimento de formas de relevo e drenagem, através do controle da cobertura vegetal e produção da carga detrítica (intemperismo). Outro fator morfogenético importante é a tectônica recente, onde soerguimento de blocos modifica o gradiente da rede de drenagem. Assim, algumas regras podem ser estabelecidas para se avaliar o sentido do desenvolvimento de um sistema:

- a) Quanto maior a amplitude altimétrica em área com mesma densidade de drenagem, maior a declividade das vertentes;
- b) Quanto maior a declividade da vertente, maior a energia disponível de transporte, logo, maior o acúmulo de colúvio.

### **2) Fatores Litológicos**

Dependem das propriedades físico-químicas da rocha. São eles:

- a) resistência à erosão: depende do grau de alterabilidade da rocha e do grau de consolidação do maciço. O melhor critério analítico para se interpretar os diferentes graus de erodibilidade resulta do exame das formas de encostas ou vertentes, classificando-se zonas fotolitológicas desta forma:
  - 1) não-resistente: encostas rebaixadas e convexas, evoluindo para formas de escoamento difuso;
  - 2) pouco resistente: a parte mais elevada das encostas é convexa e a parte inferior apresenta forma côncava;
  - 3) resistente: encostas com formas côncavas; e
  - 4) muito resistente: encosta com perfil côncavo e tópo convexo.

- b) **Permeabilidade:** caracterizável pela facilidade com que um fluido percola um meio poroso. Normalmente a permeabilidade é inversamente proporcional a densidade de drenagem.
- c) **Plasticidade e ruptibilidade:** entende-se por plasticidade a capacidade de um material ser deformado sem ruptura, sendo portanto o inverso da ruptibilidade. São detectadas pelo grau de fraturamento (linhas de drenagem retilíneas); assim, rochas com maior densidade de fratura refletem menor plasticidade.
- d) **Solubilidade:** é a propriedade que expressa a suscetibilidade de um material ser dissolvido desenvolvendo formas especiais de relevo.
- e) **Tropia:** as estruturas lineares (acamamento, xistosidade e gnaissificação) conferem à rocha, propriedades anisotrópicas condicionando o desenvolvimento orientado das formas de relevo e drenagem. Assim, na análise das imagens pode-se definir zonas homólogas com diferentes graus de orientação das formas, como:
  - 1) muito orientada: presença de alinhamentos de relevo e drenagem (corpos tabulares);
  - 2) moderadamente orientada: caracterizada pela presença de lineações de relevo e drenagem, as formas de relevo são alongadas na direção das lineações;
  - 3) pouco orientada: apresenta apenas lineações de drenagem correspondentes a traços de foliação; e
  - 4) não orientada: as formas de relevo tendem a ser isométricas.

### 3) Fatores Deformacionais

Os fatores deformacionais controlam o relevo e drenagem afetando as propriedades da imagem de forma diferente. Dentre estas deformações, para o âmbito geológico destacam-se as originadas por tectonismo.

- a) **Atitude de camadas:** através da propriedade de assimetria do relevo e drenagem definem-se classes de valor de mergulho:
  - 1) camadas sub-horizontais ( $<3^\circ$ ), relevo fortemente assimétrico com mergulho voltado para a zona homóloga sub horizontal, a rede de drenagem é bidirecional com angularidade média;
  - 2) camadas pouco inclinadas ( $3^\circ - 10^\circ$ ), relevo moderadamente assimétrico, drenagem unidirecional com angularidade baixa;
  - 3) camadas mediamente inclinadas ( $10^\circ$  a  $30^\circ$ ), relevo moderadamente assimétrico, drenagem assimétrica com mergulho acompanhando o declive da zona homóloga de menor densidade de textura de relevo;
  - 4) camadas fortemente inclinadas; relevo fracamente assimétrico com mergulho no sentido do declive da zona homóloga de menor densidade de relevo. Para mergulhos  $> 60^\circ$ , o relevo é simétrico com drenagem alinhada paralela à direção das camadas.
- b) **Fraturas:** considera-se traço de fratura as lineações de drenagem retilíneas com direções diferentes das correspondentes a traços de foliação.

- c) Falhamentos: o modelo fotointerpretativo de uma falha é representado por uma descontuidade de zonas homólogas ao longo de um alinhamento representativo do plano de ruptura.
- d) Dobras: os modelos para a interpretação de dobras podem ser de dois tipos: a) dobras com mergulhos suaves onde as formas assimétricas de drenagem e relevo são bem desenvolvidas; b) nas estruturas muito dobradas o desenho dos traços de acamamento e traços de foliação formam "trends" estruturais, narizes ou descontinuidades produzidas por pequenas falhas.

Cabe ressaltar aqui, que o método acima descrito está melhor estruturado quanto a análise textural de uma imagem radar, sendo que a observação das variações tonais, fica relegada a um segundo plano. Tal observação não produz prejuízos consideráveis ao presente trabalho, pois a cobertura vegetal muito densa na área teste não permite a visualização de afloramentos e eventuais mudanças tonais associadas à diferentes litologias.

### **5.3 - ANÁLISE DIGITAL**

#### **5.3.1 - INTRODUÇÃO**

Os dados digitais foram subdivididos em dois conjuntos: o primeiro, composto pela imagem SAR ERS-1, disponível em fita HDDT, obtida em abril de 1992 na antena receptora de Cuiabá (MT) e pré-processada em Cachoeira Paulista, no DGI (Departamento de Geração de Imagem) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. O segundo conjunto é composto pelos dados brutos do projeto SAREX, gravados pelo Bercha Group (Canadá), quando do recobrimento das áreas alvos na Amazônia brasileira. Este conjunto apresenta-se em fitas exabyte, com as faixas de vôo dispostas sequencialmente, de onde foram extraídas para o presente trabalho, as áreas de imageamento sobre Salobo 3A.

A análise digital possibilita explorar os dados de radar em sua totalidade objetivando quantificar os efeitos de técnicas de realce quanto à contribuição na extração de informações geológicas. Para tanto, faz-se necessário um preparo destas imagens numa fase denominada de pré-processamento, que envolve: georeferenciamento do conjunto, correções radiométricas e correções geométricas.

Posteriormente, os conjuntos de imagens passaram por uma gama de processamentos específicos de Radar e outros, já consagrados para sensores multiespectrais, ambos disponíveis na versão 5.2 do "software" PCI, (PCI 1993).

Na fase seguinte, os diversos produtos obtidos pelo processamento digital foram analisados visualmente na forma de composições coloridas (RGB) sendo selecionados os de melhor performance para ilustrar as conclusões desta dissertação.

### 5.3.2 - PRÉ PROCESSAMENTO DOS DADOS DIGITAIS

Os dados ERS-1 foram pré-processados no contexto de um "software" concebido pela ESA (Agência Espacial Européia), cujas principais funções estão ilustradas na Tabela 5.1. Desta forma, estes dados quando colocados em disponibilidade, foram diretos para a fase de processamento propriamente dito.

**TABELA 5.1 - PRÉ PROCESSAMENTO DIGITAL DO PRODUTO ERS-1 (SEGUNDO ESPECIFICAÇÕES DO DGI/INPE)**

compressão em azimute	8 "looks"(resolução 25 X 25 m)
correção de projeção	"slant" para "ground range"
disposição "pixel", linha	7662, 8280 - 16 bits
correção padrão de antena	função STC ("Sensitivity Time Control")
georeferenciamento	orientação ao norte

Por sua vez, os dados SAREX recebidos apenas com os processamentos em tempo real (Tabela 5.2), foram primeiramente georeferenciados, isto é, para eles foram definidos contornos regulares de um banco de dados, numa função denominada GEOSSET (PCI, 1993), a fim de ordena-los para as correções subsequentes.

**TABELA 5.2 - PROCESSAMENTOS EM TEMPO REAL SAR CV 580**

compressão em azimute	7 "looks"(alta resolução 6X6 m, baixa resolução 10X20 m)
correção de projeção	opcional ("slant" para "ground range")
disposição "pixel", linha	4096 "pixels" por linha - 8 bits
correção padrão de antena	função STC ("Sensitivity Time Control")

FONTE: Wooding e Attema, (1992).

### 5.3.2.1 - CORREÇÕES RADIOMÉTRICAS

A qualidade radiométrica do dado SAR é afetada por fatores ligados ao instrumento, assim como, à geometria de iluminação. As duas principais distorções radiométricas que prejudicam a interpretabilidade das imagens de radar são: ruído "speckle" e efeito padrão de antena.

#### a) Ruído "Speckle"

Citado anteriormente no item 5.2, o ruído "speckle" resulta em um tipo de textura "pipocada" que dificulta a análise da imagem SAR.

Para radares de alta resolução, tipo CV 580 Banda C do Projeto SAREX'92, uma textura granulométrica rugosa, originada pela cena melhor resolvida, suplanta o ruído "speckle", por isso não se nota nos imageamentos manipulados neste trabalho nenhum prejuízo relacionado a este problema. Entretanto, para imagens orbitais a textura "speckle" é inerente e precisa ser reduzida; sendo que para tanto, existem dois procedimentos:

- 1) Processamento multivisada ou "multilook": que consiste de uma média entre as visadas de um alvo, feitas pelos setores da antena SAR no transcorrer do movimento do satélite imageador. Estatisticamente, a variância de "speckle" é reduzida proporcionalmente ao número de "looks" com que é feita a média, no entanto, a resolução também é degradada na mesma proporção.
- 2) Filtragens: geralmente são aplicados filtros passa baixa, do tipo média e mediana como sugere Pietsch, (1993), os quais produzem bons efeitos em áreas homogêneas, desfocando porém, as bordas ou limites de zonas heterogêneas, conforme Frost, (1983). Por esta razão foram desenvolvidos filtros adaptativos de Lee, (1981) e Frost, (1982) em Dallemand et al., (1993), os quais consideram para os cálculos, a heterogeneidade da cena, reduzindo o "speckle" e preservando as informações texturais.

Quanto a utilização destes métodos no conjunto de dados ERS-1, salienta-se que a Tabela 5.1 indica um procedimento multivisada com o número de "looks" processados igual a oito, o que degrada a resolução espacial de 12 X 12 m a 25 X 25 m.

#### b) Efeito Padrão de Antena

Dois fatores relativos a antena afetam a fidelidade radiométrica do imageamento SAR: o primeiro, denominado geometria de iluminação está ligado ao efeito causado pela variação do ângulo incidente no transcorrer do "near" ao "far range". O aumento do ângulo incidente ( $\theta$ ) é proporcional ao aumento do raio entre instrumento sensor e alvo. Vejamos o exemplo do modo estreito no imageamento SAREX BRA2.2, onde no "near range" com ângulo  $\theta = 45^\circ$  o raio R1 é igual a 8,5 km (Figura 5.1), enquanto que no "far range" um aumento no ângulo  $\theta$  para  $76^\circ$  eleva o raio R2 para 24,7 km. Como visto anteriormente, a potência do eco radar, é inversamente proporcional à terceira potência do raio,

para radares de abertura sintética, sendo assim no caso exemplificado a potência  $W_1$  no "near range" é dada por:

$$W_1 = 1/8,5^3 = 10^{-3} \quad (5.1)$$

enquanto que no "far range"  $W_2$  corresponde a:

$$W_2 = 1/24,7^3 = 6 \times 10^{-4} \quad (5.2)$$

ou seja  $W_1$  é cerca de 24,5 vezes maior que  $W_2$ , numa relação também conhecida como "R<sup>3</sup> potência perdida" de Ulaby, (1986).

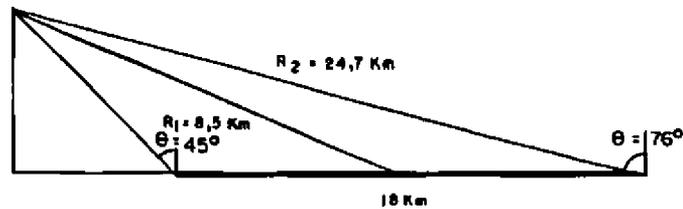


Fig. 5.1 - Exemplo modo estreito SAREX.

O segundo fator, diz respeito ao instrumento radar iluminar com maior potência a faixa do terreno correspondente ao ponto médio do seu lobo principal, Ulaby, (1986). Voltando ao exemplo do imageamento supracitado, a Figura 5.2a nos mostra as especificações técnicas da antena utilizada pelo SAR CV 580 do Projeto SAREX. Assim sendo, a Figura 5.2b complementa a ilustração mostrando que numa janela de transmissão de  $28^\circ$ , o ângulo que ilumina do centro ao "near range" ( $23^\circ$ ) encontra-se bastante deslocado do centro de potência máxima, enquanto que, o ângulo de iluminação do centro ao "far range" ( $7,8^\circ$ ) está no interior do lobo de potência máxima. Portanto, a iluminação no "far range", neste caso, terá mais potência que no "near range", compensando em parte o efeito descrito anteriormente.

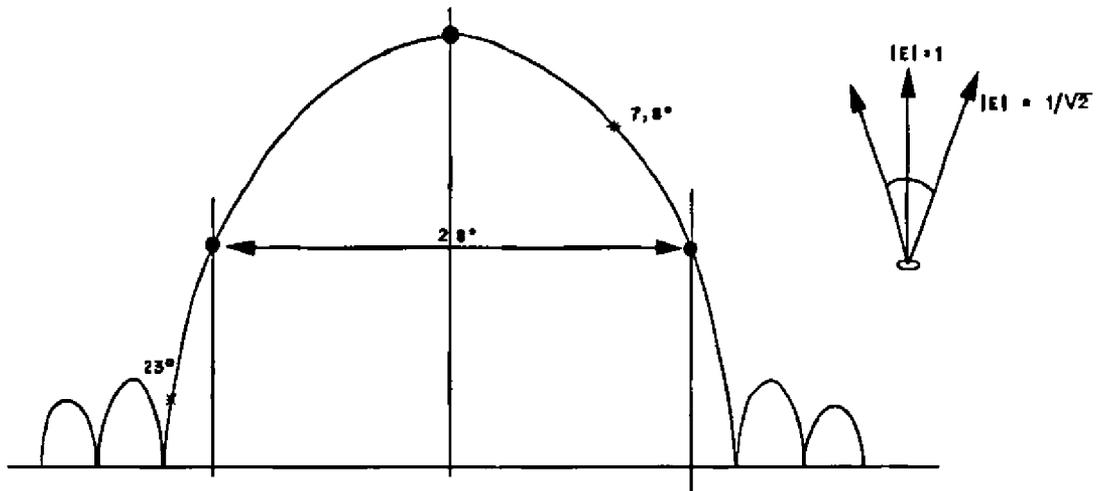


Fig. 5.2a - Gráfico de potência da antena SAREX Banda C - Largura de elevação da antena direcional (Janela de transmissão) -  $28^\circ$

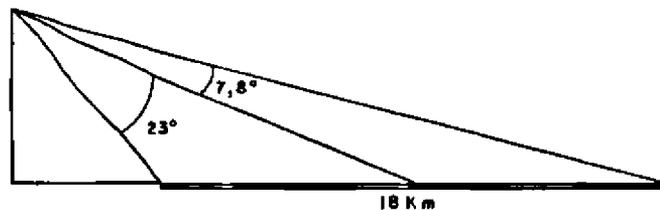


Fig. 5.2b - Exemplo: Modo estreito SAREX.

As correções destas distorções podem ser efetuadas a partir do conhecimento da quantia de potência perdida; através de medidas do padrão de antena na linha transversal a direção de voo. Um fator de correção pode vir a ser introduzido para a remoção de tais efeitos radiométricos, como é o exemplo do método APC ("Antenna Pattern Correction" - PCI V. 5.2) sugerido por Pietsch, (1993).

Sistemas SAR sofisticados, a exemplo do CV 580 SAREX e ERS-1, possuem um processamento em tempo real para acomodar largas variações do foco de retroespalhamento sobre superfícies homogêneas, denominado STC ("Sensitivity Time Control"), o qual diminui as variações sistemáticas devidas a antena, (Livingstone et al., 1987) em Hawkins e Teany, (1993).

Apesar, de evidências de correção do efeito padrão de antena, Grover e Quegan, (1993), demonstraram para dados SAREX sobre a região de Tapajós, uma nítida heterogeneidade na iluminação. Foi observado pelos autores supracitados, sistematicamente o "near range" obscurecido em relação ao restante da imagem. Tal fato, indica ter sido a calibração em tempo real exagerada, subvertendo as condições esperadas de uma iluminação homogênea.

A partir desta constatação, foi utilizada uma metodologia de calibração "pixel a pixel", baseada em uma constante empiricamente determinada com auxílio de um conjunto de "corner reflectors", conforme detalha Hawkins e Teany (1993), no trabalho sobre calibração dos dados SAREX'92.

### 5.3.2.2 - CORREÇÕES GEOMÉTRICAS

Objetivando um alto grau de precisão na posição das feições de superfície nas imagens SAR, são necessárias correções geométricas para compensar distorções introduzidas, tanto interna, como externamente, nos sistemas utilizados.

#### a) Distorções Geométricas Internas

A projeção natural do imageamento radar, é um plano inclinado na direção de iluminação, ao longo da qual, o objeto alvo é definido. Esta projeção não é fiel geometricamente a verdade terrestre, afetando, portanto, a interpretação da imagem. O processo para esta correção é denominado conversão de "slant" para "ground range". A relação entre estas projeções numa superfície horizontal é uma simples função trigonométrica que envolve o seno do ângulo incidente  $\theta_i$ .

$$R_g = R_s / \sin \theta_i, \quad (5.3)$$

onde  $R_s$  = "slant range" e  $R_g$  = "ground range"

O valor em "slant range" é sempre maior que em "ground range", e mudanças de  $\theta_i$  resultam em diferentes escalas de mudanças ao longo da largura da faixa de recobrimento, assim, a relação entre "slant" e "ground range" difere do "near" ao "far range". Tal fato, resulta na distorção máxima próxima ao nadir, nas imagens BRA2.3, BRA2.4 e BRA2.5, onde o  $\theta_i = 0$  no "near range" produz máximas mudanças de escala em "slant range" e comparativamente, poucas discrepâncias em "ground range".

#### b) Distorções Geométricas Externas

Estes tipos de distorções são induzidas por mudanças nas elevações da superfície alvo ou mudanças de atitude da plataforma de amostragem (velocidade, direção e altitude). A mudança na elevação da superfície de referência resulta em distorções conhecidas como encurtamento de rampa ("foreshortening") e em casos extremos, deslocamento proximal de cristas ("layover"), conforme Ulaby et al., (1986).

A correção destes efeitos requer processamentos adicionais; os quais são obtidos de duas formas: a primeira envolve a utilização de informação topográfica na forma de um modelo digital de terreno (DEM) e a segunda envolve a avaliação de estereopares e dados de interferometria.

No geral, dois métodos são propostos para a retificação de distorções do terreno com a utilização do modelo digital (DEM): o primeiro método envolve o registro da imagem SAR com uma imagem simulada gerada a partir do DEM, neste caso faz-se necessário um grande número de pontos comuns em ambas imagens, a fim de se gerar o coeficiente polinomial da função de correção.

Esta função é então usada para transformar as coordenadas da imagem radar nas coordenadas da simulação. Assim que a imagem SAR for co-registrada, uma rotina de reamostragem deve ser aplicada para retificar-se o formato. A precisão deste processo é função direta do número de pontos selecionados ou dos pontos de controle de campo e da qualidade do DEM usado.

O segundo método não requer a geração de uma imagem simulada, através de um DEM, nem se faz necessário um elevado número de pontos de controle. Emprega-se apenas um algoritmo desenvolvido pelo JPL (Curlander et al., 1987), o qual modela as distorções, com base nos dados de efemérides do instrumento radar, altitude da plataforma e a elevação local do terreno. No entanto, alguns pontos de controle são necessários para remover erros residuais de localização. No caso de variações muito expressivas nas altitudes da superfície, como na área de Carajás (desníveis de até 750 m), DEMs, usados em conjunção com a geometria de imageamento podem aprimorar a correção; que em resumo trata-se de um mapeamento dos "pixels" em "slant range" para sua respectiva posição geocodificada. A performance deste algoritmo demonstrou erros inferiores a 50 m para dados de SAR orbitais.

No entanto, tendo em vista as observações de MacDonald e Waite, (1971), que relatam um maior efeito distorcivo nas imagens em "ground range", que nas imagens em "slant range", para terrenos montanhosos, optou-se neste trabalho tanto para a análise visual, como para o processamento digital dos produtos SAR, pela projeção em "slant range", dado que, as correções em tempo real não levaram em conta o modelo digital de terreno da área estudada.

Quanto aos dados do sensor radar ERS-1, os produtos colocados em disponibilidade pelos laboratórios do INPE de Cachoeira Paulista - SP, apresentam-se georeferenciados e convertidos de "slant" para "ground range", através de um pacote de processamento da ESA.

### **5.3.3 - TÉCNICAS DE REALCE DE IMAGENS**

Sob este nome estão agrupados os conjuntos de procedimentos que basicamente visam melhorar a qualidade visual da cena, para o trabalho de fotointerpretação.

Dentro deste contexto, o item que segue coloca de forma sequencial as descrições das técnicas de realce utilizadas na dissertação, sendo que o conjunto aqui descrito é parte de uma gama maior de opções de tratamento de imagens digitais disponíveis no "software PCI" versão 5.2 (PCI, 1993).

O presente trabalho propõe o processamento das imagens radar disponíveis, utilizando alguns algoritmos consagrados para sensores multiespectrais e outros específicos dos instrumentos de microondas. Desta forma foram selecionados três diferentes tipos de realce

de contraste, dois filtros adaptativos, operações aritméticas (subtração e divisão) os quais serão pormenorizadas a seguir.

### 5.3.3.1 - REALCE DE CONTRASTE

Potencialmente os dados SAR tem um amplo intervalo dinâmico com intensidade variando de zero até níveis de  $10^7$ . Após processado o sinal é comprimido a níveis de intensidade com 8 bits, onde o intervalo de 0 a 255 é raramente ocupado em toda sua extensão. Tal fato acarreta uma grande redução do contraste, assim a idéia deste realce é redistribuir os valores de níveis de cinza por toda extensão do histograma da imagem.

O processo de manipulação usualmente consiste de duas etapas: a primeira, envolve a obtenção do histograma da imagem para conhecimento do estágio atual da distribuição dos níveis de cinza e para se programar cortes das curvas não representativas (ruídos). O segundo passo é o "stretch", propriamente dito, com o deslocamento do menor nível de cinza da imagem para zero e o maior para 255 ampliando assim o contraste.

Os critérios para esta redistribuição abrangeram neste trabalho três tipos de algoritmos: ampliação linear de contraste, equalização de histograma e ampliação não linear de Drieman; esta última específica para radar.

- a) **Ampliação Linear de Contraste:** trata-se da transformação mais simples das três, baseando-se na equação:

$$F(x) = A(x) + b \quad (5.4)$$

onde  $F(x)$  é o valor do nível de cinza do "pixel" de saída;  $x$  é o valor em nível de cinza original,  $A$  e  $b$  constantes que definem ganho e offset respectivamente. Desta forma um valor original  $F(x)_1$  é transformado para 0 (zero) e um valor  $F(x)_n$  é ajustado para o nível 255, sendo os valores intermediários entre  $F(x)_1$  e  $F(x)_n$  escalonados proporcionalmente.

- b) **Equalização de Histograma:** parte do princípio de que o contraste de uma imagem seria otimizado se todos os 256 níveis de intensidade fossem uniformemente distribuídos. Uma aproximação para isto é conseguido ao se espalhar os picos do histograma, deixando o restante da imagem intocada. Esse processo é obtido através de uma função de transferência que tenha uma alta inclinação toda vez que o histograma original apresentar um pico e uma baixa inclinação no restante do gráfico. A utilidade desta função é que imagens com extensas áreas de intensidade uniforme serão bastante realçadas, revelando detalhes previamente não perceptíveis.
- c) **Ampliação Não Linear de Contraste (Método de Drieman):** a função matemática desenvolvida por Drieman; (1988) em PCI, (1993); para implementar a ampliação de contraste, passa pelo cálculo da média e desvio padrão de toda imagem, a fim de determinar dois parâmetros de níveis de cinza ( $Z_1$  e  $Z_2$ ). O parâmetro  $Z_1$  corresponde ao valor da média menos duas vezes o desvio padrão, enquanto que  $Z_2$  corresponde a média mais duas vezes o desvio padrão. Desta forma, o intervalo 0 (zero) a  $Z_1$  representa 2,5% da imagem, o intervalo entre  $Z_1$  e  $Z_2$  representa 95% da imagem e conseqüentemente o intervalo  $Z_2$  e 255 (duzentos e cinquenta e cinco) representa os 2,5% restantes. Com isto, a ampliação de contraste é obtida tomando-se  $Z_1$  como 0 (zero) e  $Z_2$  como 255 (duzentos e cinquenta e cinco). O algoritmo desta função está

baseado em "Intera Technical Memo" escrito por J. Drieman, datado de 27 de outubro de 1988, em suporte a realce de imagens SAR utilizando o "software OIS"; PCI, (1993).

### 5.3.3.2 - FILTRAGENS

A filtragem é uma operação de realce que altera os valores dos "pixels" baseado nos valores de níveis de cinza da circunvizinhança; por esta razão a filtragem é considerada uma operação espacial.

Uma imagem digital contém informações espaciais de alta e baixa frequência. Altas frequências descritas por rápidas mudanças entre um "pixel" e outro (contatos litológicos, redes de drenagem, acessos, etc); e baixas frequências representadas por mudanças graduais sobre um amplo número de "pixels" (coberturas florestais, corpos d'água, etc).

Os filtros possuem a capacidade de separar somente os seus correlatos, isto é, filtro passa-alta atua somente no destaque de altas frequências, enquanto ocorre o mesmo no caso de filtros passa baixa.

Apesar dos resultados serem variados, o conceito geral da filtragem é o mesmo. Uma janela de filtro é definida, com dimensões de colunas e linhas ímpares sendo que cada "pixel" da janela contém um coeficiente. A imagem filtrada é gerada pela multiplicação de cada um desses coeficientes pelos níveis de cinza da imagem original, correspondentes a localização da janela. Sendo que, o resultado obtido será locado na posição de momento do "pixel" central da janela na nova imagem. Este processo denominado convolução deve atuar apenas com uma passagem por cada "pixel".

Existem muitos filtros disponíveis que podem ser aplicados a uma imagem digital, preferencialmente após esta ter tido o seu contraste ampliado, pois isto aumenta o intervalo útil onde operará o filtro escolhido, (PCI, 1993).

Os primeiros modelos de realce desenvolvidos especialmente para imagens SAR foram aplicados nos produtos do SEASAT, com propósito de ampliar o potencial destas imagens para o mapeamento geológico de áreas comumente encobertas por nebulosidade (Frost et al., 1983). O algoritmo de realce que foi projetado envolvia a primeira derivada de uma média mínima quadrada, que se resumia em um filtro para estimar a refletividade do alvo observado na imagem. Posteriormente, o algoritmo foi adaptado com dados de média e variância de refletividade de alguns alvos conhecidos, dando origem ao filtro adaptativo de Frost em 1981, o qual reduz o ruído "speckle" preservando os contornos, funcionando assim, como um fator de realce das estruturas de contato.

Por outro lado, o filtro de Lee desenvolvido em 1982, tem as mesmas funções que o anterior, entretanto com duas diferentes opções de operação, de acordo com o tipo de ruído. Sendo este de caráter aditivo, o filtro utiliza-se, para a remoção, de funções aditivas com o termo central da janela igual a 0 (zero), para a remoção de ruído. Sendo o ruído de caráter multiplicativo, a exemplo do "speckle", o filtro utiliza uma função multiplicativa com termo central da janela igual a 1 (um). Devido a complexidade matemática dos cálculos envolvidos, o filtro adaptativo de Lee, requer muito mais recurso operacional que o filtro adaptativo de Frost.

Cabe ressaltar que, este trabalho ficou restrito a utilização apenas destes dois algoritmos, a partir das conclusões de Sant'Anna (1994), que avaliou 11 filtros na redução do ruído speckle, observando os melhores resultados no realce de imagens para os filtros acima referidos.

### 5.3.3.3 - OPERAÇÕES ARITMÉTICAS

Um terceiro recurso na geração de produtos de processamento digital para auxílio à extração de dados geológicos reside no item operações aritméticas, conforme cita Lowman et al., (1987). Estes autores trabalharam em áreas do Escudo Canadense, gerando produtos a partir da divisão de imagens do radar SEASAT por imagens do radar SIR-B. Do resultado destas operações, observaram que os produtos gerados retinham informações topográficas e geológicas das duas fontes utilizadas. Deste modo, concluíram que a razão digital de imagens, tomadas com direções de iluminação ortogonais entre si tem o efeito de reduzir a influência deste fator na imagem resultante.

Tais observações e o recurso oferecido pelo "software PCI" em seu capítulo operações aritméticas (ARI) nos levaram a incluir, nesta metodologia, as operações:

- Divisão: "ratios" são produtos gerados pela divisão de imagens de uma mesma cena com características diferentes, a exemplo da polarização ou direção de iluminação. O processo de divisão atua para eliminar fatores igualmente distribuídos nos canais envolvidos (topografia p.ex.). O resultado é um produto imagem que melhor retrata a característica particular da feição de superfície.
- Subtração: gera produtos que partindo-se de uma mesma cena destacam as diferenças entre as imagens envolvidas. Tal processo muito pouco estudado no uso para produtos radar, será testado para imagens com diferentes polarizações de direções de visada.

### 5.3.3.4. - COMPOSIÇÕES COLORIDAS DAS IMAGENS SAR

A utilização de composições coloridas representa um recurso valioso quando se pretende obter um ganho na quantidade de informação a partir de uma única cena.

Fundamentalmente, isto ocorre pela própria característica do olho humano, capaz de discriminar com maior facilidade valores de matiz, que gradações de níveis de cinza.

A composição colorida resume em um só resultado, variações das características de alvos, sem prejuízo para as relações espaciais presentes na cena. Normalmente, a cada diferente característica é associada uma das cores primárias, em um sistema aditivo de síntese, denominado RGB. Deste modo as variações nas respostas espectrais dos alvos serão mostradas por cores diferentes e suas combinações na composição colorida.

## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 6.1 - ANÁLISE VISUAL DOS DADOS SAR CV 580

As imagens geradas a partir do sensor radar disposto na aeronave Convair-580 utilizada no projeto SAREX foram interpretadas em papel fotográfico na escala 1: 50.000.

Foi feita a opção pela análise dos produtos na projeção "slant range", já que a projeção em "ground range" apresentou-se bastante distorcida. Este problema deve-se ao fato de que a correção de projeção feita em tempo real conforme Wooding e Attema, (1992), não levou em conta o modelo digital do terreno; necessário no caso da área teste que apresenta uma brusca variação topográfica nos intervalos das faixas de recobrimento.

O produto escolhido para representar os recobrimentos SAREX em Salobo foi a faixa BRA2.2 HH em sua metade noroeste. A escolha recaiu sobre a referida imagem, devido ao fato desta apresentar a melhor média quanto a extração de dados geológicos e de aspectos gerais, dentre as diversas analisadas.

#### 6.1.1 - DISCRIMINAÇÃO DE ASPECTOS GERAIS

##### a) Drenagens

Uma das mais significativas feições interpretadas na imagem radar é a drenagem. Usualmente, esta é definida e relativamente fácil de ser traçada. O desenho da malha hidrográfica de uma área é controlado por fatores litológicos e estruturais representados pelo grau de declividade das encostas, permeabilidade do substrato e fraturamento do maciço rochoso, Trevett (1986).

A área de Carajás é um exemplo desta afirmação, como ilustra a Figura 6.1, onde pode ser visualizado o controle estrutural sobre a orientação dos elementos texturais de drenagem na faixa de influência da Falha de Carajás, (DOCEGEO, 1988) na região Salobo-Pojuca da imagem BRA2.5 HH.

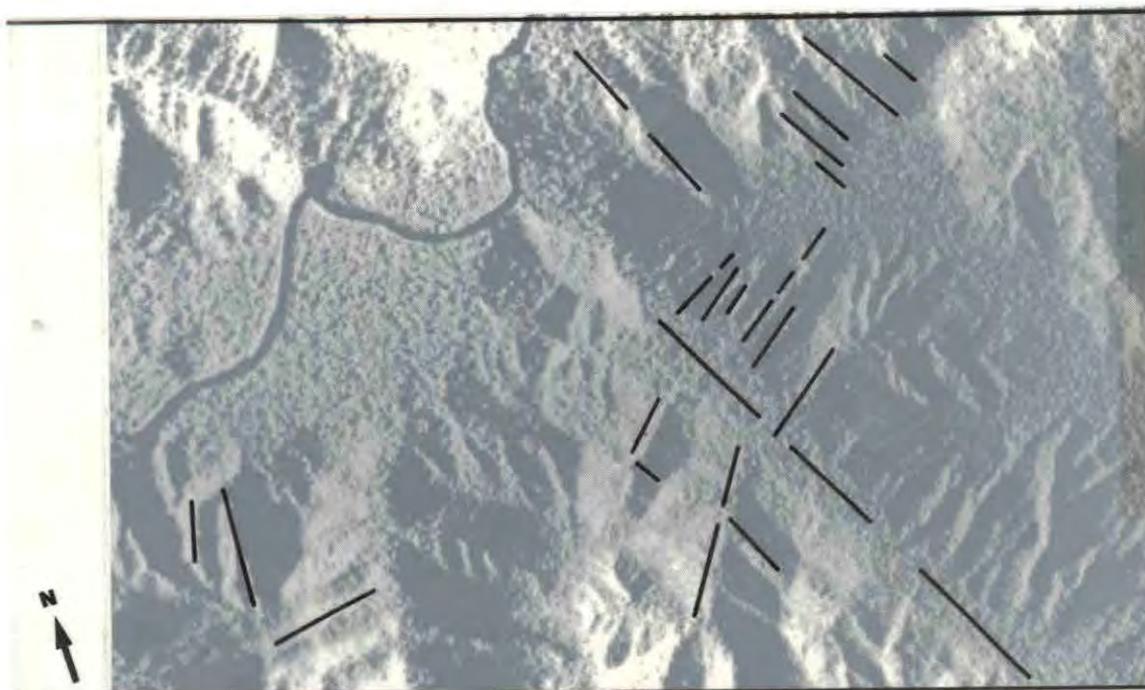


Fig. 6.1 - Típico padrão de elementos texturais de drenagem orientados segundo direções  $N60^{\circ}W$  e  $N30^{\circ}E$  na área Salobo-Pojuca - faixa BRA2.5 HH escala aproximada 1: 50.000.

Nas imagens SAREX, a maior drenagem regional, o rio Itacaiúnas, é visualizado devido a sua largura de 150m; e a reflexão especular causada pela interação feixe de microondas e a água, que faz com que o desenho do rio apareça como uma forma sinuosa e preta cortando a área de estudo na direção SW-NE. Nos trechos alinhados no sentido EW são visíveis também, no produto do modo estreito, bancos de areia que delimitam com clareza as margens desta drenagem. A alta resolução permite ainda, o mapeamento de pequenas ilhas no leito deste curso d'água.

Por outro lado, as drenagens tributárias são reveladas mais pela reflexão das margens dos vales, pela vegetação associada e pelo padrão em treliça, do que propriamente pela detecção de água em seus canais, Ford (1980).

A observação acima, também é válida para a área de estudo, pois como mostra a Figura anterior, o delineamento dos vales em forma de V desenhadas em metassedimentos do Grupo Rio Fresco, (DOCEGEO, 1988), são bastante claros, mesmo sem a visualização do curso d'água. Pode-se delimitar drenagens na área estudada também através da vegetação associada às faixas de aluvião (classe G - Figura 2.2), pois estas apresentam textura lisa contrastante às associações da circunvizinhança; conforme ilustra a Figura 6.2.



Fig. 6.2 - Ilustração de atributos gerais mapeáveis na faixa BRA2.2 escala aproximada

1: 50.000:

1 - Foz do rio Cinzento junto ao rio Itacaiúnas;

2 - Pista de pouso; e

3 - Diferença na tonalidade e textura marcando a ocorrência da vegetação tipo G associada a aluviões, em contato com vegetação da classe F associada ao substrato rochoso do Complexo Xingu.

Apesar das diversas facilidades até então demonstradas no mapeamento da rede de drenagem nas imagens SAREX, ressalva-se que alguns empecilhos foram notados: 1- o denso recobrimento vegetal prejudica a visualização de pequenas drenagens nas regiões de platô, 2- a determinação correta no posicionamento dos leitos dos rios é problemática nas áreas sombreadas, e 3- ocorre certa dificuldade na definição de drenagens orientadas segundo direção paralela à orientação de visada do sensor de microondas.

#### b) Estradas

O acesso a área Salobo é feito através de uma estrada de terra a partir do acampamento N1, colocado a cerca de 70 km do centro da região mapeada. Este caminho está disposto aproximadamente numa diagonal SE-NW na metade leste do mapa gerado a partir da faixa BRA2.2 HH, (apêndice A). O trecho mapeado possui largura média de 15m no leito carroçável, sendo que alguns pontos aparecem encobertos pela vegetação, em especial nas vicinais próximas ao acampamento Salobo.

Tendo em vista as características acima expostas; no produto analisado as estradas são definidas, mesmo nas regiões parcialmente encobertas, devido a altíssima resolução (6m) do SAR CV580 e também pelo contraste ocasionado no contato entre o leito trafegável desmatado e as árvores da floresta.

Este contato é delineado por trechos de sombreado originados pelas árvores dispostas no lado da estrada mais próximo ao "near range", e também por trechos de intensa reflexão ocasionados pelas árvores no outro lado da estrada dispostas de frente à iluminação do sensor.

A nitidez deste contato depende da orientação do leito da estrada em relação à direção de visada do radar, sendo que uma certa dificuldade é notada no delineamento dos acessos quando ocorre o paralelismo destes com o referido parâmetro do sensor.

### c) Desflorestamentos

As regiões, na área estudada, desprovidas de recobrimento florestal são fáceis de serem visualizadas (Figura 6.3), devido principalmente a dois motivos: 1- as áreas desflorestadas aparecem com uma textura lisa que contrasta muito com a textura granular emprestada pela vegetação arbórea resolvida pelo sensor SAR CV 580; e 2- os limites destes trechos de ausência de vegetação são bem demarcados pelo seu caráter geométrico regular e também pelo efeito de contraste, sombreado e reflexão intensa, citada no item anterior quando do mapeamento dos acessos à área estudada.

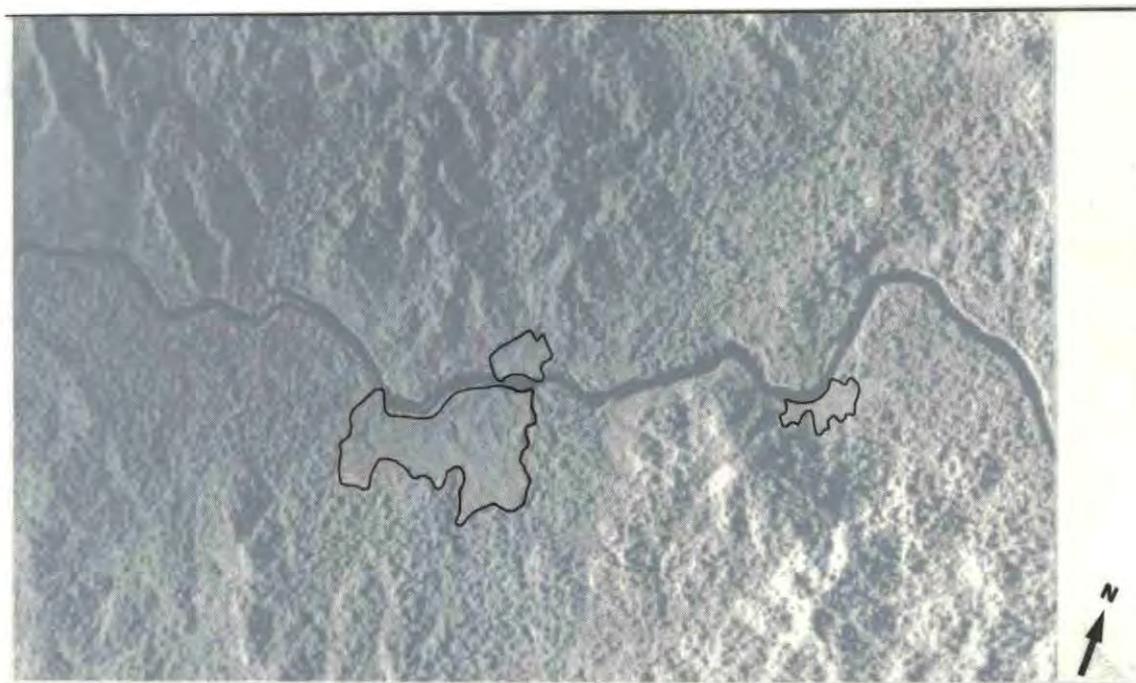


Fig. 6.3 - Visualização dos trechos desflorestados na faixa BRA2.2 HH; notar textura lisa e os contatos regulares que os limitam. Escala aproximada 1: 50.000.

### 6.1.2 - DISCRIMINAÇÃO LITOLÓGICA

Foram discriminadas, nos produtos SAREX analisados, 20 unidades fotolitológicas para a área de estudo. Cada uma destas unidades encontra-se caracterizada nas Tabelas que seguem à individualização das associações litoestratigráficas descritas nos itens 2.3 e 2.4; com base nas publicações prévias e trabalho de campo.

Os contatos entre estas unidades fotolitológicas estão marcados por quebras de relevo do tipo negativas, as quais são visualizadas nas imagens de radar de dois modos distintos: o primeiro na face voltada para o instrumento imageador, estando a quebra localizada no contato da zona mais iluminada com a zona de iluminação mais suave, sempre no sopé das elevações. O segundo modo encontra-se na face que se coloca do lado contrário a iluminação, sendo assim, a quebra negativa encontra-se no contato da zona sombreada com a região iluminada, coincidindo normalmente com os vales.

#### 1) Complexo Xingu

Trata-se da associação de distribuição mais vasta na área de estudo, compondo cerca de 50% do mapa no apêndice I. As publicações de DOCEGEO, (1988); Macambira et al., (1990) e Siqueira, (1990); relacionam a ocorrência destas rochas, de caráter granito gnáissicas como representantes do embasamento Arqueano na Província Mineral de Carajás, sem individualizar nos mapas os tipos rochosos que compõem este Complexo.

No entanto, no presente trabalho fica claro a discriminação de duas associações (Xingu 1 e Xingu 2), as quais apresentam nítida distinção nos produtos radar analisados, conforme demonstra a Tabela 6.1 e ilustra a Figura 6.4.

Veneziani et al., (1994), também subdividem a Unidade Xingu, a partir de dados do SAREX para a área do Pojuca/N1.

TABELA - 6.1 - COMPLEXO XINGU - ARQUEANO

UNIDADE	LITÓTIPO	TEXTURA	ESTRUT.	TROPIA	PERMEABILIDADE	RESISTÊNCIA EROSÃO	TONALIDAD E
Assoc. Xingu 1 (E1)	Gnaisses Granodioritos Granitos Migmatizados	Densidade alta	Reticulada (4ª Ordem)	Multi direcional Ordenada	Baixa	Média	Cinza Médio
Assoc. Xingu 2 (E2)	Paragneisses Anfibolíticos	Densidade baixa	Pouco Definida	Multi direcional Pouco Ordenada	Média	Baixa	Cinza Claro



Fig. 6.4 - Diferenças texturais, estruturais e de tonalidade entre as associações Xingu 1 (E1) e Xingu 2 (E2), na faixa BRA2.2 HH escala 1: 50.000.

## 2) Supracrustais do Grupo Salobo

O conjunto litológico que compõe o Grupo Salobo ocupa a área do Duplex Salobo Mirim de Siqueira, (1990), representado no mapa anexo pelas unidades fotointerpretadas dispostas na faixa noroeste da região trabalhada.

Estas unidades fotolitológicas são correspondentes a estratigrafia proposta pelo autor citado acima, obtida com extensivos trabalhos de campo durante a fase de prospecção da jazida cuprífera de Salobo (vide mapa Figura 2.4 pág. 10).

A Tabela 6.2 apresenta as principais características que originaram a discriminação das seis unidades litológicas no Duplex Salobo Mirim e a Figura 6.5 ilustra parcialmente a disposição geográfica destas.

TABELA - 6.2 - GRUPO SALOBO - ARQUEANO

UNIDADE	LITOTIPO	TEXTURA	ESTRUT.	TROPIA	PERMEABILIDADE	RESISTÊNCIA EROSÃO	TONALIDADE
C <sub>1</sub>	Clorita Xistos e Metavulcânicas	Densidade baixa	Indefinida	Multi direcional não ordenado	Média a Baixa	Muito Baixa	Cinza escuro Homogênea
C <sub>2</sub>	Xistos e Form. Ferrif. Subordinadas	Densidade média	Definida 1ª ordem	Bidirecional Preferencial	Média	Baixa	Cinza escuro Sombreado
C <sub>31</sub>	Formação Ferrif. Bandadas	Densidade média	Definida 2ª ordem	Unidirecional Preferencial	Média	Moderada a Alta	Saturada traços retilíneos
C <sub>32</sub>	Formação Ferrif. Maciça	Densidade média	Definida 2ª ordem	Bidirecional Preferencial	Baixa	Moderada a Alta	Cinza médio
C <sub>4</sub>	Qz clorita xistos e quartzitos associados	Densidade média	Definida 3ª ordem	Bidirecional Preferencial	Baixa	Moderada a Alta	Cinza médio
C <sub>5</sub>	Quartzitos	Densidade média	Definida (fragmentada)	Multidirecional (preferencial p/ EW)	Baixa	Alta	Cinza claro (saturado nas cristas)

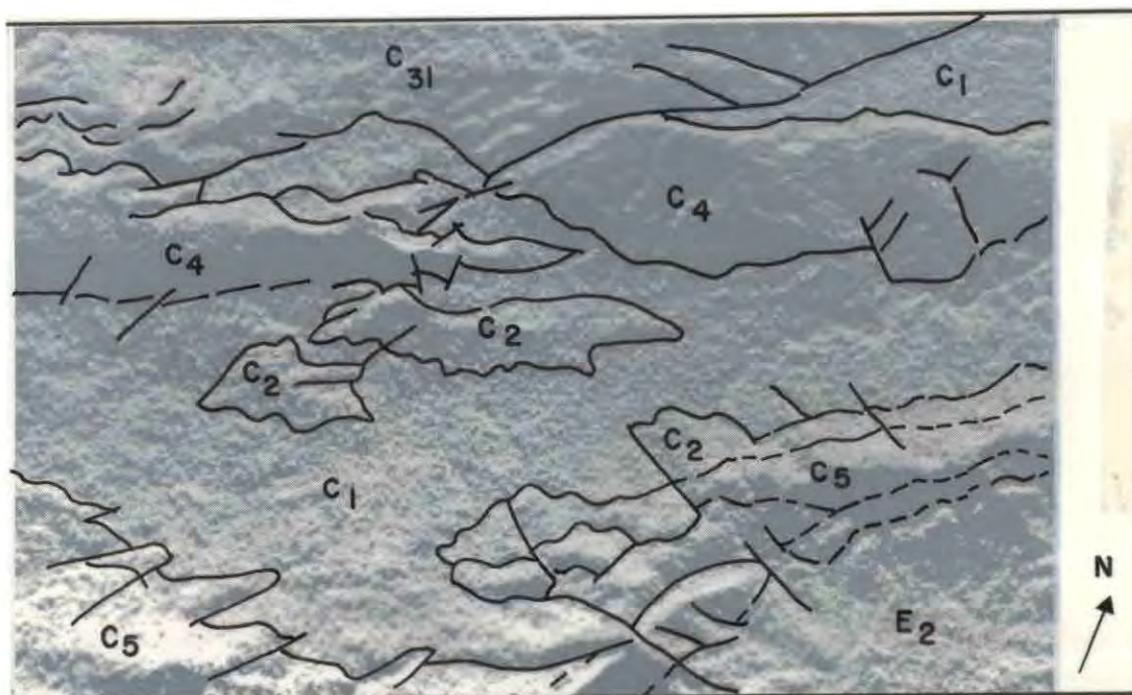


Fig. 6.5 - Distribuição de algumas das litologias discriminadas na área do Duplex Salobo Mirim: C<sub>1</sub> - clorita xistos e metavulcânicas; C<sub>2</sub> - xistos com formações ferríferas bandadas subordinadas; C<sub>31</sub> - formação ferrífera bandada; C<sub>4</sub> - clorita quartzito; C<sub>5</sub> - quartzitos e E<sub>2</sub> - Associação Xingu-2 (paragneisses e anfíbolitos); no produto da faixa BRA2.2 HH; Área Salobo escala 1: 50.000.

Esta ilustração propicia a observação de algumas coincidências e divergências entre o produto fotointerpretado e o mapa geológico de Siqueira (1990). As semelhanças são atribuídas às áreas mapeadas como xistos associados a formações ferríferas e as áreas de ocorrência de formações ferríferas à grunerita e magnetita; que são correspondentes respectivamente às unidades C<sub>2</sub> e C<sub>31</sub> no apêndice A.

No entanto, nas regiões onde Siqueira atribui ocorrência à unidade de gnaisses anfibolíticos, foi possível a discriminação de duas unidades: C<sub>1</sub>- correspondentes a metavulcânicas e xistos e C<sub>4</sub>- clorita quartzo xistos, a qual apresenta elementos texturais de relevo em número elevado o que a diferencia de C<sub>1</sub> e portanto dos anfibólio gnaisses.

Outro ponto divergente, está no mapeamento, da unidade gnaisses migmatíticos na área paralela ao leito do rio Salobo, onde foi possível detectar a ocorrência das unidades C<sub>1</sub> e E<sub>2</sub> (clorita xistos/metavulcânicas e paragneisses e anfibolitos, respectivamente). Estas duas unidades encontram-se no contato do Grupo Salobo, representado por C<sub>1</sub> e a Associação Xingu 2 (E<sub>2</sub>), sendo portanto diferentes da unidade de Siqueira pertencente ao embasamento migmatítico do Complexo Xingu.

Um terceiro ponto discordante ocorre na estrutura retilínea a sul da Figura, onde Siqueira atribui ocorrência de uma única unidade quartzítica, enquanto que no produto interpretado é possível separar uma unidade xistosa (C<sub>2</sub>) e uma quartzítica (C<sub>5</sub>), paralelas a direção E W.

### 3) Supracrustais do Grupo Pojuca

Tendo por base as publicações de DOCEGEO, (1988), Macambira et al., (1990) e Rolim, (1993), parte da ocorrência do Grupo Pojuca, também foi mapeada neste trabalho, como mostra o mapa fotogeológico anexo.

As unidades discriminadas foram em número de quatro que corresponde a finalização de uma estrutura lenticular. Esta subdivisão está de acordo com a continuidade das divisões mapeadas por Veneziani op. cit. na área de Pojuca leste.

A Tabela 6.3 resume os caracteres discriminados entre as unidades litoestratigráficas.

**TABELA 6.3 - GRUPO POJUCA - ARQUEANO**

UNIDADE	LITOTIPO	TEXTURA	ESTRUTURA	TROPIA	PERMEABILIDADE	RESISTÊNCIA EROSÃO	TONALIDADE
D <sub>1</sub>	Clorita Xistos Metavulcânicas Metasedimentos	Densidade baixa	Indefinida	Multi direcional desordenado	Média a Baixa	Baixa	Cinza escuro Homogênea
D <sub>2</sub>	Form. Ferr. Bandedas e Metasedimentos	Densidade média	Definida 2ª ordem	Unidirecional Preferencial	Média a Alta	Moderada a Alta	Cinza Claro
D <sub>3</sub>	Metasedimentos	Densidade média	Pouco definida 1ª ordem	Multi direcional desordenado	Média	Moderada	Cinza Médio
D <sub>4</sub>	Metarenitos arcosos nos	Densidade média	Definida 1ª ordem	Unidirecional	Alta	Moderada a Alta	Cinza médio (liso)

### 4) Coberturas do Grupo Rio Fresco

Posicionada no extremo sudeste da área mapeada, as ocorrências do Grupo Rio Fresco, nas publicações disponíveis, são generalizadas como coberturas metassedimentares de idade Proterozóica não sendo diferenciadas quanto a faciologia destes sedimentos.

No entanto, a imagem SAREX estudada, mostra claramente na Figura 6.6 algumas quebras negativas atribuídas a diferentes fácies sedimentares, as quais foram confirmadas por perfilagem de campo de Gouveia, (1989), trabalhos de Rolim (1993) e Veneziani et al., (1994).

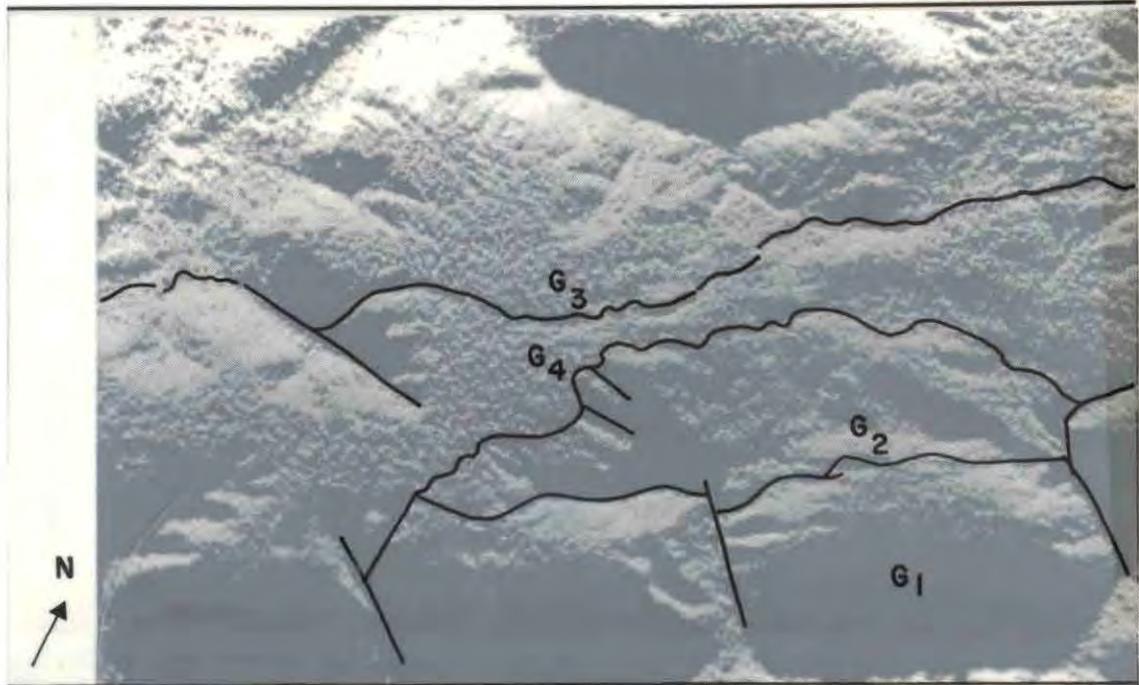


Fig. 6.6 - Ocorrência do Grupo Rio Fresco no produto BRA2.2 HH com a delimitação das unidades faciológicas: G<sub>1</sub>- metarenitos; G<sub>2</sub>- metasiltitos; G<sub>3</sub>- metarenitos e metargilitos intercalados e G<sub>4</sub>- metassedimentos diversos intercalados, escala 1: 50.000.

Tendo em vista esta separação, a Tabela 6.4 caracteriza cada uma das unidades discriminadas.

**TABELA 6.4 - GRUPO RIO FRESCO - PROTEROZÓICO**

UNIDADE	LITOTIPO	TEXTURA	ESTRUTURA	TROPIA	PERMEABILIDADE	RESISTÊNCIA EROSÃO	TONALIDADE
G <sub>1</sub>	Metarenitos	Densidade baixa	Definida	Unidirecional	Média a Baixa	Alta	Cinza Escuro
G <sub>2</sub>	Metasiltitos	Densidade média	Mediamente definida	Isotrópico	Alta	Média a Baixa	Cinza Médio (Homôgeneo)
G <sub>3</sub>	Metarenitos/ Argilitos Intercalados	Densidade média	Definida 3ª ordem	Tridirecional	Baixa	Moderada	Cinza Escuro
G <sub>4</sub>	Intercalação de metassedimentos	Densidade média	Pouco definida	Multidirecional preferencial p/N50W	Alta	Baixa	Cinza médio (Homôgeneo)

### 5) Granito Tipo Serra dos Carajás

A ocorrência desta litologia é restrita ao extremo leste da área mapeada, no interior da lente estrutural do Grupo Pojuca, sendo descrita por DOCEGEO, (1988) e Rolim, (1993), como um granito do tipo intrusivo composto por feldspato potássico, plagioclásio e quartzo, com idade provável de 2Ga (Proterozóico Médio).

As principais características discriminantes desta unidade encontram-se resumidas na Tabela 6.5.

**TABELA 6.5 - GRANITO CARAJÁS - PROTEROZÓICO MÉDIO**

UNIDADE	LITOTIPO	TEXTURA	ESTRUTURA	TROPIA	PERMEABILIDADE	RESISTÊNCIA EROSAO	TONALIDADE
F	Granito	Densidade média	Indefinida	Multidirecional desordenada	Média	Média	Cinza Médio

### 6) Coberturas Lateríticas

As coberturas lateríticas são de distribuição generalizada na área de estudo, sendo mapeada localmente por Siqueira, (1990), em alguns platôs do Duplex Salobo-Mirim. Dado o interesse analítico desta dissertação todos os platôs passíveis de mapeamento foram observados e as características de discriminação desta cobertura Terciária foram colocadas na Tabela 6.6; disposta abaixo.

**TABELA 6.6 - COBERTURAS LATERÍTICAS TERCIÁRIAS**

UNIDADE	LITOTIPO	TEXTURA	TROPIA	PERMEABILIDADE	RESISTÊNCIA EROSAO	TONALIDADE
B	Laterita Aluminosa Ferruginosa	Densidade baixa	Isotrópico	Média	Baixa	Cinza Médio Homogêneo

### 7) Aluviões e Colúvios

Finalmente, foram também caracterizadas as ocorrências de aluviões, eluviões e colúvios, dispostos associados às drenagens atuais e escarpas com rochas de baixa resistência a erosão. Na bibliografia disponível, apenas alguns mapas de detalhe de jazidas, atribuídos a DOCEGEO, levam em conta a discriminação destas unidades sedimentares.

Dado a facilidade de mapeamento destes sedimentos (Figura 6.2) e do nível de escala trabalhada, o mapa da faixa BRA2.2 HH apresenta as referidas unidades discriminadas, assim como a Tabela 6.7 traz as suas caracterizações resumidas.

TABELA 6.7 - COBERTURAS QUATERNÁRIAS

UNIDADE	LITOTIPO	TÊXTURA	ESTRUTURA	TROPIA	PERMEABILIDADE	RESISTÊNCIA EROSÃO	TONALIDADE
A <sub>1</sub>	Sedimentos imaturos não selecionados aluviais						Uniforme Pontuada Cinza Médio
A <sub>2</sub>	Sedimentos elúvicos e colúvicos					Baixa	Cinza Escuro

### 6.1.3 - DISCRIMINAÇÃO DE ESTRUTURAS

Os produtos SAREX analisados proporcionam o mapeamento das direções estruturais observadas durante os levantamentos de campo na região de Salobo e Pojuca, por DOCEGEO (1988) e Siqueira (1990).

As feições estruturais foram visualizadas de maneiras distintas de acordo com o aspecto topográfico da área analisada. Nas regiões de relevo mais movimentado estas feições são representadas por vales retilíneos, cristas e escarpas formadas pelo alinhamento dos corpos litológicos e representados na imagem pelos contatos entre zonas sombreadas e iluminadas. Por outro lado nas áreas de relevo arrasado a distinção destas estruturas faz-se através de pequenos trechos retilíneos de drenagens e mais comumente por feições lineares de alternâncias tonais originadas pelo sombreamento das litologias que sustentam o relevo. Estes aspectos foram também observados por Liu et al., (1994) durante análise preliminar dos lineamentos extraídos com dados SAREX conforme ilustra a Tabela 6.8.

TABELA - 6.8 SISTEMAS DE LINEAMENTOS EXTRAÍDOS DO PRODUTO DA FAIXA BRA2.2

MODOS	FAIXA ESTREITA
DIREÇÃO DE VÔO	N50°W (AZIMUTE 130°)
DIREÇÃO DE ILUMINAÇÃO	S40°W
SISTEMAS DE LINEAMENTOS	(A) N65°W
	(B) NS
	(C) N70°E
	(D) FEIÇÕES CIRCULARES

FONTE: Liu et al., (1994)

Regionalmente destaca-se um "trend" estrutural representado pela direção N55°-70°W, a qual corresponde ao traço geral da foliação milonítica nos gnaisses das Associações Xingu e boa parte do desenho estrutural da lente que engloba as litologias do Grupo Pojuca no sudeste da área mapeada. No entanto, a feição mapeada que mais destaca esta direção é a zona de cisalhamento secundária que compõe a parte interna do Duplex Salobo-Mirim; Siqueira, (1990). Esta feição é caracterizada por um bandamento composicional regular inclinado para SW conforme ilustra o apêndice A.

Outras feições que encontram-se alinhadas segundo a direção NW-SE são falhas sinistrais correspondentes as estruturas tipo P de Riedel no conjunto de falhamentos transcorrentes tardios segundo classificação de Siqueira e Costa (1991). Ressalta-se que este

Último conjunto estrutural citado, tem direção próxima a  $N70^{\circ}W$  e é melhor detectado na imagem BRA2.4 HH do modo nadir.

A segunda feição em número de traços, corresponde ao alinhamento estrutural sub meridiano (NNE-SSW) atribuído pelos autores supracitados a pequenos falhamentos transcorrentes de movimentação dextral ligados a estrutura R' de Riedel. Esta estrutura foi melhor visualizada no produto BRA2.2 HH, na qual o conjunto de alinhamentos desenha uma foliação milonítica com direção N-S.

Na sequência, aparece melhor detectada nos produtos BRA2.2 HH e BRA2.5 HH, a direção estrutural  $N70^{\circ}-80^{\circ}E$  correspondente ao alinhamento da zona de cisalhamento retilínea de Siqueira, (1990); desenhada pela alternância de quartzitos, xistos e formações ferríferas, com postura sub vertical. Outras feições que se encaixam neste direcionamento são os alinhamentos das drenagens Salobo e Cinzento, conforme ilustrado no apêndice A.

Subordinadamente, é possível detectar as feições retilíneas atribuídas ao conjunto de falhas transcorrentes sinistrais classificadas por Siqueira e Costa como estrutura do tipo R de Riedel, com direção  $N40^{\circ}E$ , especialmente no produto da imagem BRA2.4 HH.

A zona de cisalhamento curvilínea a norte do Duplex Salobo-Mirim, assim como a falha Carajás estão representados no segmento mapeado (apêndice A) por pequenos trechos, os quais encontram-se alinhados sub paralelamente ao "trend" estrutural da área, ou seja,  $N60^{\circ}-70^{\circ}W$ .

## **6.2 - ANÁLISE VISUAL DOS DADOS DO SAR ERS-1**

O mapa fotogeológico da Figura 6.7 obtido com a interpretação da imagem do radar orbital europeu ERS-1 (SAR - Banda C, Polarização VV), em projeção "ground range", resolução 25 X 25m, mostrou correspondência com as publicações até então disponíveis na mesma escala.

O produto fotográfico analisado cobre uma área de aproximadamente 1.600  $km^2$  com centro geográfico em Salobo, na escala 1: 100.000, correspondente a parte do imageamento feito em 24 de abril de 1992, pela órbita descendente 4048, caracterizada por uma direção de visada  $N78^{\circ}W$ .

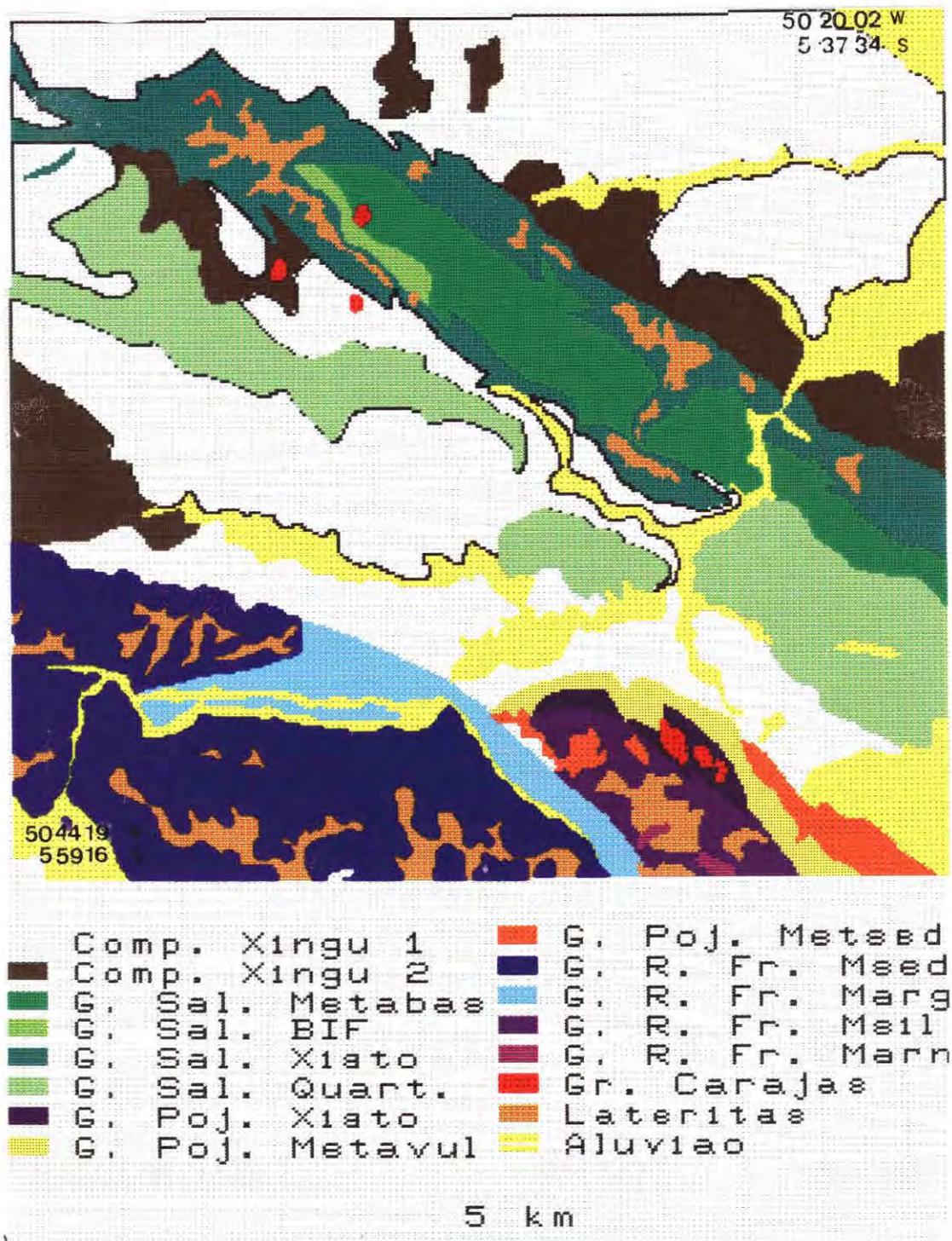


Fig. 6.7 - Mapa Fotogeológico da área de Salobo (ERS-1).

### 6.2.1 - DISCRIMINAÇÃO DE ASPECTOS GERAIS

### a) Drenagens

Como visto, nos resultados obtidos para o imageamento CV 580 (SAREX), um dos fatores mais importantes para o mapeamento de drenagens é a resolução. Sendo assim, a resolução inferior do instrumento radar do ERS-1 limita muito a visualização dos canais e vales dos cursos d'água na região mapeada. Ainda assim, o rio Itacaiúnas, devido ao seu porte, é perfeitamente definido pelo seu desenho sinuoso e cor negra - (Figura 6.8 -1).

Por outro lado os tributários podem ser inferidos apenas pelo aspecto típico, emprestado pelo desenho dos vales nas regiões com alto relevo, sempre levando-se em conta, a distorção inerente ao efeito de "layover" que se apresenta no produto ERS-1 nestas áreas como ilustra a Figura 6.8 -2.

Nas áreas de ocorrência das Associações Xingu onde o relevo é mais arrasado, pode se distinguir duas situações: a primeira nas regiões de gnaisses migmatizados ( $E_1$ ) onde é possível visualizar com clareza os canais de drenagem entre as colinas; e a segunda nas regiões de ocorrência da unidade de paragnaisses/anfibolito ( $E_2$ ) onde a fotoleitura dos elementos de drenagem fica muito prejudicada devido a ocorrência de ruído "speckle", (Figura 6.8 -3).

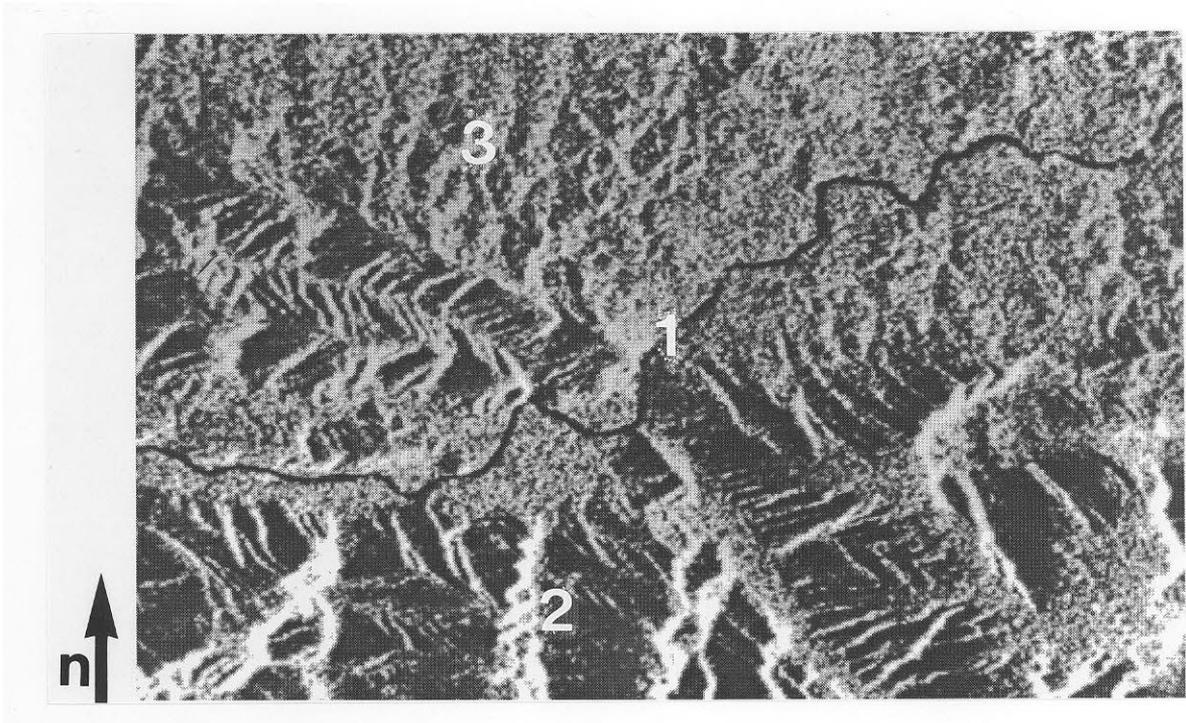


Fig 6.8 - Ilustração do produto ERS-1 quanto a extração de elementos texturais de drenagem: 1- leito do rio Itacaiúnas na região da falha de Carajás; 2- efeitos combinados de "layover" e "foreshortening" prejudicando a visualização de tributários nas áreas de alto relevo e 3- aspectos das drenagens em trechos de relevo arrasado (unidades  $E_1$  e  $E_2$ ), escala 1: 100.000.

### b) Estradas e Desflorestamentos

Novamente, a pior resolução do radar orbital ERS-1 explica a não visualização dos acessos terrestres à área de estudo. Porém, outro motivo que não possibilita nenhuma constatação do contraste entre o leito da estrada e a floresta circundante, é a ocorrência do ruído "speckle" que gera na imagem um aspecto "pipocado", o qual prejudica sobremaneira a interpretação, inclusive das áreas de desflorestamentos que por suas extensões estariam dentro do intervalo de resolução do SAR analisado. (Figura 6.9).

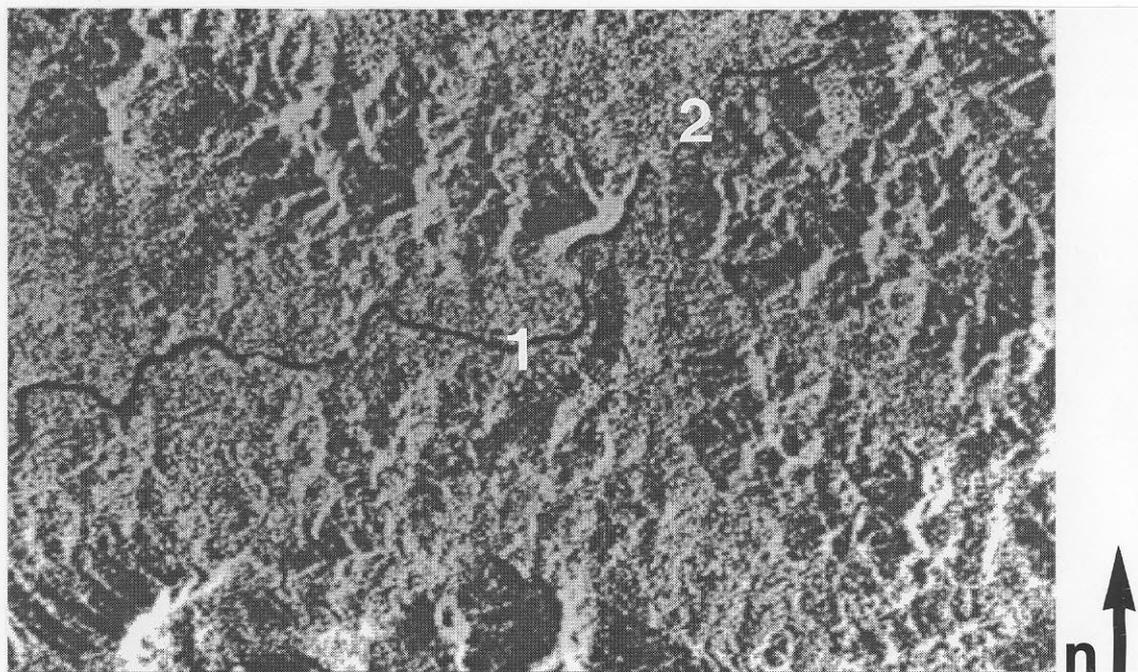


Fig. 6.9 - Ilustração demonstrando o prejuízo causado pelo ruído "speckle" na extração de feições dos acessos terrestres (1) e áreas desflorestadas (2), escala 1: 100.000.

### 6.2.2 - DISCRIMINAÇÃO LITOLÓGICA

Foram discriminadas, no produto ERS-1 analisado, 16 unidades fotolitológicas para a área estudada. Da mesma forma, que para os produtos SAREX, os resultados aqui foram comparados às publicações existentes na mesma escala de mapeamento, sendo assim distribuídos:

#### 1) Complexo Xingu

Também nos produtos ERS-1 é possível a subdivisão de duas unidades distintas para o embasamento granito gnássico da área estudada. Os caracteres texturais da Associação Xingu 1 ( $E_1$ ) são visualmente mais grosseiros e portanto devem ser interpretados como pertencentes a uma unidade com mais elementos texturais de relevo e conseqüentemente mais resistentes a erosão. Por outro lado o aspecto homogêneo e isento de elementos texturais de relevo na Associação Xingu 2 ( $E_2$ ), levam a interpretação de um terreno arrasado sustentado por rochas metassedimentares e metavulcânicas pouco resistentes a erosão. A presença destas distintas respostas para estas unidades nas imagens SAREX e

agora nas imagens ERS-1, e não mapeadas previamente, enfatiza a importância do uso dos dados SAR na detecção de unidades litológicas neste tipo de ambiente.

## **2) Supracrustais do Grupo Salobo**

Quatro unidades fotolitológicas foram individualizadas na análise da imagem ERS-1 para a área do Duplex Salobo-Mirim de Siqueira (1990). Em relação a interpretação do produto BRA2.2 HH (SAREX), houve dificuldade na discriminação das unidades C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> e C<sub>5</sub>, respectivamente xistos, formações ferríferas e quartzitos na área de ocorrência da zona de cisalhamento retilínea no limite sul do Duplex, (Siqueira, op. cit.).

Os fatos que explicam esta pior performance passam pela influência dos parâmetros resolução e direção de visada, além do efeito distorcivo de "layover" e "foreshortening" devidos ao baixo ângulo incidente.

A espessura dos limites entre as três unidades fotolitológicas não é representada por aspectos capazes de serem "resolvidos" pelo sensor orbital. Além da pequena espessura, os traços estruturais que desenham os contatos litológicos encontram-se sub paralelos a direção N78°W (visada do sensor), o que acarreta prejuízo na visualização dos mesmos.

Somados a estes aspectos, é, notado nesta área uma grande distorção atribuída aos efeitos "layover" e "foreshortening" inerente à geometria de visada (ângulo incidente 23°) do sensor radar a bordo do ERS-1; (Figura 6.10).

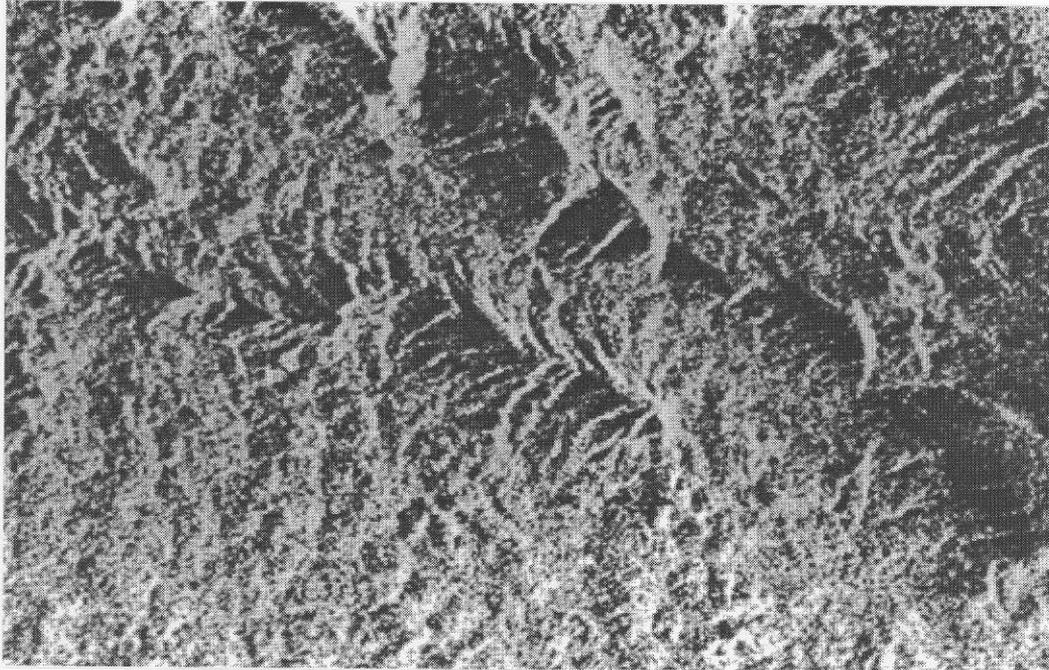


Fig. 6.10 - Ilustração da área centrada em Salobo; notar o efeito "layover" e "foreshortening", e a impossibilidade de se discriminar as unidades C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> e C<sub>5</sub>, separadas nos produtos SAREX conforme mostrado na Figura 6.5. Escala aproximada 1: 100.000.

### 3) Supracrustais do Grupo Pojuca

A ocorrência do Grupo Pojuca, representada pela lente estrutural desenhada por intercalações sub verticais de formações ferríferas e metassedimentos (DOCEGEO, 1988); apresenta ainda a discriminação de mais uma unidade atribuída a clorita xistos e anfibolitos nas zonas mais arrasadas desta estrutura.

As litologias arqueanas do Pojuca, localizadas no extremo SE do produto ERS-1 estão, portanto, representadas pelas unidades fotolitológicas D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> e D<sub>3</sub> na Figura 6.7.

A unidade D<sub>4</sub>, discriminada nas imagens SAREX na forma de trechos de serra, não é separada na presente imagem devido a orientação paralela de seus elementos texturais de relevo em relação ao ângulo de iluminação do sensor.

### 4) Coberturas do Grupo Rio Fresco

Por abranger uma ampla área de ocorrência desta associação litológica, foi possível na parte sul da imagem ERS-1, discriminar quatro unidades fotolitológicas, a semelhança do que ocorreu com os produtos SAREX.

Estas discriminações foram apoiadas nos dados bibliográficos analisados (Gouveia, 1992), assim como, nos perfis de campo realizados pelo autor. Desta forma a unidade G<sub>1</sub> (metarenitos) destacou-se das demais devido a sua maior resistência a erosão,

sobressaindo-se na forma de pequenas colinas em meio aos amplos platôs desenvolvidos na unidade G<sub>2</sub> (metasiltitos).

Por sua vez, a unidade G<sub>3</sub> (metassedimentos intercalados) aparece associada às estruturas da Falha Carajás estando, portanto, intensamente fraturada e com troya unidirecional (N65°W), características que a discrimina das outras unidades fotolitológicas.

Finalmente a unidade G<sub>4</sub> (metassedimentos com extensos platôs associados), ocupa o flanco sudoeste da imagem, caracterizando-se por ser muito plana e apresentar baixa permeabilidade com desenvolvimento de alta densidade de elementos texturais de drenagem.

### **5) Granito Tipo Serra dos Carajás**

Foram mapeados os três corpos atribuídos a esta litologia, localizados no interior da lente estrutural do Grupo Pojuca, conforme indica a bibliografia consultada.

A unidade F na Figura 6.7, destaca-se por sua forma circular, característica dos corpos graníticos intrusivos. Baseado neste caracter discriminante foram individualizados outros três corpos circulares associados ao extremo oeste do Duplex Salobo-Mirim, os quais aqui foram atribuídos a corpos granitóides, podendo no entanto, serem estruturas originadas pelo cruzamento de lineamentos ligados as zonas de cisalhamento retilínea e secundária que compõem o referido Duplex.

### **6) Coberturas Lateríticas Terciárias**

Esta unidade fotolitológica, a semelhança do que se apresenta nos produtos SAREX, aparece amplamente distribuída sobre diversas outras unidades que compõem zonas elevadas e com topo plano.

Indicada como unidade B na Figura 6.7, as lateritas alúmino-ferruginosas caracterizam-se pelo formato irregular e isotropia, assim como, pela tonalidade escurecida devido a alta densidade de cobertura vegetal nestes platôs (classe A na Figura 2.2, de Paradella et al., 1994).

### **7) Coberturas Quaternárias**

Finalmente, a unidade mais recente representada na Figura 6.7 genericamente pelo símbolo A<sub>1</sub>, aparece associada às drenagens atuais, sendo caracterizada por terrenos planos onde mais se visualiza o ruído "speckle". Devido a tal característica é impraticável a individualização de sub unidades, como ocorre nos produtos SAREX de melhor resolução.

Outro problema é discriminar com exatidão o contato desta unidade com a unidade E<sub>2</sub> (Associação Xingu2) composta por paragneisses e anfibolitos que apresenta características visuais semelhantes.

### 6.2.3 - DISCRIMINAÇÃO DE ESTRUTURAS

A imagem ERS-1 abrange, na escala 1: 100.000, uma área maior que a fotointerpretada no produto SAREX. Esta área inclui por completo o Duplex Salobo-Mirim de Siqueira, (1990) e a sul parte do Falhamento Transcorrente Carajás; DOCEGEO, (1988).

A análise estatística dos elementos estruturais obtidos na interpretação deste produto, originaram o diagrama em roseta de frequência absoluta, ilustrado na Figura 6.11 e na Tabela 6.9, os quais demonstram a capacidade de, mesmo na imagem ERS-1, com menor resolução, ser possível delinear com clareza as zonas de cisalhamento descritas por Siqueira, e portanto visualizar o desenho do Duplex Salobo-Mirim.

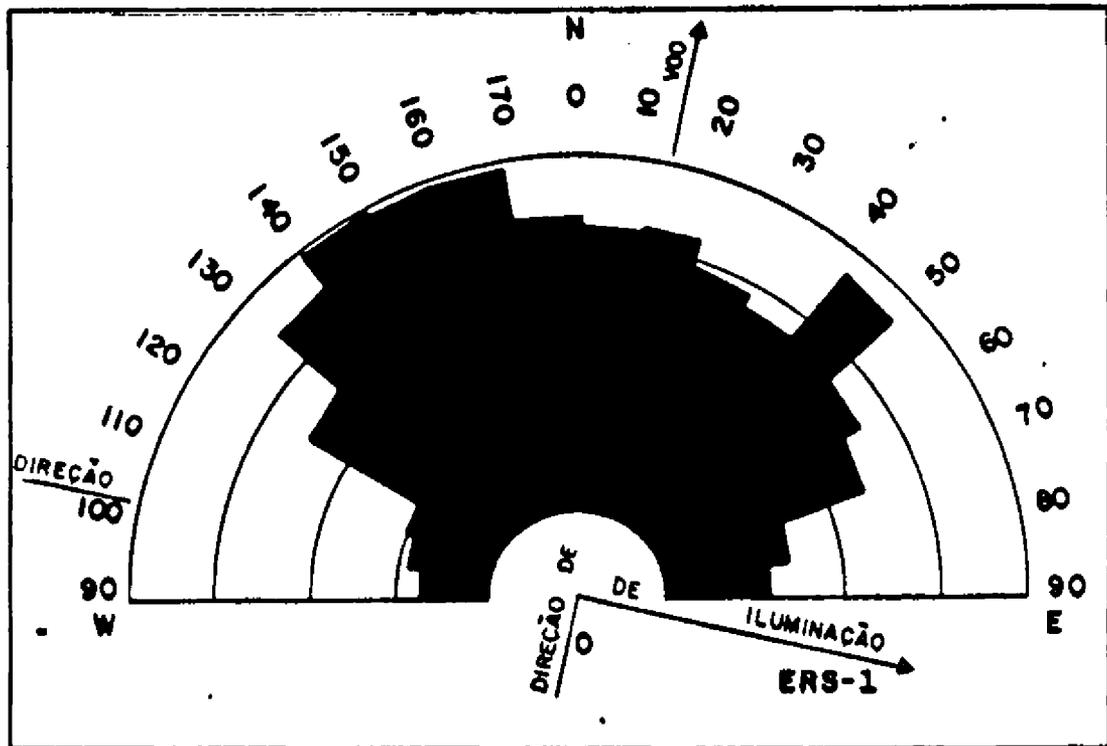


Fig. 6.11 - Diagrama em roseta de frequência absoluta para elementos estruturais do produto imagem SAR ERS-1.

TABELA - 6.9 SISTEMAS DE LINEAMENTOS EXTRAÍDOS DO PRODUTO DO SAR-ERS-1

MODO	ERS-1
DIREÇÃO DE VÔO	N12°E
DIREÇÃO DE ILUMINAÇÃO	N78°W
SISTEMAS DE LINEAMENTOS	(A) N30-50°W
	(B) N30-70°E
	(C) NNE-SSW
	(D) FEIÇÕES CIRCULARES
	(E) N75-85°E

Quando observado, o diagrama acima mostra uma predominância de estruturas orientadas entre  $N10-60^{\circ}W$ . Apesar de ser um intervalo bastante amplo, pode se atribuir estes dados como pertencentes aos de foliação milonítica nas áreas da Associação Xingu, em conjunto com os lineamentos estruturais da zona de cisalhamento curvilínea, em sua metade oeste no Duplex Salobo-Mirim. Ainda estão incluídos neste intervalo, os segmentos estruturais paralelos ao Falhamento Sinistral de Carajás, os lineamentos associados às falhas NW-SE integrantes da zona de cisalhamento tardia (Siqueira, 1990) e os alinhamentos  $N60^{\circ}W$ , que se apresentam no Grupo Pojuca.

O fato deste intervalo de medidas direcionais estar deslocado em relação as mesmas estruturas no produto SAREX, pode ser explicado pelo efeito "layover" e "foreshortening" que distorcem a visualização destes segmentos, proporcionando uma nova atitude estrutural.

Na sequência, é observado o intervalo entre  $N30-70^{\circ}E$  correspondente aos dados estruturais da faixa leste da zona de cisalhamento curvilínea, (Siqueira e Costa, 1991), e falhamentos transcorrentes sinistrais NE-SW pertencentes a zona de cisalhamento tardia descrita pelos mesmos autores.

Em terceiro lugar aparece a direção sub meridiana NNE-SSW, correspondente aos falhamentos destrais que completam o conjunto de falhas transcorrentes que compõem a zona de cisalhamento tardia supracitada. Estes falhamentos também se encontram distribuídos associados à litologias do Grupo Pojuca e Coberturas do Grupo Rio Fresco.

Finalmente, a direção EW aparece com pouca expressão no diagrama acima, apesar de representar a estrutura regional denominada por Siqueira, (1990) como zona de cisalhamento retilínea no extremo sul do Duplex Salobo-Mirim.

O pequeno número de segmentos estruturais, devidos a esta zona de cisalhamento, tem explicação no fato destes estarem alinhados sub paralelos a direção de iluminação do sensor orbital, o que por vezes torna invisível alguns elementos texturais de relevo e drenagem.

Com base nos resultados mencionados anteriormente conclui-se que os dados dos sensores aerotransportados no SAREX, apresentam performance notadamente superior quanto as informações geológicas, em relação aos resultados obtidos à partir dos dados do sensor orbital ERS-1. Este último tem sua qualidade deteriorada pelos efeitos distorcivos de "layover" e "foreshortening" além do ruído "speckle" inerentes à geometria de aquisição deste sensor radar. Mesmo assim o ERS-1 apresenta boa capacidade de discriminação litoestrutural nos terrenos mais arrasados.

### **6.3 - ANÁLISE DIGITAL DAS IMAGENS SAREX E ERS-1**

#### **6.3.1 - INTRODUÇÃO**

A análise digital dos dados envolvidos nesta investigação foi subdividida em dois segmentos. O primeiro, restrito aos dados do Projeto SAREX e denominado pré-processamento de calibração, e o segundo envolvendo todos os dados disponíveis denominados processamentos de imagens.

#### **6.3.2 - PRÉ-PROCESSAMENTOS DE CALIBRAÇÃO**

Os fatores de calibração, enviados pelo CCRS, para todas as faixas de recobrimento no Brasil do Projeto SAREX, foram implementados em um programa denominado COR1, possibilitando assim uma homogeneização da iluminação radar para todas as cenas analisadas. (Figura 6.12).

Importante ressaltar que, algumas destas imagens melhoraram ainda mais quanto aos efeitos de padrão da antena; com o processamento de correção por média móvel implementada por Tissi e Alves, (1993); em conjunto com os dados de calibração supra referidos (Figura 6.13).

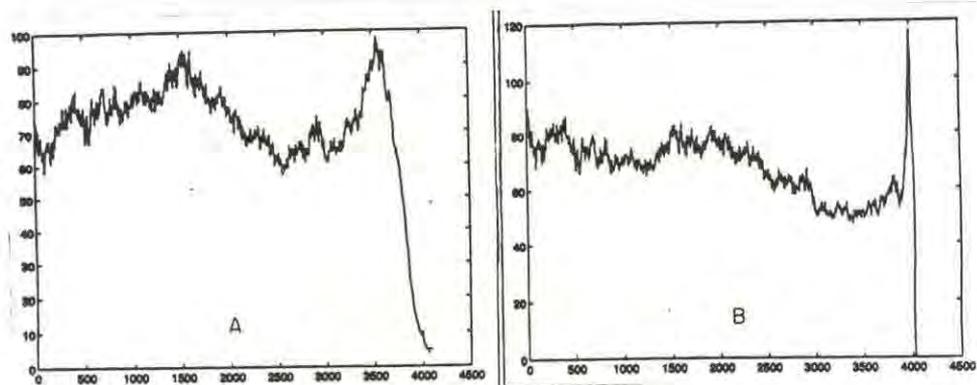
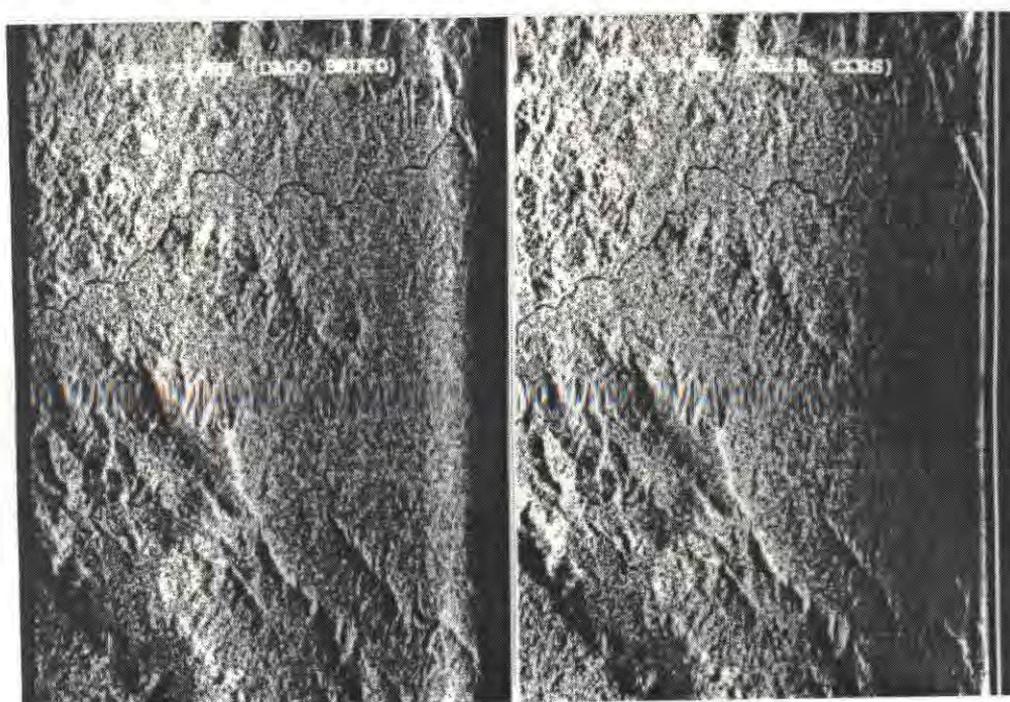


Fig. 6.12 - Mostrando no exemplo da faixa BRA2.4 HH os efeitos da calibração implementada por fatores de correção do CCRS, escala aproximada 1: 200.000:  
 (A) visualização dos dados brutos e histograma da média de intensidade nas colunas;  
 (B) visualização do dado calibrado e histograma da média de intensidade nas colunas.

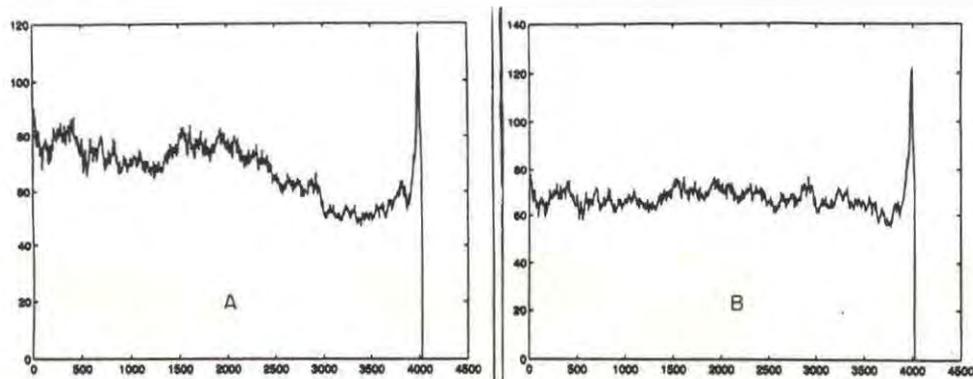
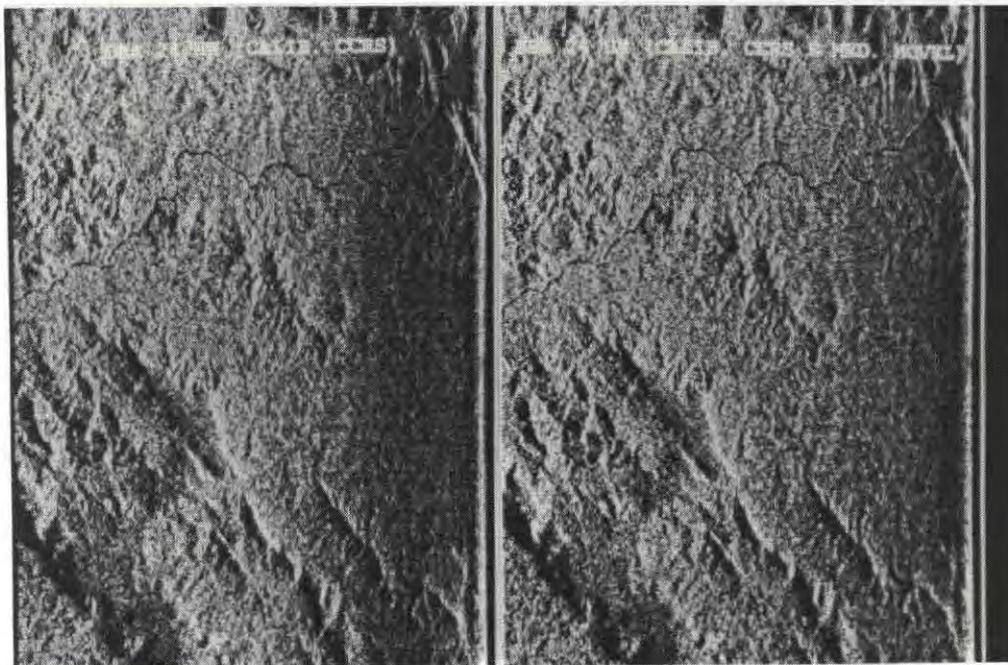


Fig. 6.13 - Ilustração do exemplo da faixa BRA2.4 HH para os efeitos da correção por média móvel sobre os dados calibrados por fatores de correção do CCRS, escala aproximada 1: 200.000:  
 (A) visualização do dado calibrado por fatores CCRS e histograma da média de intensidade nas colunas;  
 (B) visualização do dado corrigido por média móvel e histograma da média de intensidade nas colunas.

### 6.3.3 - PROCESSAMENTOS DE IMAGENS

### **6.3.3.1 - INTRODUÇÃO**

Existe um compromisso evidente entre o canal ou a composição colorida escolhida e o resultado conseguido na extração de dados geológicos.

O ideal para se assegurar que a interpretação final tenha sido baseada em informações de todos os produtos, seria obviamente analisar todas as combinações possíveis. Para tanto, foram observadas as performances individuais de cada processamento nos conjuntos de produtos, representados pela faixa BRA2.2 no caso do SAR CV 580, e pela órbita 4048 de abril de 1992, para o SAR ERS-1.

### **6.3.3.2 - REALCE DE CONTRASTE**

#### **a) SAR CV 580**

Foram aplicadas, para cada canal de polarização da imagem BRA2.2, sete funções de ampliação de contraste, disponíveis no "software PCI", gerando quatorze produtos, dos quais destes extrairam-se os seis de melhor aspecto quanto a visualização de detalhes interessantes para a fotointerpretação geológica.

As funções selecionadas foram: 1- aumento linear de contraste, 2 - método não linear de Drieman e 3 - equalização de histograma. A partir destas, foram produzidas as vinte interações possíveis e escolhidos visualmente os melhores canais para a composição colorida.

Destes canais selecionados, deve-se destacar que as versões em preto e branco que contêm as melhores performances, quanto a melhoria na visualização de dados são: para o canal de polarização horizontal, o realce de contraste não linear de Drieman e para o canal de polarização vertical, a ampliação linear de contraste. Estes canais conjuntamente abrangem praticamente todas as informações do produto radar.

Os histogramas das Figuras 6.14 e 6.15, mostram, respectivamente a redistribuição das curvas de intensidade nas imagens de polarizações HH e VV, após os aumentos de contraste de melhor performance, referidos acima. Os valores de média das imagens variam entre 30 e 50%, levando a um melhor aspecto visual das imagens de contraste ampliado, permitindo assim, uma melhor extração de informações em relação aos dados originais, nos quais há homogeneização dos níveis de cinza.

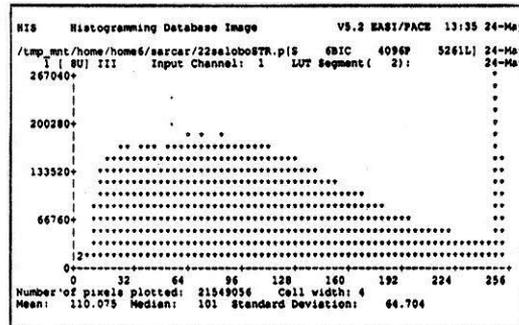
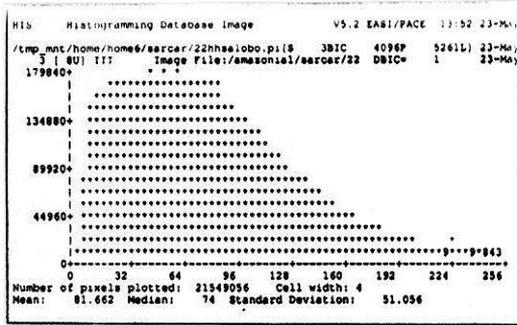


Fig. 6.14 - Histogramas da imagem BRA2.2 HH, mostrando à esquerda os valores para o dado calibrado e à direita os valores da mesma imagem com ampliação não linear de contraste (método Driemann).

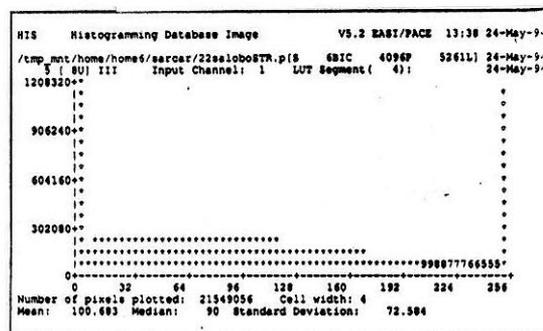
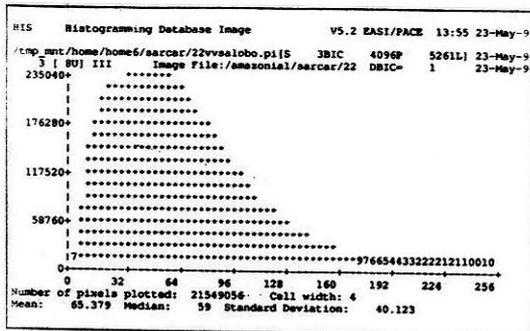


Fig. 6.15 - Histogramas da imagem BRA2.2 VV mostrando à esquerda os valores para o dado calibrado e a direita os valores da mesma imagem com ampliação linear de contraste.

Com base nesta abordagem chegou-se às duas melhores composições em RGB representadas aqui pelas Figuras 6.16 e 6.17, com centro próximo ao acampamento Salobo.

As composições enfatizam o contato litológico entre as unidades  $C_2$  e  $C_5$ , (xistos e quartzitos) respectivamente, na serra de Salobo; além de realçar estruturas geológicas e o traçado de estradas.



Fig. 6.16 - Composição colorida de dados SAR, BRA2.2: canal 1 (vermelho) pol. HH com ampliação linear de contraste; canal 2 (verde) pol. VV com ampliação linear de contraste e canal 3 (azul) pol. HH com ampliação não linear de Drieman, escala aproximada 1: 200.000.

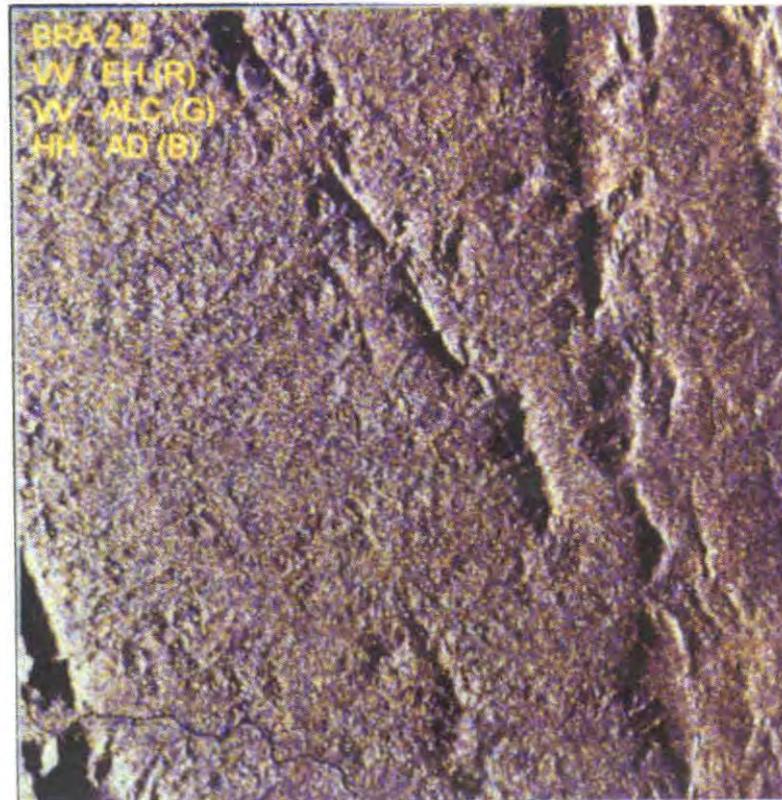


Fig. 6.17 - Composição colorida de dados SAR, BRA2.2: canal 1 (vermelho) pol. VV com equalização de histograma; canal 2 (verde) pol. VV com ampliação linear de contraste e canal 3 (azul) pol. HH com ampliação não linear de Drieman, escala aproximada 1: 200.000.

Quanto aos aspectos observados especialmente no segundo produto, pode se destacar com clareza o contato litológico discutidos na foto anterior (em cor rosa-azulada), mesmo este estando localizado na área sombreada da imagem.

A estrada, por sua vez, aparece através de uma sequência de segmentos retilíneos alternados de tonalidade clara e escura, assim como os traços estruturais destacam-se por uma coloração majenta brilhante, em especial os de direção sub meridiana.

No entanto o aspecto mais salientado, pelas composições coloridas acima, é o alinhamento das estruturas na direção NNE/SSW correspondentes a falhamentos destrais e foliação milonítica citadas por Siqueira,(1990).

#### **b) SAR ERS-1**

O produto deste sensor, disponível neste trabalho, já se apresenta com uma ampliação linear de contraste aplicada através do processamento da ESA nos laboratórios do INPE, em Cachoeira Paulista SP.

Obviamente, conforme observa Lowman et al. (1987), para outros radares orbitais, o aumento linear de contraste mostrou-se valioso, ampliando a capacidade de

visualização de detalhes geológicos em relação aos produtos brutos. Fato este, devido a compressão de 16 para 8 bits que acarreta neste dado a não utilização de todos níveis de cinza disponíveis, deixando a imagem sem contraste. As composições coloridas não foram aqui testadas, devido a ausência dos produtos passíveis de manipulação de contraste para geração de outros dois canais.

### 6.3.3.3 - FILTRAGENS

#### a) SAR CV 580

Como exposto anteriormente, foram testados no conjunto de dados SAREX a aplicação de dois tipos de filtros adaptativos de uso consagrado para imagens digitais de radar.

A contribuição deste recurso de realce foi muito sutil a ponto de dificultar a sua documentação. Os filtros de Lee, com máscara de 5X5 "pixels", aplicados sobre o dado calibrado por fatores do CCRS e também sobre o produto da polarização horizontal com ampliação linear de contraste, não geraram mudanças perceptíveis visualmente. Apenas foi notado um decréscimo de 2,60 pontos na média do histograma do dado calibrado, o que provavelmente significa um escurecimento generalizado na imagem sem grande alteração visual.

Por sua vez, o filtro adaptativo de Frost, aplicado com o mesmo tamanho e, sobre os mesmos produtos digitais, não apresentou resultado perceptível para os dados calibrados pela correção do CCRS. No entanto, na imagem com aumento linear de contraste, é possível verificar um sutil aumento na sensação visual de alinhamentos estruturais, especialmente no "near range" e em contrapartida uma leve desfocagem nas áreas elevadas de topo aplainado com recobrimento vegetal homogêneo.

#### b) SAR ERS-1

O recurso de realce por filtragem apresentou grandes resultados nas imagens do radar orbital ERS-1. Obviamente a redução do ruído "speckle" já é por si só uma boa contribuição para melhorar a capacidade de extração de informações.

No entanto, como ilustra a Figura 6.18, pode-se notar com a utilização do filtro de Frost, um aumento na capacidade de discriminação das unidades litológicas associadas a relevos mais arrasados, ou seja, as unidades que compreendem o Complexo Xingu (Associações E<sub>1</sub> e E<sub>2</sub>) e os depósitos quaternários. Esta discriminação é facilitada porque o filtro adaptativo amplia a diferença textural entre estas unidades destacando as zonas de contato.

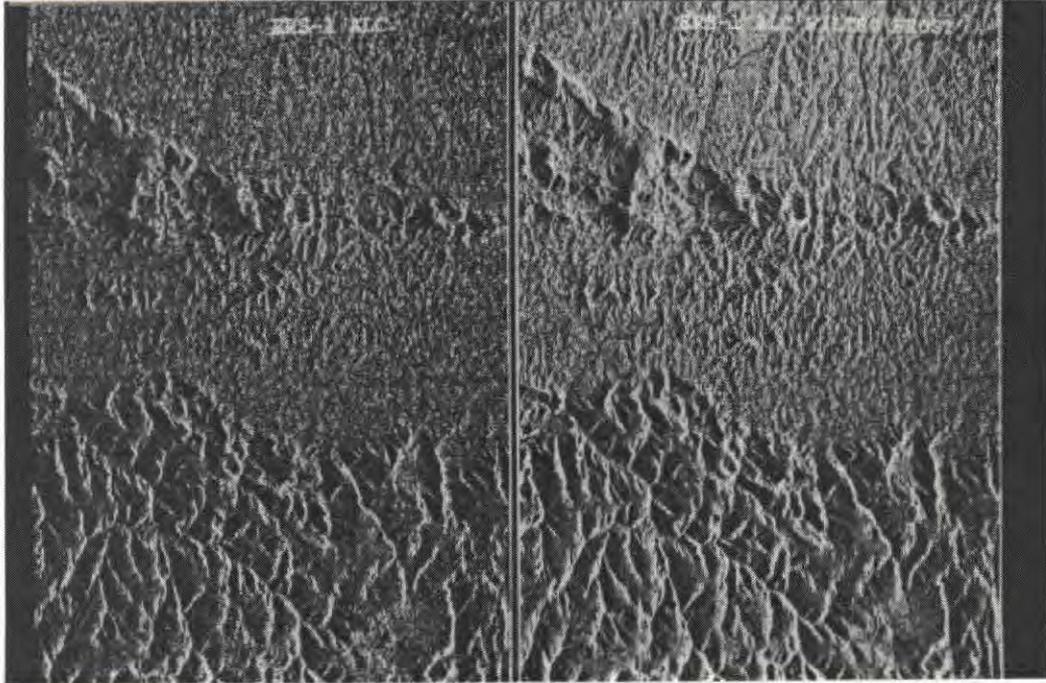


Fig. 6.18 - Foto demonstrando a contribuição do uso do filtro adaptativo de Frost em imagens digitais da radar orbital ERS-1. A esquerda encontra-se o dado com aumento linear de contraste e a direita o mesmo dado com aplicação da filtragem 5X5, escala aproximada 1: 200.000.

Outra utilização, dos produtos de filtragens adaptativas está aqui representada pela composição colorida RGB (Figura 6.19); que no canal do vermelho tem a imagem ERS-1 filtrada pelo método de Frost, o canal do verde apresenta a mesma imagem filtrada pelo método de Lee e o canal do azul composto pelo dado ERS-1 com contraste ampliado linearmente.

A observação desta Figura nos leva a destacar a contribuição deste processamento de realce, quanto a discriminação textural de unidades fotolitológicas representadas pelas simbologias  $E_1$ ,  $E_2$  e  $A_1$ , nas áreas de relevo mais baixo, as quais apresentavam aspectos homogêneo devido ao ruído "speckle" na imagem bruta.



Fig. 6.19 - Composição colorida dos dados ERS-1 filtrados; filtro Frost no canal vermelho, filtro Lee no canal verde e dado bruto no canal azul. Note a discriminação das unidades E<sub>1</sub> - Associação Xingu1, E<sub>2</sub> - Associação Xingu2 e A<sub>1</sub> - Depósitos aluvionares e correlatos, escala aproximada 1: 200.000.

#### 6.3.3.4 - OPERAÇÕES ARITMÉTICAS

Estas operações, no presente trabalho, foram efetuadas apenas nos produtos SAREX por estarem disponíveis variadas direções de iluminação e dupla polarização, o que não ocorre com o dado do SAR orbital ERS-1.

Basicamente foram programadas duas etapas de utilização das operações aritméticas divisão e subtração, as quais, a princípio destacam as diferenças entre os produtos processados.

A primeira etapa envolveu operações entre os canais de polarização horizontal e vertical da faixa do modo estreito BRA2.2.

A divisão destes canais gerou um produto com média de intensidade muito baixa e sem contraste, devido ao fato da pequena diferença radiométrica entre as imagens, o que resulta numa razão próxima a 1 (um), conforme ilustra a figura 6.20.



Nesta etapa a **composição** colorida que apresentou melhores resultados foi aquela representada pelos canais: vermelho - polarização vertical com ampliação linear de contraste; verde - polarização horizontal com ampliação não linear de Driemann e azul - subtração dos canais horizontal e vertical com ampliação não linear de contraste (Driemann); Figura 6.22.

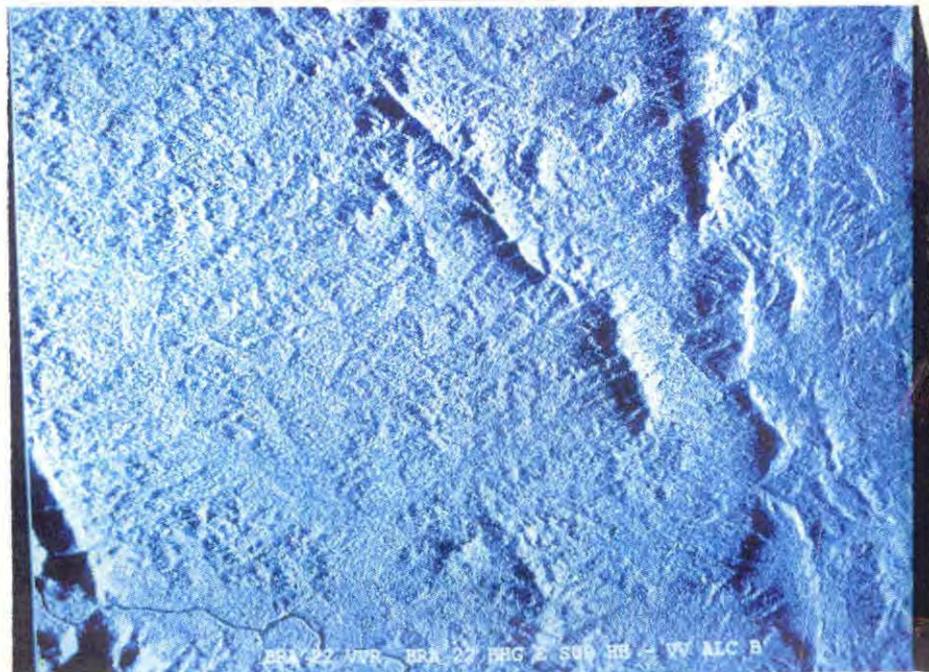


Fig. 6.22 - Composição colorida com canal gerado por operação aritmética. Canal vermelho BRA22VV, Canal verde BRA22HH e Canal azul HH-VV com ampliação de contraste não linear (Driemann), escala aproximada 1: 200.000.

Da observação deste produto, pode-se concluir que a subtração dos dados de dupla polarização, aumenta a sensação de relevo, enfatizando assim, uma clara separação entre as unidades das Associações Xingu 1 e 2 ( $E_1$  e  $E_2$ ),  $C_1$  (xistos e anfíbolitos do Grupo Pojuca) e áreas aluvionares. As tonalidades mais escuras são representativas das áreas mais arrasadas, enquanto que as mais claras, representam as áreas com relevo mais movimentado.

A segunda etapa deste tipo de processamento envolveu a obtenção de produtos a partir de operações de divisão e subtração entre as faixas de recobrimento SAREX, que reproduzem a simulação das direções de iluminação do RADARSAT. Tal fato ocorre entre as imagens BRA2.4 HH e BRA2.5 HH, com direções  $N78^\circ W$  e  $N78^\circ E$ , respectivamente. Desta forma, através de registro, chegou-se a uma área comum sobre Salobo; sendo efetivadas as operações possíveis e obtidos os produtos que estão ilustrados nas Figuras 6.23, 6.24 e 6.25. O melhor resultado foi obtido com a subtração entre os canais BRA2.5 HH e BRA2.4 HH (Figura 6.25).

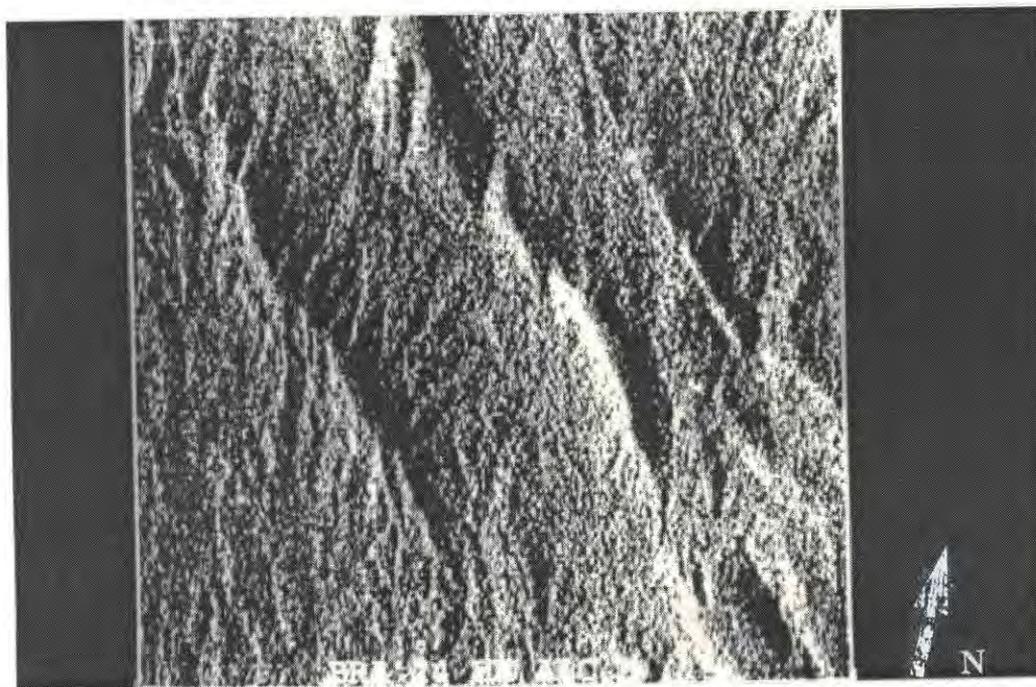


Fig 6.23 - Área sobre Salobo obtida da imagem BRA2.4 HH, escala aproximada 1: 50.000.

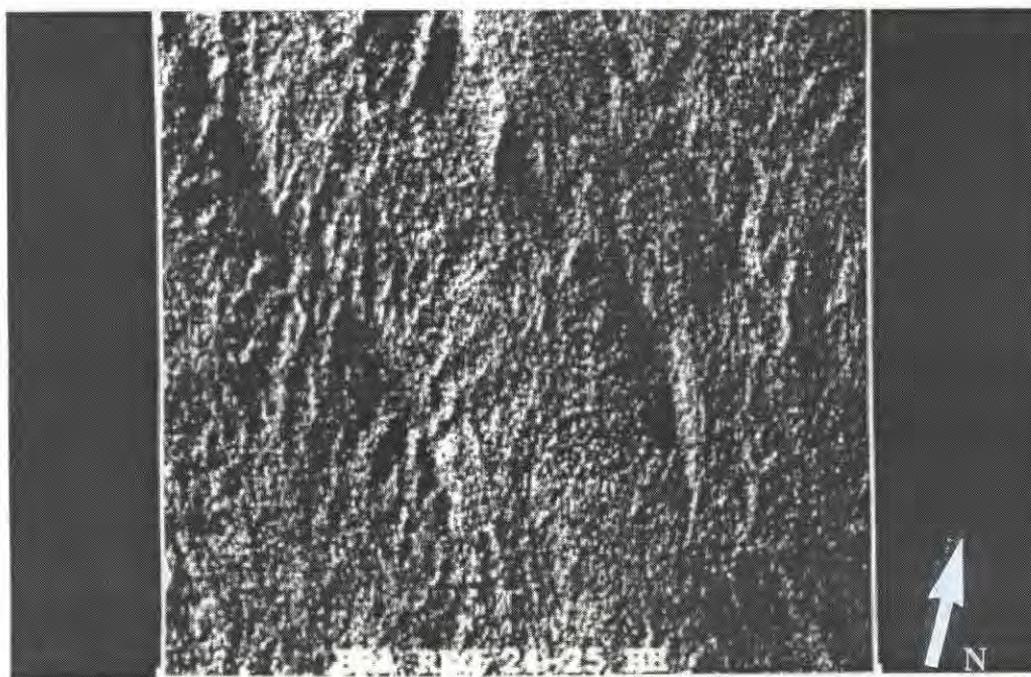


Fig. 6.24 - Área sobre Salobo obtida da imagem BRA2.5 HH, escala aproximada 1: 50.000.

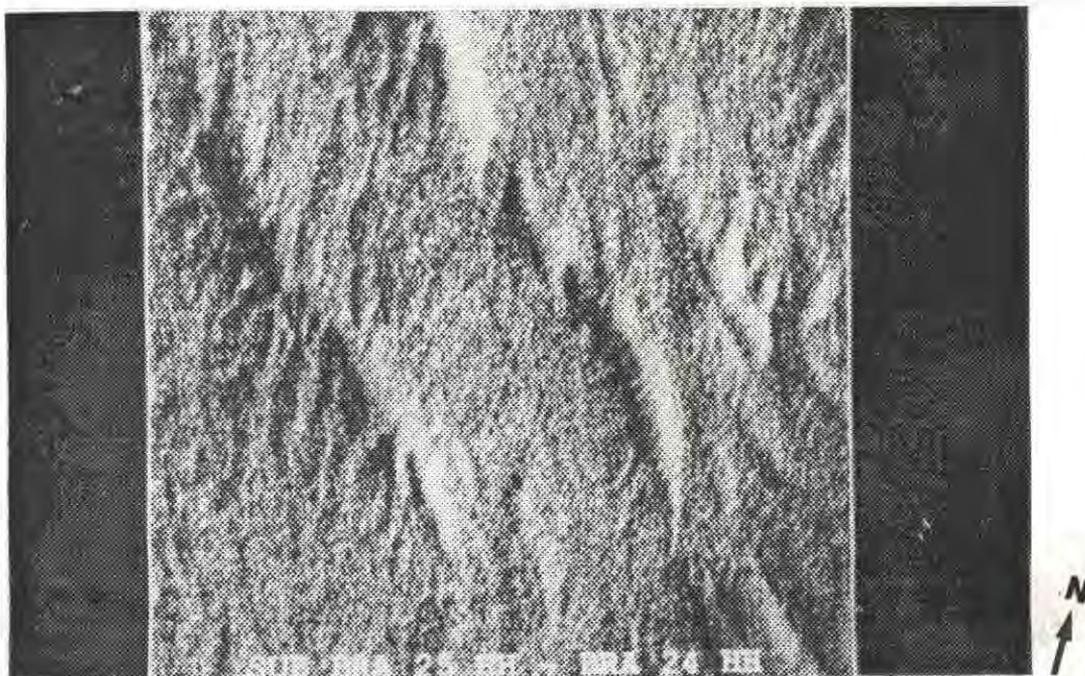


Fig. 6.25 - Produto obtido da subtração entre as imagens BRA2.5 HH e BRA2.4 HH sobre área comum em Salobo, escala aproximada 1: 50.000.

A partir dos produtos acima ilustrados obteve-se duas composições coloridas, (Figuras 6.26 e 6.27), as quais foram filtradas (filtro média) e com contraste ampliado linearmente. Destas imagens pode-se concluir que a operação entre os produtos de diferentes ângulos de iluminação proporcionam uma atenuação dos efeitos deste parâmetro, gerando composições de razoável qualidade quanto à extração de informações.

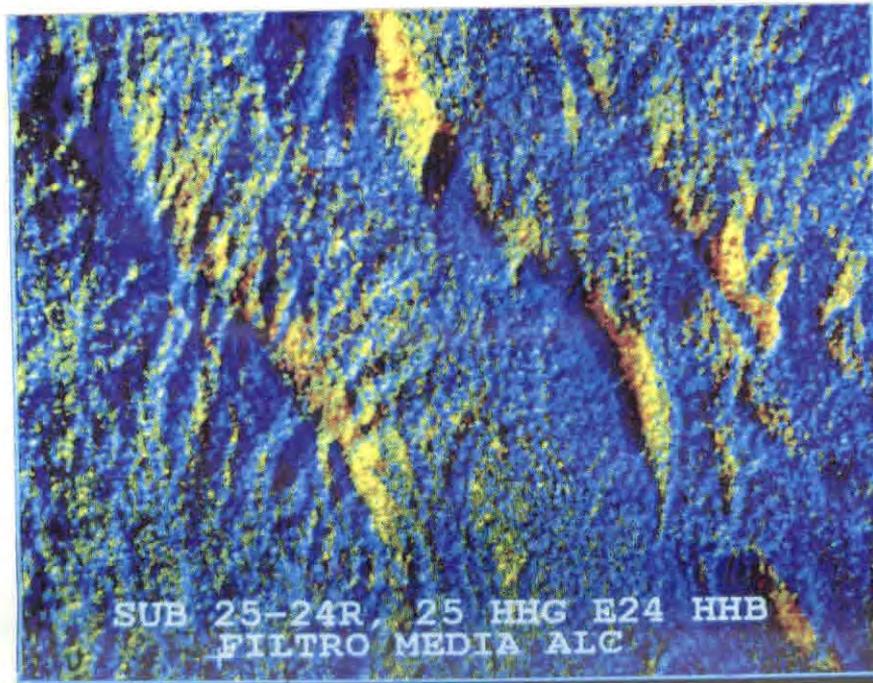


Fig. 6.26 - Composição SAR colorida com visadas distintas sobre Salobo. Canal vermelho = subtração das imagens BRA2.5 HH e BRA2.4 HH; canal verde = imagem BRA2.5 HH e canal azul = imagem BRA2.4 HH. Escala aproximada 1: 50.000.

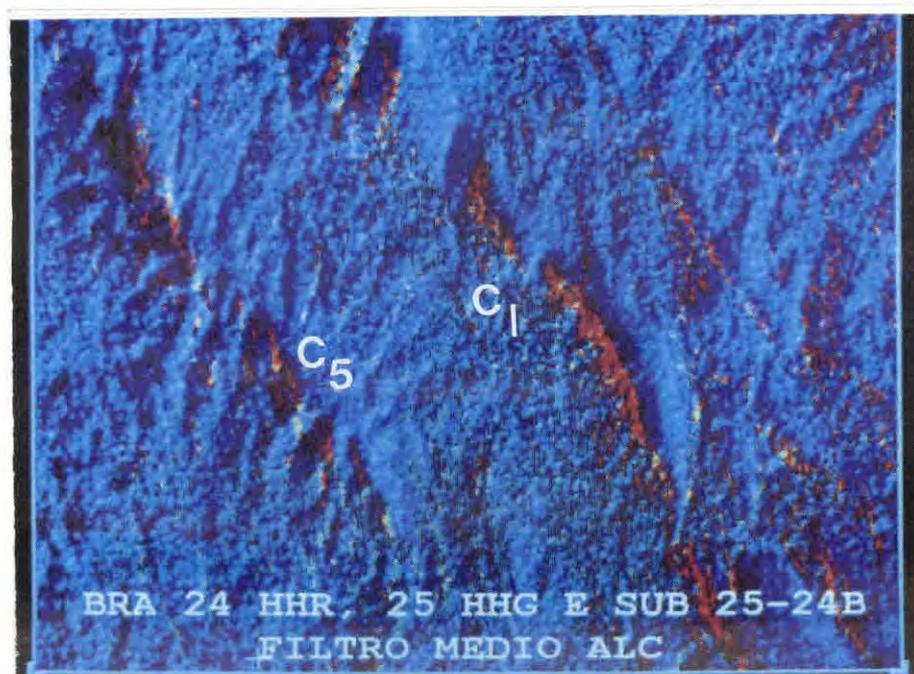


Fig. 6.27 - Composição SAR colorida com visadas distintas sobre Salobo. Canal vermelho = BRA2.4 HH; canal verde = imagem BRA2.5 HH e canal azul = subtração das imagens BRA2.5 HH e BRA2.4 HH. Escala aproximada 1: 50.000.

Deve contudo ser mencionado, que os ângulos de incidência diferentes nos canais registrados, acarretam distorções, nas composições coloridas, com um aspecto final desfocado que prejudica a fotointerpretação. Ainda assim, nas composições é possível a discriminação de algumas matizes que se associam à diferenças litológicas. Nas Figuras anteriores, as simbologias C<sub>1</sub> e C<sub>5</sub> representam respectivamente as unidades cloritas xistos/metavulcânicas e quartzitos.

É possível que esta tendência à diminuição de nitidez das composições coloridas, possa ser minimizada com o imageamento do RADARSAT, usando-se visadas diferentes e mesmo ângulo de incidência.

## **6.4 - AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS FUNCIONAIS E DE VISADA DOS RADARES CV 580 E ERS-1 NA EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÃO DE SIGNIFICADO GEOLÓGICO**

### **6.4.1 - INTRODUÇÃO**

Muitas variáveis independentes, combinadas, afetam o retroespalhamento do radar das feições na superfície terrestre e são de interesse para os geólogos; Colwell, (1983).

Os fatores mais importantes dos sistemas de radar são os parâmetros do sensor: comprimento de onda e polarização; e os parâmetros de visada: ângulo de incidência, direção de visada e resolução.

Quanto aos parâmetros do alvo, para a área teste somente deve ser considerado o efeito topográfico, pois devido ao denso recobrimento vegetal e umidade constante, uniformemente distribuída, os fatores rugosidade superficial e constante dielétrica devem ser negligenciados; a exemplo do que considerou Ford, (1980) para o estudo com dados do SEASAT no Tennessee (USA).

Desta forma este Capítulo procura analisar a contribuição de cada um destes parâmetros nos resultados obtidos da investigação.

### **6.4.2 - PARÂMETROS FUNCIONAIS**

#### **6.4.2.1 - COMPRIMENTO DE ONDA (FREQUÊNCIA)**

No geral, o comprimento de onda não é considerado como um fator significativo nos estudos geológicos, em especial, a nível de reconhecimento em terrenos densamente encobertos por vegetação.

Em nosso caso, muito pouco pode ser considerado quanto a frequência, principalmente pela ausência de produtos na mesma escala disponíveis, com outros comprimento de onda para comparação. Ambos sistemas aqui estudados apresentam frequência de 5,3 GHz ou 5,66 cm de comprimento de onda, denominados comumente como Banda C.

Sabidamente esta frequência tem capacidade de pouca penetrabilidade na vegetação já que interage a nível de dossel (Figura 3.4). Ainda assim, pode se afirmar que a Banda C está adaptada para uso em estudos geológicos - geomorfológicos, pois apresenta grande sensibilidade quanto às alterações superficiais no relevo e permite uma interação, ainda que mínima, com alvos na subsuperfície do nível foliar, possibilitando uma diferenciação

grosseira entre tipos vegetais e conseqüentemente uma associação destes tipos com o substrato rochoso.

No caso do vasto recobrimento florestal da área teste, esta interação superficial nas copas das árvores permite a diferenciação de algumas classes de vegetação, constituindo-se no principal parâmetro de mapeamento dos trechos aluvionares nos terrenos arrasados da Associação Xingu 2 (E<sub>2</sub>), como ilustra a Figura 6.2; assim como, facilita o mapeamento de áreas desmatadas devido às grandes variações texturais (Figura 6.3).

#### 6.4.2.2 - POLARIZAÇÃO

A polarização de radar mais amplamente utilizada em geologia é a paralela HH. No geral as polarizações paralelas, HH ou VV tem o sinal de retorno 10% a 15% mais fortes que as polarizações cruzadas, HV ou VH. Os imageamentos com polarização paralela exibem um largo alcance dinâmico e uma melhor razão sinal/ruído em relação às polarizações cruzadas, NASA (1988).

Neste contexto, a polarização paralela HH tem uma pequena preferência em relação à polarização VV, devido a sua capacidade de realçar as configurações morfológicas com componente horizontal maior, as quais são predominantes na natureza.

Os produtos CV 580 (SAREX), adquiridos em dupla polarização, (HH e VV), permitem a comparação quanto a influência deste parâmetro funcional na aquisição de informações geológicas na região de Salobo.

A nível de observação visual dos produtos fotográficos a diferença é muito sutil, permitindo a afirmação de que o resultado quanto a obtenção de dados geológicos é o mesmo para ambas polarizações. Este resultado foi também constatado por Liu et al., (1994) e Veneziani et al., (1994), para as interpretações visuais dos dados do SAREX para as áreas Salobo e N1/Pojuca, respectivamente.

No entanto, nas áreas de mineração da Serra de Carajás; N<sub>4</sub> (ferro) e Azul (manganês) a leste da área de estudo; Paradella et al., (1993), constataram diferenças no retorno radar para as duas polarizações, sendo concluído que em áreas sem vegetação a polarização HH é melhor na identificação das bancadas horizontais das minas, assim como na discriminação de obras de infraestrutura e construções, devido a predominância do caráter horizontal destes alvos. Todavia para as áreas de "campos rupestres" associados com lateritas mineralizadas em ferro, foram observadas melhores contrastes tonais nas polarizações VV que em HH, devido a ocorrência do efeito "double bounce" nas hastes verticais da vegetação rupestre.

Por outro lado, quando da análise digital destes produtos, as diferenças entre as polarizações são mais significativas, como ilustram os histogramas nas Figuras 6.28a e 6.28b e a foto na Figura 6.29.

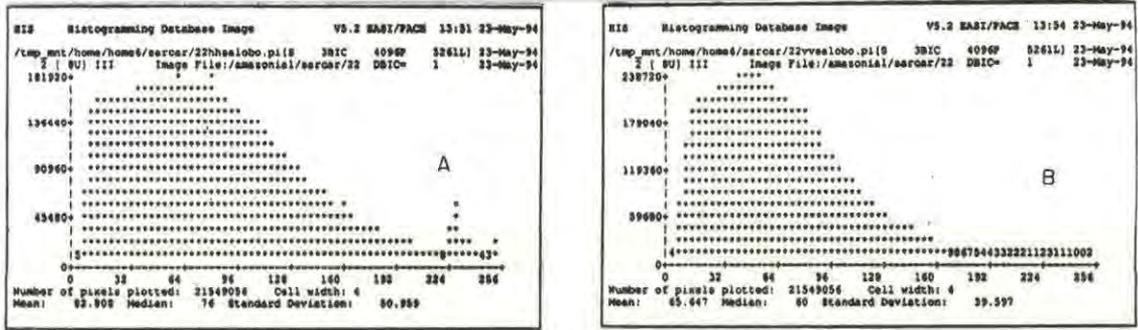


Fig. 6.28 - Histogramas mostrando a diferença de intensidade no retroespalhamento de radar para as polarizações: (a) polarização horizontal HH e (b) polarização vertical VV; faixa BRA2.2, do modo estreito (dados brutos corrigidos por fatores de calibração CCRS).

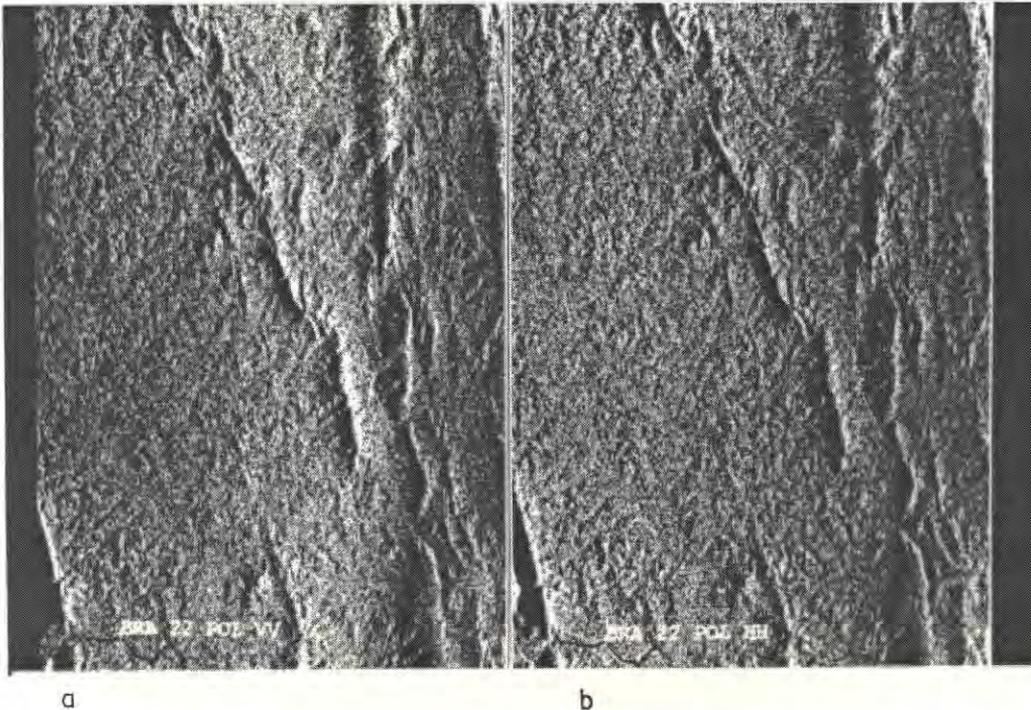


Fig. 6.29 - Ilustração da diferença quanto ao retroespalhamento de radar para dupla polarização: (a) polarização vertical e (b) polarização horizontal; faixa BRA2.2, do modo estreito (dados brutos corrigidos por fatores de calibração CCRS). Escala aproximada 1: 200.000.

Desta forma, pode ser observado que, para a região Salobo, com denso recobrimento florestal, a polarização HH apresenta uma distribuição mais equalizada do histograma, sendo sua média em intensidade, cerca de 26% maior que na polarização vertical (VV).

Aparentemente, pode-se notar entre as duas polarizações, que uma sutil diferença tonal apresenta-se no "far range" da faixa de recobrimento estudada.

O produto da polarização HH aparece com brilho mais intenso em relação ao produto VV, isto não representando, entretanto, uma variação de performance entre as duas polarizações, quanto à extração de informações geológicas.

### 6.4.3 - PARÂMETROS DE VISADA

#### 6.4.3.1. - ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

O aspecto ângulo incidente, tem muita importância na detecção das feições superficiais. Basicamente o efeito do ângulo de incidência é ilustrado graficamente pelo diagrama de Lung em Lowman, et al., (1987) na figura 6.30.

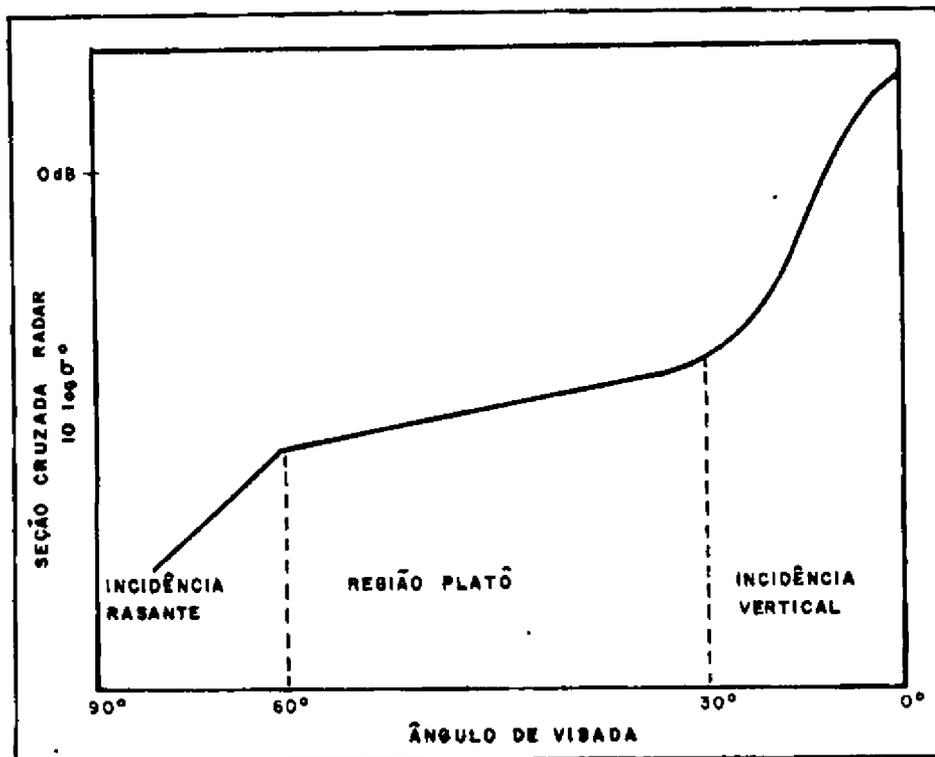


Fig. 6.30 - Diagrama de Lung ilustrando a influência do efeito ângulo de incidência no coeficiente de retroespalhamento radar.

FONTE: Lowman et al., (1987).

Como visto no diagrama, ângulos compreendidos entre 0° e 25° mostram-se com influência muito significativa sobre os valores de retrobrilho, assim como, ângulos

superiores a  $70^\circ$ . Por outro lado, os ângulos dispostos no intervalo entre  $25^\circ$  e  $75^\circ$ , estão em uma região denominada zona de platô onde o retroespalhamento muda pouco com a variação angular. Em resumo, o retroespalhamento do radar é influenciado por: 1 - "slope", quando o ângulo de incidência encontra-se no intervalo entre  $0$  e  $30^\circ$ ; 2 - rugosidade de superfície, quando o ângulo encontra-se no intervalo entre  $30$  e  $70^\circ$ , e 3 - sombreamento, para ângulos de incidência entre  $70$  e  $90^\circ$ , JPL, (1980).

O imageamento radar aerotransportado depende profundamente do efeito sombreamento para mostrar a topografia de uma região, como demonstrado por MacDonald e Waite, (1971). Este efeito de sombra ocorre quando a declividade da encosta é mais íngreme que o ângulo de depressão (complementar ao ângulo incidente). Caracteristicamente, os radares em aviões tem baixo ângulo de depressão produzindo situações que simulam baixos ângulos de elevação solar, e portanto enfatizam as feições topográficas, Sabins (1983).

Tal fato, ocorre com os imageamentos SAREX abordados neste trabalho; nas três geometrias de obtenção de imagens disponíveis. O modo amplo possui ângulo incidente variando de  $45^\circ$  a  $85^\circ$ , que compreende boa parte da região de platô no diagrama acima e cerca de 25% da imagem ("far range") dentro da área de incidência rasante onde é possível verificar um aumento do efeito sombreamento. O referido efeito, na área mapeada permite concluir que nas faixas de relevo mais movimentado, ocorre perda de informação devido a extensão das regiões sombreadas.

O modo estreito representado pela faixa de recobrimento BRA2.2 apresenta seu conjunto de ângulo de incidência compreendido entre  $45^\circ$  e  $76^\circ$ , isto é, todo ele na faixa da região de platô onde o coeficiente de retroespalhamento é mais independente de mudanças do ângulo incidente. Portanto nesta imagem, o efeito topográfico e direção de visada dominam inteiramente as variações de intensidade de retrobrilho.

Finalmente, o modo nadir correspondente as faixas de imageamento BRA2.3, BRA2.4 e BRA2.5 apresentam o intervalo entre  $28^\circ$  e  $74^\circ$  também dentro da faixa considerada como de platô, porém com o detalhe de, nas regiões de ângulo incidente agudo ("near range") ser notado o efeito denominado "foreshortening", ou seja compressão dos elementos da imagem com eventual distorção destes e prejuízo na interpretação.

O melhor exemplo quanto a influência do ângulo incidente pode ser visualizado junto as Figuras 6.31 e 6.32 respectivamente faixas BRA2.3 e BRA2.4 onde uma mesma região, a norte de Salobo, apresenta aspectos bastante diferenciados de acordo com o respectivo ângulo de visada.

O principal contraste está na área do terreno que aparece comprimida na faixa BRA2.3 em relação a mesma área na faixa BRA2.4. Esta compressão acarreta entre outras coisas a diminuição da capacidade de extração de elementos texturais de relevo e drenagem, na faixa BRA2.3. Da mesma forma nota-se que na faixa BRA2.4 o efeito de sombreamento é melhor delineado, dando uma melhor noção de relevo a imagem.



Fig. 6.31 - Ilustração da zona de cisalhamento curvilínea a norte de Salobo (Siqueira, 1990) vista sob o ângulo de incidência médio de  $54^\circ$  ("near range") na faixa BRA2.3 do Projeto SAREX. Escala aproximada 1: 50.000.

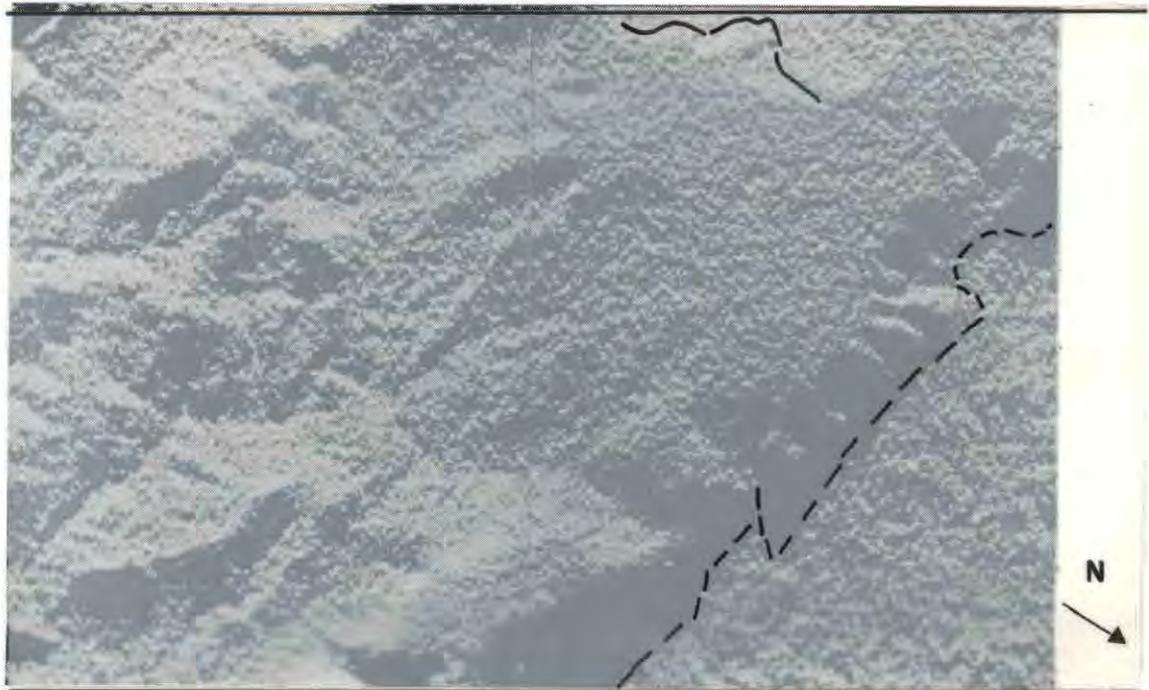


Fig. 6.32 - Ilustração da mesma área da Figura anterior sob ângulo de incidência médio de  $73^\circ$  ("far range") na faixa BRA2.4. Ressalta-se que em ambas faixas de recobrimento a direção de visada é  $N78^\circ E$ . Escala aproximada 1: 50.000.

Por outro lado, na imagem originada pelo radar orbital ERS-1 sob ângulo de incidência médio de  $23^\circ$ , espera-se um baixo rendimento quanto ao efeito sombreamento. No entanto, conforme indica o diagrama de Lung em Lowman et al (op. cit.), o retroespalhamento é muito mais sensível a ângulos incidentes inferiores a  $25^\circ$ , pois neste intervalo a variação no retrobrilho é governado pela variação no ângulo incidente local definido no item 3.5.4.1. (Figura 3.6), o qual é a legítima expressão da topografia; tal efeito é denominado "shading".

Por este motivo, a performance do sensor ERS-1 nas áreas de baixo relevo é muito boa, em contrapartida às áreas de relevo montanhoso, onde é expressiva a ocorrência de "layover e foreshortening", devido a visada sob ângulo agudo; o que prejudica a fotointerpretação.

#### 6.4.3.2 - DIREÇÃO DE VISADA

O aspecto das feições do terreno nos imageamentos SAR é altamente dependente da direção sob a qual estas são visualizadas. Para mapeamentos geológicos, os melhores resultados são obtidos quando a direção de visada do radar está orientada perpendicularmente ao "trend" estrutural-morfológico da região estudada. Isto resulta numa otimização do realce de feições importantes tais como, elementos texturais de relevo e drenagens, mais especificamente cristas e vales, (Ford, 1980; Koopmans, 1985).

Lowman, (1991) em trabalho com radar aerotransportado tipo CV 580 SAR, sobre a região Canadense da Bacia de Sudbury, aponta que a direção da iluminação para radares de alta resolução e ângulo incidente entre  $45^\circ$  e  $75^\circ$ , não corresponde a um fator importante.

No presente estudo, as evidências mostradas nas Figuras 6.33, 6.34 e 6.35 nos leva a discordar de tal afirmação, pois é clara a diferente performance das visadas quando procuramos interpretar as feições subparalelas a "look direction".



Fig. 6.33 - Ilustração mostrando na região Pojuca, alinhamento de relevo com direção geral  $N65^{\circ}W$  (metassedimentos e metavulcânicas do Grupo Pojuca), visto sob a direção de visada da faixa BRA2.2 do modo estreito, correspondente a  $S40^{\circ}W$ , ou seja sub ortogonal ao "trend" estrutural. Notar a clareza dos contatos e discriminação de estruturas. Escala aproximada 1: 50.000.



Fig. 6.34 - Foto da mesma área da Figura anterior sob visada da faixa BRA2.4 modo nadir, ou seja  $N78^{\circ}E$ . Atente a menor clareza das zonas marcadas por quebras negativas (contato). Escala aproximada 1: 50.000



Fig. 6.35 - Ilustração da mesma região das fotos acima vista sob as características da faixa BRA2.5 do modo nadir, a qual apresenta direção de visada  $N78^{\circ}W$ , sub paralela ao "trend" estrutural. Observa-se que a colina no centro da Figura passa ter contatos de difícil definição, assim como tornam-se praticamente invisíveis os alinhamentos de serras compostas por lentes de formação ferrífera bandada e rocha quartzítica pertencentes ao Grupo Pojuca. Escala aproximada 1: 50.000.

Destas observações concluímos que para a região estudada a melhor direção de visada fica por conta da faixa BRA2.2 (modo estreito), ou seja  $S40^{\circ}W$ ; pois além das ilustrações anteriores, os diagramas de roseta, gerados a partir de áreas comuns às imagens BRA2.2, BRA2.4 e BRA2.5, das Figuras 6.36 e 6.37 mostram as direções estruturais mais destacadas conforme sua relação com a "look direction".

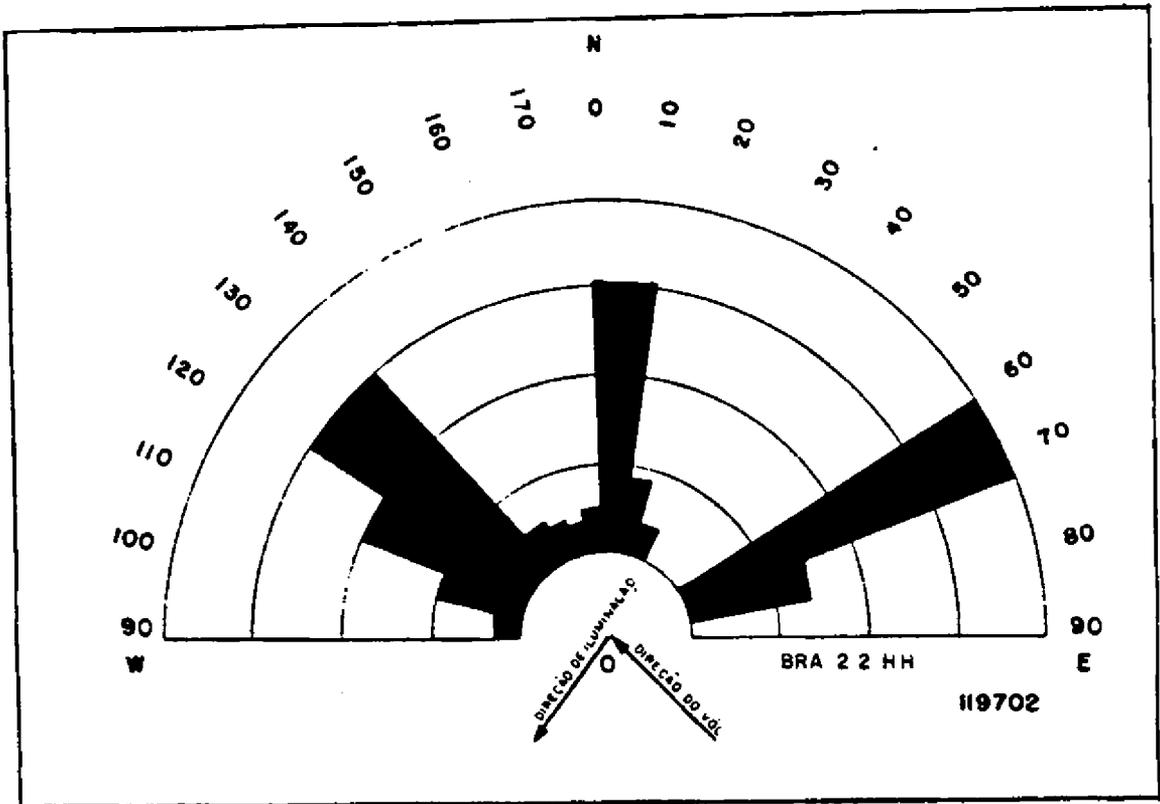


Fig. 6.36 - Diagrama de roseta representando a frequência absoluta de traços estruturais para a faixa de imageamento BRA2.2. Ângulo de visada  $S40^{\circ}W$ .

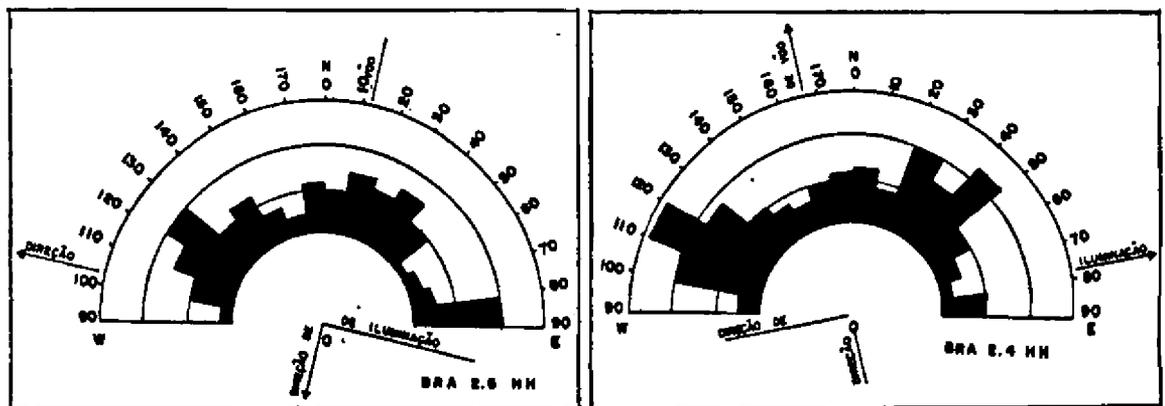


Fig. 6.37 - Diagramas de roseta representando a frequência absoluta de traços estruturais nas faixas de imageamento BRA2.5 ( $N78^{\circ}W$ ) e BRA2.4 ( $N78^{\circ}E$ ).

Na imagem analisada do sensor orbital ERS-1 sobre a área de estudo em Salobo, pode-se observar que o sentido de iluminação é o parâmetro mais importante que atua sobre o retrobrilho. Esta verificação concorda com as conclusões de Lowman, et al., (1987) e Singhroy, et al., (1993) em trabalhos com radares orbitais sobre o Escudo Canadense, os quais observaram o forte efeito da direção da iluminação, especialmente para feições que se mantinham num intervalo inferior a  $20^\circ$  do alinhamento da visada do sensor. Tais feições eram suprimidas prejudicando sobremaneira a interpretação da imagem.

O mais expressivo exemplo deste efeito, está localizado na imagem ERS-1 junto a faixa de ocorrência da zona de cisalhamento retilínea (Siqueira, 1990); a sul do acampamento Salobo, onde um conjunto de serras perfeitamente delineados nos produtos SAREX, confunde-se com terrenos mais baixos tornando impossível via ERS-1, a discriminação dos elementos texturais que apresentam direção estrutural próxima a  $N70^\circ W$ , isto é, a menos de  $10^\circ$  da direção paralela a iluminação radar.

Para concluir, observa-se que o realce de lineamentos varia muito com a direção de visada, portanto uma análise destes lineamentos requer ao menos dois recobrimentos radar sob direções preferencialmente ortogonais.

#### 6.4.3.3 - RESOLUÇÃO

A comparação do parâmetro resolução está fundamentada na análise das faixas BRA2.5 VV (SAREX) e no produto ERS-1, numa área de recobrimento comum sobre Salobo. Ambas imagens possuem polarização vertical e ângulo de iluminação  $N78^\circ W$ , sendo diferentes apenas no ângulo de incidência e na resolução, Figuras 6.38 e 6.39.

Resguardada a influência do parâmetro ângulo incidente discutida anteriormente, observa-se a importância da resolução quando se compara a extração de elementos texturais de relevo e drenagem entre as faixas citadas.

A altíssima resolução do SAR CV 580 (6X6 m), permite a obtenção de 1538 traços estruturais, enquanto que a resolução do SAR ERS-1 (25X25 m), restringe-se a menos que um terço deste valor, para uma mesma área.

Outro aspecto notado refere-se ao fato de que, a cena com melhor resolução no produto SAREX, apresenta uma textura granulométrica, atribuída a visualização das copas das árvores, que suplanta a ocorrência do ruído "speckle". Este fato diferencia sobremaneira os dois produtos, pois no caso da imagem orbital a presença do referido ruído prejudica muito a interpretabilidade do produto.



Fig. 6.38 - Foto mostrando a performance da altíssima resolução SAR CV 580 (6X6 m) na mina de cobre Salobo - faixa BRA2.5 VV. Notar os pontos: 1 - acampamento Salobo e 2 - represamento do rio Salobo. Escala aproximada 1: 50.000.



Fig. 6.39 - Foto mostrando o mesmo local acima, sob resolução do SAR orbital ERS-1 (25 X 25 m). Notar os mesmos pontos indicados. Escala aproximada 1: 100.000.

#### 6.4.4 - PARÂMETROS DO ALVO

A orientação das facetas de declividade ou frente de encostas em relação a direção de visada do radar e seu ângulo de depressão é o mais importante parâmetro do alvo nos ambientes naturais com vasto recobrimento florestal, pois controla o retroespalhamento e consequentemente a tonalidade da imagem; (Koopmans, 1985).

Ângulos incidentes normais a estas facetas apresentam o sinal de retorno muitas vezes mais alto que ângulos de incidência que apresentam-se dentro do intervalo de platô no diagrama de Lung na Figura 6.30. O fato da variação na orientação da declividade é ainda mais importante com respeito aos valores de retroespalhamento. Esta afirmação é particularmente verdadeira em terrenos montanhosos ou recobertos por densa vegetação úmida, a exemplo da área teste, onde os fatores rugosidade superficial e propriedade dielétrica podem ser negligenciados, já que não é possível a interação do feixe microondas diretamente com o substrato rochoso.

Nas imagens orbitais, a importância do efeito topográfico é notado principalmente nos terrenos com relevo baixo, onde a orientação das facetas de declividade em relação ao ângulo incidente agudo, governa as variações bruscas do gráfico de retroespalhamento, (Figura 6.30), no intervalo denominado incidência vertical.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os dados apresentados e as discussões dos capítulos precedentes possibilitam a formulação das seguintes conclusões e recomendações, apresentadas na sequência. Cabe mencionar que as conclusões devem se restringir ao domínio estudado, ou seja, uma área de recobrimento florestal tropical denso e úmido; pois ainda não se dispõem de suficiente conhecimento para permitir extrapolações para ambientes diferentes.

#### 7.1 - ANÁLISE VISUAL DE PRODUTOS FOTOGRÁFICOS

- a) O produto SAR CV 580 de melhor performance correspondeu ao da faixa BRA2.2, escala 1: 50.000, na projeção em "slant range". A polarização horizontal HH, o ângulo de incidência variando de 45° a 76° e principalmente a direção de visada a S40°W, perpendicular ao "trend" estrutural/morfológico da área teste, formaram, entre os dez produtos analisados, o melhor conjunto na aquisição de informações geológicas. A referida imagem permitiu a fotointerpretação de 20 (vinte) unidades litológicas na área centrada em Salobo, um nível comparável aos mapeamentos de semi-detulhe até então publicados. Este fato torna-se importante ao se considerar que os mapas publicados por DOCEGEO, (1988) e Siqueira, (1990) demandaram extensos trabalhos de campo e elevados custos, enquanto que a interpretação fotogeológica do produto radar foi obtida em alguns meses e se constituiu em excelente fonte de informações geológicas.
- b) Quanto aos aspectos estruturais foi possível com os dados SAREX, a observação de todos elementos mapeados como estruturas geológicas na área de estudo, principalmente o delineamento das zonas de cisalhamento que desenham o Duplex Salobo-Mirim. A análise do parâmetro direção de iluminação para a faixa BRA2.2 HH mostra ainda que, a orientação mais destacada neste recobrimento foi N65°W ou seja, o "trend estrutural" da região mapeada.
- c) Em relação aos atributos gerais, observou-se que as drenagens quando detectadas, foram mapeadas como trechos sinuosos de coloração negra; e quando encobertas ou não diretamente visíveis, foram inferidas através da clara visualização dos vales ou pela associação vegetal típica de aluviões, que aparece destacada sob forma de uma textura lisa e homogênea. Os acessos e trechos desmatados foram facilmente discriminados por seus contornos regulares e pelo contraste tonal para com as regiões densamente recobertas por vegetação.
- d) O produto obtido pelo sensor radar ERS-1 na sua órbita 4048 de 24 de abril de 1992, escala 1: 100.000, na projeção "ground range", mostrou ser apenas de razoável correspondência às publicações prévias analisadas. A interpretação do conjunto permitiu a separação de 16 (dezesesseis) unidades fotolíticas, deixando para as áreas de relevo mais elevados, as principais dúvidas (Grupos Salobo e Pojuca). Tal fato, explica-se parcialmente pelo efeito "layover" e ruído "speckle" atribuídos ao conjunto de parâmetros que caracteriza o recobrimento ERS-1 em sua órbita descendente, ou seja, polarização VV, ângulo de incidência 23°, direção de visada N78°W e resolução espacial 25m.

- e) Os traços estruturais regionais foram bem visualizados no produto ERS-1, exceção feita a direção N75° - 85° W correspondente a zona de cisalhamento retilínea posicionada a sul do Duplex Salobo Mirim. Este fato é principalmente explicado pelo subparalelismo desta orientação estrutural em relação a direção de iluminação do satélite orbital ERS-1, (N78°W).
- f) Os atributos gerais nos produtos ERS-1 tiveram sua interpretação visual prejudicada principalmente pela baixa resolução espacial (25 m) em relação aos demais produtos radar analisados; pelo efeito distorcido de "layover" e pela ocorrência de ruído "speckle". Ainda assim, as drenagens maiores foram discriminadas por suas características de sinuosidade e reflexão especular. Os canais menores foram mapeados, ainda que, com distorção, devido ao aspecto em rede, bastante característico. Muito prejudicada mesmo, ficou a visualização das estradas e áreas desmatadas.

## 7.2 - ANÁLISE DIGITAL DOS DADOS SAR

- a) Das sete funções de aumento de contraste testadas para os dados do SAREX, três apresentaram efetivos resultados quanto a melhoria dos aspectos visuais para fotointerpretação: aumento linear de contraste, aumento não linear de Driemann e equalização de histograma. O aumento linear destacou-se para os dados de polarização vertical enquanto que o método de Driemann foi o melhor para o produto de polarização horizontal.
- b) A contribuição quanto ao realce de geoestruturas dos filtros adaptativos de Lee e de Frost aplicados nos dados SAREX, foi considerada muito sutil e por vezes imperceptível. Vale ressaltar apenas, um melhor destaque no mapeamento de estruturas para o produto BRA2.2 HH com aumento linear de contraste, filtrado pelo método de Frost, efeito este, restrito a área do "near range".
- c) O efeito da utilização de filtros adaptativos na imagem ERS-1, é claramente notado, principalmente quanto a diminuição do ruído "speckle". Observa-se uma ampliação nos contrastes texturais, o que proporciona, em especial nas áreas de relevo arrasado, uma maior discriminação de unidades litológicas. A melhor performance foi obtida pelo filtro adaptativo de Frost. No entanto, o produto que mais contribui para a análise quanto a extração de informações geológicas, foi a composição colorida RGB (Figura 6.19), onde fica clara a separação das unidades E1, E2 e A1, principalmente.
- d) Os dados SAREX foram abordados quanto às operações aritméticas segundo dois critérios. O primeiro estudo abrangeu imagens com diferentes polarizações (HH e VV), neste caso a operação de subtração destacou a pequena diferença radiométrica entre os produtos, gerando uma composição colorida que destacou a sensação de relevo, capacitando o observador discriminar nas tonalidades mais escuras as zonas mais arrasadas e nas tonalidades claras, os locais de relevo mais movimentados (Figura 6.22). A segunda etapa das operações aritméticas visou gerar novos canais a partir, da combinação dos recobrimentos SAREX, paralelos às orbitas ascendentes e descendentes do RADARSAT. Com isso, procurou-se uma atenuação do efeito direção de iluminação, obtendo-se a partir da subtração do canal BRA2.5 HH pelo canal BRA2.4 HH (Figura 6.25), o melhor produto.

### 7.3 - AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS FUNCIONAIS E DE VISADA

- a) Comprimento de onda (frequência): Apesar de pouco importante nos trabalhos geológicos de reconhecimento em áreas densamente recobertas por vegetação, devido a pouca penetrabilidade no dossel, pode-se afirmar que a Banda C, comum aos dois instrumentos radar analisados, adapta-se muito bem aos objetivos pretendidos. Primeiro, por ser sensível as ondulações do relevo e segundo, por possibilitar, ainda que grosseiramente, uma diferenciação entre os tipos vegetais e consequentemente, entre as variações do substrato rochoso.
- b) Polarização: Dentro dos limites da área de estudo, pode-se afirmar que o resultado quanto a obtenção de dados geológicos é o mesmo para as polarizações paralelas HH e VV, no que concerne à análise visual. Quando analisado digitalmente, o parâmetro polarização apresenta sutil diferença, sendo que, a polarização paralela horizontal (HH) tem um histograma com distribuição mais equalizada e média de intensidade maior que na polarização vertical, sem no entanto com isso melhorar a performance na extração de informações geológicas. Isto se deve provavelmente, ao fato do feixe microonda interagir ainda a nível do recobrimento florestal.
- c) Ângulo de incidência: Baseado nas observações das faixas de recobrimento SAREX pode se afirmar que o ângulo de incidência e seu complementar ângulo de depressão são parâmetros de grande importância na obtenção de dados geológicos. Na faixa BRA4.4 de modo amplo nota-se que próximo ao "far range" onde o ângulo incidente atinge valores próximos a  $80^\circ$ , esta visada rasante, especialmente nas áreas com relevo elevado, dá origem à faixas de sombreamento extensas com perda de informação. Por outro lado, as faixas do modo nadir (BRA2.3, BRA2.4 e BRA2.5), apresentam problema junto ao "near range", onde o ângulo incidente por volta  $28^\circ$  é responsável pelo efeito denominado "foreshortening", o qual acarreta perda de informação, devido a distorção, em cerca de 15% da área imageada. Assim sendo, a faixa do modo estreito com ângulos incidentes compreendidos no intervalo de  $45^\circ$  a  $76^\circ$ , apresenta-se como o conjunto mais adaptado ao mapeamento geológico, permitindo maximizar a extração de feições estruturais e texturais principalmente nos terrenos com relevo elevado. Este modo também não apresenta perda de informações por excessos de sombreamento, nem tão pouco áreas distorcidas. Por sua vez, a imagem obtida pelo sensor radar orbital ERS-1 que tem ângulo incidente médio igual a  $23^\circ$ , apresentou boa performance quanto as informações obtidas nas áreas mais arrasadas (Associações Xingu). Em contrapartida, nas regiões montanhosas, o ângulo agudo dá origem a expressiva ocorrência do efeito "layover" e "foreshortening" com perda de informações, em especial de caráter estrutural.
- d) Direção de visada: A interpretabilidade das imagens radar está intimamente relacionada com a escolha da direção de visada ("look direction") e sua respectiva relação com a direção do "trend" estrutural ou alinhamento das feições morfológicas da área alvo. Uma direção de visada perpendicular às estruturas, realça a morfologia facilitando a interpretação, enquanto que uma orientação paralela ao alinhamento estrutural torna a interpretação muito difícil e prejudicada. Conclui-se, portanto, que quanto a este aspecto, a imagem SAREX BRA2.2, programada para recobrir a área teste sob direção de visada  $S40^\circ W$ , isto é, sub- ortogonal à morfologia e estruturação locais, apresentou a melhor performance na confecção do mapa fotogeológico de Salobo exposto no apêndice A. Deve-se salientar no entanto, que em regiões com elevada topografia, o efeito sombreamento, causado pela visada ortogonal às feições de relevo, acarreta perda de informações, principalmente nas áreas próximas ao "far range". Pode se ainda afirmar que, quanto a uma prévia avaliação das geometrias de imageamento disponíveis nos radares orbitais RADARSAT e ERS-2, para a área estudada, maiores

informações geoestruturais devem ser obtidas a partir de imagens das órbitas ascendentes com direção de visada N78°E, paralela a orientação das faixas SAREX BRA2.3 e BRA2.4. Ainda dentro deste item, permite-se a afirmação de que a faixa BRA2.5 e o recobrimento ERS-1 em órbita descendente ambas orientadas a N78°W, foram a de pior performance, devido ao sub paralelismo desta direção com o "trend" estrutural e morfológico da região.

- e) **Resolução:** Obviamente a grande diferença entre as resoluções espaciais do SAR CV 580 (6 m) e do SAR orbital ERS-1 (25 m) é notada quando da análise na extração de atributos gerais e feições geológicas. Como discutido anteriormente, algumas feições não são discriminadas na imagem ERS-1, como por exemplo o acampamento Saiobo. Algumas quebras negativas também próximas ao referido acampamento não são detectadas no SAR orbital, aparecendo, no entanto, com certa clareza no produto SAREX. Isto acarreta no contexto geral um maior número de unidades fotogeológicas nos produtos de radar aerotransportado. Outro fato significativo quanto a resolução dos produtos, refere-se a ocorrência de ruído "speckle" nos produtos ERS-1, fato este que não acontece nos produtos SAREX devido a alta resolução que discrimina detalhes na imagem os quais suplantam o efeito de ruído.

#### **7.4 - IMPORTÂNCIA DOS PARÂMETROS DO ALVO**

Devido a fatores tais como; pouca penetrabilidade da Banda C no denso recobrimento vegetal da área teste, impossibilitando a interação direta do feixe microondas com o substrato rochoso e a umidade constante e uniformemente distribuída, os fatores rugosidade superficial e propriedade dielétrica não podem ser considerados na análise dos parâmetros geológicos da área teste. Sendo assim, conclui-se que, para estas condições, apenas deve ser considerado como características do alvo, suas propriedades topográficas ou seja, a orientação das facetas de declividade do terreno para com a direção de visada do radar e seu ângulo incidente. Este fator da superfície governa em primeira ordem, a intensidade de retroespalhamento na região de estudo.

#### **7.5 - AVALIAÇÃO DO POSSÍVEL DESEMPENHO DO RADARSAT**

Dentro dos objetivos do Projeto SAREX, de análise e avaliação dos parâmetros de radar para o futuro imageamento orbital do RADARSAT, pode se adiantar as seguintes conclusões preliminares quanto a performance para o mapeamento geológico na área teste.

- a) Banda de frequência C - caracterizada por pouca penetração na cobertura vegetal e boa sensibilidade quanto as variações de relevo, portanto; relativamente bem adaptada para finalidades geológicas - geomorfológicas.
- b) Polarização paralela horizontal - a de melhor adaptação para mapeamento de geoestruturas, devido ao caráter horizontalizado destes alinhamentos.
- c) Ângulo de incidência compreendido entre 20 e 50° - esta faixa encampa tanto as características do ERS-1 (23°) com boa performance para áreas arrasadas e planas; como as características do SAR CV 580 onde o ângulo incidente superior a 40° propicia

bom rendimento de sombreamento para regiões de relevo elevado, com isenção do efeito "layover".

- d) Direção de visada - órbita ascendente (N78°E) melhor adaptada às características da área teste por ser sub ortogonal ao "trend" estrutural representado pela direção N65°W. Órbita descendente (N78° W) não adaptada às características supracitadas, sendo sub paralela aos alinhamentos estruturais, os quais terão sua visualização altamente prejudicada.
- e) Resolução - compreendida entre 10 e 100 m, conjuntamente a largura de recobrimento entre 50 e 500 Km, adapta-se às finalidades tanto de mapeamentos de semi detalhe como de mapeamentos regionais.

## 7.6 - CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO GEOLÓGICO NA ÁREA DE SALOBO

As publicações que estabelecem a cartografia geológica, até então mais completa da área teste, referem-se as de DOCEGEO (1988), Macambira (1990) e Siqueira (1990). Entretanto, este trabalho demonstra com base no mapa fotogeológico de Salobo (apêndice I), ser possível algumas contribuições no âmbito geológico, conforme segue:

- a) A subdivisão da unidade denominada genericamente como Complexo Xingu, por Araujo et al., (1988), em duas Associações: (1)- Associação Xingu 1 (E<sub>1</sub>) - como composta por rochas granito gnáissicas migmatizadas, discriminada pela tropia multidirecional ordenada de elementostexturais de relevo e drenagem e média resistência a erosão e; (2)- Associação Xingu 2 (E<sub>2</sub>) -caracterizada como um conjunto de litologias metassedimentares e metavulcânicas com migmatização incipiente (facies anfíbolito), discriminada pela estruturação desordenada e baixa resistência a erosão, aparecendo na área mapeada como extensas áreas planas com aspecto tonal cinza claro homogêneo.
- b) A divisão em quatro unidades faciológicas (unidades G1, G2, G3, e G4), da unidade litoestrutural, mapeada pela DOCEGEO, (1988), sob a denominação geral de Grupo Rio Fresco. Em especial no apêndice I fica claro a distinção de quatro quebras negativas no interior desta unidade, fato este comprovado durante as atividades de campo quando foi possível a diferenciação de termos metassedimentares que intercalados variavam de metarenitos a metargilitos mais ou menos milonitizados. É possível visualizar esta separação também nas perfilações de campo atribuídas a Gouveia, (1989).
- c) A discriminação dos depósitos aluvionares regionais, correspondentes à áreas com potencial econômico; obtida através do contraste tonal atribuído a associação vegetal que se desenvolve sobre estas regiões (classe G - Figura 2.2). O aspecto textural liso e homogêneo nos produtos fotográficos é devido à cobertura vegetal onde predominam palmeiras e o substrato sedimentar aparece comumente alagado.
- d) Discriminação de estruturas circulares, principalmente no produto imagem ERS-1, na região do Duplex Salobo-Mirim, representadas na Figura 6.7 como unidade F, ou seja, granitos intrusivos tipo Serra dos Carajás. Tais estruturas podem também ser atribuídas a regiões de conexão entre zonas de cisalhamento.

## 7.7 - RECOMENDAÇÕES

- 1 - Quanto às aplicações geológicas em ambientes tropicais através de radares aerotransportados de alta resolução, assim como de radares orbitais.
  - a) Configurar um recobrimento nos moldes do Projeto SAREX para regiões com ampla exposição do substrato rochoso, onde seria possível a melhor caracterização dos parâmetros de discriminação litológica ou seja, rugosidade superficial e constante dielétrica. A sugestão recai sobre áreas do nordeste brasileiro onde a restrita vegetação de caatinga possibilitaria a interação direta do feixe de microondas com a umidade contida no solo. Tais estudos complementariam a caracterização dos parâmetros do alvo na resposta radar, dos quais, neste trabalho ficou-se restrito ao efeito topográfico, dadas as peculiaridades da área teste.
  - b) A mesma configuração acima sugerida complementar os estudos quanto a capacidade de discriminação litológica associada a multi polarização e multi frequência.
  - c) Analisar para a área de estudo a contribuição do uso da Banda L, através da comparação dos produtos imagens do satélite japonês J-ERS-1, dando atenção especialmente para fatores de discriminação de classes de vegetação e litologia. Complementar este estudo avaliando a ocorrência do ruído "speckle" e a contribuição dos filtros testados nas imagens Banda C (ERS-1) e Banda L (J-ERS-1).
  - d) Avaliar a performance em aplicações geológicas da simulação do RADARSAT através dos dados SAREX.

### 2 - Integração de dados radar com de outros sensores

Visto que as imagens radar são diferentes das outras tanto pela forma de aquisição, quanto pela região espectral trabalhada, torna-se opção atrativa uma combinação com outras fontes de dados para avaliação da magnitude da contribuição radar em conjunto com outros sensores.

A bibliografia ressalta muitos trabalhos a este respeito (Lynne e Taylor, 1986; Harris et al., 1989; Rheault et al. 1991, etc), chamando a atenção quanto a contribuição do radar principalmente em relação as propriedades geomorfológicas da superfície. Desta forma, o radar em composições tipo IHS com outros dados (TM-Landsat, Aerogeofísicos, etc), participaria com realces topográficos e texturais, auxiliando entre outras coisas no campo geológico a extração de dados estruturais.

A metodologia usada neste estudo passa por estágios básicos de processamentos preliminares como correção geométrica e radiométrica, geocodificação e no caso do produto radar, filtragens para diminuição do ruído speckle.

Na região trabalhada, os produtos mais adequados a este objetivo são as faixas BRA4.4 e o produto ERS-1, por serem em resolução os mais aproximados com os dados TM LANDSAT e geofísicos disponíveis.

Este procedimento de integração, com certeza acrescentaria novas informações ao banco de dados de Carajás, Paradella et al. (1990), que de forma geral pode não só apoiar a exploração geológica da região Amazônica, como também supervisiona-la e direcioná-la mais inteligentemente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.F.M. A evolução dos Crátons Amazônico e do São Francisco comparada com seus homólogos no hemisfério norte. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30., Recife, 1978. **Anais. Recife, Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p. 2393-2407.**
- Araujo, O.J.B.; Maia, R.G.N.; João, X.S.J.; Costa, J.B.S. A megaestruturação da Folha Serra de Carajás. In: Congresso Latinoamericano de Geologia, 7., Belém, 1988. **Anais. Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 324-336.**
- Colwell, R.N. **Manual of remote sensing.** Falls Church, VA., American Society of Photogrammetry, 1983.
- Cordani, V.G.; Neves, B.B. The geologic evolution of South America during the Archean and early Proterozoic. **Revista Brasileira de Geociências, 12 (1-3):78-88, 1982.**
- Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Serra dos Carajás, Folha SB. 22-Z-A Estado do Pará.** Brasília, NUTEC-CPRM, 1991. 70p.
- Curlander, J.C.; Kwoh, R.; Pang, S.S. A post-processing system for automated rectification and registration of spaceborne SAR imagery. **International Journal of Remote Sensing, 8(4):621-638, 1987.**
- Dall'agnoll, R.; Vieira, E.A.P.; Sá, C.A.S.; Medeiros, H.; Gastal, M.C.P.; Teixeira, N.P. Estado atual do conhecimento sobre rochas granitóides da porção sul da Amazônia oriental. **Revista Brasileira de Geociências, 16(1):11-23, 1986.**
- Dallemand, J.F.; Lichtenegger, J.; Raney, R.K.; Schumann, R. **Radar Imagery: theory and interpretation lecture notes.** Rome, Italy, FAO, 1993. 103 p. (RSC Serie nº 67).
- DOCEGEO. Revisão lito-estratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35., Belém, 1988. **Boletim Especial. Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, p.11-54.**
- Elachi, C. **Spaceborne radar remote sensing applications and techniques.** New York, N.Y., IEEE Press, 1988, 255 p.
- ESA. **ERS-1 System.** Noordwijk, Netherlands, Pam Vass & Bruce Battrick ed., 1992. 85p. (ESA SP-1146).
- Farias, N.F.; Meyer, D.J.K. O depósito de cobre Salobo 3 Alfa Serra de Carajás, Brasil. In: Symposium Amazônico, 1. Caracas, Venezuela, 1982. **Anais, Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, p. 529-537.**
- Fielding, E.J.; Knox, W.J.; Bloom, A.L. SIR-B radar imagery of volcanic deposits in the Andes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE24(4):582-589, July, 1986.**
- Ford, J.P. Seasat orbital radar imagery for geologic mapping: Tennessee-Kentucky-Virginia. **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 64 (12): 2064-2094, Dec. 1980.**

- Frost, V.S.; Perry, M.S.; Dellwig, L.F.; Holtzman, J.C. Digital enhancement of SAR imagery as an aid in geologic data extraction. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, (2):357-364, 1983.
- Graham, D.F.; Harris, J. Shuttle imaging radar-A (SIR-A) scenes from Iran and China. In: Canadian Symposium on Remote Sensing, 10., Edmonton, AB, 5-8. May, 1986. **Proceedings**. Ottawa, ON, CASI, 1986, v.1, p.513-528.
- Grover, K.D.; Quegan, S. **Radiometric quality of SAREX'92 data over Tapajós**. Sheffield, England, University of Sheffield, 1993, 35 p.
- Gouveia, J.L. **Perfil geológico Pojuca-Bahia**, Projeto Pojuca. Belém, (DOCEGEO relatório interno), 1989.
- Harris, J.; Murray, R. IHS transform for the integration of radar imagery with geological data. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canadá, 10-14 July, 1989. **Proceedings**, Piscataway, NJ, IEEE, 1989, v.1, p. 923-926.
- Hasui, Y.; Haralyi, N.L.E.; Schobbenhaus, C. Elementos geofísicos e geológicos da região Amazônica: subsídios para o modelo geotectônico. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 2., Manaus, 1984. **Anais**, Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, p. 129-147.
- Hawkins, R.K.; Teany, L.D. SAREX 1992. Data calibration. In: Workshop SAREX'92 South American Radar Experiment, 1., Paris, 6-8, Dec, 1993. **Proceedings**, Paris, ESA, 1993, p.41-53. (ESA WPP-76).
- Hirata, W.K.; Rigon, I.C.; Kadekarv, K.; Cordeiro, A.A.; Meirelles, E.M. Geologia da Província Mineral de Carajás. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 1., Belém, 1982. **Anais**, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p.100-110.
- JPL. **Radar geology: an assessment**. Report of the Radar Geology Workshop. Snowmass, CO, 16-20 July, 1979. JPL, Pasadena, CA, 1980, 513p. (JPL Publication 80-61).
- Koopmans, B.N. Report on the results in geology and geomorphology of the European SAR-580 experiment. **ITC Journal**, 3:203-206, 1985.
- Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. **Remote sensing and image interpretation**, 2.ed., New York, John Wiley and sons, 1987.
- Liu, C.C.; Paradella, W.R.; Veneziani, P.; Santos, A.R.; Bignelli, P.A.; Dias, R.R. SAREX imagery for lineament study in the Salobo area, Carajás Mineral Province (Brazil). In International Symposium on Resource and Environmental Monitoring, Rio de Janeiro, 26-30 sept, 1994. **Proceedings**. São José dos Campos, INPE, 1994, v.1, p.426-433.
- Lowman Jr, P.D.; Harris, J.; Masuoka, P.M.; Singhroy, V.H.; Slaney, V.R. Shuttle Imaging Radar (SIR-B) investigations of the Canadian Shield: Initial Report. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** GE25 (1):55-66, Jan. 1987.
- Lowman Jr, P.D. Original shade of the Sudbury structure, Canadá: a study with airborne imaging radar. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 17 (2): 152-161, Apr. 1991.
- Lynne, G.J.; Taylor, G.R. Geological assessment of SIR-B imagery of the Amadeus basin, N.T. Austrália. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE24 (4): 575-581, July. 1986.

- Macambira, J. B.; Ramos, J. F. F.; Assis, J. F. P.; Figueiras, A. J. M. **Projetos Serra Norte e Pojuca : relatório final**. Belém, MME, UFPA. 1990. 149p.
- MacDonald, H.C.; Waite, W.P. Optimum radar depression angle for geological analysis. **Modern Geology**, 2:179-193, 1971.
- NASA. **Sar Synthetic Aperture Radar: Instrument Panel Report**. S.L., 1988. (Earth Observing System, V.2f).
- Paradella, W.R.; Kushigbor, C.A.; Fabbri, A.G. Um banco de dados digitais para a exploração geológica na faixa mineralizada em Cu e Zn do Pojuca (Carajás), baseado em dados geológicos, geoquímicos, de sensores remotos e de elevação. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6.**, Manaus, 24-29 jun. 1990. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1990, v.3, p.649-662.
- Paradella, W.R. Radar em aplicações geológicas: os experimentos SAREX na Província Mineral de Carajás (Pará) e AIRSAR no vale do Rio Curaça (Bahia). In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7.**, Curitiba, 10-14 maio 1993. **Anais**. São José dos Campos, Brasil, INPE, v.3, p.282-294.
- Paradella, W. R.; Liu, C. C.; Veneziani, P.; Santos, A. R.; Bignelli, P. A.; Dias, R. R. e Singhroy, V. H. First results from a SAR investigation (SAREX data) in the Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon Region). In: **Workshop SAREX'92 South American Radar Experiment.**, 1., Paris, 1993. **Proceedings**. Paris, ESA, p. 101-111. (ESA WPP-76).
- Paradella, W. R.; Liu, C. C.; Veneziani, P.; Santos, A. R.; Bignelli, P. A.; Dias, R. R. RADARSAT: Um avançado e versátil sistema de radar orbital com grande potencialidade de aplicação em geologia e estudos ambientais. In: **Congresso Brasileiro de Geologia, 38.**, Balneário Camboriú, 23-28 out 1994. **Anais**. Balneário Camboriú, Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p. 474-475.
- Paradella, W. R.; Silva, M. F. F.; Rosa, N. A.; Kushigbor, C. A. A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of the Carajás Mineral Province (Amazon Region, Brazil), based on digital TM-Landsat and DEM data. **International Journal of Remote Sensing**, 15 (8): 1633-1648, 1994.
- PCI INC. **Using PCI software**. Richmond Hill, ON, 1993. 279 p. (PCI Committed to remote sensing version 5.2 - EASI-PACE).
- Pietsch, R.W. **TFI SAR Processing Procedure**. Ottawa, ON, Dendron Resource Surveys, CCRS, 1993. 7p.
- PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SB-22 Araguaia e parte da Folha SC-22 Tocantins**. Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Produção Mineral, 1974. (levantamento de recursos naturais, 4) 728 p.
- Renne, P.R.; Onstott, T.C., João, X.S.J. AR<sup>40</sup>/AR<sup>39</sup> and paleomagnetic results from the Guaporé shield: further implications for the nature of middle proterozoic mobile belts of gondwanaland. In: **Congresso Latinoamericano de Geologia, 7.**, Belém, 1988. **Anais**. Belém, Brasil, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 348-362.
- Rheault, M.; Simard, R.; Gameau, C.; Slaney, V.R. SAR Landsat TM-geophysical data integration utility of value-added products in geological exploratio. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 17 (2): 185-190, Apr. 1991.

- Rolim, S. B. A. **Avaliação do uso da transformação IHS na integração de dados geofísicos (Aeromagnetometria) e de Sensoriamento Remoto (TM-Landsat) para a investigação geológica na área do Pojuca (Serra dos Carajás, PA).** (Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto), INPE, São José dos Campos, 1993. 133p. (INPE-5532-TDI/521).
- Sabins Jr, F.F. **Geologic interpretation of Space Shuttle Radar images of Indonésia.** *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 67 (11): 2076-2099, 1983.
- Sant'Anna, S.I.S. **Avaliação do desempenho de filtros redutores de "speckle" em imagens de radar de abertura sintética.** (Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto em preparo), INPE.
- Shanmugan, K.S.; Narayanan, V.; Frost, V.S.; Stiles, J.A.; Holtzman, J.C. **Textural features for radar image analysis.** *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE 19 (3): 153-156, 1981.
- Singhroy, V.H.; Lowman, P.D.; Morasse, C.R. **Preliminary analysis of ERS-1 SAR for structural and surficial mapping in the Sudbury Basin, Canadá.** In: *Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, 19., Pasadena, CA, 8-11, Feb, 1993. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, ERIM, 1993.
- Siqueira, J.B. **Organização lito-estrutural do Duplex Salobo-Mirim, Serra de Carajás.** (tese de Mestrado), Belém, Universidade do Pará, 1990, 125p.
- Siqueira, J.B.; Costa, J.B.S. **Evolução geológica do Duplex Salobo-Mirim.** In: *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 3., Belém, 29 nov- 08 dez 1991. **Anais**. Belém, Brasil, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 232-243.
- Soares, P.C.; Fiori, A.P. **Lógica e Sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia.** *Notícia geomorfológica*, 16 (3): 71-104, 1976.
- Souza, Z.S.; Santos, A.R.S.; Ledsham, E.J.; Huhn, S.R.B; Gato, V.C. **Feições geológicas e estruturais do "greenstone belt" de Identidade, região de Xinguara - Rio Maria, sul do Pará.** In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 35., Belém, 1988. **Anais**, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, v.3, p.1453-1467.
- Tissi, P.; Alves, A.H. **A correção das imagens SAREX por um algoritmo de média móvel.** São José dos Campos, INPE, 1993. (INPE relatório técnico, no prelo).
- Trevett, J.W. **Imaging radar for resource surveys: remote sensing applications.** New York, NY, Chapman and Hall, 1986. 313p.
- Ulaby, F.F.; Moore, R.K.; Funk, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive.** Reading, MA, Addison-Wesley, 1982, v.2. 320p.
- \_\_\_\_\_. **Microwave remote sensing: active and passive.** Reading, MA, Addison- Wesley, 1986, v.3 360p.
- Veneziani, P.; Anjos, C.E. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia.** São José dos Campos, INPE, 1982. 45p. (INPE-227-MD/014).
- Veneziani, P.; Paradella, W.R.; Santos, A.R.; Liu, C.C.; Bignelli, P.A.; Dias, R.R. **Dados de radar do SAREX: Uma ferramenta para obtenção de conhecimentos geológicos na Amazônia.** In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 38., Balneário Camboriú, 23-28 out 1994. **Anais**. Balneário Camboriú, Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p. 457-460.

Werle, D. **Radar remote sensing: a training manual.** Ottawa, ON, 1988. 300p. (Dendron Resource Survey, Ltda).

Wooding, M.G.; Attema, E.P. **SAREX'92 (South American Radar Experiment).** Noordwijk, Netherlands, ESA, 1992, 49 P. Experimenters Handbook.

APÊNDICE A: MAPA FOTOGEOLÓGICO DA ÁREA DE SALOBO (CARAJÁS)