



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15187-TDI/1297

**AVALIAÇÃO DAS IMAGENS RADARSAT-1 SOB DIFERENTES
GEOMETRIAS DE OBSERVAÇÃO EM APLICAÇÃO
GEOLÓGICA NO VALE DO RIO CURUÇÁ (BAHIA)**

Sheila Soraya Alves Knust

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Waldir Renato Paradella e Athos Ribeiro dos Santos, aprovada em
27 de setembro de 2007.

INPE
São José dos Campos
2008

Publicado por:

esta página é responsabilidade do SID

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**Solicita-se intercâmbio
We ask for exchange**

Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15187-TDI/1297

**AVALIAÇÃO DAS IMAGENS RADARSAT-1 SOB DIFERENTES
GEOMETRIAS DE OBSERVAÇÃO EM APLICAÇÃO
GEOLÓGICA NO VALE DO RIO CURUÇÁ (BAHIA)**

Sheila Soraya Alves Knust

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Waldir Renato Paradella e Athos Ribeiro dos Santos, aprovada em
27 de setembro de 2007.

INPE
São José dos Campos
2008

528.711.7

Knust, S. S. A.


Avaliação das imagens RADARSAT-1 sob diferentes geometrias de observação em aplicação geológica no Vale do Rio Curuçá (Bahia) / Sheila Soraya Alves Knust. - São José dos Campos: INPE, 2007.

146 p. ; (INPE-15187-TDI/1297)

1. Geologia. 2. Sensoriamento remoto.
3. Azimute de visada. 4. Ângulo de incidência. I. Título.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Dr. Lênio Soares Galvão




Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Waldir Renato Paradella



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Athos Ribeiro dos Santos



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Camilo Daleles Rennó



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Alvaro Penteado Crósta



Convidado(a) / UNICAMP / Campinas - SP

Aluno (a): Sheila Soraya Alves Knust

São José dos Campos, 27 de Setembro de 2007

“No caráter, na conduta, no estilo, em todas as coisas, a simplicidade é a suprema virtude”.

Henry Wadsworth Longfellow

Dedico esta dissertação com especial carinho a meus pais Dalton e Flora e a meus irmãos Shirley, Sandra e Sérgio, que sempre me deram o aporte e segurança à minha formação moral e acadêmica.

AGRADECIMENTOS

A meus pais por acreditarem na importância do estudo, e sempre estarem ao meu lado.

A meus irmãos, cunhados e sobrinhos, pelo amor e união que fazem da nossa família o alicerce de nossas vidas.

Aos meus orientadores Dr. Waldir Renato Paradella e Dr. Athos Ribeiro dos Santos, pelo conhecimento transmitido, e pela orientação e apoio na realização deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela oportunidade de estudos, utilização de suas instalações e pelo fornecimento das imagens RADARSAT-1.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro de dois anos de bolsa de mestrado.

Às irmãs que a vida me presenteou: Carol e Poly, pelo bom humor, compreensão e amizade que me proporcionaram momentos inesquecíveis e muito divertidos.

Ao meu grande amigo Tiago Rabelo, pela amizade, paciência e presteza com o qual sempre pude contar.

Ao John, pelos momentos agradáveis, ensinamentos e conselhos.

Aos meus queridos amigos Marquinhos e Gabriel, pela fiel amizade e ajuda nos momentos mais difíceis.

Aos demais colegas e amigos do curso de Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: Taíse, Wagner, Arnaldo, Iwashita, Javier, Rui, Fábio, Annette, Mariana, Mírcea, Pablo, Roberta, Allan, Vivi, Ramon, Daniel, Marcos, Delano, Enner, Gisele, André e todos os outros que fizeram parte desta grande família Inpeana. Pelo ótimo convívio, ensinamentos e companheirismo durante esta etapa de nossas vidas.

Ao Tiago Badal, pela valiosa ajuda na formatação deste documento e auxílio no *abstract*.

À Dra. Leila Amorim da UFBA, e ao Dr. Camilo Daleles Rennó pelas ajudas e sugestões nas análises estatísticas.

Ao estimado Dr. Paulo Veneziani (*in memoriam*) pelas breves mas importantes discussões geológicas.

Às queridas e prestativas Etel e Vera, pela dedicação e bom humor sempre.

A Deus, pela oportunidade de crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

RESUMO

As imagens de radar de abertura sintética vêm sendo utilizadas com sucesso como uma importante ferramenta em auxílio a diversos estudos de cunho geológico, principalmente em regiões de clima tropical úmido. Entretanto, são poucos os trabalhos que envolvem o sistema radar em regiões de clima semi-árido, onde há uma interação mais direta entre a radiação eletromagnética com as rochas/solo devido à escassez de cobertura vegetal densa. Desta forma, o objetivo desta investigação foi o de avaliar o potencial geológico de um conjunto de imagens do satélite RADARSAT-1, obtidas em diferentes configurações de ângulo de incidência, direção de visada e resolução espacial na região do Vale do Rio Curaçá. A área de estudo localiza-se ao norte do estado da Bahia, e é considerada uma região de interesse econômico devido às mineralizações de cobre hospedadas em alguns corpos máficos-ultramáficos. Possui relevo plano, clima semi-árido, vegetação rala de caatinga e abundante exposição de solos residuais. Duas linhas de pesquisa foram levadas em conta nesta investigação: (a) qualitativa, através da análise visual monoscópica da imagem de alta resolução espacial e estereoscópica das imagens SAR de menor resolução e; (b) quantitativa, por meio de análises por componentes principais, análises da rugosidade superficial medida em campo, análises estatísticas da separabilidade dos litotipos (teste-t *Student*), e estudo das relações entre os parâmetros do alvo com os do sensor (análise de regressão simples). Os resultados da análise qualitativa mostraram uma boa performance da análise visual monoscópica e estereoscópica quanto à caracterização geológica da área de estudo, delimitando-se com mais precisão os contatos, falhamentos e cinemática das estruturas. Quanto ao estudo quantitativo, a análise por componentes principais mostrou ser uma técnica eficiente para o estudo da influência dos parâmetros do sensor (variação do ângulo de incidência e azimute de visada), com resultados que indicam que a variação do azimute de visada é mais relevante que a variação do ângulo de incidência para esse tipo de ambiente. Análises estatísticas dos valores de retroespalhamento corroboraram com esta afirmativa, e também indicaram que imagens com ângulos de incidência maiores e com órbita descendente produziram melhores resultados na separabilidade dos litotipos. Quanto à relação dos coeficientes de retroespalhamento com os parâmetros do alvo concluiu-se que o efeito da micro-rugosidade do terreno é o maior responsável pelas variações da resposta dos alvos ($r^2=0,57$), seguido pelos efeitos da variação local de declividade e erros inerentes as medições de campo, já que a constante dielétrica foi desconsiderada neste estudo.

EVALUATION OF RADARSAT-1 IMAGES ACQUIRED UNDER DISTINCT
VIEWING GEOMETRY APPLIED FOR GEOLOGICAL APPLICATION IN THE
CURAÇÁ RIVER VALLEY (BAHIA)

ABSTRACT

Synthetic aperture radar images have been successfully used in geological applications, mainly in moist tropical regions. However, only a few examples deal with radar images in semi arid regions, where the interaction between the electromagnetic radiation and the rock/soil is more direct, due to the lack of dense vegetation coverage. Therefore, the objective of this investigation is to evaluate the potencial of providing geological information from a set of RADARSAT-1 satellite images, acquired under different incidence angles, look directions and spatial resolutions at the Curaçá River Valley region. The study area is located in the north of Bahia state and has economic potential owing to copper mineralization hosted in mafic-ultramafic rocks. The study area is characterized by plain landscape, semi-arid weather, caatinga type vegetation and residual soil exposure. Two research approaches have been considered in this investigation: (a) qualitative, through visual monoscopic analysis of the high resolution images and stereoscopic in lower SAR resolution images; (b) quantitative, by principal component analysis, superficial roughness field measurement analysis, rock distinction statistic analysis (test-t Student), and the study between target and sensor parameters relations (simple regression analysis). The qualitative study showed good performance in characterizing geologically the region both with monoscopic and stereoscopic visual analysis, delimiting more precisely rock contacts, faults and structure cinematics. In relation to the quantitative study, the principal component analysis shows that the technique is efficient when studying the sensor parameters influence (incidence angles and look directions variations) with results indicating that the azimuth variation is more relevant than the incidence angle in this type of environment. The backscattering statistical analysis corroborates this statement and also indicates that images with higher incidence angles and descendent orbit lead to better distinction results between the rock types. The analysis of the relationship between the backscattering coefficient and the target parameters indicated that the terrain micro roughness is the main responsible for the target response variations. The effects of the local slope variation also contributed to the detected response variations.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Contexto e Justificativa	23
1.2	Objetivo Geral	24
1.3	Objetivos Específicos	24
2	O SISTEMA DE IMAGEAMENTO POR RADAR	27
2.1	Introdução.....	27
2.2	Parâmetros relacionados ao sistema sensor	29
2.2.1	Frequência / comprimento de onda.....	29
2.2.2	Polarização	29
2.2.3	Ângulo de incidência.....	30
2.2.4	Direção ou azimute de visada.....	33
2.3	Parâmetros do Alvo	34
2.3.1	Rugosidade da Superfície	34
2.3.2	Constante Dielétrica	35
2.4	RADARSAT-1	36
3	FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA	39
3.1	Atenuação do Ruído <i>Speckle</i>	39
3.2	Correção Geométrica.....	40
3.3	Coefficiente de Retroespalhamento	40
3.4	Análises Visuais	41
3.4.1	Análise Monoscópica.....	41
3.4.2	Análise Estereoscópica.....	44
3.5	Análise por Componentes Principais.....	45

4	ÁREA DE ESTUDO	49
4.1	Localização	49
4.2	Aspectos Fisiográficos	50
4.3	Geologia Regional e Tectônica	52
4.3.1	Porção Norte do Cráton São Francisco	54
4.4	Geologia Local	56
4.4.1	Estudos anteriores	56
4.4.2	Cartografia Geológica da Área	57
4.4.3	Recursos Minerais	61
5	MATERIAIS E MÉTODOS	63
5.1	Materiais	63
5.1.1	Dados SAR	63
5.1.2	Dados Climáticos	63
5.1.3	Dados Geológicos e Cartográficos	64
5.1.4	Materiais de campo	65
5.1.5	Software	65
5.2	Métodos	66
5.2.1	Seleção da Área	67
5.2.2	Campanha de campo	67
5.2.3	Pré-Processamento	69
5.2.4	Análise Visual das Imagens SAR	71
5.2.5	Processamentos e Análises Estatísticas	74
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
6.1	Pré-Processamento das Imagens	79
6.2	Análise Visual	79
6.2.1	Análise Monoscópica	79
6.2.2	Identificação dos elementos de imagem	80
6.2.3	Análise Estereoscópica	95
6.3	Análise por Componentes Principais (ACP)	102
6.4	Análise da Micro-Topografia	108

6.4.1	Análise do Coeficiente de Retroespalhamento	113
6.4.2	Análise das relações entre coeficiente de retroespalhamento x h_{rms}	117
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	123
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
	APÊNDICE A	135
	APÊNDICE B	139
	APÊNDICE C	141
	APÊNDICE D	143

LISTA DE FIGURAS

2-1 – Espectro eletromagnético e as bandas da região de microondas.....	27
2-2 – Relação entre os ângulos de incidência, depressão (no caso de radar aerotransportado) e visada no mapeamento por radar.....	30
2-3 – Diagrama de Long mostrando a dependência entre o coeficiente de retroespalhamento e o ângulo de incidência.....	31
2-4 – Relação entre tipo de terreno imageado e ângulo de incidência.....	32
2-5 – Curvas de retroespalhamento para superfícies lisas, intermediárias e rugosas, em função do ângulo de incidência.....	32
2-6 – Diagrama mostrando a supressão de lineamentos e destacando os melhores ângulos para a detecção das feições lineares.....	33
2-7 – Modelo de padrões de espalhamento para uma superfície horizontal.....	35
2-8 – Diferentes modos de aquisição de imagens do RADARSAT-1.....	37
3-1 – Representação hipotética da orientação dos novos eixos (novas imagens) após a transformação por componentes principais.....	46
4-1 – Mapa de localização da área de estudo. Em vermelho têm-se os limites municipais, e a área de estudo em cinza.....	49
4-2 – Características geomorfológicas da área de estudo. (a) Vasta superfície de pediplanação; (b) Serra da Cana Brava ao fundo.....	50
4-3 – Hidrografia da área de estudo. Detalhe para o Rio Curaçá na época da seca (a); e para o Rio São Francisco (b).....	51
4-4 – Aspectos da vegetação da área de estudo. (a) Contraste da vegetação verde no aluvião com a vegetação seca do biotita-gnaiss; (b) Vegetação densa e seca do quartzo-mica xisto.....	52
4-5 – Configuração geral do Cráton São Francisco.....	53
4-6 – Porção norte do Cráton São Francisco.....	54
4-7 – Posições postuladas dos blocos Arqueanos e início da colisão Paleoproterozóica.....	55
4-8 – Mapa geológico do Vale do Rio Curaçá.....	58

4-9 – Coluna Litoestratigráfica do mapa geológico do Vale do Rio Curaçá referente a Figura 4.8.....	59
4-10 – Mapa Litológico de referência.....	60
5-1 – Precipitação pluviométrica mensal (mm) da Estação Agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina-PE 09°09'S 40°22'W) para o ano 2003. Destaque para os meses de aquisição das imagens RADARSAT-1.....	64
5-2 – Rugosímetro utilizado para as medidas de rugosidade superficial.....	65
5-3 – Fluxograma da metodologia do trabalho.....	66
5-4 – Recobrimento original das imagens RADARSAT-1 e limite dos principais mapas geológicos de referência para a área de estudo (em destaque com a imagem).....	67
5-5 – Digitalização do perfil de rugosidade.....	68
5-6 – Fluxograma da análise monoscópica. Etapas: identificação dos elementos de imagem em preto; análise dos elementos de imagem em cinza e; interpretação dos elementos de imagem em azul.....	72
5-7 – Fluxograma com a metodologia adotada na análise estereoscópica de cada par.....	73
5-8 – Foto ilustrativa do monitor ZSCREEN® 2000.....	74
6-1 – Imagem RADARSAT-1, modo fine 2 com órbita ascendente: a) Rio São Francisco; b) Rio Curaçá; c) Serra da Cana Brava, d) Serrote do Lajedo; e) Serra Redonda, f) Serrote do Velho Chico.....	80
6-2 – Rede de drenagem extraída a partir da imagem RADARSAT-1 (F2A) e do mapa geológico de Delgado e Souza (1975).....	82
6-3 – Feições lineares (em preto) e alinhamento de drenagem (em azul).....	83
6-4 – Zonas homólogas de drenagem (em azul) sobre as feições lineares de drenagem.....	84
6-5 – Quebras positivas (linha tracejada em verde) e quebras negativas (linha contínua em marrom) de relevo. Principais serras e serrotes da região: (a) Serra da Cana- Brava, (b) Serrote do Lajedo, (c) Serra Redonda, e (d) Serrote do Velho Chico.....	85
6-6 – Feições lineares de relevo (em preto) e alinhamentos de relevo (em vermelho).....	86
6-7 – Mapa de zonas homólogas de relevo.....	87
6-8 – Mapa de zonas homólogas de tonalidade.....	88
6-9 – a) Zonas homólogas integradas; b) Mapa de alinhamentos integrados.....	90

6-10 – Mapa geológico obtido a partir da análise visual da imagem F2A.....	95
6-11 – Par estereoscópico S7A x S2A.....	96
6-12 – Detalhe da diferença de realce nas drenagens devido à variação do ângulo de incidência das imagens S2A e S7A.....	97
6-13 – Par estereoscópico S7D x S2A.....	98
6-14 – Diferenças do realce morfológico da Serra da Cana Brava com a variação do ângulo de incidência e direção de visada.....	99
6-15 – Par estereoscópico S7D x S7A.....	100
6-16 – Contribuições dos canais originais para a primeira (a), segunda (b), terceira (c), e quarta componente principal (d).....	103
6-17 – Imagens componentes principais das imagens RADARSAT-1, modos F2A, S2A, S7A, e S7D. a) Primeira componente principal; (b) Segunda componente principal; (c) Terceira componente principal; (d) Quarta componente principal.	104
6-18 – Composição colorida R(CP-1) G(CP-2) B(CP-3), e demarcação dos litotipos.....	106
6-19 – Perfis de rugosidade dos principais litotipos e coberturas da área de estudo.....	108
6-20 – Pontos com medidas de rugosidade de campo.....	109
6-21 – Coeficiente de retroespalhamento σ_0 versus litotipos analisados. Os círculos indicam os litotipos que apresentaram médias iguais, e as letras em maiúsculo representam os grupos definidos através da análise dos dados. (a) Resultados com a imagem S2A; (b) imagem S7A; (c) imagem S7D.....	115
6-22 – Curvas de retroespalhamento para superfícies lisas, intermediárias e rugosas, em função do ângulo de incidência.....	117
6-23 – Estudo da normalidade da variável dependente (σ_0 -S7D): (a) Histograma de frequência; (b) Probabilidade normal.....	118
6-24 – Relação dos resíduos padronizados com a variável explicativa variância ($1/h_{rms}$).....	120
6-25 – Estudo da normalidade dos resíduos padronizados: (a) Histograma de frequência; (b) Probabilidade normal.....	121

LISTA DE TABELAS

2-1 – Parâmetros do sistema e do alvo que influenciam no sinal de retorno do radar....	28
2-2 – Características dos modos de imageamento do RADARSAT-1.....	38
3-1 – Propriedades dos elementos texturais e das formas.....	43
3-2 – Interpretação geológica dos elementos texturais e das formas.....	43
4-1 – Características dos solos do Vale do Rio Curaçá.....	51
5-1 – Características gerais das imagens RADARSAT-1 utilizadas na pesquisa.....	63
6-1 – Erro médio quadrático (RMSE) obtido no processo de correção geométrica das imagens RADARSAT-1.....	79
6-2 – Quadro-legenda das propriedades dos elementos texturais e das formas de drenagem.....	84
6-3 – Quadro-legenda das propriedades dos elementos texturais e das formas de relevo.....	87
6-4 – Quadro-legenda das propriedades das zonas homólogas de tonalidade.....	89
6-5 – Relação entre as zonas homólogas integradas com as de drenagem e relevo.....	90
6-6 – Relação entre as zonas homólogas integradas e tipos litológicos.....	91
6-7 – Características dos pares estereoscópicos RADARSAT-1.....	95
6-8 – Performance dos pares estereoscópicos em relação à geologia da área de estudo.....	101
6-9 – Matriz de correlação das imagens RADARSAT-1.....	102
6-10 – Matriz de auto-vetores ou de transformação, baseado na matriz de covariância.....	103
6-11 – Autovalores ou variância dos novos canais, com as respectivas porcentagens de informação.....	104
6-12 – Valores de h_{rms} obtidos a partir dos perfis de rugosidade, e análise dos dados segundo o Critério de Rayleigh.....	110
6-13 – Valores da altura RMS obtidos a partir dos perfis de rugosidade, e análise dos dados segundo o Critério de Peake e Oliver.....	112
6-14 – Coeficientes de retroespalhamento e desvio padrão para os litotipos analisados.....	113

6-15 – Conjunto de observações para a variável dependente (σ_0 da imagem S7D) e independente (h_{rms} descendente).....	118
6-16 – Matriz de correlação linear das variáveis independentes e dependentes antes e após a transformação aritmética da variável independente.....	119
6-17 – Parâmetros da regressão linear simples.....	119

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Justificativa

Dados de sensoriamento remoto têm sido utilizados como uma importante ferramenta no auxílio de diversas áreas de pesquisa (agricultura, cartografia, geologia, engenharia florestal, ambiental, etc.). O desenvolvimento de novas tecnologias e de novos sensores, capazes de coletar informações em diferentes porções do espectro eletromagnético, fornece subsídios importantes para o avanço da pesquisa científica, especialmente nas geociências.

Desta forma, estudos de cunho geológico envolvendo imageamento por radar são cada vez mais comuns. Tais imagens realçam a topografia (macro-relevo) e a rugosidade superficial (micro-topografia), além de fornecer valiosas informações geológicas, como por exemplo, o realce de estruturas, de unidades litológicas e de padrões geobotânicos (PARADELLA et al., 1998).

Diferentemente dos sensores remotos passivos, os sistemas radares possuem a sua própria fonte de energia, operam em uma faixa de comprimento de onda maior que a do espectro óptico, e a interação energia-matéria relaciona-se com as características elétricas e geométricas do alvo (FORD et al., 1998). Tais particularidades fazem com que estes sistemas possam operar tanto de dia quanto à noite e através da cobertura das nuvens, fumaça, bruma e até chuva, dependendo da banda utilizada.

Devido a tais características, muitos trabalhos são desenvolvidos em ambientes com condições climáticas adversas ao imageamento óptico (MORAIS, 1998; CUNHA, 2002; TERUYA, 2002), e em especial na região amazônica, onde se encontram importantes províncias minerais. Entretanto, são poucos os trabalhos que envolvem o sistema radar em regiões de clima tropical semi-árido do país, onde há uma interação mais direta entre a radiação eletromagnética com as rochas/solos devido à escassez de cobertura vegetal densa.

Esta dissertação surgiu da necessidade de avaliar o potencial das imagens de radar de abertura sintética (SAR – *Synthetic Aperture Radar*) no mapeamento geológico de regiões de clima semi-árido, que atualmente abrange uma área de aproximadamente 974.800 km² do território brasileiro (EMBRAPA SEMI-ÁRIDO). Como suporte, utilizou-se imagens do satélite RADARSAT-1 em diferentes resoluções espaciais, ângulos de incidência e/ou azimutes de visada.

A área selecionada, porção do baixo Vale do Rio Curaçá, localiza-se ao nordeste do estado da Bahia e encerra no seu substrato corpos máficos-ultramáficos com potencial para mineralização de cobre. Mapeada em escala de semi-detalle por Delgado e Souza (1975), a área de estudo possui grande variabilidade de rochas e estruturas geológicas, o que torna a pesquisa mais interessante, além dos interesses prospectivos.

Duas abordagens complementares foram enfocadas nesta investigação: uma mais qualitativa, através da análise visual monoscópica e estereoscópica das imagens SAR; e outra mais quantitativa, por meio da avaliação dos valores de retroespalhamento em relação às unidades litológicas analisadas, medidas da rugosidade superficial do terreno, e técnicas de processamento digital de imagens.

1.2 Objetivo Geral

A pesquisa visa avaliar, qualitativa e quantitativamente, o potencial de aplicabilidade geológica das imagens RADARSAT-1 obtidas em diferentes configurações de ângulo de incidência, direção de visada e resolução espacial para um setor no baixo Vale do Rio Curaçá, a partir de técnicas de processamento digital de imagem, interpretação visual (mono e estéreo) e análises estatísticas.

1.3 Objetivos Específicos

A investigação abrangeu os seguintes objetivos específicos:

a) Caracterizar os litotipos e estruturas geológicas do Vale do Rio Curaçá a partir de técnicas de processamento de imagens e interpretação visual.

- b) Interpretar e comparar os pares estereoscópicos, a partir da análise dos diversos aspectos teóricos que envolvem a estereoscopia de radar e através da análise visual, a fim de auxiliar na caracterização geológica da área de estudo.
- c) Avaliar a influência da variação dos parâmetros do sensor (azimute de visada e ângulo de incidência) e do alvo (rugosidade superficial) na discriminação dos litotipos.
- d) Investigar a potencialidade de discriminação litológica através de análises dos coeficientes de retroespalhamento e verificar a influência da rugosidade nestas respostas.
- e) Comparar as informações geológicas que serão obtidas neste trabalho com informações obtidas anteriormente na bibliografia.

2 O SISTEMA DE IMAGEAMENTO POR RADAR

2.1 Introdução

O termo RADAR é um acrônimo da expressão inglesa *Radio Detection And Ranging* e refere-se a um dispositivo sensor capaz de detectar informações dos alvos através da indicação da sua posição e distância (SABINS, 1996). Este sistema difere dos sistemas ópticos no que diz respeito à faixa de comprimento de onda no qual operam, à forma de interação energia-matéria, e por ser um sensor remoto ativo, com fonte própria de energia (RADARSAT *International*, 1997). A Figura 2.1 ilustra as diferentes regiões do espectro eletromagnético, e as bandas espectrais da região de microondas.

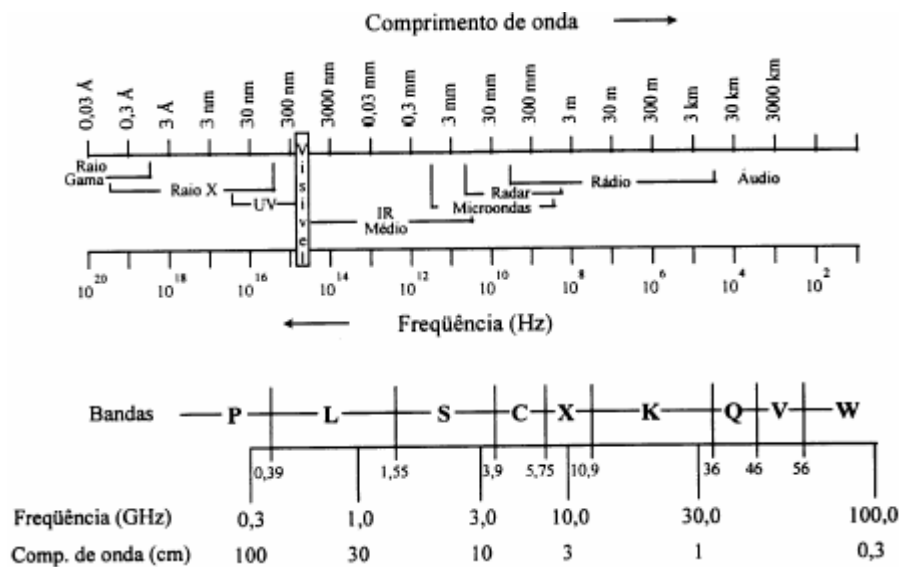


Figura 2-1 – Espectro eletromagnético e as bandas da região de microondas.
Fonte: Modificado de Dallemand et al. (1993).

Enquanto as informações fornecidas pelo sensor óptico relacionam-se às propriedades físico-químicas dos materiais superficiais, o SAR detecta as propriedades elétricas e geométricas do alvo (PARADELLA et al., 2000). Com relação à forma de aquisição dos dados, o radar é um sistema imageador ativo, no qual se tem que uma determinada quantidade de energia eletromagnética, emitida pelo sensor, é retrospalhada pelos alvos e registrada pelo sistema. Desta forma, os radares podem operar tanto de dia quanto à

noite e são bastante utilizados em ambientes com condições climáticas e ambientais adversas.

O entendimento da interação da energia eletromagnética com os alvos, bem como dos parâmetros envolvidos, é necessário a fim de aumentar a qualidade e confiabilidade das interpretações. Segundo Lewis e Henderson (1998), os principais parâmetros que condicionam o retroespalhamento do radar estão relacionados ao sistema sensor e ao alvo (Tabela 2.1). Alguns desses parâmetros, os mais importantes para o escopo deste trabalho, serão descritos nos próximos tópicos.

Tabela 2-1 – Parâmetros do sistema e do alvo que influenciam no sinal de retorno do radar.

Parâmetros do Sistema	Parâmetros do Alvo
1. Comprimento de Onda ou Frequência	1. Rugosidade da Superfície
2. Polarização	2. Constante Dielétrica
3. Ângulo de Incidência	3. Inclinação e Orientação
4. Azimute de Visada	
5. Resolução Espacial	

Fonte: Lewis e Henderson (1998).

A relação fundamental entre as características do sistema de radar, do alvo, e do sinal que é transmitido pela antena (que interage com o alvo e novamente retorna para a antena), pode ser resumida através da equação de radar, detalhada por Ulaby et al. (1986) e Lewis e Henderson (1998):

$$P_R = P_T (\sigma^s A) \left(\frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \right) \quad (2.1)$$

Os termos da equação do radar são descritos pela potência do sinal recebido (P_R), que é diretamente proporcional à potência do sinal transmitido (P_T); ao coeficiente de retroespalhamento (σ_0); à área efetiva da abertura da antena (A); ao ganho da antena (G); ao comprimento de onda do radar (λ); e a $1/4\pi^3 R^4$, onde R é distância em *range* entre o radar e o alvo, considerando a transmissão e a recepção da energia de forma isotrópica. O coeficiente de retroespalhamento σ_0 , que é adimensional, está diretamente relacionado aos parâmetros dos alvos, enquanto que os demais termos da equação do radar se relacionam com os parâmetros do sensor.

2.2 Parâmetros relacionados ao sistema sensor

A frequência ou o comprimento de onda, juntamente com o ângulo de incidência, a polarização, e o azimute de visada são os principais parâmetros que definem o sistema sensor na faixa de microondas (BRISCO; BROWN, 1998). Estes parâmetros definem o tipo de informação contida no sinal de retorno e o tipo de interação entre a energia incidente e os alvos.

2.2.1 Frequência / comprimento de onda

A magnitude do coeficiente de retroespalhamento dos alvos depende diretamente da frequência, pois esta define a ordem de grandeza dos efeitos da constante dielétrica (ULABY; BATLIVALA, 1986) e da rugosidade superficial dos alvos (LEWIS; HENDERSON, 1998).

O retroespalhamento de um alvo é o resultado do espalhamento superficial, volumétrico ou de ambos. A importância desses espalhamentos é governada pelas formas superficiais dos alvos, e todos esses fatores são fortemente influenciados pelo comprimento de onda (JPL, 1986).

Em estudos aplicados ao mapeamento geológico básico, é comum a utilização de radares operantes nas bandas X ($\lambda = 2,4-3,8$ cm), C ($\lambda = 3,75-7,5$ cm) e L ($\lambda = 15-30$ cm). Neste tipo de aplicação merece destaque o Projeto RADAMBRASIL na década de 70, que com base nas imagens de radar aerotransportado em banda X, realizou um amplo estudo geológico de todo o território nacional. As bandas C e L também têm sido amplamente utilizadas, devido a uma maior disponibilidade de sensores orbitais com estas configurações, tais como o RADARSAT-1, ERS-1,2 e SIR-C em banda C; e JERS-1 e ALOS-PALSAR em banda L.

2.2.2 Polarização

No que diz respeito à polarização, os ecos de radar são mais intensos na polarização paralela e mais fracos na polarização cruzada (COLWELL, 1983).

Em estudos de vegetação, a polarização VV (vertical-vertical) é mais útil em observações de caules e troncos, e a HH (horizontal-horizontal) realça mais a estrutura horizontal do dossel. Para estudos geológicos, é esperado que a polarização HH seja mais sensível à penetração em sedimentos e nas superfícies expostas, as quais tendem a ser orientadas preferencialmente de forma horizontal (WERLE, 1988).

2.2.3 Ângulo de incidência

O ângulo de incidência (Θ_i) é definido como o ângulo entre a direção de iluminação do radar e a normal à superfície do alvo imageado (RANEY, 1998) (Figura 2.2). Este ainda varia ao longo da faixa imageada, ou seja, quanto mais larga a faixa maior será o intervalo de ângulos de incidência ao longo da mesma. É um dos principais fatores que influenciam o retroespalhamento e a aparência dos objetos na imagem (LOWMAN et al. 1987), uma vez que este determina os efeitos de relevo. Segundo Santos et al. (2001), a magnitude deste ângulo tem relação direta com o sombreado, e relação inversa com os efeitos de deslocamento e inversão do relevo.

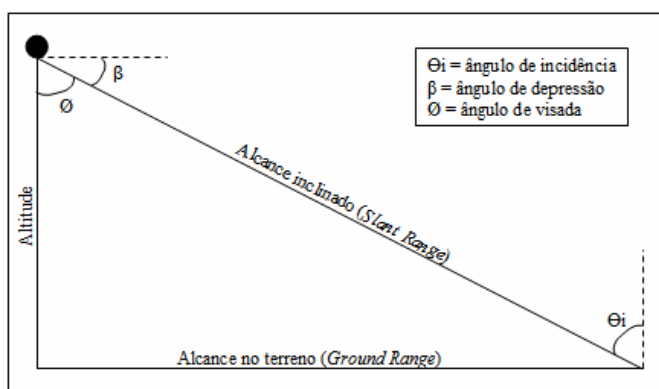


Figura 2-2 – Relação entre os ângulos de incidência, depressão (no caso de radar aerotransportado) e visada no imageamento por radar.
Fonte: Lewis e Henderson (1998).

Uma forma de relacionar o ângulo de incidência ao retroespalhamento é através do diagrama de Long (Figura 2.3), que não leva em consideração o tipo de terreno imageado (plano, intermediário ou movimentado). Pelo gráfico, nota-se que o retroespalhamento é mais sensível a ângulos de incidência menores (menores que 30°), controlado pela declividade local. No intervalo compreendido entre 25° e 70° , na “região

platô”, a curva assume uma forma quase constante, indicando pouca variação do retroespalhamento neste intervalo de ângulos de incidência, com controle da rugosidade. Para ângulos compreendidos entre 70° e 90°, o controle se dá pelo sombreado (LOWMAN et al., 1987).

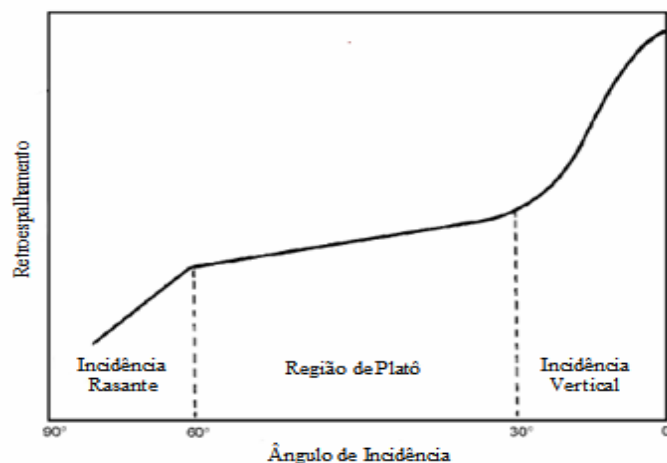


Figura 2-3 – Diagrama de Long mostrando a dependência entre o coeficiente de retroespalhamento e o ângulo de incidência.
Fonte: Lowman et al. (1987).

Singhroy e Saint-Jean (1999) estudaram as bases da escolha dos ângulos de incidência do satélite RADARSAT-1 para aplicações geológicas. Os resultados deste estudo mostraram que existe uma diferença significativa na interpretabilidade de estruturas geológicas, unidades litológicas e de tipos de terreno dependendo do ângulo de incidência da imagem.

A Figura 2.4 é o guia proposto por Singhroy e Saint-Jean (1999) para a seleção do ângulo de incidência de acordo com o tipo de terreno imageado. Nela observa-se que para terrenos movimentados, ângulos de incidência variando entre 40-59° são os mais favoráveis; ângulos de incidência entre 20-35° realçam terrenos de relevo moderado; e uma ampla faixa de ângulos de incidência de 25-45°, é indicada para terrenos planos.

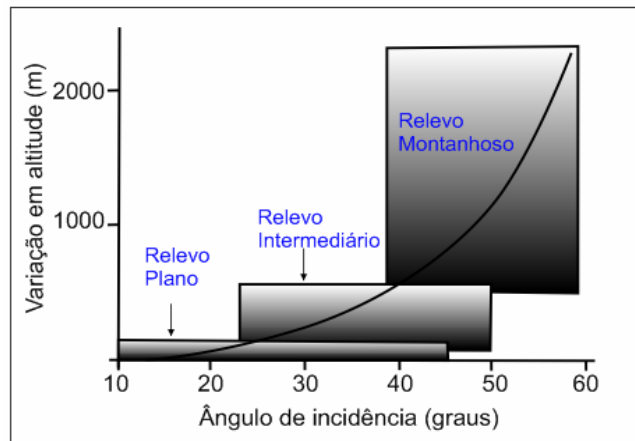


Figura 2-4 – Relação entre tipo de terreno imageado e ângulo de incidência.
 Fonte: Singhroy e Saint-Jean (1999).

Normalmente, terrenos planos requerem baixos ângulos de incidência para a maximização de variações topográficas pequenas, uma vez que com uma alta incidência estas pequenas variações não seriam detectadas e a superfície apareceria lisa ao sensor. Entretanto, para efeitos da micro-rugosidade da superfície, imagens com ângulos de incidência maiores também detectam as variações de rugosidade da superfície, como mostra a Figura 2.5.

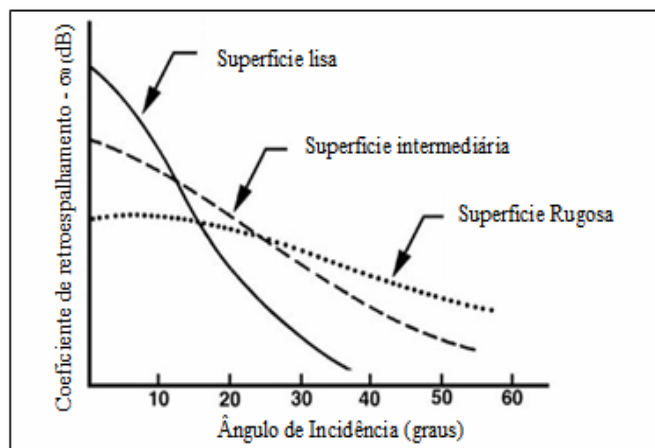


Figura 2-5 – Curvas de retroespalhamento para superfícies lisas, intermediárias e rugosas, em função do ângulo de incidência.
 Fonte: NASA (1988).

Os estudos de Singhroy e Saint-Jean (1999) confirmam esta afirmativa em relação à rugosidade superficial. Utilizando imagens RADARSAT modo *Standard* com posição S2 e S7, os autores verificaram que a imagem S2 mapeou bem as quebras topográficas,

enquanto que na imagem S7 a rugosidade da superfície, relacionado ao uso da terra, foi mais detalhada.

2.2.4 Direção ou azimute de visada

A direção de visada (*look direction*) é definida como o ângulo entre o norte geográfico e a direção de apontamento do feixe de iluminação do radar em sentido horário, ou seja, perpendicular à direção de movimento da plataforma (LEWIS; HENDERSON, 1998).

Este parâmetro é especialmente importante para estudos geológicos/estruturais, pois muitas feições possuem certas tendências direcionais, expressas pela disposição das feições lineares (RADARSAT *International*, 1997).

Desta forma, lineamentos, falhas e contatos litológicos podem ser realçados ou suprimidos nas imagens de radar dependendo de suas orientações em relação à direção de visada.

Feições com direção perpendicular ou com ângulo agudo com a direção de visada são realçadas pelo efeito de “luz e sombra”. Já as feições orientadas paralelamente com a direção de visada não produzem realces nem sombras, de forma que estas são mascaradas nas imagens de radar (SABINS, 1996). Essa relação é ilustrada pela Figura 2.6, que mostra de forma sucinta os melhores ângulos de detecção das estruturas lineares.

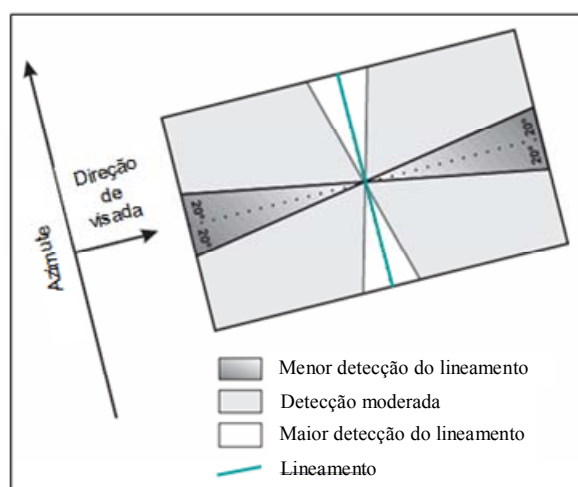


Figura 2-6 – Diagrama de supressão e realce de lineamentos de acordo com a direção de visada. Fonte: modificado de RADARSAT *International* (1997).

2.3 Parâmetros do Alvo

Os parâmetros do alvo que influem no sinal de retorno estão principalmente relacionados com as suas propriedades geométricas e dielétricas. O coeficiente de retroespalhamento, σ_0 , é função basicamente desses parâmetros (ULABY; BATLIVALA, 1976).

2.3.1 Rugosidade da Superfície

A rugosidade superficial é um importante atributo na análise do terreno, e reflete a natureza do substrato geológico, o tipo de solo e a cobertura vegetal (GRUNSKY, 2002).

Na análise de imagens de radar, a superfície é separada em diferentes regimes de rugosidade (DIERKING, 1999). Duas escalas de rugosidade são assumidas neste trabalho: a macro-rugosidade e a micro-rugosidade.

Segundo Lewis e Henderson (1998), a macro-rugosidade é controlada pelas mudanças na macro-topografia, e relaciona-se com as grandes estruturas e com o relevo. Inclui feições como montanhas, vales e encostas, que geralmente são responsáveis pelos efeitos de sombreamento, *layover* e *foreshortening*. Já a micro-rugosidade refere-se à componente de pequena escala, ou seja, à rugosidade superficial determinada pelas feições texturais de superfície próximas ao comprimento de onda do radar. Este tipo de rugosidade determina a intensidade do retroespalhamento do radar dentro da célula de resolução.

No que concerne à micro-escala de rugosidade, as superfícies são em geral, classificadas em três categorias (ULABY et al., 1982) (Figura 2.7):

(a) Lisa: quando a superfície reflete boa parte da energia incidente de forma especular, com ângulo de reflexão igual e oposto ao ângulo de incidência. Neste caso a tonalidade da imagem será mais escura, já que pouco ou nenhum sinal retornará ao sistema sensor.

(b) Intermediária: a energia incidente é refletida pela superfície de uma forma mais difusa, entretanto não homogênea.

(c) Rugosa: a energia incidente é retroespalhada em todas as direções de forma mais homogênea. O tom da imagem será mais claro, já que há uma boa quantidade de energia retroespalhada em direção ao sistema radar.

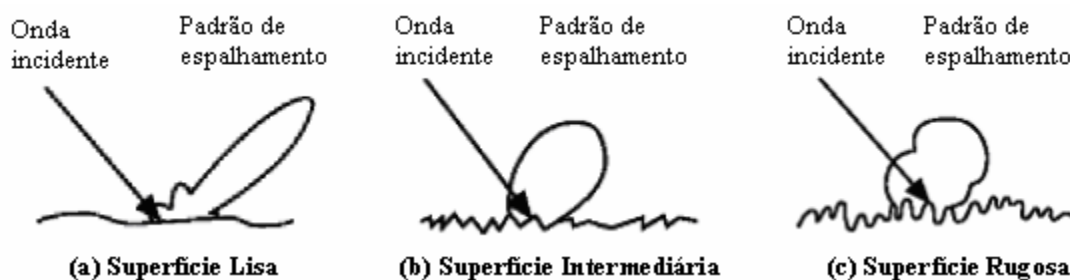


Figura 2-7 – Modelo de padrões de espalhamento para uma superfície horizontal.
Fonte: modificado de Ulaby et al. (1982).

Existem diversos níveis de aproximação que caracterizam a rugosidade da superfície (LEWIS; HENDERSON, 1998). A aproximação definida pelo Critério de Rayleigh, supõe que as irregularidades da superfície são expressas em função das variações de altura da superfície pelo erro quadrático médio das variações verticais do terreno (h_{rms}), pelo comprimento de onda (λ) e pelo o ângulo de incidência (Θ_i). De acordo com o Critério de Rayleigh (equação 2.2), uma superfície é rugosa se:

$$h_{rms} > \lambda / 8 \cos \Theta_i \quad (2.2)$$

Segundo Lewis e Henderson (1998), outra aproximação utilizada é a proposta por Peake e Oliver (equação 2.3), que propuseram três categorias de rugosidade de superfície:

$$\text{Lisa: } h_{rms} > \lambda / 25 \cos \Theta_i, \text{ Superfície Rugosa: } h_{rms} > \lambda / 4 \cos \Theta_i \quad (2.3)$$

e intermediária para valores de h_{rms} entre os dois anteriores.

2.3.2 Constante Dielétrica

A constante dielétrica influencia fortemente a interação da radiação eletromagnética com a superfície do terreno (LEWIS; HENDERSON, 1998), ou seja, o sinal de

retroespalhamento do radar é influenciado pela umidade do solo e da vegetação. Um elevado conteúdo de umidade resulta em uma constante dielétrica alta, e conseqüentemente em um alto sinal de retorno. Um conteúdo de umidade baixo implica em uma constante dielétrica baixa e um baixo sinal de retorno, exceto em caso de solos muito secos, onde ocorre uma maior penetração na superfície.

Sendo assim, através da variação da umidade, que é proporcional à capacidade de retenção de água dos materiais, é possível diferenciar determinados litotipos.

Na frequência das microondas, a constante dielétrica dos solos depende fortemente do conteúdo de umidade dos mesmos (HOEKSTRA; DELANEY, 1974). Além disso, medidas dos valores de retroespalhamento em áreas com solo exposto indicam alto grau de sensibilidade à umidade em ângulos de incidência próximo ao nadir (ULABY; BATLIVALA, 1976). Observações similares foram descritas em áreas vegetadas (ULABY, 1975), embora a presença da vegetação tenda a reduzir a sensibilidade do σ_0 na variação da umidade do solo.

Ulaby e Batlivala (1976) determinam a melhor combinação dos parâmetros do radar (frequência, polarização e ângulo de incidência) para mapeamento do conteúdo de umidade de solos em região com pouca vegetação. Como resultados obtiveram: 7 a 15 graus de incidência, frequência de 4GHz (banda C), e polarização HH ou VV.

2.4 RADARSAT-1

O RADARSAT-1 é um radar orbital de abertura sintética (SAR) desenvolvido pela Agência Espacial Canadense e lançado pela NASA em 4 de novembro de 1995 (RADARSAT *International*, 1997). Possui órbita sol-síncrona, ciclo de 24 dias e está a uma altitude de 796,6 km, cruzando o Equador em direção ao sul no nascente (órbita descendente: visada para oeste) e em direção ao norte no poente (órbita ascendente: visada para leste). Esta variação de visada possibilita a iluminação de áreas com sombreamento, e realça as feições com orientações preferenciais perpendiculares ao azimute de visada. Além disso, é possível a formação dos pares estereoscópicos com visadas diferentes ou com o mesmo azimute para o estudo de diferentes tipos de terreno.

Este sensor opera na banda C ($\lambda = 5,6$ cm), com polarização horizontal paralela (HH), e possui um conjunto de sete diferentes tipos de feixes de transmissão que permitem a aquisição de imagens com variação de ângulos de incidência e faixas de imageamento.

As resoluções também variam de acordo com o modo de aquisição, de forma a gerar ao todo 35 opções de produtos disponíveis do RADARSAT-1 (Figura 2.8 e Tabela 2.2).

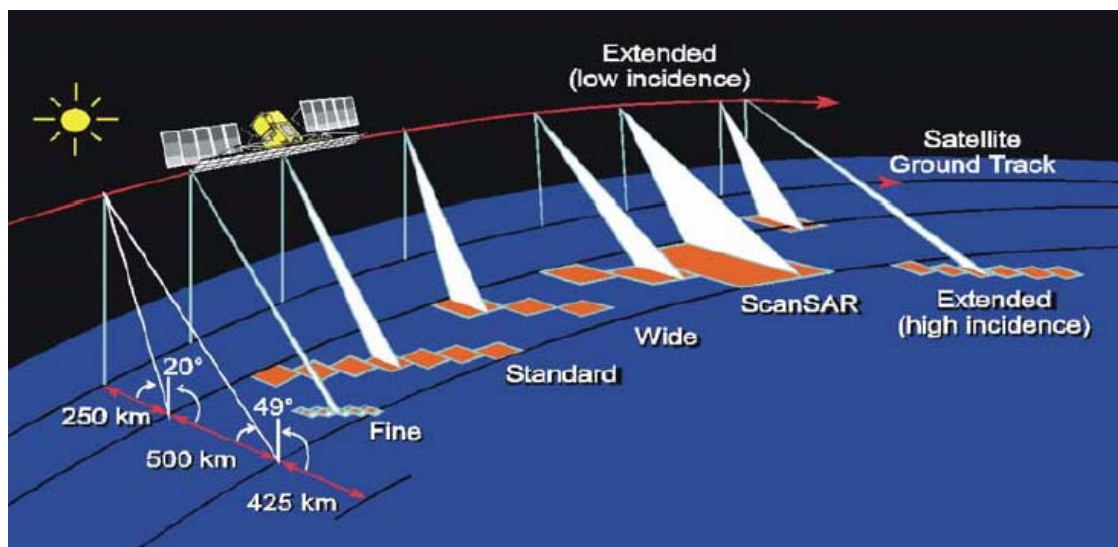


Figura 2-8 – Diferentes modos de aquisição de imagens do RADARSAT-1.

Fonte: RADARSAT *International* (1997).

Geralmente, as imagens geradas e distribuídas para os usuários são imagens amplitude, ou seja, a imagem resultado da detecção linear quantizada em 16 bits, em projeção *ground-range* e com a correção do padrão da antena já previamente feita.

Tabela 2-2 – Características dos modos de imageamento do RADARSAT-1.

Modo	Posição	Angulo de Incidência (°)	Resolução Espacial (m)	Número de Looks	Area de Cobertura (km)
<i>Fine</i>	F1	37-40	9,1x8,4	1x1	50x50
	F2	39-42	8,7x8,4		
	F3	41-44	8,4x8,4		
	F4	43-46	8,1x8,4		
	F5	45-48	7,8x8,4		
<i>Standard</i>	S1	20-27	26,0x27,0	1x4	100x100
	S2	24-31	22,0x27,0		
	S3	30-37	27,6x27,0		
	S4	34-40	25,7x27,0		
	S5	36-42	24,2x27,0		
	S6	41-46	22,1x27,0		
	S7	45-49	20,1x27,0		
<i>Wide</i>	W1	20-31	35,5x27,0	1x4	150x150
	W2	31-39	26,6x27,0		
	W3	39-45	22,8x27,0		
<i>ScanSAR Narrow</i>	SN1	20-40	73,5x47,8	2x2	300x300
	SN2	31-46	55,1x7,1		
<i>ScanSAR Wide</i>	SW1	20-49	146,6x93,1	2x2	500x500
	SW2	20-46	146,6x93,1		
<i>Extended High</i>	H1	49-52	19,8x27,0	1x4	75x75
	H2	50-53	19,4x27,0		
	H3	52-55	19,1x27,0		
	H4	54-57	18,5x27,0		
	H5	56-68	18,2x27,0		
	H6	57-59	18,0x27,0		
<i>Extended Low</i>	L1	out/23	35	1x4	170x170

Fonte: adaptado de RADARSAT *International* (1997).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda, do ponto de vista teórico, alguns conceitos e procedimentos metodológicos adotados na pesquisa.

3.1 Atenuação do Ruído *Speckle*

O *speckle* é um fenômeno inerente ao sistema imageador e não o resultado da variação da refletividade média das superfícies iluminadas (CCSR, 1997). É considerado um ruído multiplicativo que reduz a qualidade da imagem, dificultando a interpretação e análise digital das imagens SAR, sendo necessária a sua redução.

Essa degradação é muito comum nas imagens SAR, uma vez que tais imagens são formadas por uma interferência coerente entre os difusores que formam cada *pixel* da imagem. Como cada elemento de resolução é composto por um grande número de difusores, o sinal de retorno resulta da soma coerente do sinal retornado por cada um dos elementos difusores (LEWIS; HENDERSON, 1998). Segundo Ulaby et al (1982), o *speckle* é resultado das flutuações aleatórias ocasionadas por este processo.

Técnicas de atenuação do ruído *speckle*, de acordo com Lee (1986), podem ser classificadas em duas categorias: processamento *multilook* ou multivisada, e através de filtragem. O processamento multivisada consiste em dividir a abertura sintética da antena em alguns setores, processando-os independentemente e somando em seguida cada um desses *looks*. Esta técnica melhora a resolução radiométrica da imagem final de maneira proporcional ao número de *looks*, à custa da resolução espacial que piora em azimute (RANEY, 1998).

Com relação às filtragens, existem dois tipos de filtros (LOPES et al. 1990): os não adaptativos ou empíricos, e os pontuais adaptativos. A opção por determinado tipo de filtro depende da aplicação desejada (SANT'ANNA, 1995); entretanto, os filtros empíricos (média, mediana, etc.) ocasionam uma redução significativa no desvio levando a uma perda de informação (degradação de resolução), enquanto os filtros adaptativos preservam o valor médio da imagem.

Segundo Shi e Fung (1994), os filtros adaptativos mais conhecidos são o Lee, Kuan, Frost, além dos filtros Lee e Frost realçados, propostos por Lopes et al. (1990). O filtro *Enhanced Frost* é convolucional linear, derivado da minimização do erro quadrático médio sobre o modelo multiplicativo que representa o ruído *speckle* (SANT'ANNA, 1995).

3.2 Correção Geométrica

Originalmente, as imagens de satélite apresentam distorções em sua geometria que precisam ser corrigidas para que tenham maior rigor geométrico. Tais distorções relacionam-se à instabilidade da plataforma (posição, velocidade, orientação), ao sensor (ângulo de orientação, IFOV), à Terra (elipsóide, geóide, elevação) e à projeção cartográfica utilizada (elipsóide, plano cartográfico) (TOUTIN, 1995).

Segundo Curlander (1984), estes efeitos podem ser minimizados com a utilização de informações altimétricas, através do uso de modelos digitais de elevação (DEM - *Digital Elevation Model*). Esse tipo de correção geométrica é denominada de ortorretificação.

A ortorretificação é uma operação pixel a pixel que consiste em gerar orto-imagens a partir de modelos digitais de terreno, de pontos de controle (GCPs - *Ground Control Point*) e dados de efemérides do satélite (PARADELLA et al., 1997).

3.3 Coeficiente de Retroespalhamento

O cálculo dos valores do coeficiente de retroespalhamento (σ_0), a partir dos níveis digitais de amplitude das imagens, representa uma calibração radiométrica absoluta de uma imagem SAR (AMARAL; SHIMABUKURO, 1996).

O coeficiente de retroespalhamento, também conhecido por sigma zero (ULABY et al., 1982), depende das propriedades físicas e elétricas do material que está sendo analisado, bem como do comprimento de onda, da polarização e do ângulo de incidência (LEWIS; HENDERSON, 1998). Desta forma, é possível compreender, através desta calibração,

os processos de retroespalhamento dos alvos, e conseqüentemente comparar imagens de datas e passagens distintas (AMARAL; SHIMABUKURO, 1996).

A relação entre σ_0 e o valor atribuído à intensidade de cada pixel da imagem (número digital – ND), pode ser expressa pela equação 3.1 (PCI Geomatics Enterprises inc.®):

$$\sigma_0 = 10 * \log_{10}((DN^2 + A_0)/A_j) + 10 * \log_{10}(\sin(I_j)) \quad (3.1)$$

onde: DN= número digital do pixel da imagem; A_0 = offset fixo; A_j = ganho para o pixel no alcance do terreno; I_j = ângulo de incidência para a coluna j.

3.4 Análises Visuais

3.4.1 Análise Monoscópica

Os métodos de fotointerpretação geológica, inicialmente desenvolvidos para fotografias aéreas, possibilitam a extração de informações através da análise dos elementos da imagem e de suas relações. Tais métodos podem ser subdivididos em dois grupos (VENEZIANI; ANJOS 1982): o método comparativo (método das chaves) e o método da análise lógica (método sistemático).

No método comparativo, há certa subjetividade no processo fotointerpretativo, uma vez que este é baseado no estabelecimento de padrões comparativos. Segundo Soares e Fiori (1976), no método das chaves, a análise e dedução do conteúdo de informação geológica das imagens dependem do conhecimento prévio do fotointérprete sobre aquela área ou da imagem de objetos comparativamente similares.

Para que o processo de interpretação de imagens de satélites e de fotos aéreas seja mais efetivo, deve-se usar o método de trabalho sistemático com objetivos claros. Sob esta óptica, o método de interpretação mais adequado é aquele que se baseia na lógica e sistemática proposto por Soares e Fiori (1976) para fotografias aéreas, que posteriormente foi adaptado por Veneziani e Anjos (1982) para a interpretação de imagens de satélite.

Santos et al. (2001) descreveram os procedimentos na interpretação geológica de dados SAR em três fases principais: (1) definição do tipo de análise (mono, estéreo ou produtos integrados); (2) definição das características dos dados SAR (ângulos de incidência, azimute de iluminação, de interseção estereoscópica e de interseção entre órbitas, resolução espacial, bandas de radar e polarização) e; (3) interpretação geológica (identificação, análise e interpretação das feições de imagem).

Na etapa de identificação, é fundamental a caracterização dos elementos naturais de paisagem, em especial aqueles que determinam a morfologia superficial do terreno: o relevo e a drenagem (SANTOS et al, 2001). Além disso, deve-se levar em consideração a tonalidade da imagem, que pode estar relacionada à importantes feições de paisagem naturais ou não.

Na análise dos elementos de imagem, o estudo da disposição e o ordenamento dos elementos texturais (menores elementos identificáveis e passíveis de repetição dentro de uma imagem) são importantes indicadores das zonas homólogas (ZH). As zonas homólogas constituem áreas que possuem repetição dos elementos texturais com propriedades semelhantes, e geralmente refletem condições geológicas distintas.

A última fase da fotointerpretação consiste na interpretação geológica dos elementos de imagem e associação de um significado geológico ao mesmo (SANTOS et al, 2001).

A definição das propriedades dos elementos texturais e das formas que definem as zonas homólogas, bem como a interpretação geológica desses parâmetros encontram-se sintetizados nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Tabela 3-1 – Propriedades dos elementos texturais e das formas.

Propriedade dos Elementos Texturais	
Frequência	Relação entre o número de elementos texturais de drenagem/relevo por unidade de área.
Feições Lineares	Elementos texturais de drenagem/relevo fortemente estruturados, retilíneos ou curvos.
Alinhamentos	Definidos pela disposição geométrica, alinhada e fortemente estruturada das feições lineares.
Tropia	Orientações das feições lineares em uma ou mais direções.
Assimetria	Distribuição dos elementos texturais em tamanho, forma e posição, situados em lados opostos de um canal de drenagem de ordem superior ou entre as declividades das encostas de uma crista.
Quebras positivas	Disposição estruturada de rupturas de declive com convexidade voltada para cima.
Quebras negativas	Disposição estruturada de rupturas de declive com convexidade voltada para baixo.
Homogeneidade	Constância das propriedades texturais.
Propriedade das Formas	
Frequência Textural	Já definida anteriormente. Importante propriedade para delimitação das zonas homólogas.
Estrutura	Lei que exprime a disposição espacial dos elementos texturais.
Grau de estruturação	Nível de organização dos elementos texturais.
Ordem de estruturação	Ordena, em função da complexidade de organização dos elementos texturais, as diferentes formas de drenagem/relevo.

Tabela 3-2 – Interpretação geológica dos elementos texturais e das formas.

Interpretação Geológica dos Elementos Texturais	
Frequência	Drenagem: em área com mesmo índice pluviométrico, é inversamente proporcional a permeabilidade dos tipos litológicos superficiais. Relevo: é indicativo do grau de dissecação
Feições Lineares	Interseção de planos estruturais dos corpos rochosos, de origem tectônica (foliações e fraturas) ou não, com a superfície do terreno.
Alinhamentos	Associados aos planos estruturais de maior magnitude dos corpos rochosos, ou seja, zonas de cisalhamento, falhas e descontinuidades.
Tropia	Fornece importantes informações a cerca das propriedades físicas das rochas, podendo indicar o grau de anisotropia/isotropia de determinada litologia.
Assimetria	Fornece informações sobre a atitude (direção e mergulho) dos planos estruturais das rochas.
Quebras positivas	Importantes elementos na caracterização da assimetria do relevo.
Quebras negativas	Feições indicativas mais importantes do limite entre diferentes maciços rochosos. São limites definidos entre zonas fotolitológicas.
Homogeneidade	Relacionado ao nível de persistência das propriedades texturais comuns a uma zona homóloga, e indica a uniformidade das características litoestruturais de uma unidade fotolitológica.
Interpretação Geológica das Formas	
Estrutura	Reflexo direto de um determinado condicionamento geológico/geomorfológico.
Grau de estruturação	Dá consistência à lei que define a estrutura da drenagem e relevo, e subsidia, na mesma proporção, à interpretação do controle geológico.
Ordem de estruturação	Relacionado à complexidade da lei que define a estrutura. Quanto maior a ordem de estruturação, mais evidente é o controle geológico imposto sobre determinada região.

3.4.2 Análise Estereoscópica

Partindo-se de conceitos desenvolvidos do entendimento da visão humana, a estereoscopia visa reconstruir uma paisagem tridimensional, registrada sob diferentes perspectivas em um par de imagens planas (SANTOS et al., 1999).

A estereoscopia depende de dois indicadores fotogramétricos (SANTOS et al., 1999): (a) a paralaxe estereoscópica ou horizontal, que pode ser entendida como a aparente mudança de posição de objetos quando vistos de diferentes perspectivas e; (b) o ângulo de interseção estereoscópica, medido entre as linhas de visada do sensor em um determinado ponto do terreno, nas duas cenas do par.

Para avaliar a performance da estereoscopia, existem dois importantes indicadores: a visibilidade estereoscópica e a paralaxe. A visibilidade estereoscópica determina o grau de facilidade de percepção tridimensional em um par estereoscópico, e é diretamente relacionada à correlação radiométrica entre as cenas do par. Já a paralaxe determina o nível de detalhe na percepção da profundidade, relacionando-se diretamente com a disparidade geométrica entre as cenas do par (SANTOS et al., 2001). Apesar de estes dois indicadores estarem diretamente relacionados, é desejável que em um par estereoscópico de imagens SAR, as cenas tenham um equilíbrio entre as similaridades radiométricas e as diferenças geométrica das cenas do par (TOUTIN; VESTER, 1997; SANTOS et al, 1999).

A partir de cenas RADARSAT-1, Toutin (1998) demonstra que o ângulo de interseção estereoscópica não é o melhor indicador da performance da estereoscopia, como é para o caso das imagens óticas, e sugere um critério mais adequado para a análise da configuração estéreo de imagens SAR: a Razão de Paralaxe Vertical (VPR- *Vertical Parallax Ratio*), definida pela equação 3.2:

$$VPR = p/h = (\cot r - \cot l) \quad (3.2)$$

onde p é a paralaxe de elevação, h é a elevação do alvo, cot r a cotangente do ângulo de visada da imagem da direita, e cot l a cotangente do ângulo de visada da imagem da

esquerda. Desconsiderando a curvatura da Terra, o ângulo de visada é igual ao ângulo de incidência (PARADELLA et al., 2003). Assim, quanto maior a VPR, melhor tende a ser a percepção em 3D e maior o potencial de extração de informações geológicas.

Devido à geometria de observação lateral do radar, é possível se formar pares de cenas com dois tipos de estereoscopia, de acordo com o azimute de visada: de mesmo sentido (iluminação em um único sentido nas duas cenas) e de sentidos opostos (iluminação em sentidos opostos). A estereoscopia no mesmo sentido privilegia a correlação radiométrica entre as duas cenas do par (boa visibilidade estereoscópica), enquanto que a estereoscopia de sentidos opostos realça a disparidade geométrica entre elas (grandes paralaxes).

Estudos sobre a aplicabilidade da estereoscopia em sentidos opostos (TOUTIN; GRAY, 2000; TOUTIN, 1996, 1998) demonstram que apesar das dificuldades impostas pela diferença de iluminação entre as cenas, este tipo de configuração é superior no caso de áreas com relevo plano, e inferior em terrenos muito movimentados.

3.5 Análise por Componentes Principais

A análise por componentes principais (ACP) baseia-se nas propriedades estatísticas multivariadas das imagens e fundamenta-se no fato de que os dados de sensoriamento remoto apresentam correlações, isto é, ocorre redundância de informações (imagens visual e numericamente similares). A geração de componentes principais é uma técnica de realce que redistribui a informação das bandas originais, ou seja, gera um novo conjunto de imagens com informações distintas entre elas (MATHER, 1999).

Derivada da matriz de covariância ou da matriz de correlação entre as imagens, esta transformação resulta em um novo conjunto de imagens (componentes principais) onde cada valor de *pixel* é uma combinação linear dos valores originais. O número de componentes principais é igual ao número de imagens utilizadas e são ordenadas de acordo com o decréscimo da variância de nível de cinza. De um modo geral, a primeira componente principal irá conter a informação que é comum a todas as imagens originais analisadas, a segunda componente conterá a feição espectral mais significativa do

conjunto, e assim por diante, com informações espectrais cada vez menos significantes à medida que se aumenta a ordem das demais componentes (CRÓSTA, 1992; MATHER, 1999).

Graficamente pode se ilustrar essa transformação por meio da rotação dos eixos das imagens, o que resulta na eliminação da correlação inicial existente. No novo conjunto de eixos de coordenadas, a primeira componente principal terá uma orientação que maximiza a variância considerada para aquele eixo.

A Figura 3.1 é uma representação hipotética do espaço de atributo bidimensional de duas imagens, no qual a elipse desenhada corresponde ao espaço de distribuição dos *pixels*.

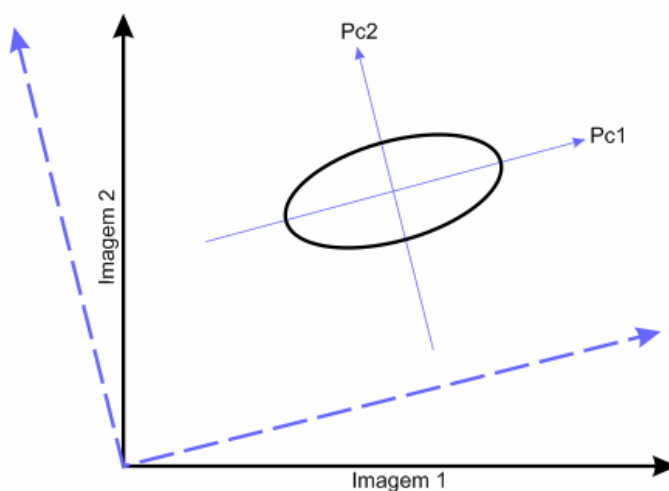


Figura 3-1 – Representação hipotética da orientação dos novos eixos (novas imagens) após a transformação por componentes principais.
Fonte: modificado de Crósta (1992).

Estudos anteriores utilizaram-se da análise por principais componentes em imagens de radar. Masuoka et al. (1988) aplicou a técnica de ACP nas imagem do SIR-B (Shuttle Imaging Radar) e do satélite SEASAT (Sea Satellite) em Mazinaw Lake (Canadá). Neste estudo, a ACP foi útil para combinar imagens com diferentes direções de visada e ângulos de incidência, a fim de auxiliar na extração de feições estruturais.

Moom et al. (1995) também realçaram as estruturas da região de Ontário (Canadá), baseada na técnica de ACP. Utilizando-se imagens ERS-1 e do sensor aerotransportado CCRSs, os autores realçaram pequenas feições geológicas antes não identificáveis na imagem ERS-1.

Grunsky (2002) e Paganelli et al. (2003) obtiveram sucesso com esse tipo de processamento em imagens RADARSAT-1 em Alberta, Canadá. Como resultado, realçou-se a geomorfologia, estruturas geológicas e a variação da vegetação da região.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização

A área de estudo, com uma extensão aproximada de 1.200 km², situa-se à nordeste do Estado da Bahia, nos municípios de Curaçá e Juazeiro, e possui coordenada central de 39°48'06'' de latitude sul e de 9°09'28'' de longitude oeste (Figura 4.1). Está próxima à divisa com o Estado de Pernambuco, aproximadamente a 90 km das cidades de Petrolina e Juazeiro, na região conhecida como Vale do Rio Curaçá.

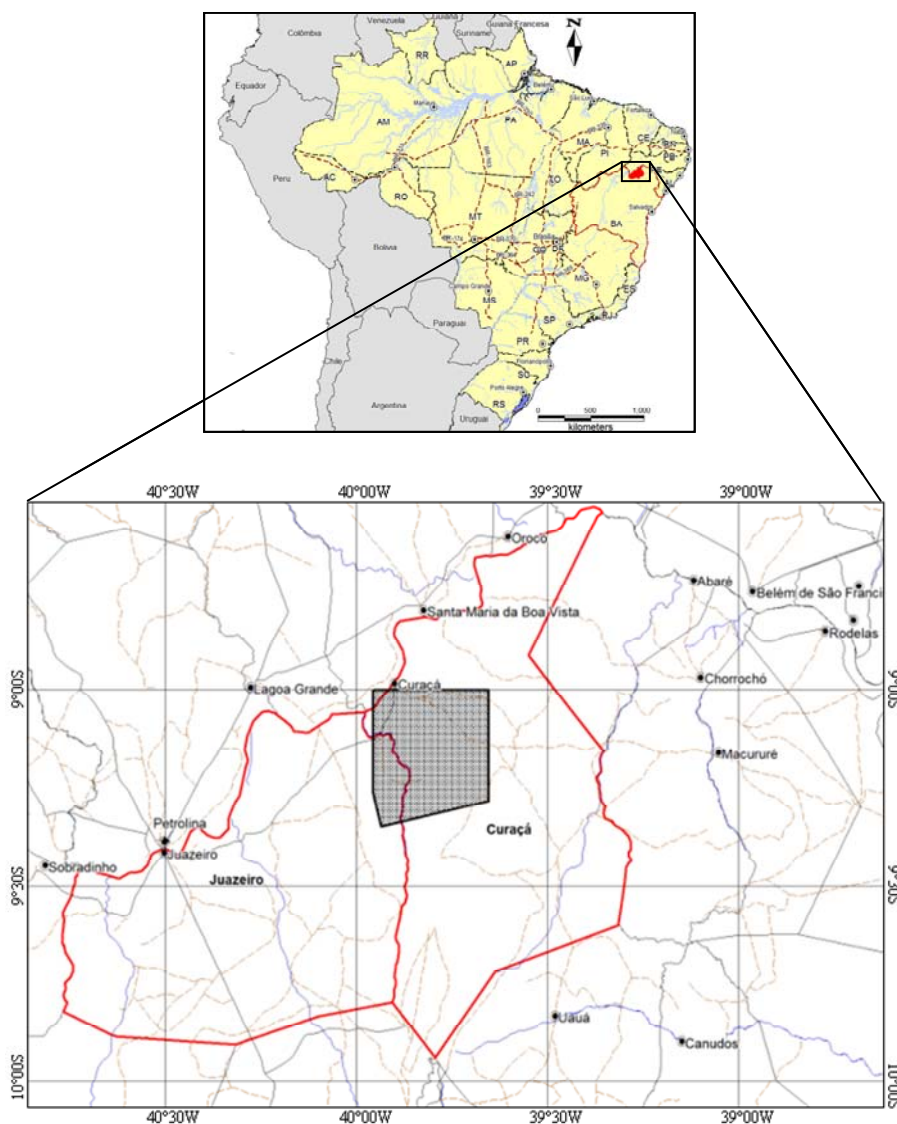


Figura 4-1 – Mapa de localização da área de estudo. Em vermelho têm-se os limites municipais e a área de estudo em cinza.

4.2 Aspectos Fisiográficos

O Vale do Rio Curaçá apresenta clima do tipo Bsh, da classificação Köppen, correspondente ao clima semi-árido brasileiro (DELGADO; SOUZA, 1975). Está enquadrado como área de alto risco de seca, no denominado "Polígono das Secas", e a sua temperatura média oscila em torno de 30°C. A precipitação pluviométrica anual média é de 452 mm, sendo que geralmente 80% da precipitação ocorrem na estação chuvosa, de janeiro a março.

Geomorfologicamente têm-se uma vasta superfície de pediplanação (Figura 4.2-a), onde a monotonia topográfica é quebrada pela presença de algumas serras dispostas preferencialmente na direção N-S, tais como a Serra Redonda e a Serra da Canabrava (Figura 4.2-b). A altitude média varia entre 350 a 430m acima do nível do mar.

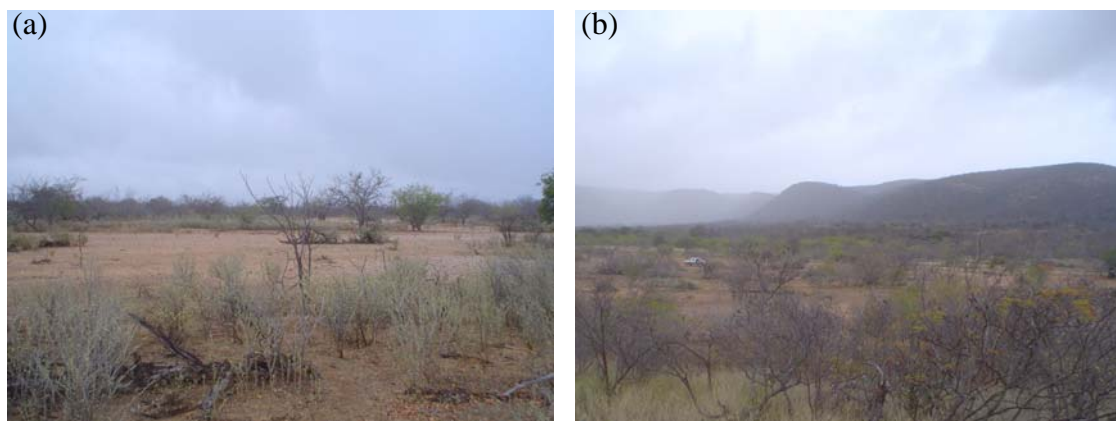


Figura 4-2 – Características geomorfológicas da área de estudo. (a) Vasta superfície de pediplanação; (b) Serra da Canabrava ao fundo.

Segundo Paradella e Vitorello (1995), os solos da região são predominantemente residuais com áreas de características colúvias de pequena espessura (30cm a 1,5m). Os solos residuais têm composição, textura e cor variáveis, de acordo com a rocha subjacente que lhes deu origem (Tabela 4.1), e são relativamente férteis apesar de mostrarem deficiência em matéria orgânica. Os tipos de solo que podem ser distinguidos são: Planossolo vértico, Luvisolo vértico abrupto, Latossolo, Luvisolo típico, Luvisolo vértico, Planossolo, Neossolo Litólico e Cambissolo Litólico.

Tabela 4-1 – Características dos solos do Vale do Rio Curaçá.

Solos	Litotipos Relacionados	Fe ₂ O ₃ %	Matéria Orgânica	Areia %	Silte-Argila %
Planossolo-vértico	biotita gnaisse	1,9	2,1	72,3	27,7
Luvisso solo vértico abrupto	migmatitos	2,7	1,0	65,8	34,2
Latossolo	mármore	3,2	0,2	63,0	37,0
Luvisso solo típico	granito e migmatito	4,6	0,6	68,0	32,0
Luvisso solo vértico	granulito e hiperstênio-gnaisses	5,1	0,8	57,0	43,0
Neossolo litólico e Cambissolo litólico	filitos	5,2	0,7	46,5	53,5
Planossolo	mica-xisto	3,6	1,3	80,0	20,0

Fonte: adaptada de Paradella e Vitorello (1995).

A região é drenada por cursos d'água pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (Figura 4.3), dentre os quais destaca-se o Rio Curaçá e seus afluentes, sendo todos intermitentes. O Rio São Francisco é o único curso d'água perene da região.



Figura 4-3 – Hidrografia da área de estudo. Detalhe para o Rio Curaçá na época da seca (a); e para o Rio São Francisco (b).

A vegetação é do tipo caatinga rala em extensas áreas, havendo a presença de caatinga arbórea às margens dos riachos que, mesmo secos, armazenam umidade suficiente para o desenvolvimento de uma vegetação de maior porte (Figura 4.4-a). A cobertura vegetal é representada por espécies predominantemente caducifólias, de caráter xerófilo.

Dominam membros das famílias das cactáceas, bromeliáceas e leguminosas (EMBRAPA SEMI-ÁRIDO).

As espécies são condicionadas pelo tipo de solo (Figura 4.4-b) e pela disponibilidade de água (DELGADO; SOUZA, 1975). Associações de pinhões, matapasto, catingueira, quipá, baraúna e imburana são típicas de solos de rochas máficas-ultramáficas, enquanto que associações de xique-xique, favela, cansanção, carqueja e jurema são freqüentes nos solos areno-argilosos, derivados de gnaisses e migmatitos. Nos aluviões predominam carabeira, angico e juazeiro (DELGADO; SOUZA, 1975; PARADELLA, 1983).

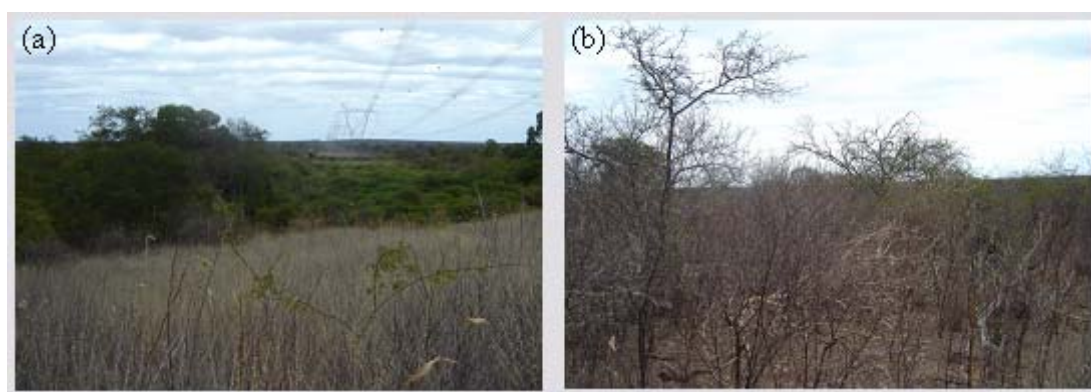


Figura 4-4 – Aspectos da vegetação da área de estudo. (a) Contraste da vegetação verde no aluvião com a vegetação seca do biotita-gnaisse; (b) Vegetação densa e seca do quartzo-mica xisto.

4.3 Geologia Regional e Tectônica

O Vale do Rio Curaçá está situado na parte nordeste do Cráton do São Francisco (ALMEIDA, 1977), que constitui a mais bem exposta e estudada unidade tectônica do embasamento da Plataforma Sul Americana (PSA). Este cráton engloba principalmente os estados da Bahia e Minas Gerais, e compreende terrenos metamórficos de médio a alto grau, associações granito-greenstone, faixas de rochas supracrustais Paleoproterozóicas e rochas plutônicas de composições variadas (TEIXEIRA et al. 2000).

Segundo Teixeira et al. (2000), o Cráton São Francisco (CSF) pode ser dividido em três

domínios distintos, como pode ser observado na Figura 4.5.



Figura 4-5 – Configuração geral do Cráton São Francisco.
Fonte: modificado de Teixeira et al. (2000).

Na parte central do Cráton, o embasamento cristalino foi afetado tectonicamente por uma faixa de *rifts* e empurrões (Província Polifásica Paramirim) com *grábens* e bacias alongadas segundo a direção N-S que posteriormente foram preenchidas por rochas sedimentares Paleo a Mesoproterozóicas do Supergrupo Espinhaço (CORDANI et al. 2000). Além disso, o embasamento cristalino foi parcialmente coberto pelas rochas sedimentares do Neoproterozóico e do Fanerozóico.

O domínio sul do CSF envolve os núcleos metamórficos Bonfim, Belo Horizonte, Campo Belo, Passa Tempo, Bação, Caeté e Florestal, constituindo fragmentos continentais distintos unidos no Neoarqueano. A maior parte desses núcleos contém migmatitos e anfibolitos, intrudidos por plútons tonalíticos e graníticos, além de resquílios de Greenstone Belts (CORDANI et al., 2000).

A porção norte do CSF é resultado da acreção de terrenos Arqueanos e Paleoproterozóicos, através de processos tectônicos ocorridos essencialmente durante o

Evento Transamazônico (2.14-1.94 Ga), e será discutido com maior detalhe no próximo tópico, já que a área de estudo está inserida neste contexto.

4.3.1 Porção Norte do Cráton São Francisco

Segundo Teixeira et al. (2000), esta porção é articulada pelo Lineamento Contendas Jacobina, que corresponde a aproximadamente 800 km de imbricação tectônica com sentido N-S. Tal lineamento separa a porção norte do CSF em dois domínios: o domínio oeste, que corresponde ao Bloco Gavião, e o domínio leste, que inclui os Blocos Jequié e Serrinha, além das Faixas Salvador-Curaçá e Itabuna Costa-Atlântica (Figura 4.6). Além disso, as Faixas Jacobina e Contendas-Mirante estão incluídas entre esses dois domínios, bem como a Folia Mairí, que corresponde à folia tectônica de terrenos antigos imbricados nestas faixas.

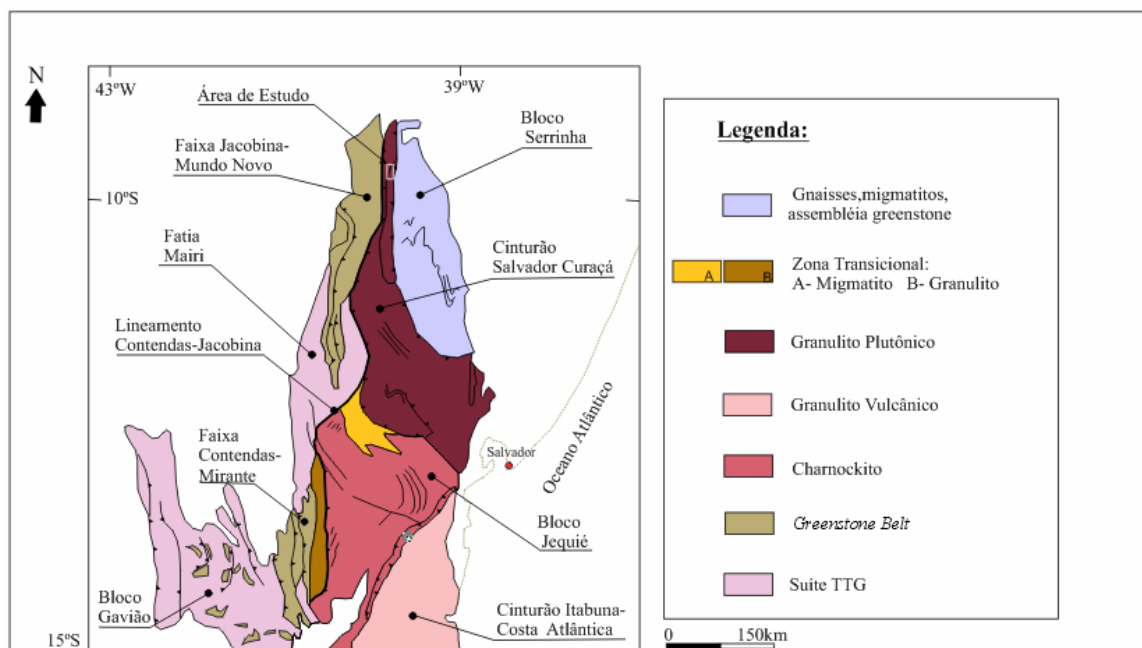


Figura 4-6 – Porção norte do Cráton São Francisco.

Fonte: modificado de Teixeira et al., 2000.

O Vale do Rio Curaçá pertence basicamente ao Cinturão Salvador Curaçá, que corresponde a uma faixa móvel estruturada no Paleoproterozóico que se estende inicialmente na direção NW-SE, e em seguida na direção N-S, desde o paralelo da cidade de Salvador até o Rio São Francisco, próximo à Curaçá (ANGELIN; KOSIN, 2001).

É subdividida nas unidades litotectônicas dos Complexos Caraíba, São José do Jacuípe e Tanque Novo-Ipirá, além de rochas granitóides intrusivas paleoproterozóicas, dentre os quais se destaca o Batólito Sienítico de Itiúba (KOSIN et al. 2003).

O Complexo Caraíba é composto por ortognaisses de fácies granulito, com composições trondhjemiticas e calci-alcálicas, enquanto que o Complexo São José do Jacuípe é formado por bandas e lentes tectonicamente intercaladas, caracterizando rochas máficas e ultramáficas de composição toleítica com fraca contaminação crustal (TEIXEIRA et al., 2000). O Complexo Ipirá corresponde à cobertura plataformal do Cinturão Salvador Curaçá (KOSIN et al, 2003).

Segundo Barbosa e Sabaté (2003), o Cinturão Salvador Curaçá, também chamado de Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá, é interpretado como resultado de uma colisão oblíqua entre os blocos Serrinha, Jequié e Gavião durante o Paleoproterozóico. Essa colisão ocorreu com o movimento dos blocos no sentido NW-SE (Figura 4.7), identificado pela presença de falhas de empurrão e zonas transcorrentes tardias com cinemática sinistral.

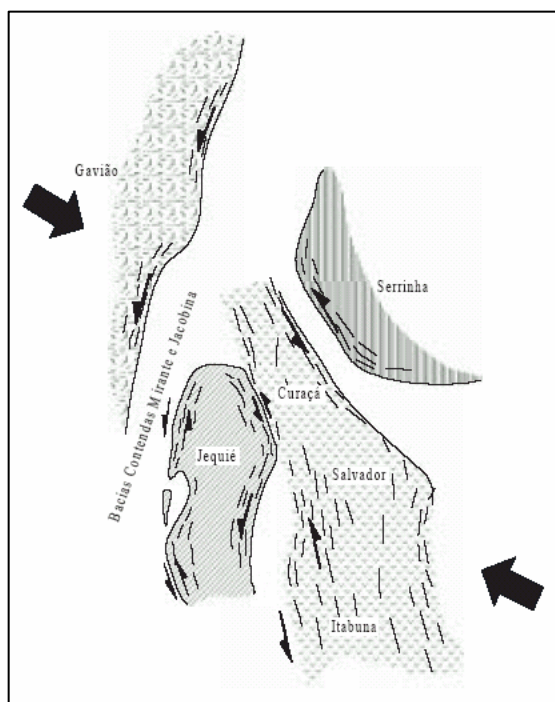


Figura 4-7 – Posições postuladas dos blocos Arqueanos e início da colisão Paleoproterozóica.
Fonte: Barbosa e Sabaté, 2003.

4.4 Geologia Local

4.4.1 Estudos anteriores

Do ponto de vista geológico, o avanço no conhecimento da região está ligado à intensa atividade de pesquisa nos depósitos cupríferos, principalmente na região próxima à Jazida de Caraíba, ao sul da área. Deste esforço, resultaram inúmeras contribuições como as de Delgado e Souza (1975), Loureiro (1991), Paradella (1983) e Teixeira (1997), entre outros.

A mineralização de cobre no Vale do Curaçá é conhecida há mais de cem anos, todavia somente em 1946 surgiram dados sobre a tonelagem e teor do minério de Caraíba (MELLO; POUNCHAIN, 1946). A partir daí, muitas investigações foram realizadas na região, tanto em âmbito regional como em detalhe.

O primeiro estudo em escala regional (1:100.000), foi feito por Barbosa et al (1964), através do Convênio DNPM/Prospec. Reconheceu-se aqui quatro unidades litológicas: Grupo Caraíba, Grupo Macurerê, Grupo Canudos e Grupo Bambuí.

Entre 1967 a 1972, outro avanço na geologia da região foi dado pela Missão Geológica Alemã, em convênio com a SUDENE (JORDAN, 1968). Com um mapeamento em escala 1:50.000, este estudo sugeriu a inexistência de discordância entre os Grupos Canudos e Bambuí, sendo observado na Serra da Cana Brava, uma transição gradual entre os mesmos (JORDAN, 1968).

Delgado e Souza (1975), em mapeamento geológico 1:50.000 (convênio DNPM-CPRM), propõem para o Distrito Cuprífero do Vale do Rio Curaçá uma subdivisão litoestratigráfica para os Grupos Caraíba e Canudos. Por ser a cartografia geológica mais detalhada na região do Vale do Rio Curaçá, este trabalho é tomado como a referência básica na confecção do mapa geológico desta pesquisa (com algumas modificações propostas por PARADELLA, 1983), e portanto será detalhado no próximo tópico.

Considerando a dificuldade de reconhecer formações diferentes, que caracterizam os grupos geológicos, Jardim de Sá et al. (1976) utilizaram pela primeira vez o termo Complexo Caraíba ao invés de Grupo Caraíba. Este estudo baseia-se na análise de dados geocronológicos das rochas da região.

Com relação ao contexto estrutural, Jardim de Sá et al. (1982) e D'el-Rey Silva (1985, 1996), a partir de estudos metamórficos e estruturais, caracterizaram a evolução geológica da área. Segundo D'el-Rey Silva (1985, 1996), a região foi afetada por deformações progressivas polifásicas (D1-D3), acompanhadas por grandes volumes de intrusões graníticas sin-tectônicas (G1-G3). A primeira fase de deformação dúctil foi responsável pelo acamamento metamórfico e dobras isoclinais com eixo N-S. Na segunda fase, os gnaisses bandados passaram pelo processo de anatexia e por dobramentos isoclinais com eixos E-W. A terceira fase, responsável pelas estruturas N-S, ocasionou dobras fechadas, com foliação penetrativa e zonas de cisalhamento.

4.4.2 Cartografia Geológica da Área

Como mencionado anteriormente, dois mapas de referência foram utilizados para a caracterização geológica da área de estudo: o de Delgado e Souza (1975) e o de Paradella (1983).

O mapeamento realizado por Delgado e Souza (1975) foi o mais importante e completo trabalho realizado no Vale do Rio Curaçá. Dispondo de análises de campo, de geoquímica, de geofísica e de petrografia, este projeto resultou no mapa geológico de detalhe da região (1:50.000).

Segundo os autores, distinguem-se no Distrito Cuprífero do Vale do Rio Curaçá dois grupos com ciclos tectono-orogênicos distintos: o Grupo Caraíba (Paleoproterozóico) e o Grupo Canudos (Neoproterozóico). Sobre estes grupos têm-se ainda os depósitos de idade recente. A Figura 4.8 corresponde ao mapa geológico de parte do Vale do Curaçá, e a Figura 4.9 é um esboço da coluna litoestratigráfica da região, segundo Delgado e Souza (1975). É importante ressaltar que as unidades pertencentes à Seqüência Rio Curaçá, não possuem conotação estratigráfica.

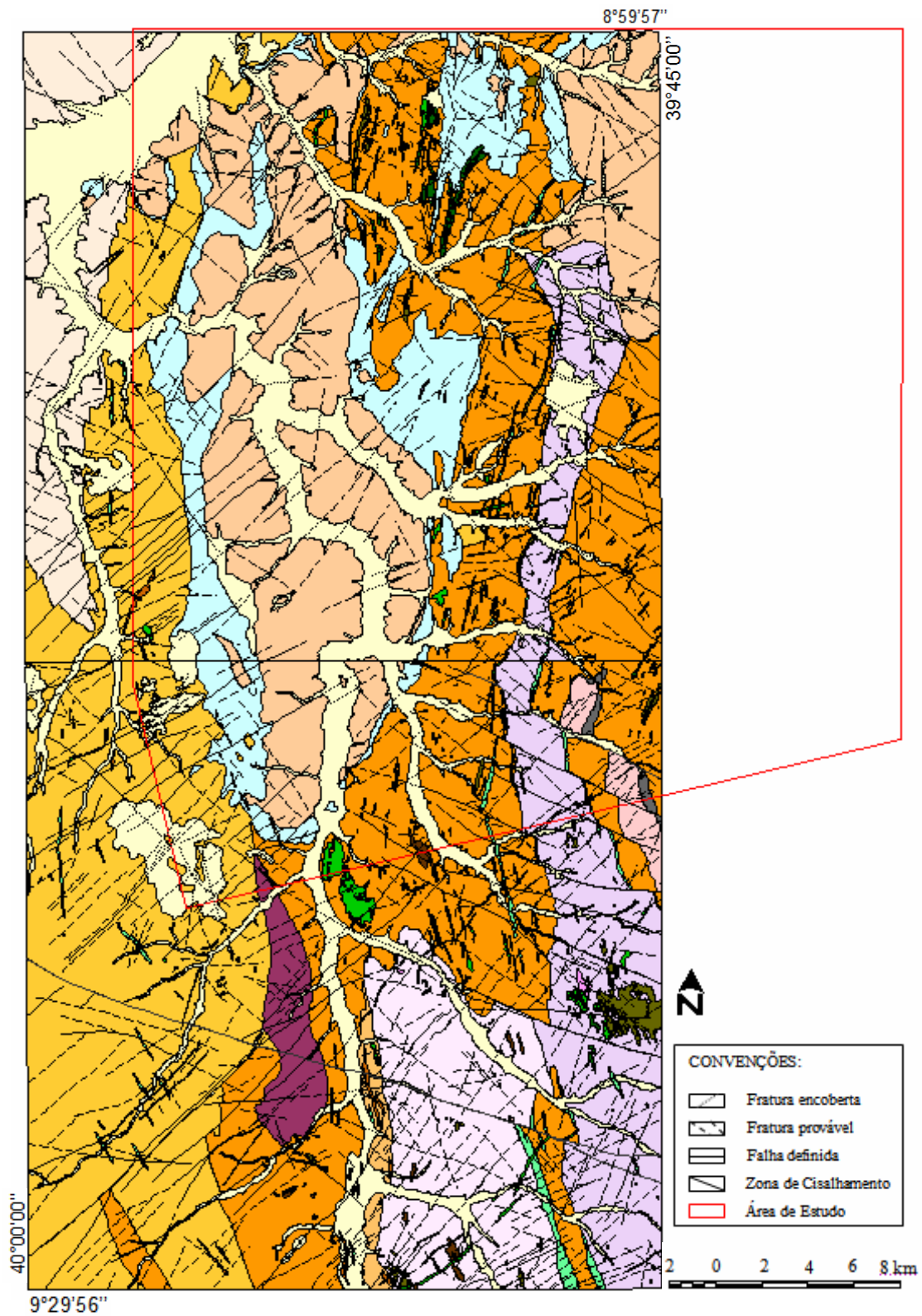


Figura 4-8 – Mapa geológico do Vale do Rio Curaçá. Convenções em relação aos litotipos na Figura 4.9.

Fonte: modificado de Delgado e Souza (1975).

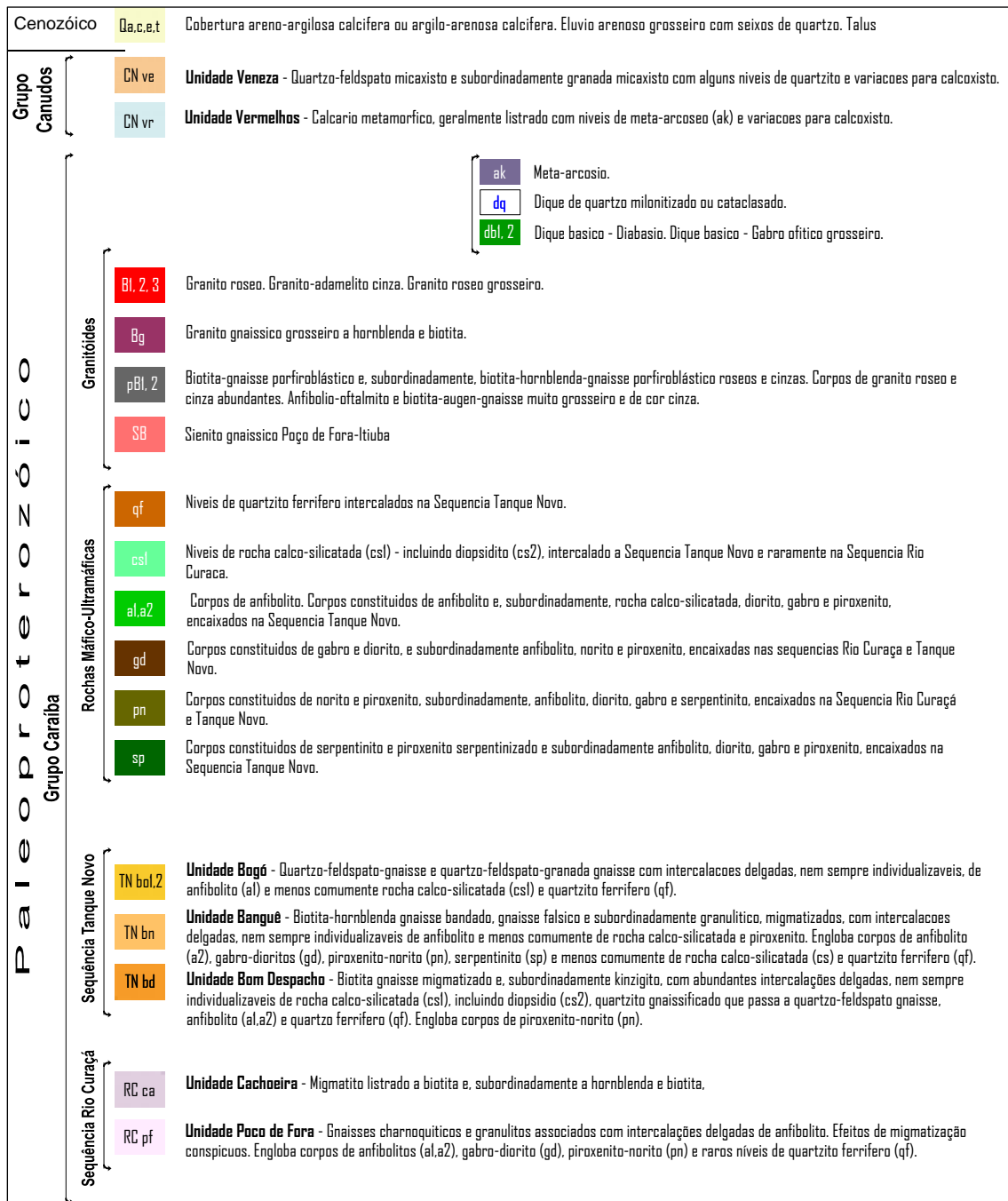


Figura 4-9 – Coluna Litoestratigráfica do mapa geológico do Vale do Rio Curaçá (Figura 4.8).
Fonte: modificado de Delgado e Souza (1975).

O outro mapa de referência adotado nesta pesquisa (Figura 4.10) foi o proposto por Paradella (1983). Neste mapa, o autor discriminou as principais unidades litológicas do

Baixo Vale do Rio Curaçá através de técnicas de processamento digital de imagens MSS Landsat-3, dados de campo e de laboratório.

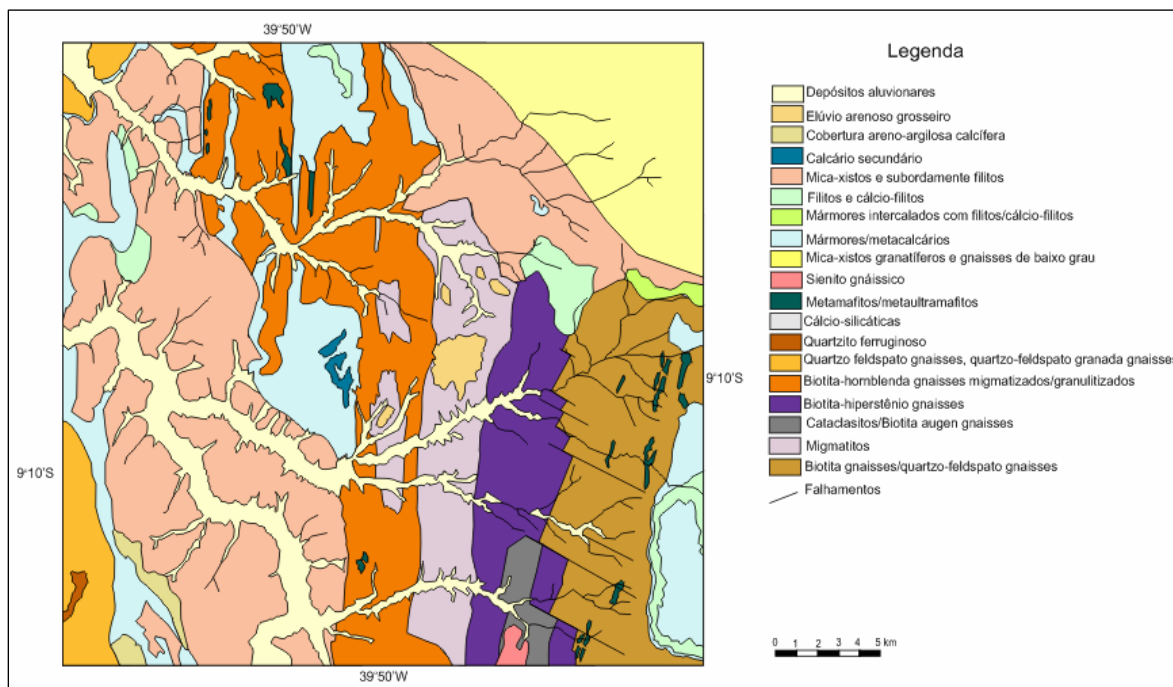


Figura 4-10 – Mapa Litológico de referência.
Fonte: Paradella (1983).

Neste mapa, estritamente litológico, é possível observar algumas mudanças em relação ao mapa de Delgado e Souza (1975), principalmente na porção leste da área. O quartzo-feldspato gnaiss (Unidade Bogó) que antes ocupava ampla área se restringiu à porção central do mapa de Paradella (1983). Na porção leste, foram diferenciados dois litotipos extras: o biotita hiperstênio gnaiss, e o biotita gnaiss/quartzo-feldspato gnaiss.

Como os dois mapas de referencia não cobrem a totalidade da área de estudo desta investigação, há uma complementação de informações entre eles.

Além destes mapas, trabalhos mais recentes deram novas diretrizes para o entendimento da geologia do Vale do Rio Curaçá. O Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil, executado pela CPRM (ANGELIN; KOSIN, 2001), trouxe algumas modificações na geologia da região. As considerações mais importantes, e que foram adotadas neste trabalho são:

As duas principais unidades mapeadas por Delgado e Souza (1975) como Seqüência Tanque Novo e Seqüência Rio Curaçá foram reagrupadas e denominadas, respectivamente, de Complexo Tanque Novo e Complexo Caraíba.

Os gnaisses que ocorrem à leste da intrusão sienítica de Itiúba foram reinterpretados como ortognaisses do Complexo Santa Luz (que corresponde ao embasamento Arqueano do Bloco Serrinha). Portanto, não pertencem mais ao Grupo Caraíba – Seqüência Tanque Novo, conforme a concepção do Projeto Cobre (DELGADO; SOUZA, 1975). Esses gnaisses são interpretados por Paradella (1983) como biotita gnaissse/quartzo-feldspato gnaissse.

O Grupo Canudos, na nova interpretação, está em contato tectônico com os Complexos Caraíba e Tanque Novo, e suas relações de campo indicam ser uma estrutura *klippe*.

4.4.3 Recursos Minerais

O cobre representa o principal recurso mineral econômico do Vale do Rio Curaçá, e está associado ao Complexo Máfico-Ultramáfico intrusivo.

Segundo Angelin e Kosin (2001), os jazimentos do Distrito Cuprífero do Vale do Rio Curaçá ocorrem, predominantemente, em rochas metabásicas-metaultrabásicas cumuláticas diferenciadas. Estas rochas constituem três tipos principais: piroxênitos e noritos, noritos e gabros, e corpos gabróicos. As mineralizações de cobre estão fortemente relacionadas às rochas piroxeníticas e melanoríticas (DELGADO; SOUZA, 1975). As rochas de composição norítico-gabróica são pobremente mineralizadas ou estéreis.

Explorado desde 1978 em lavra a céu aberto e subterrânea pela Mineração Caraíba S.A., o depósito de cobre de Caraíba, a sul da área de estudo, é considerado como um *sill* estratificado, derivado de magma toleítico intrudido pré ou sintectonicamente à fase deformacional D1 (D'EL-REY SILVA, 1996).

Até 1998, a região produziu cerca de 600 Mt de minério com um teor de 1,6% Cu. Já em 1996 as reservas da mina eram da ordem de 42 Mt de minério com 1,82% Cu (DARDENNE; SCHOBENHAUS, 2001).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

Os materiais utilizados na realização deste estudo consistem no conjunto de dados SAR (imagens digitais RADARSAT-1), dados climáticos da região (precipitação), carta topográfica da área, mapas geológicos de referência, materiais de campo e software para o tratamento dos dados.

5.1.1 Dados SAR

O conjunto de dados SAR é formado por quatro imagens digitais do satélite RADARSAT-1, descrito no capítulo 2, e fornecidas pelo INPE para a investigação. A tabela 5.1 apresenta as características gerais destas imagens.

Tabela 5-1 – Características gerais das imagens RADARSAT-1 utilizadas na pesquisa.

Satélite/Imagem	Data de Aquisição	Ângulo de Incidência	Resolução Espacial (m)	Sentido da Órbita	Azimute de iluminação
RADARSAT <i>Fine Mode</i> <i>Beam 2A</i>	27/set/03	39,2 – 42,5°	8,7 x 8,4	Ascendente	78°
RADARSAT <i>Standard Mode</i> <i>Beam 2A</i>	17/set/03	24 – 31°	22 x 27	Ascendente	78°
RADARSAT <i>Standard Mode</i> <i>Beam 7A</i>	14/out/03	45 – 49°	20,1 x 27	Ascendente	78°
RADARSAT <i>Standard Mode</i> <i>Beam 7D</i>	22/out/03	45 – 49°	20,1 x 27	Descendente	282°

5.1.2 Dados Climáticos

Como dado auxiliar, a precipitação pluviométrica da Estação Agrometeorológica de Bebedouro (EMBRAPA SEMI-ÁRIDO) foi utilizada. O gráfico da Figura 5.1 representa o índice pluviométrico médio para cada mês do ano 2003, ano de aquisição das imagens.

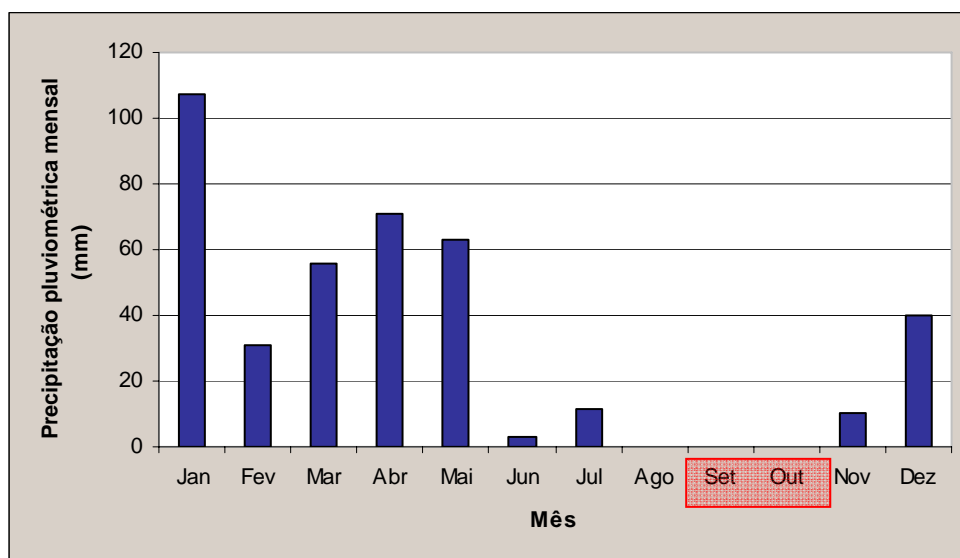


Figura 5-1 – Precipitação pluviométrica mensal (mm) da Estação Agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina-PE 09°09'S 40°22'W) para o ano 2003. Destaque (em vermelho) para os meses de aquisição das imagens RADARSAT-1.
 Fonte: Embrapa Semi-Árido (2006).

A finalidade desses dados é ligada principalmente ao conteúdo de umidade da região, que afeta diretamente a constante dielétrica e influencia na resposta dos alvos investigados. Observa-se que nos meses de aquisição das imagens SAR e no mês anterior, a precipitação pluviométrica é nula.

5.1.3 Dados Geológicos e Cartográficos

Os mapas geológicos da CPRM/DNPM (DELGADO; SOUZA, 1975) foram as principais bases para a caracterização litológica do Vale do Rio Curaçá. Foram utilizados os mapas geológicos na escala 1:50.000 de Curaçá (SC. 24-V-D-II-1) e de Barro Vermelho (SC. 24-V-D-II-3).

Além desses mapas, utilizou-se também o mapa de Paradella (1983), uma vez que a parte leste da área de estudo não está mapeada por Delgado e Souza (1975).

Com relação à base cartográfica utilizada, esta compreende a carta topográfica 1:100.000 de Barro Vermelho (SC. 24-V-D-II), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A projeção cartográfica empregada é a UTM, datum de referência SAD 69, zona 24.

5.1.4 Materiais de campo

Para a execução do trabalho de campo, foram confeccionados os *layouts* das imagens RADARSAT-1, da carta topográfica e da imagem LANDSAT, sendo estes dois últimos utilizados basicamente para localização.

Para a coleta dos perfis de rugosidade do terreno, utilizou-se o rugosímetro. Este material trata-se de uma placa de PVC quadriculada, com 40 cm de altura por 120 cm de comprimento (Figura 5.2) que tem por finalidade auxiliar nas medidas de rugosidade superficial.

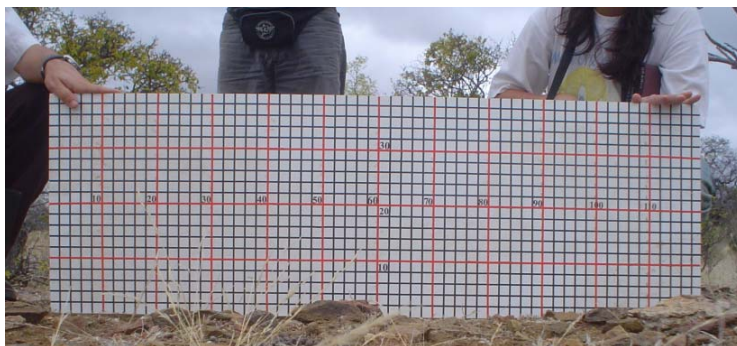


Figura 5-2 – Rugosímetro utilizado para as medidas de rugosidade superficial.

Outros materiais utilizados foram GPS (*Ground Position System*) para a coleta das coordenadas dos pontos visitados, máquina fotográfica, martelo geológico e bússola Brunton.

5.1.5 Software

Os *software* empregados para a realização deste trabalho foram:

PCI Geomatica Versão 9.1 e 10.0 (PCI Geomatics Enterprises Inc.®);

SPRING 4.1;

IDL (Interactive Data Language);

ArcView GIS 3.2;

Statistica 6.0.

5.2 Métodos

No semi-árido, estudos com o sistema radar para caracterização de unidades geológicas são ainda escassos. Neste sentido, foram utilizados alguns procedimentos metodológicos com a finalidade de complementação de dados, tanto de forma qualitativa quanto quantitativa.

Na Figura 5.3 está esquematizado o fluxograma utilizado nesta pesquisa, que é composto pelas seguintes etapas: seleção da área de estudo; campanha de campo; pré-processamento dos dados; interpretação visual; e análises digitais e estatísticas.

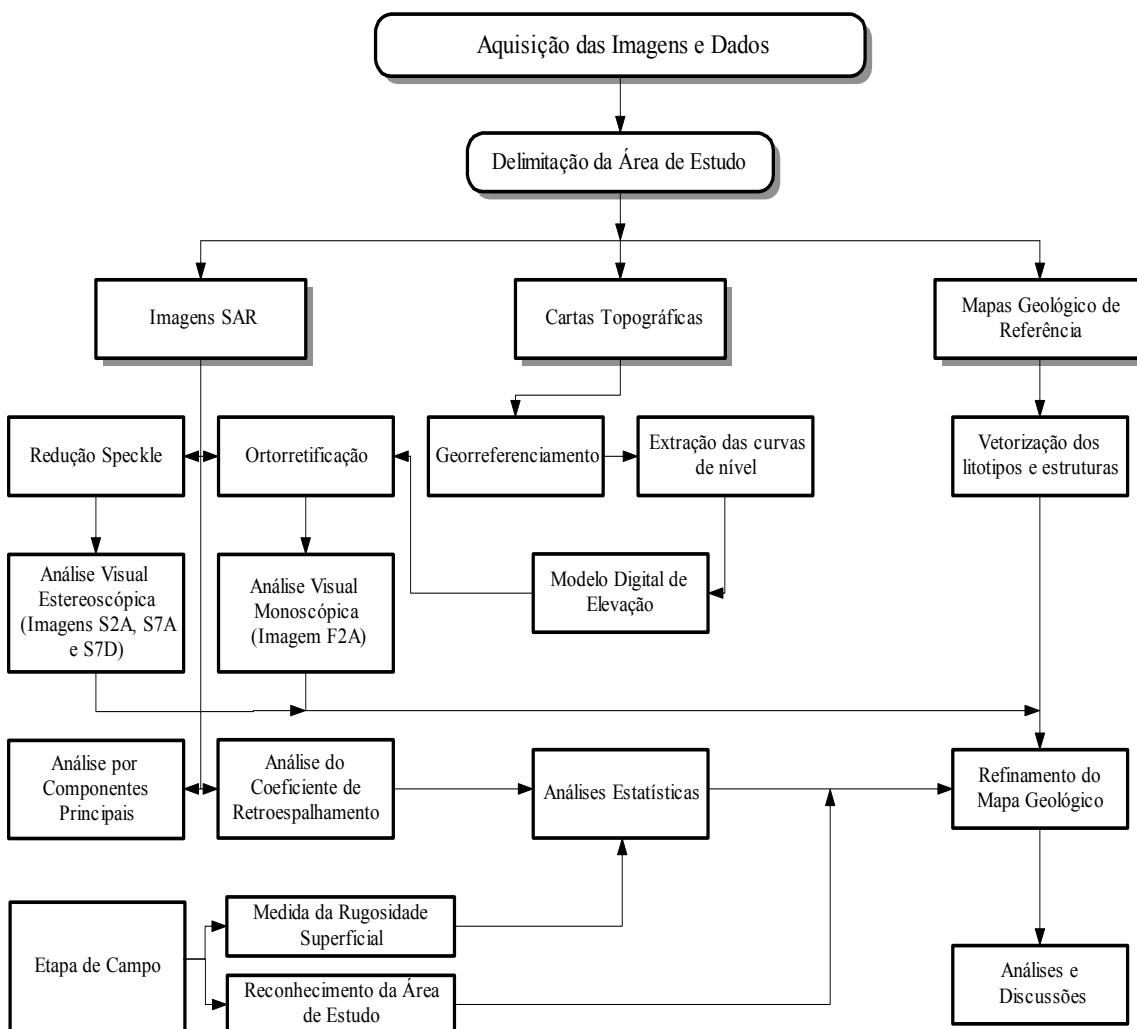


Figura 5-3 – Fluxograma da metodologia do trabalho.

5.2.1 Seleção da Área

De posse das imagens RADARSAT-1 e dos dados cartográficos/geológicos fez-se a delimitação da área de estudo. Esta etapa foi feita com base na sobreposição dos dados disponíveis e segundo o grau de conhecimento geológico prévio da região, de forma que os resultados gerados nesta pesquisa pudessem ser comparados com dados pré-existentes. A Figura 5.4 exibe a cobertura em área das principais fontes de informação utilizadas na pesquisa, com destaque para a área útil utilizada.

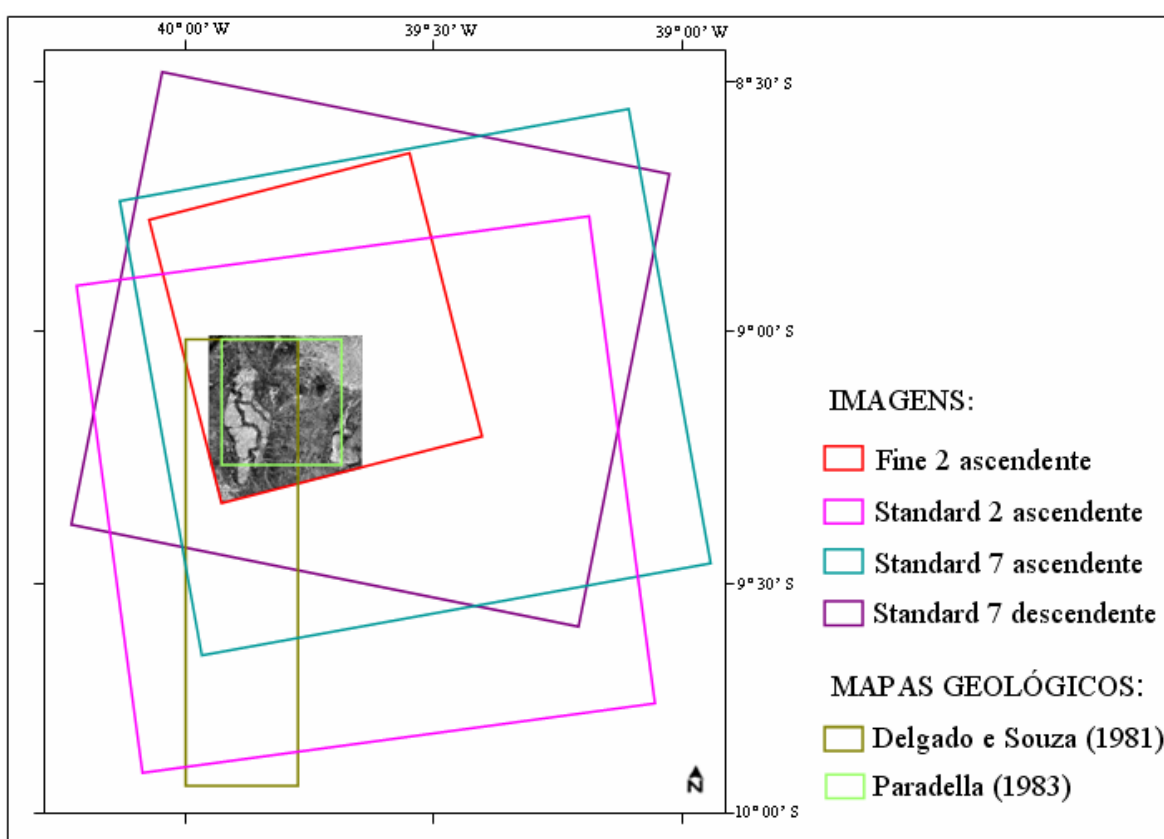


Figura 5-4 – Recobrimento original das imagens RADARSAT-1 e limite dos principais mapas geológicos de referência para a área de estudo (em destaque com a imagem).

5.2.2 Campanha de campo

O trabalho de campo ocorreu em setembro de 2006, período de seca na região (EMBRAPA SEMI-ÁRIDO), com o objetivo de reconhecer e caracterizar as principais unidades litológicas mapeadas por Delgado e Souza (1975), e Paradella (1983).

Na verificação de campo (Tabela A1), procurou-se compreender as relações das feições espectrais com as características da paisagem (aspectos litológicos, estruturais, tipo de solo, e vegetação), além de coleta de pontos de controle com amarração em GPS (Figura B1), e registro fotográfico. Medidas estruturais foram realizadas através da bússola Brunton, de forma a fornecer subsidio para a inserção das foliações e falhas (Tabela C1).

Também foram coletados os perfis de rugosidade do terreno, utilizando para tal a metodologia descrita em Ulaby e Batlivala (1976) e Moraes (1998). Essa técnica determina através do erro quadrático médio das variações verticais do terreno (h_{rms}) se a superfície é lisa, intermediária ou rugosa, de acordo com o critério de aproximação adotado. Para mais detalhes a respeito dos níveis de aproximação que caracterizam a rugosidade da superfície, vide capítulo 2.

O equipamento usado para a quantificação destas medidas, o rugosímetro, é colocado sobre o terreno na posição ortogonal à direção de visada do satélite, e em seguida é fotografado. Posteriormente o perfil de rugosidade foi digitalizado em escritório, conforme mostra a Figura 5.5. A digitalização do perfil foi realizada por meio do *software* SPRING, e o valor de micro-rugosidade do terreno (h_{rms}) para cada ponto foi calculada através de um algoritmo feito em “*Interactive Data Language*” (IDL). Com esse algoritmo, foi possível também corrigir as distorções provocadas pela câmera fotográfica e pela inclinação da placa no terreno.

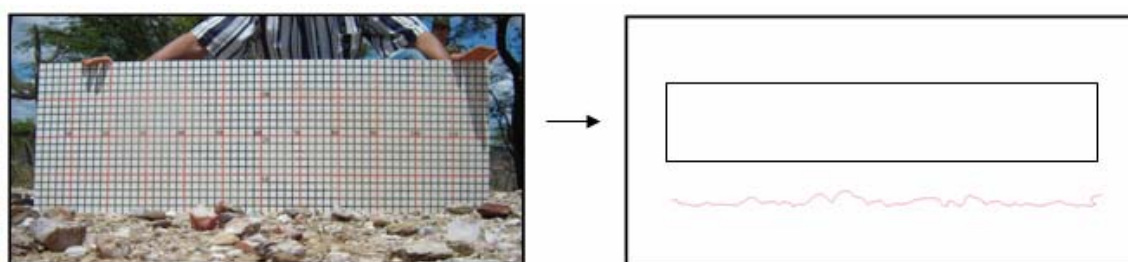


Figura 5-5 – Digitalização do perfil de rugosidade.

Após o tratamento dos dados, os valores de h_{rms} foram analisados de forma quantitativa, baseados nos critérios de “Peake e Oliver” e “Rayleigh”. Esta técnica descrita em Ulaby

e Batlivala (1976) consiste em caracterizar a rugosidade superficial do terreno em diferentes níveis de rugosidade superficial (liso, intermediário e rugoso).

No total, foram tomados 86 perfis de rugosidade para cada trajetória (ascendente e descendente).

5.2.3 Pré-Processamento

A fase de pré-processamento dos dados objetivou a manipulação das informações básicas (dados vetoriais), e as operações de correção geométrica e radiométrica das imagens de radar.

Considerada imprescindível para o sucesso das etapas subseqüentes, esta etapa será detalhada a seguir.

5.2.3.1 Pré-processamento dos dados vetoriais

O mapa geológico confeccionado por Delgado e Souza (1975), inicialmente em formato analógico, foi escaneado e georreferenciado para posterior digitalização dos seus vetores (litologias, estruturas e foliações). Como a parte leste da área de estudo está fora dos limites do mapeamento de Delgado e Souza (1975), foi necessária a digitalização de do mapa litológico confeccionado por Paradella (1983).

A carta topográfica também foi georreferenciada e extraídos os dados vetoriais de curva de nível e pontos cotados com a finalidade de se gerar o modelo digital de elevação (DEM), que posteriormente foi utilizado na ortorretificação das imagens SAR.

Utilizou-se o *software* Geomatica OrthoEngine 10.0 (PCI Geomatics Enterprises Inc.®) para a digitalização dos mapas e carta topográfica. A partir desta última foi gerada, usando o interpolador média ponderada por cota e quadrante, uma grade retangular numa resolução de 20x20 metros. A partir disto, foi produzida uma imagem digital em nível de cinza que reproduz a variação altimétrica da área.

5.2.3.2 Pré-processamento das Imagens SAR

A etapa de pré-processamento das imagens RADARSAT seguiu três procedimentos diferenciados: um para a análise visual monoscópica e técnicas de processamento digitais de imagens; outro para as análises estereoscópicas; e o último para a análise dos coeficientes de retroespalhamento.

Em ambos os processos, inicialmente fez-se as leituras das imagens amplitude a partir do pacote FOCUS (PCI Geomatics Enterprises Inc.®), no qual requeria as informações de altitude, efemeridade e geométrica de visada (*orbit* da imagem). A correção radiométrica também foi aplicada nos três procedimentos e objetivou amenizar os efeitos do ruído *speckle*.

A imagem RADARSAT-1 modo *Fine* possui apenas um *look* de processamento, enquanto que as imagens do modo *Standard* vêm processadas com quatro visadas. Entretanto, esse processo não foi suficiente para atenuar o aspecto granuloso das imagens, sendo necessária também a aplicação de técnicas de filtragem. Neste sentido, foram testados diversos filtros adaptativos contidos no *software* PCI, com diferentes tamanhos de máscaras.

Com relação à correção geométrica, adotou-se o método da ortorretificação das imagens, realizada através do módulo *OrthoEngine* (PCI Geomatics Enterprises Inc.®). Esta correção só não foi aplicada para a análise estereoscópica das imagens.

As imagens foram ortorretificadas individualmente utilizando-se o DEM gerado a partir da carta topográfica e os pontos de controle extraídos da mesma. Os pontos de controle das imagens em amplitude foram aproveitados para as imagens em sigma zero (σ_0), de forma que estes possuíram o mesmo erro médio quadrático (*Root Squared Mean Error* – RMSE) em relação a cada imagem. Durante o processo de ortorretificação, o tamanho do *pixel* das imagens foi reamostrado.

No caso das análises dos coeficientes de retroespalhamento, as imagens amplitude, previamente filtradas, foram convertidas para sigma zero, e posteriormente foram

ortorretificadas. Os procedimentos desta etapa serão descritos em um tópico específico (5.2.5.2), de forma a facilitar o entendimento da metodologia.

5.2.4 Análise Visual das Imagens SAR

A análise visual consistiu de duas etapas distintas: a análise monoscópica e a análise estereoscópica. A análise monoscópica foi aplicada à imagem SAR do modo *fine 2*, órbita ascendente (F2A), enquanto que as análises estereoscópicas foram realizadas sobre os estéreo-pares *Standard* (S2A, S7A e S7D).

5.2.4.1 Análise Monoscópica

Neste trabalho, a análise monoscópica foi aplicada à imagem de maior resolução espacial (F2A), e seguiu a sistemática proposta por Santos et al. (2001), que subdivide a fase de interpretação geológica em: (a) identificação dos elementos de imagem; (b) análise dos elementos de imagem; e (c) interpretação dos elementos de imagem. O fluxograma da Figura 5.6 resume os principais produtos gerados a partir da análise monoscópica.

Na etapa de identificação e análise dos elementos de imagem, observou-se e estudou-se a disposição e o ordenamento dos elementos texturais de relevo e de drenagem.

Para a análise dos elementos texturais de drenagem, foi confeccionado o mapa da rede de drenagem. Este consistiu inicialmente na digitalização dos principais traçados da hidrografia presentes nas cartas topográficas e no mapa geológico, com posterior detalhamento por meio da imagem RADARSAT-1, modo *fine 2* com órbita ascendente (F2A).

As propriedades dos elementos texturais de drenagem (frequência, feições lineares, alinhamentos, tropia, assimetria e homogeneidade) e de relevo (frequência, feições lineares, alinhamentos, tropia, quebra positiva de relevo, quebra negativa de relevo, assimetria e homogeneidade) foram analisadas de forma a fornecer informações acerca das propriedades das formas de relevo e de drenagem (frequência textural, estrutura, grau de estruturação e ordem de estruturação). Através das análises conjuntas de todas

as propriedades dos elementos texturais e das formas, as zonas homólogas de drenagem e de relevo foram individualizadas.

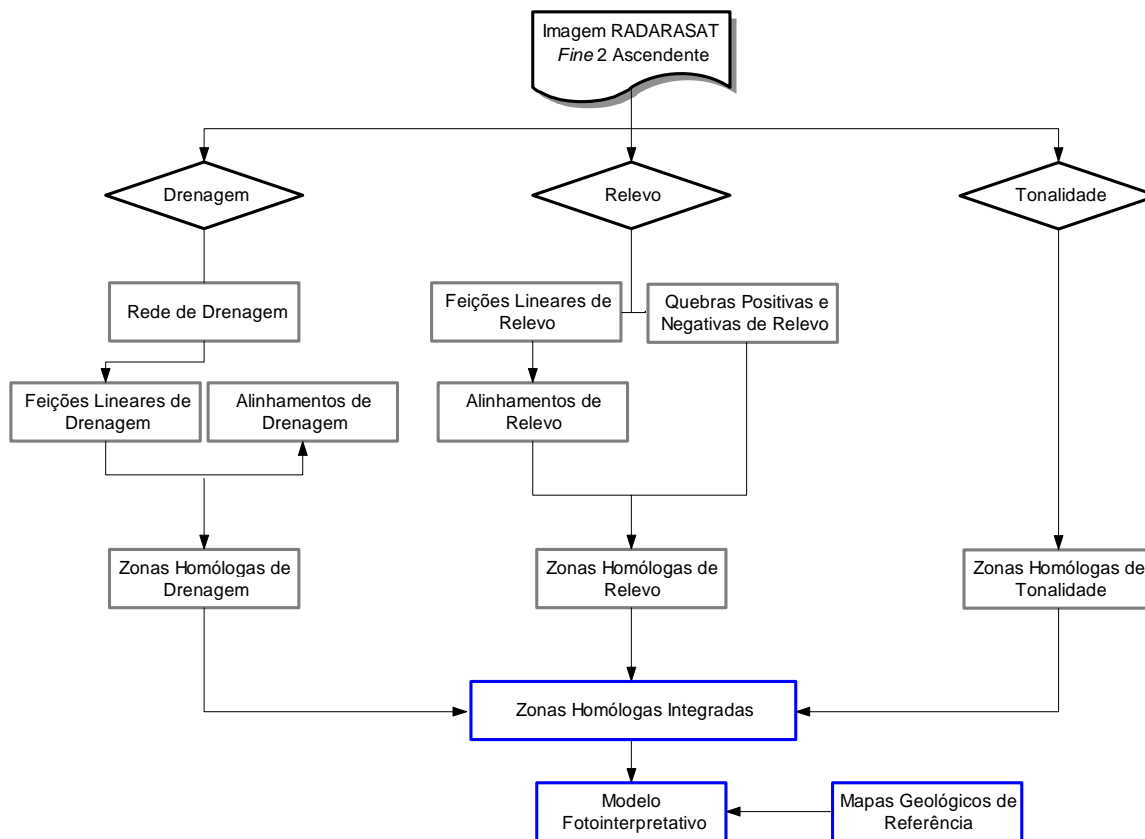


Figura 5-6 – Fluxograma da análise monoscópica. Etapas: identificação dos elementos de imagem em preto; análise dos elementos de imagem em cinza e; interpretação dos elementos de imagem em azul.

Outro elemento analisado nesta etapa foi a tonalidade da imagem, que é o resultado direto da interação entre a radiação de microondas e as características dos alvos superficiais. O mapa de zonas homólogas de tonalidade foi confeccionado levando-se em conta a intensidade, a homogeneidade e o contraste em relação às regiões adjacentes.

Como resultado final da análise e interpretação dos elementos da imagem, foi elaborado um modelo fotointerpretativo para a área de estudo de forma a definir as principais unidades fotolitológicas e estruturas geológicas.

5.2.4.2 Análise Estereoscópica

Nesta investigação, a análise estereoscópica (abordagem digital, 3D estéreo) foi realizada a partir das imagens do modo Standard, de forma a obter três estéreo-pares: par S7AxS2A, S7DxS7A, e S7DxS2A. O fluxograma desta etapa é apresentado na Figura 5.7.

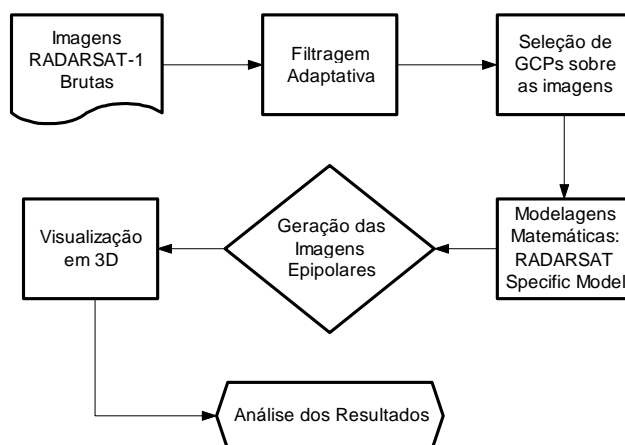


Figura 5-7 – Fluxograma com a metodologia adotada na análise estereoscópica de cada par.

As imagens, sem nenhum tipo de correção geométrica, foram filtradas (FeFrost, 7x7) para atenuação do speckle e melhora do contraste visual, e importadas para um projeto no módulo *OrthoEngine* (PCI Geomatics Enterprises Inc.®) com as informações do sistema de projeção e datum.

Como parte do procedimento, gerou-se as imagens epipolares de cada estéreo-par, e a visualização em três dimensões foi possível a partir do monitor ZSCREEN[®] 2000. Este monitor é um sistema de visualização que consiste em um painel estereoscópico e visor polarizado. O painel é acoplado a um monitor comum e o visor (óculos especial 3D) polariza as imagens do olho esquerdo e do olho direito em direções opostas para proporcionar a visualização tridimensional (Figura 5.8).



Figura 5-8 – Foto ilustrativa do monitor ZSCREEN® 2000.

Os pares foram interpretados geologicamente (unidades, contatos e estruturas) e as diferenças entre os resultados explicadas com base nas características de cada estereopar, as quais determinam os graus de similaridade radiométrica (maior ou menor visibilidade estereoscópica) e de disparidade geométrica (maior ou menor paralaxe estereoscópico). As feições geológicas foram então classificadas em termos de sua nitidez e facilidade na caracterização na interpretação tridimensional, dentro de uma escala variando de ótimo a sem definição.

5.2.5 Processamentos e Análises Estatísticas

5.2.5.1 Análise por Componentes Principais (ACP)

Dados SAR de diferentes resoluções espaciais (modos *fine* e *standard*), com diferentes intervalos de incidência (S2A, F2A, S7A) e diferentes azimutes de visada (S7D com as demais) foram submetidas à técnica de ACP no esforço de avaliar a capacidade de discriminação de unidades litológicas do Vale do Curaçá. Além disso, buscou-se através desta técnica, investigar se os parâmetros sensor-alvo possuíam um incremento na discriminação de rochas e de realces de estruturas.

Segundo Grunsky (2002) e Paganelli et al. (2003), métodos como razão de bandas e subtração são eficazes para se comparar duas imagens, mas quando são comparadas três ou mais imagens deve-se utilizar técnicas multivariadas mais adequadas, como por exemplo a análise por componentes principais.

Esta técnica teve como canal de entrada a imagem *Fine* e as três imagens do modo *Standard*, todas com espaçamento de *pixel* igual. Avaliou-se aqui as matrizes de correlação, auto-valores e auto-vetores, de forma a analisar a contribuição de cada imagem em cada componente principal gerada.

As componentes principais foram analisadas separadamente, bem como a melhor composição colorida RGB das mesmas.

5.2.5.2 Obtenção e Análises do Coeficiente de Retroespalhamento

Para a aquisição dos valores dos coeficientes de retroespalhamento a partir das imagens amplitude, utilizou-se os módulos CDSAR, SARINC e SARSIGM do *software* PCI versão 9.0. O módulo CDSAR lê a imagem conjuntamente com os parâmetros de órbita e os parâmetros de calibração, presentes no cabeçalho da imagem. O módulo SARINC armazena os parâmetros de ângulo de incidência aplicados sobre as imagens na fase de aquisição dos dados. E por fim, a correção das variações ocorridas na emissão e recepção do pulso pelo sensor foi feito através do módulo SARSIGM.

Após a calibração de cada imagem, as mesmas foram ortorretificadas, utilizando os mesmos pontos de controle da imagem em amplitude. De posse dos coeficientes de retroespalhamento foram coletados os valores correspondentes a uma matriz de tamanho 3x3 (aproximadamente 60mx60m no terreno) nos pontos onde havia coleta de campo dos dados de rugosidade superficial. É importante ressaltar que a aplicação do filtro de speckle (FeFrost, janela 7x7) foi feita sobre as imagens amplitude para posterior conversão para σ_0 .

Para analisar a separabilidade litológica através dos coeficientes de retroespalhamento, utilizou-se as imagens do modo *Standard* e fez-se uso da análise de variância (ANOVA), e posteriormente do teste-t par a par com a correção de Bonferroni a um nível de significância de 5%. O teste-t, de modo geral, compara a média de cada par de dados analisado e estima se é ou não significativa essa diferença. Já a correção de Bonferroni procura ajustar a inflação no valor de alfa quando se faz repetidas

comparações, ou seja, há um ajuste do valor de “alfa” para “alfa/(c)”, onde c é o número de possíveis combinações de médias.

5.2.5.3 Análise de Regressão

Outra abordagem quantitativa empregada nesta investigação foi a análise de regressão linear simples entre os valores de rugosidade superficial medida em campo (h_{rms}) e os coeficientes de retroespalhamento (σ_0) da imagem com maior separabilidade de litotipos. Segundo Neter et al. (1996), a análise de regressão é uma ferramenta estatística que utiliza a relação existente entre duas ou mais variáveis, de forma que uma variável pode ser predita a partir de outra (Equação 5.1):

$$Y = \sum_{i=1}^p \beta_i \cdot X_i + \varepsilon \quad (5.1)$$

Onde Y é a variável dependente, a qual se deseja ser explicada; X_i são as variáveis independentes; β_i são os p parâmetros da regressão; e, por fim, ε é o termo relativo aos resíduos.

Esta análise visou estimar o quanto os valores de h_{rms} estão correlacionados com os valores de retroespalhamento da imagem, levando em consideração que o σ_0 é função da constante dielétrica, da rugosidade da superfície e da geometria dos alvos.

Como metodologia de trabalho, foi realizada uma avaliação preliminar dos dados, de forma a identificar e diminuir eventuais inconsistências. Posteriormente foram testadas algumas premissas básicas no qual a teoria da regressão linear é edificada.

A análise de normalidade foi feita em duas etapas: análise da normalidade da variável dependente, e a normalidade dos resíduos da regressão. Para estes estudos foram executados o teste de Shapiro-Wilk e a análise dos gráficos de probabilidade normal.

Quanto à estimativa dos parâmetros da regressão utilizou-se o método dos mínimos quadrados, que calcula o valor dos estimadores que minimizam o quadrado médio dos resíduos. Neste caso, é necessário que a variância dos resíduos seja constante, e para

testar esta hipótese aplicou-se o teste de Levene modificado, que determina se a média dos desvios absolutos de cada grupo são estatisticamente iguais (NETER et al., 1996).

Além dessas premissas fundamentais, verificou-se se haviam *outliers* que pudessem influenciar negativamente os resultados. Para isso aplicou-se o teste DFFITS, que mede a influência de um determinado ponto no modelo de regressão. Segundo Neter et al. (1996), o valor máximo aceitável para o DFFITS é de 1 para pequenos ou médios conjuntos de dados.

Por fim, o modelo de regressão foi validado através da proximidade do valor PRESS (p), com o valor da soma dos quadrados dos resíduos (SQR), e os resultados discutidos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Pré-Processamento das Imagens

No processo de correção geométrica das imagens RADARSAT-1, o erro médio quadrático (*Root Mean Squared Error* - RMSE) obtido foi inferior a dois *pixels* para todas as imagens. A Tabela 6.1 apresenta a quantidade de pontos de controle, o RMS para as coordenadas X e Y e o erro residual, em metros.

Tabela 6-1 – Erro médio quadrático (RMSE) obtido no processo de correção geométrica das imagens RADARSAT-1.

Imagens RADARSAT-1	Número de GCP's	X RMS (m)	Y RMS (m)	RMS residual (m)
<i>Fine 2</i> ascendente	18	6,48	6,67	9,29
<i>Standard 2</i> ascendente	23	16,54	17,57	24,13
<i>Standard 7</i> ascendente	23	17,96	14,22	22,91
<i>Standard 7</i> descendente	22	15,52	18,13	23,86

Durante este processo, o tamanho do *pixel* das imagens foi reamostrado para 20m, levando em consideração alguns fatores como: precisão do modelo de ortorretificação, resolução dos dados, e conservação da informação a ser extraída.

O filtro de *speckle* que apresentou os melhores resultados visuais foi o *Enhanced Frost Filter* (FeFrost) com janela 7×7 *pixels*. Este filtro foi aplicado durante a fase de ortorretificação das imagens, e este possibilitou a visualização dos principais elementos de drenagem e de relevo da imagem. Os resultados das correções geométricas e radiométricas foram iguais para as imagens em sigma zero (σ_0).

6.2 Análise Visual

6.2.1 Análise Monoscópica

Após a ortorretificação e filtragem da imagem F2A em amplitude, procedeu-se a identificação, análise e interpretação dos elementos da imagem, conforme mencionado na metodologia. Esta etapa permitiu a confecção de um mapa fotogeológico, com a

individualização dos principais conjuntos litológicos e a caracterização das principais estruturas geológicas de parte do Vale do Rio Curaçá.

6.2.2 Identificação dos elementos de imagem

A drenagem e o relevo constituem os principais elementos da imagem para a obtenção de informações geológicas, juntamente com a tonalidade da imagem. Na imagem analisada (Figura 6.1), estes elementos puderam ser identificados com clareza a partir de uma análise cuidadosa e sistemática.

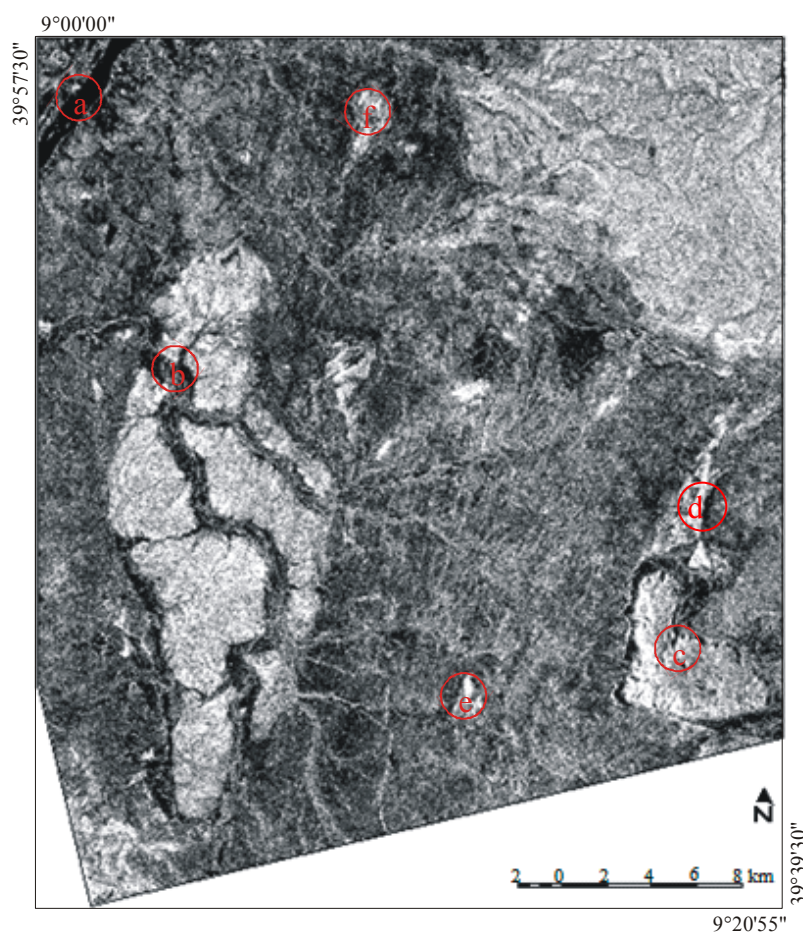


Figura 6-1 – Imagem RADARSAT-1, modo fine 2 com órbita ascendente: a) Rio São Francisco; b) Rio Curaçá; c) Serra da Cana Brava, d) Serrote do Lajedo; e) Serra Redonda, f) Serrote do Velho Chico.

A rede de drenagem é bem marcada na imagem, principalmente na parte oeste, onde se encontram o Rio São Francisco e o seu afluente principal, o Rio Curaçá. O Rio São Francisco apresenta uma tonalidade muito escura (comportamento especular), enquanto

o Rio Curaçá é caracterizado pela intercalação de faixas claras e escuras. Já no restante da área, as drenagens se resumem a pequenos canais de tonalidade clara, resultante da interação da energia eletromagnética com a mata ciliar.

Com relação ao relevo, destacam-se na área as Serras da Cana-Brava, Serrote do Lajedo, Serra Redonda e o Serrote do Velho Chico, identificadas na Figura 6.1. O restante da área é caracterizado por um relevo predominantemente plano.

Por fim, a variação de tonalidade é marcante ao longo de toda a área, correspondendo a variações litológicas, de vegetação e de topografia.

6.2.2.1 Análise dos elementos de imagem

Drenagem

Como primeiro passo para o estudo da disposição e ordenamento dos elementos de drenagem, foi confeccionado o mapa da rede de drenagem (Figura 6.2). Esse mapa serviu de base para a análise dos elementos texturais de drenagem e, por esta razão, seu traçado foi tão detalhado quanto possível.

A área de estudo apresenta heterogeneidade das propriedades texturais de drenagem, caracterizada pelas diferenças na frequência, assimetria e tropia das feições lineares e alinhamentos de drenagem.

Com relação à frequência dos elementos texturais de drenagem, esta é alta para a maioria da área imageada. Entretanto, em regiões específicas, essa frequência tem um decréscimo abrupto, indicando principalmente regiões com altos topográficos (serras e serrotes).

A rede de drenagem é levemente assimétrica, principalmente ao longo do Rio Curaçá. Esta assimetria é caracterizada por drenagens maiores e com organização mais complexa à leste da margem do rio, sugerindo assim um leve declínio topográfico da área de estudo na direção oeste.



Figura 6-2 – Rede de drenagem extraída a partir da imagem RADARSAT-1 (F2A) e do mapa geológico de Delgado e Souza (1975).

As feições lineares, traçadas de forma sistemática a partir da rede de drenagem, apresentam forte estruturação na parte sul e sudeste da área de estudo (Figura 6.3). A tropia dessas feições varia ao longo da área, destacando-se o caráter bidirecional na porção centro-sul da área e multidirecional ao leste e nordeste.

Os alinhamentos de drenagem (Figura 6.3), definidos pela disposição alinhada e fortemente estruturada das feições lineares de drenagem, possuem quatro direções definidas (NE-SW, NNE-SSW, N-S e NW-SE).

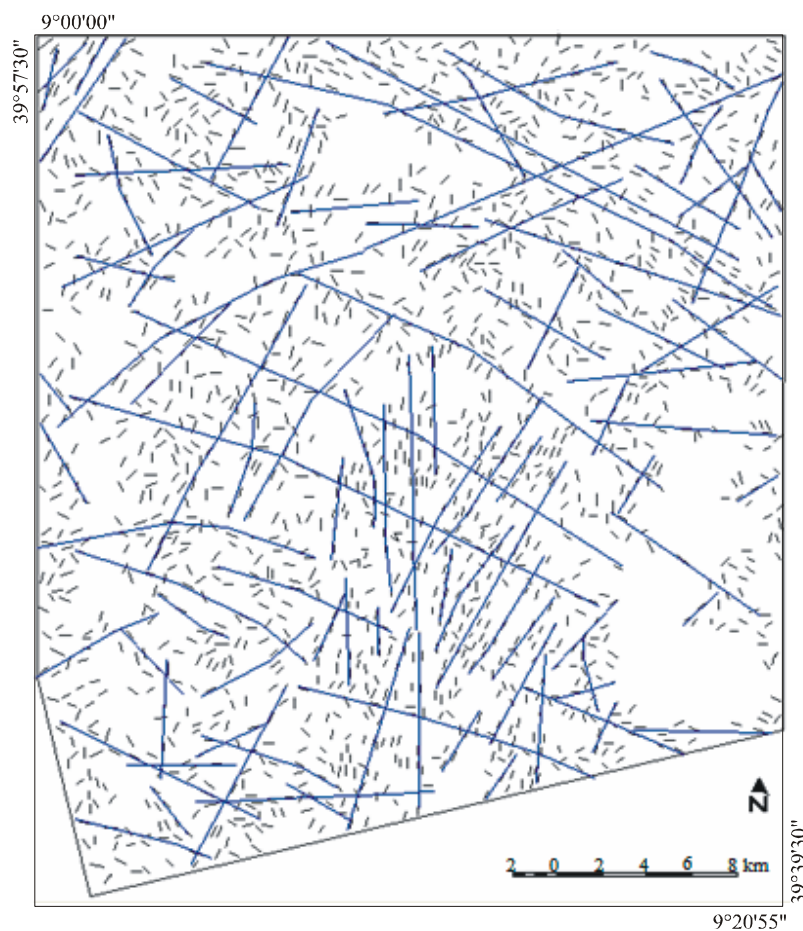


Figura 6-3 – Feições lineares (em preto) e alinhamento de drenagem (em azul).

As propriedades texturais da rede de drenagem descritas acima estão intimamente relacionadas às características geológicas da área sendo, portanto, importantes elementos diagnósticos e interpretativos. Através da análise desses elementos e das propriedades das formas de drenagem foi possível delimitar as zonas homólogas de drenagem (Figura 6.4).

No total, foram caracterizadas dez zonas homólogas de drenagem, através das propriedades dos elementos texturais e da forma. A Tabela 6.2 apresenta o quadro-legenda com as principais características de cada zona homóloga.

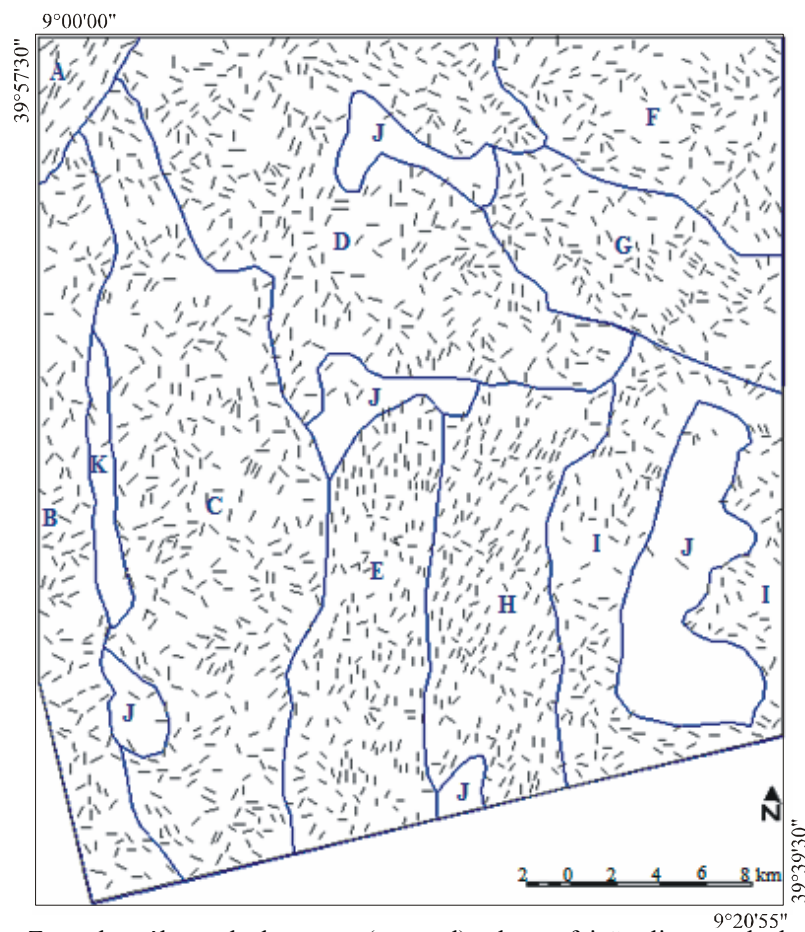


Figura 6-4 – Zonas homólogas de drenagem (em azul) sobre as feições lineares de drenagem.

Tabela 6-2 – Propriedades dos elementos texturais e das formas de drenagem.

Zonas Homólogas	Frequência Textural	Propriedade dos Elementos Texturais			
		Anisotropia	Alinhamentos	Assimetria	Uniformidade
ZH-A	moderada	unidirecional (NE-SW)	existem	não observado	alta
ZH-B	moderada	multidirecional	existem	não observado	moderada
ZH-C	alta	multidirecional	existem	forte	alta
ZH-D	alta	multidirecional	existem	fraca	alta
ZH-E	muito alta	bidirecional (N-S; NW-SE)	existem	fraca	alta
ZH-F	moderada	multidirecional	existem	fraca	alta
ZH-G	moderada	bidirecional (NW-SE; NE-SW)	existem	forte	baixa
ZH-H	muito alta	bidirecional (NE-SW, NW-SE)	existem	fraca	alta
ZH-I	baixa	multidirecional	existem	não observada	moderada
ZH-J	nula	---	não observados	---	alta
Zonas Homólogas	Frequência Textural	Propriedade das Formas			
		Estrutura	Grau de Estruturação	Ordem de Estruturação	
ZH-A	moderada	bem definida	muito alto	2	
ZH-B	moderada	mal definida	baixo	9	
ZH-C	alta	mal definida	baixo	8	
ZH-D	alta	mal definida	baixo	6	
ZH-E	muito alta	bem definida	muito alto	3	
ZH-F	moderada	moderadamente definida	moderado	5	
ZH-G	moderada	moderadamente definida	moderado	4	
ZH-H	muito alta	bem definida	muito alto	1	
ZH-I	baixa	mal definida	baixo	7	
ZH-J	nula	---	---	---	

Relevo

Com relação ao relevo, os elementos fundamentais em sua análise para a interpretação geológica são as rupturas de declive, pois definem os elementos texturais do mesmo. A disposição regular, definida no espaço desses elementos, constitui a estrutura do relevo, considerada como quebras positivas e negativas, e as feições lineares de relevo.

As principais quebras positivas e negativas de relevo, originadas pela disposição estruturada de rupturas de declive convexas para cima e para baixo, respectivamente, estão representadas na Figura 6.5. Essas quebras identificam as principais serras e serrotes e as quebras negativas são consideradas limites definidos das zonas homólogas de relevo.

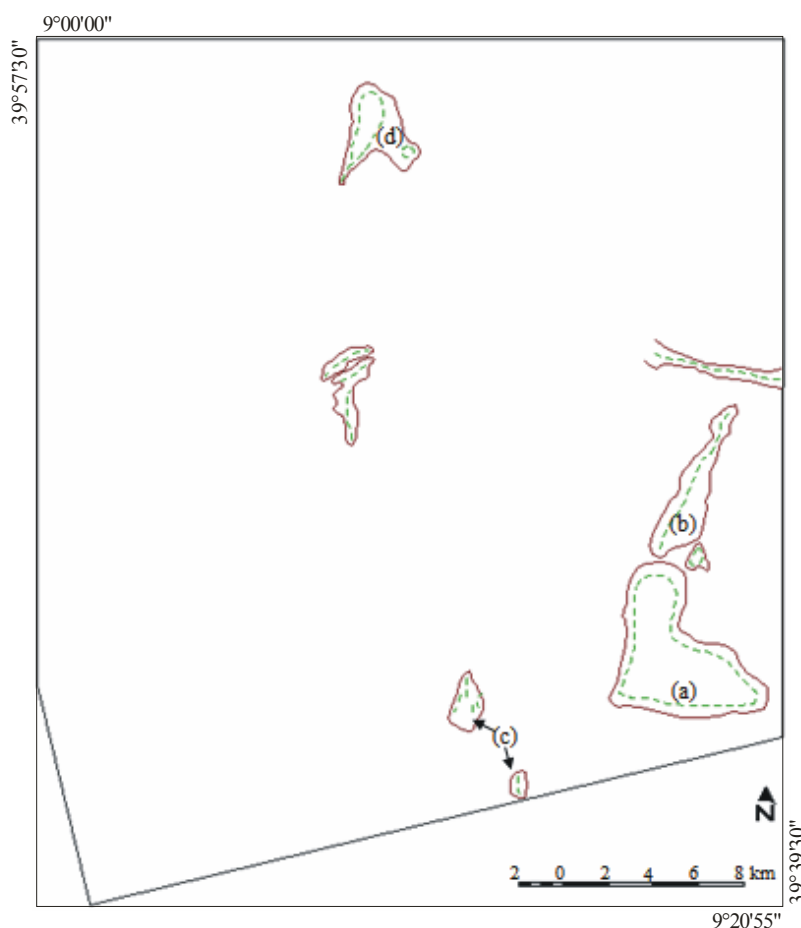


Figura 6-5 – Quebras positivas (linha tracejada em verde) e quebras negativas (linha contínua em marrom) de relevo. Principais serras e serrotes da região: (a) Serra da Cana-Brava, (b) Serrote do Lajedo, (c) Serra Redonda, e (d) Serrote do Velho Chico.

As feições lineares de relevo (Figura 6.6) são significativas na área, principalmente na porção sul e sudeste. Nesta região, as feições lineares estão orientadas segundo o *trend* principal NNE- SSW, concordante com as feições lineares de drenagem. Estas feições estão bem marcadas na imagem por variações de declividade local, e constituem uma seqüência estruturada de pequenas e suaves elevações (rupturas de declive) em meio ao terreno plano.

Equivalente à metodologia adotada na análise dos elementos de drenagem, os alinhamentos de relevo e as demais propriedades dos elementos texturais e das formas de relevo foram analisados. Os alinhamentos de relevo (Figura 6.6), extraídos a partir das feições lineares, apresentam direção principal NNE-SSW e, subordinadamente, as direções N-S e NW-SE.

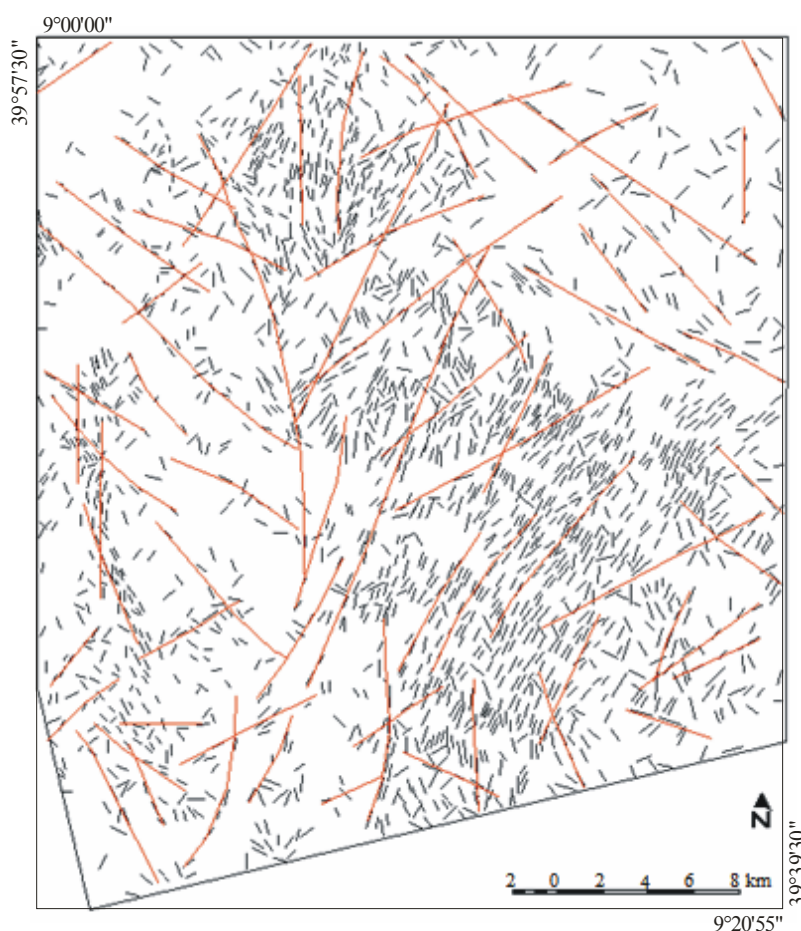


Figura 6-6 – Feições lineares de relevo (em preto) e alinhamentos de relevo (em vermelho).

As feições de relevo apresentam heterogeneidade nas propriedades dos elementos texturais e nas propriedades das formas. A partir de tais diferenças, as zonas homólogas de relevo (Figura 6.7) foram traçadas, e suas características principais estão resumidas na tabela 6.3.

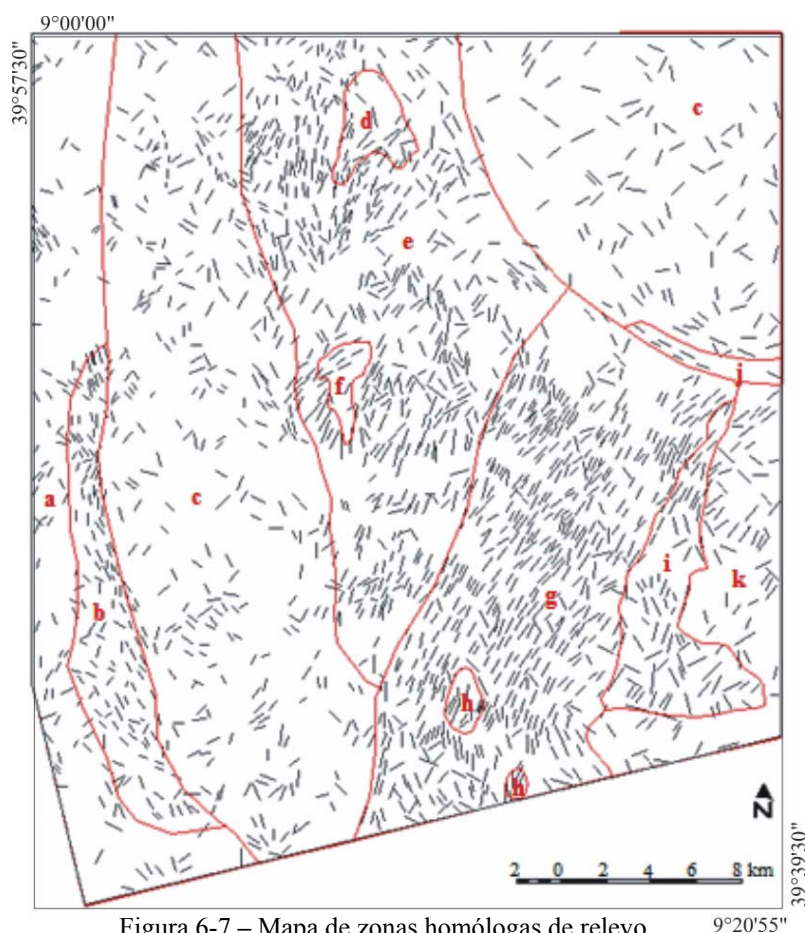


Figura 6-7 – Mapa de zonas homólogas de relevo.

Tabela 6-3 – Propriedades dos elementos texturais e das formas de relevo.

Zonas Homólogas	Propriedade dos Elementos Texturais			
	Freqüência Textural	Anisotropia	Alinhamentos	Uniformidade
ZH-a	muito baixa	multidirecional	existem	baixa
ZH-b	alta	bidirecional (NW-SE; N-S)	existem	alta
ZH-c	baixa	multidirecional	existem	alta
ZH-d	moderada	bidirecional (NE-SW; NW-SE)	existem	baixa
ZH-e	alta	bidirecional (NE-SW; N-S)	existem	moderada
ZH-f	moderada	unidirecional (NE-SW)	existem	moderada
ZH-g	muito alta	bidirecional (NE-SW; NW-SE)	existem	moderada
ZH-h	alta	bidirecional (NW-SE; N-S)	existem	moderada
ZH-i	moderada a alta	multidirecional	existem	alta
ZH-j	baixa	unidirecional (NW-SE)	existem	moderada
ZH-k	moderada	multidirecional	existem	alta

(Continua)

Tabela 6.3 - (Conclusão)

Zonas Homólogas	Frequência Textural	Propriedade das Formas		
		Estrutura	Grau de Estruturação	Ordem de Estruturação
ZH-a	muito baixa	mal definida	baixo	11
ZH-b	alta	definida	moderado	5
ZH-c	baixa	mal definida	baixo	10
ZH-d	moderada	definida	moderado	7
ZH-e	alta	definida	moderado	6
ZH-f	moderada	definida	alto	3
ZH-g	muito alta	bem definida	muito alto	1
ZH-h	alta	definida	alto	4
ZH-i	moderada a alta	mal definida	baixo	8
ZH-j	baixa	definida	alto	2
ZH-k	moderada	mal definida	baixo	9

Tonalidade

As zonas homólogas de tonalidade são apresentadas na Figura 6.8, onde se observa a delimitação de 16 zonas com características específicas de tonalidade.



Figura 6-8 – Mapa de zonas homólogas de tonalidade.

A variação da tonalidade levou em consideração os critérios de intensidade, contraste e uniformidade, de modo que cada zona homóloga identificada preservasse uma determinada uniformidade da tonalidade, além de intensidade e contraste distinto entre as zonas adjacentes (Tabela 6.4).

Tabela 6-4 – Quadro-legenda das propriedades das zonas homólogas de tonalidade.

Zona Homóloga	Propriedades da Tonalidade		
	Intensidade	Contraste	Uniformidade
ZH-1	moderada	o: 16	baixa
ZH-2	moderada	o: 3,5,9; b: 10,15,4	alta
ZH-3	muito alta	o: 2,4,6,7,9,10,15; b: 13	alta
ZH-4	baixa	o: 3,9; b: 2,7,10	moderada
ZH-5	muito alta	o: 2; r: 10	baixa
ZH-6	moderada à alta	o: 3,16; b: 7,15 ; r:10	alta
ZH-7	moderada à baixa	o: 3,9,12,13; b: 4,10; r: 8,17	alta
ZH-8	moderada	o: 9; b: 7,10; r: 11	alta
ZH-9	muito alta	o: 2,3,4,7,8,10,11,12,14,17	moderada
ZH-10	moderada à baixa	o: 3,9,12,16 ; b: 2,4,7,8,11,13,17 ; r: 5,6,15	baixa
ZH-11	moderada à alta	o: 9,12; b: 10,13,17; r: 8	moderada
ZH-12	baixo	o: 7,9,10,11,13,17	alta
ZH-13	alta	o: 7,12; b: 3,10,11	moderada
ZH-14	moderada	o: 9,12; b: 10,11; r: 7	alta
ZH-15	moderada	o: 3,16; b: 2,6 ; r:10	
ZH-16	muito baixa	o: 1,6,10,15	alta

o= ótimo; b= bom; r= regular.

Integração das zonas homólogas e mapa de alinhamento

As zonas homólogas de drenagem, relevo e de tonalidade foram analisadas e integradas (Figura 6.9-a), e os traços estruturais (lineamentos) foram obtidos através da seleção dos alinhamentos de drenagem e relevo (Figura 6.9-b). Estes dados, conjuntamente com os mapas geológicos prévios da região e dados de campo, foram a base para a confecção do mapa geológico interpretado final que será apresentado nos próximos itens.

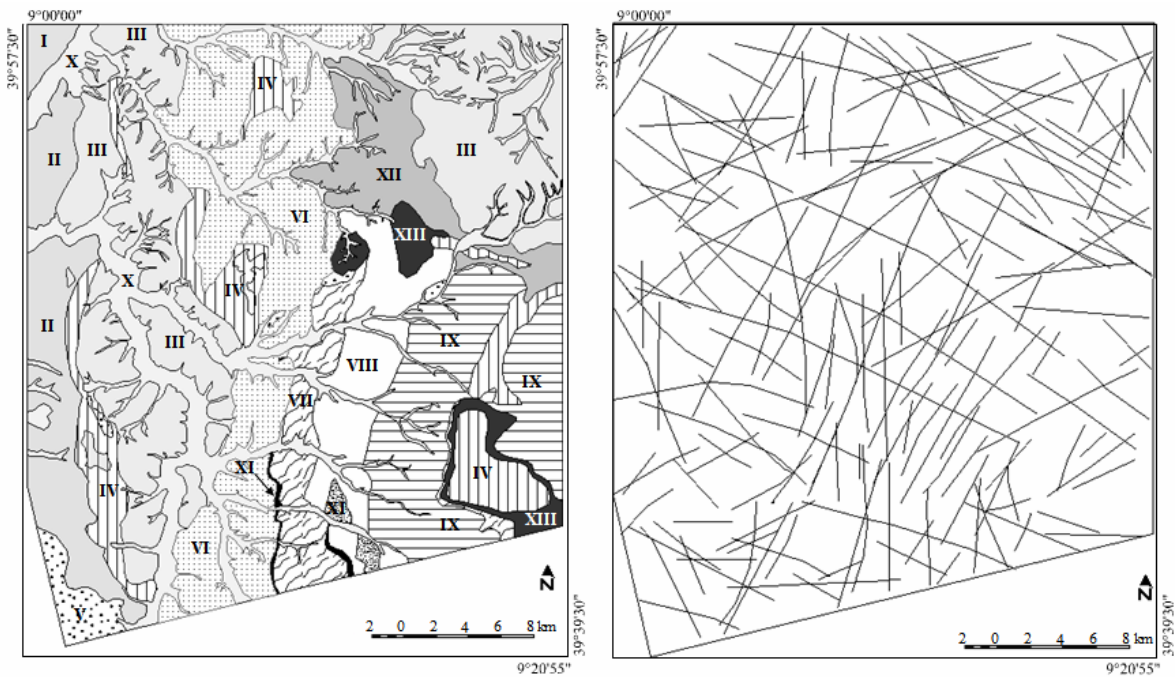


Figura 6-9 – a) Zonas homogêneas integradas; b) Mapa de alinhamentos integrados.

Observa-se através da Figura 6.9-a, que há uma boa correspondência e complementação entre os diferentes tipos de ZH's, com maiores detalhes obtidos pela tonalidade, que por si só definiu três classes: V, X e XII. A relação entre todas as ZH's integradas com as ZH's de relevo, de drenagem e de tonalidade é resumida pela Tabela 6.5.

Tabela 6-5 – Relação entre as zonas homogêneas integradas com as de drenagem e relevo.

Correspondência entre Zonas Homogêneas			
Integradas	Drenagem	Relevo	Tonalidade
I	A	-	1
II	B	a	2
III	C, F	c	3,6,15
IV	J	b, d, f, i, j	9
V	-	-	5
VI	D, E	e	4,7
VII	E	e, g	8
VIII	H	g	11
IX	I	g, k	14
X	-	-	10,16
XI	J	h	9
XII	G	-	13
XIII	-	-	12

A principal modificação em relação à zona homóloga de tonalidade referiu-se a união das ZH's 3, 6 e 15 (tonalidade), embasadas pela continuidade das ZH's de relevo (ZH-c) e de drenagem (ZH-C). Outro ajuste significativo foi a delimitação da ZH-IX, que se estendeu em relação à ZH-14 (tonalidade) à esquerda devido principalmente à ZH-I (drenagem).

6.2.2.2 Interpretação dos elementos de imagem

As zonas homólogas integradas foram comparadas com os mapas geológicos de Delgado e Souza (1975) e com o mapa litológico de Paradella (1983), apresentados no capítulo 4 (Figuras 4.8 e 4.10, respectivamente). Este cotejo objetivou a caracterização dos litotipos associados a cada uma das zonas homólogas, aliado aos dados obtidos em campo. A associação de cada zona homóloga integrada com o tipo litológico consta na Tabela 6.6, e o mapa geológico interpretado é apresentado na Figura 6.10.

Tabela 6-6 – Relação entre as zonas homólogas integradas e tipos litológicos.

Zona Homóloga Integrada	Litotipo Associado *
I	Migmatito estromatítico
II	Quartzo gnaiss Bogó
III	Mica-xisto/ Mica-xisto com granada
IV	Mármore
V	Cobertura areno-argilosa
VI	Biotita hornblenda gnaiss
VII	Migmatito
VIII	Biotita hiperstênio gnaiss
IX	Quartzo-feldspato gnaiss
X	Aluvião
XI	Calco-silicáticas
XII	Mica-xisto
XIII	Filito

*Baseado em Delgado e Souza (1981) e Paradella (1983).

Em geral, as zonas homólogas integradas possibilitaram a diferenciação dos principais litotipos da área de estudo. Os pequenos corpos de rochas máficas-ultramáficas e o gnaiss porfiroblástico (ao redor da Serra Redonda) entre outros, não foram discriminados nesta análise, ou seja, não possuíram diferenças nas propriedades geométricas e dielétricas em relação às unidades vizinhas.

As ZH's I, II e V, mapeadas por Delgado e Souza (1975) como migmatito estromático, quartzo gnaisse da Unidade Bogó e cobertura areno-argilosa, respectivamente, estão bem representados no mapa geológico resultante da análise visual monoscópica. Estas unidades apresentam apenas variações na definição dos limites, mas sem grandes deslocamentos.

A ZH-III é composta por dois litotipos que possuem pequenas variações composicionais segundo os mapas de referência: o mica-xisto e o mica-xisto com granada. Esses tipos litológicos foram distinguidos através de análises petrográficas por Paradella (1983). Acredita-se que a presença do mineral granada não tenha influenciado nos aspectos geométricos do terreno, tais como a micro-rugosidade e frequência vegetacional.

Em contrapartida, a ZH-XII que também corresponde ao mica-xisto, apresenta característica tonal bastante distinta da observada pela ZH-III. Neste caso, a frequência menor de cobertura vegetal na ZH-XII foi a responsável por essa diferença, fato registrado em campo.

O mármore (ZH-IV) obteve em geral a sua área de ocorrência reduzida, e por vezes não mapeada em relação ao mapa de Delgado e Souza (1975). A análise da frequência das feições lineares de drenagem desta ZH é condizente com o litotipo associado, uma vez que áreas com menor frequência de drenagem sugerem rochas mais permeáveis (SOARES; FIORI, 1976).

As principais diferenças em relação ao mapa geológico de Delgado e Souza (1975) referem-se às ZH's VI, VII e VIII. A ZH-VI, associada ao biotita hornblenda gnaisse, teve a sua ocorrência restrita na porção central da área, diferenciando-se portanto da ZH-VIII. A caracterização da ZH-VIII como biotita hiperstênio gnaisse baseou-se no trabalho de Paradella (1983), assim como a ZH-IX (quartzo-feldspato gnaisse) que se encontra fora da área cartografada por Delgado e Souza (1975).

O migmatito (ZH-VII) teve sua área de ocorrência ampliada, e os seus limites foram muito bem definidos na porção sul através da imagem SAR. As rochas calci-silicáticas (ZH-XI) definem muito bem o contato com o migmatito (ZH-VI) com o biotita-

hornblenda gnaiss (ZH-VI), e conjuntamente com estes litotipos caracterizam o movimento sinistral das falhas transcorrentes.

A elevada frequência dos elementos texturais de relevo, principalmente na porção referente ao migmatito (ZH-VII) e ao biotita-hiperstênio gnaiss (ZH-III), indica o alto grau de dissecação do terreno, revelando o predomínio progressivo dos processos erosivos sobre os deposicionais.

A ZH-XIII foi associada ao filito de acordo com os mapas de referência. São ocorrências restritas, e bem caracterizadas pelo elevado valor de retroespalhamento resultantes pela ausência de vegetação e pequena variação da rugosidade superficial.

Com relação às estruturas geológicas fotointerpretadas, foram caracterizadas quatro classes principais de estruturas: as foliações, as falhas transcorrentes sinistrais, as fraturas/juntas, e a falha de empurrão.

As feições lineares de relevo e de drenagem representam a interseção de planos estruturais dos corpos rochosos de origem tectônicas, tais como foliações e fraturas. As foliações são expressas pela disposição fortemente anisotrópica das feições lineares ao longo do eixo de assimetria do Rio Curaçá, e possuem tendências estruturais bem definidas nas feições lineares de drenagem e relevo. É observado um pronunciado *trend* estrutural de direção NNE-SSW ao centro da área. Esse *trend* converge para NE-SW mais a leste, de forma que esta discordância foi um importantes critério para separar o migmatito (com direção aproximada N20E) do biotita-hiperstênio gnaiss (direção aproximada N45E).

As feições lineares bidirecionais a multidirecionais constituem as juntas e as fraturas, que estão distribuídas ao longo de toda área. As direções principais desta classe são NE-SW e WNW-SSE.

Os traços associados aos planos estruturais de maior magnitude, como falhas e zonas de cisalhamento, são retratados pelos alinhamentos de drenagem e relevo. Em função da forma desses alinhamentos, foram caracterizadas as falhas transcorrentes sinistrais

muito bem definidas entre os litotipos da região sul da área de estudo. Essas falhas, com direção principal N60W, apresentam um rejeito direcional de aproximadamente 2 km.

Já o contato entre o mica xisto e o mármore com o biotita-hornblenda gnaiss é marcado por um extenso alinhamento de relevo arqueado. Esse arqueamento é indicativo de falhas de empurrão (SANTOS et al. 2001), de forma a ratificar as informações presentes no programa de levantamentos geológicos do Brasil (ANGELIN; KOSIN, 2001).

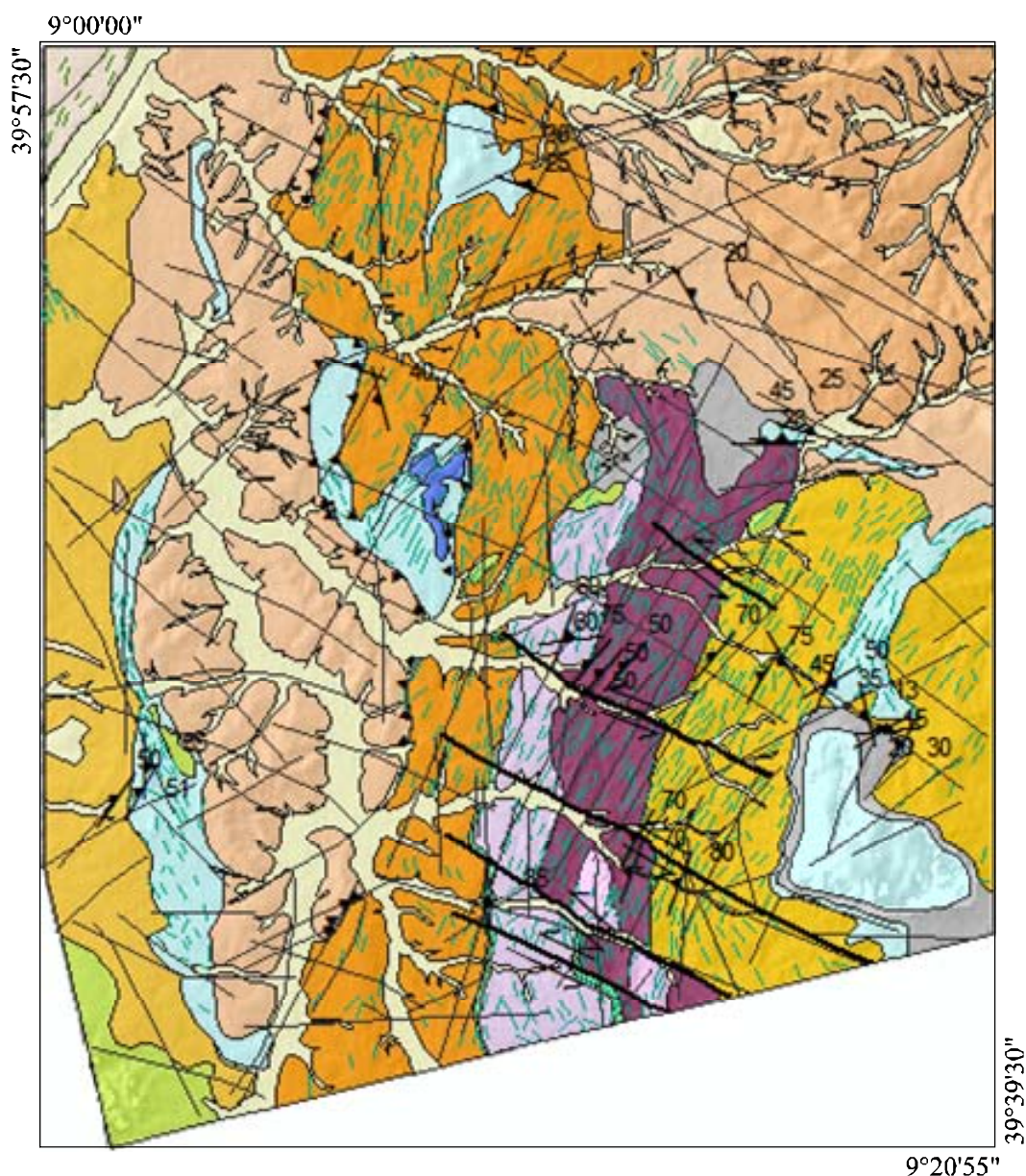


Figura 6-10 – Mapa geológico foto-interpretado obtido a partir da análise visual da imagem F2A. (continua)

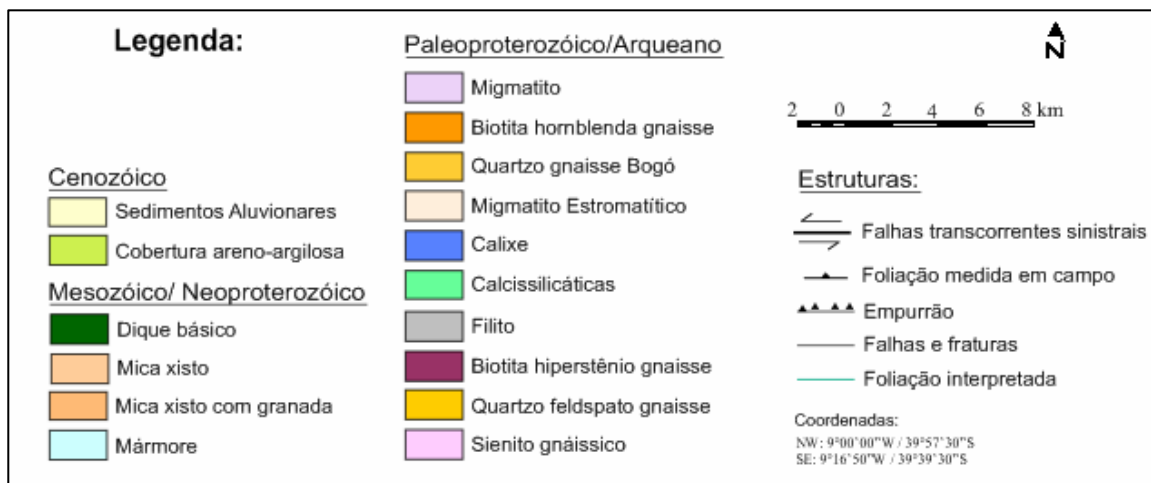


Figura 6-10 – Conclusão.

6.2.3 Análise Estereoscópica

Como primeiro passo para a análise dos pares estereoscópicos, parâmetros como o ângulo de interseção estereoscópica, ângulo de interseção entre órbitas e razão de paralaxe vertical (RPV) foram calculados (Tabela 6.7).

Tabela 6-7 – Características dos pares estereoscópicos RADARSAT-1.

Pares Estereoscópicos	Mesmo Sentido		Sentidos Opostos	
	S7A x S2A	S7D x S2A	S7D x S7A	
Razão de Paralaxe Vertical (RPV)	0,99	2,85	1,87	
Ângulo de Interseção Estereoscópica	19,5°	74,5°	94°	
Ângulo de Interseção entre Órbitas	0°	24°	24°	

De forma a auxiliar na compreensão da performance de cada um dos pares estereoscópicos, determinada pelos seus parâmetros e características (similaridade radiométrica, disparidade geométrica, RPV, ângulo de interseção estereoscópica, etc.), eles serão discutidos separadamente nos itens seguintes.

6.2.3.1 Par S7A X S2A

O par estereoscópico de mesmo sentido (ascendente) (Figura 6.11), apresenta uma ótima visibilidade estereoscópica, devido ao pequeno ângulo de interseção estereoscópica ($19,5^\circ$) e ângulo de interseção entre órbitas de 0° . Estas características resultam em uma ótima similaridade radiométrica entre as cenas do par, de forma que a visão tridimensional é confortável ao observador.

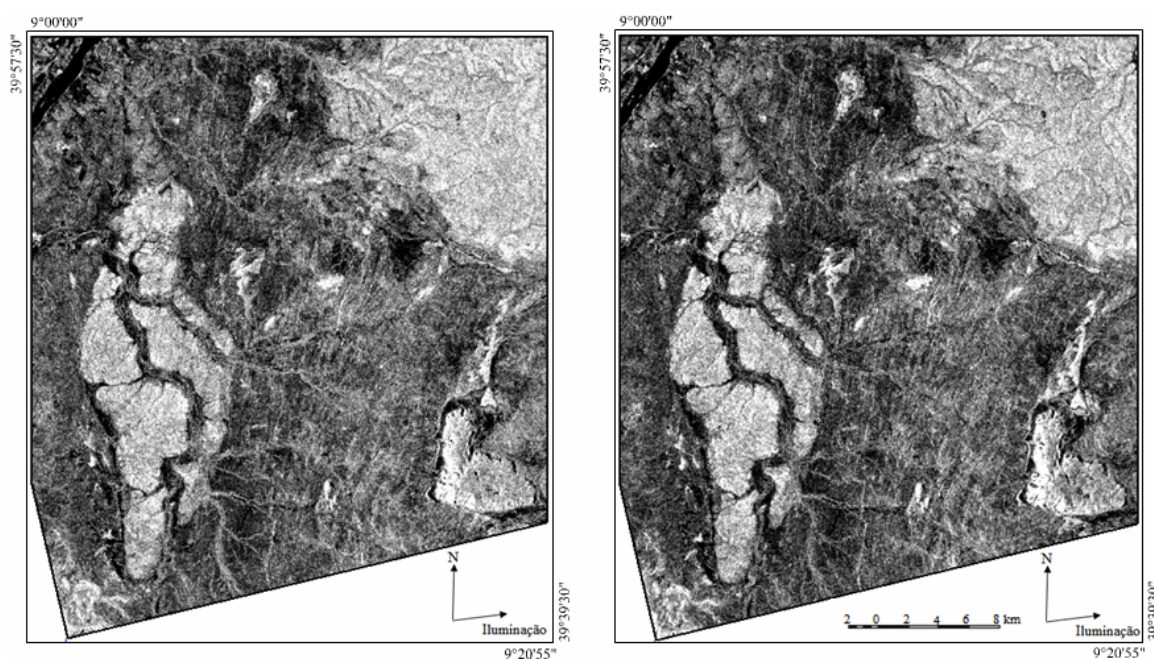


Figura 6-11 – Par estereoscópico S7A x S2A.

Ao analisar as imagens separadamente, observou-se que a imagem S2A, por possuir um ângulo de incidência menor (Θ_i : $24-31^\circ$), proporcionou um melhor realce da topografia. Os canais de drenagem, bem como algumas feições de relevo são mais bem mapeadas na imagem S2A do que na imagem S7A, como pode ser constatado na Figura 6.12. Entretanto, a imagem S7A (Θ_i : $45-49^\circ$) apresentou, em geral, uma maior variação da tonalidade, resultado da variação da rugosidade da superfície (LOWMAN et al., 1987).

Desta forma, a análise estereoscópica possibilitou que essas duas características pudessem ser vistas em uma única imagem, otimizando assim o grau de

interpretabilidade das estruturas geológicas e litotipos quando comparados com as análises visuais monoscópicas.

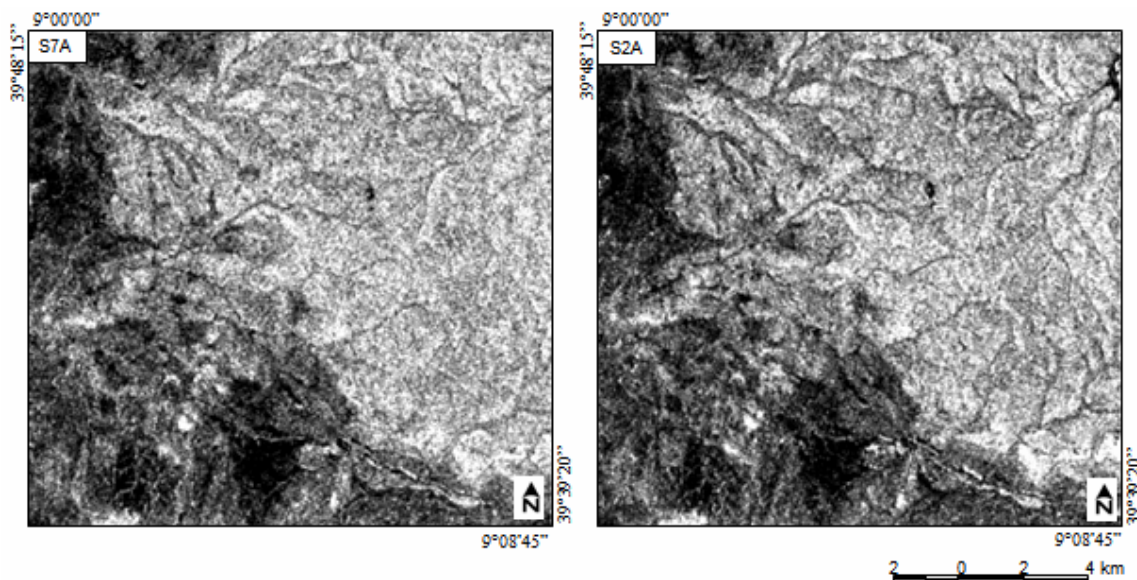


Figura 6-12 – Detalhe da diferença de realce nas drenagens devido à variação do ângulo de incidência das imagens S2A e S7A.

Apesar da RPV ser a mais baixa entre os demais pares estereoscópicos formados (0,99), foi possível caracterizar com facilidade os elementos fotointerpretativos que permitem a definição das estruturas geológicas, contatos e os principais litotipos.

A percepção de profundidade é muito boa nas regiões de relevo mais acidentados, principalmente na Serra da Cana Brava. É maior o número de detalhes dos elementos texturais de relevo quando comparado com a análise monoscópica da imagem de maior resolução (F2A).

Além disso, a rede de drenagem é mais bem definida em relação à análise monoscópica da imagem F2A, por apresentarem-se como pequenos “sulcos” em meio ao relevo plano. Na parte central da área, onde houve uma maior dificuldade na extração da rede de drenagem, a análise estéreo permitiu uma melhor visualização.

Assim como na análise da imagem F2A, observou-se uma descontinuidade entre as foliações NNW-SSE e NE-SW, de forma a separar os conjuntos litológicos correspondentes ao migmatito e o biotita-hiperstênio gnaisse.

Os demais litotipos, bem como os principais *trends* estruturais da região foram avaliados comparativamente em relação aos demais pares estereoscópicos, e o resultado desta análise será discutido mais adiante.

6.2.3.2 Par S7D X S2A

O par estereoscópico de sentidos opostos (Figura 6.13) possui a maior RPV (2,85) dentre os pares analisados. Como ângulo de interseção estereoscópico é muito alto ($74,5^\circ$), e o ângulo de interseção entre órbitas é de 24° , a visibilidade estereoscópica é um pouco comprometida no começo da análise, principalmente nas áreas com serras, onde é difícil obter a visão tridimensional.

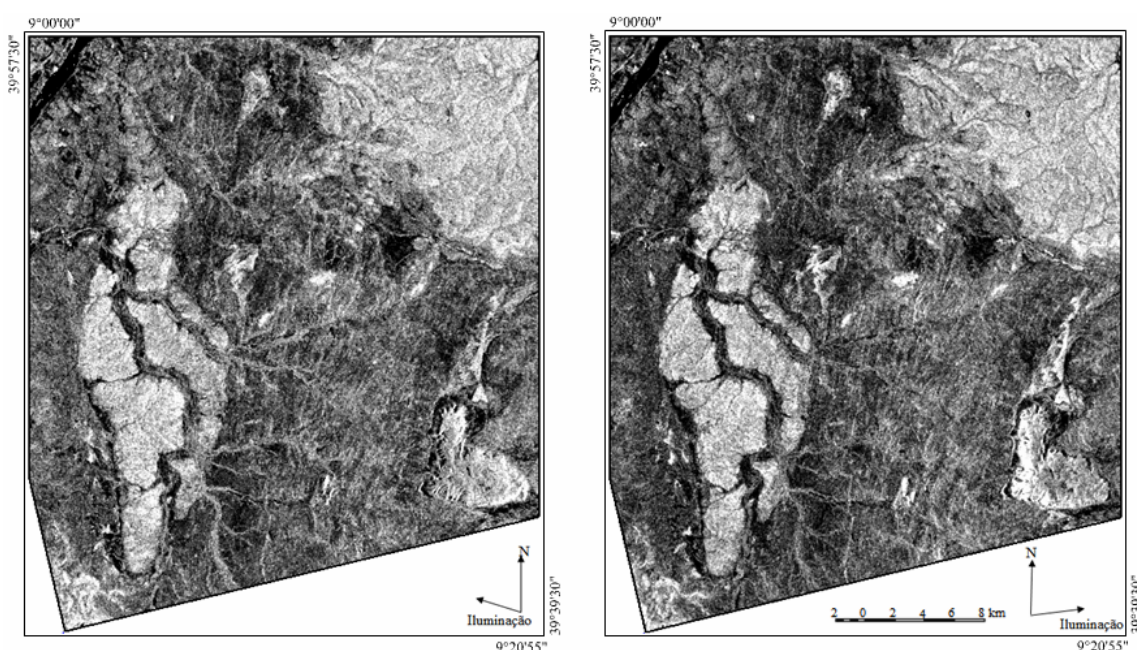


Figura 6-13 – Par estereoscópico S7D x S2A.

A dificuldade inicial da percepção estereoscópica deve-se à maior disparidade radiométrica entre as cenas. Entretanto essa sensação foi superada à medida que se adquiriu mais prática na análise de pares estereoscópicos com sentidos opostos.

Há uma grande disparidade geométrica neste par, com ângulo de incidência médio variando entre 37° para a cena S2A e 47° para a cena S7D, resultando em um elevado ângulo de interseção estereoscópica ($74,5^\circ$). Assim como o par S7A x S2A, essa grande

variação do ângulo de incidência contribui com o complemento de informações, uma vez que para áreas planas a modulação do sinal retroespalhado do radar depende basicamente da topografia, que é realçada com ângulos de incidência menores, enquanto que a micro-topografia é mais bem detectada com ângulos de incidência maiores.

Este par, além de variar o ângulo de incidência, possui direções de visada distintos (282° e 78°). Isso ocasiona um realce maior nas estruturas planares (falhas, fraturas, contatos) de direção NW-SE na imagem S2A, e realça a estruturação geral da área (NNE-NE) com a imagem de visada descendente (S7D).

Apesar das restrições iniciais, o realce morfológico das áreas mais elevadas é muito bom neste par, realçando as estruturas planares (complementação entre as duas iluminações), como pode ser observado na Figura 6.14.

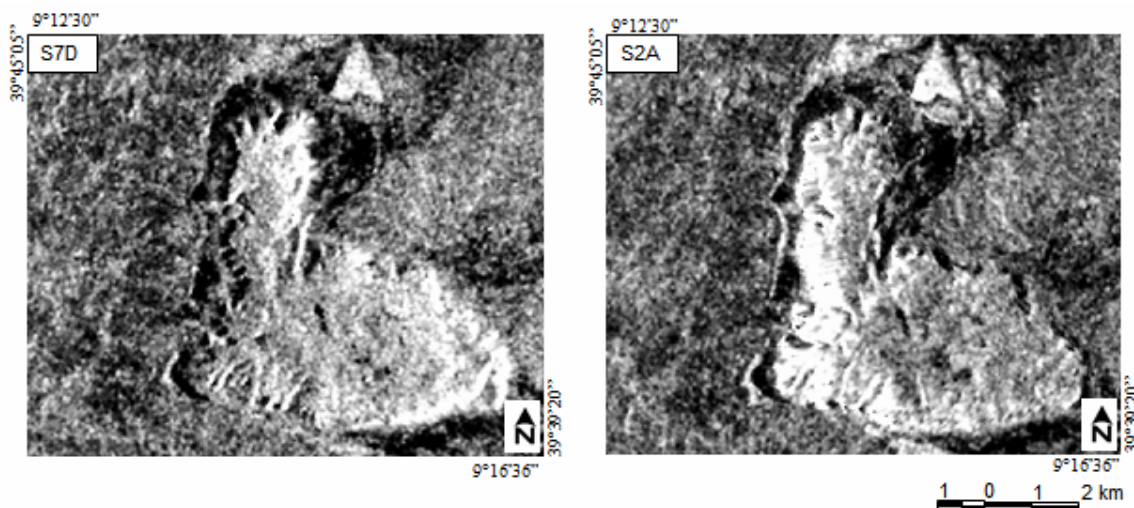


Figura 6-14 – Diferenças do realce morfológico da Serra da Cana Brava com a variação do ângulo de incidência e direção de visada.

No restante da área, principalmente nas porções mais planas, não há quantidade de informação significativa em relação ao par S2A x S7A e com a análise monoscópica da imagem F2A.

6.2.3.3 Par S7D X S7A

Assim como o par estereoscópico S7D x S2A, o par S7D x S7A apresenta ângulo de interseção estereoscópico muito alto (94°) e ângulo de interseção entre órbitas de 24° , resultando em uma significativa perda de visibilidade estereoscópica.

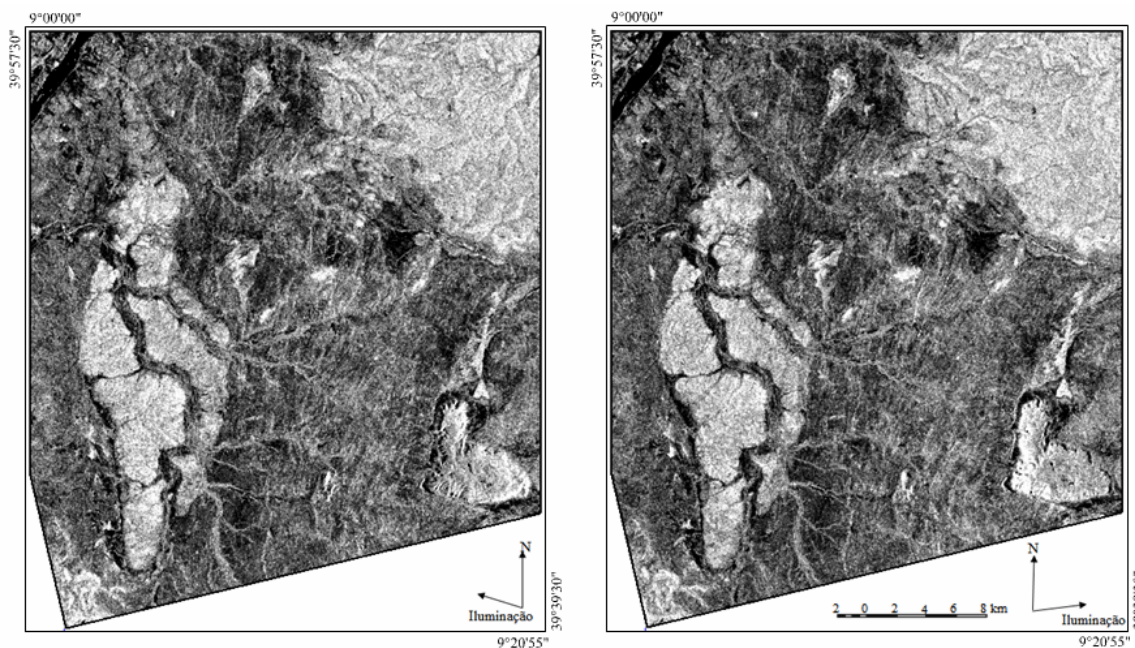


Figura 6-15 – Par estereoscópico S7D x S7A.

A estereoscopia desse par foi menos eficiente que os dois anteriores, consequência da geometria de iluminação mais oblíqua, que não se mostram a mais adequada para realçar as pequenas variações morfológicas desta área predominantemente plana. Além disso, a grande disparidade radiométrica entre as cenas ocasionou a ausência inicial da percepção estereoscópica.

6.2.3.4 Performance dos pares

O resultado da comparação qualitativa da performance de cada par na detecção da ocorrência dos principais litotipos da região em relação à análise monoscópica da imagem F2A, bem como os contatos e principais *trends* estruturais, está resumido na tabela 6.8.

Tabela 6-8 – Performance dos pares estereoscópicos em relação à geologia da área de estudo.

Litotipo/ Estruturas Geológicas	Aspectos Analisados	S7AxS2A	S7DxS2A	S7DxS7A
Filito	Ocorrência	O	O	O
	Contatos	O	O	O
Micaxisto/Micaxisto com granada	Ocorrência	O	O	O
	Contatos	O	O	O
Mármore	Ocorrência	O-B-R	O-B	O-B-R
	Contatos	O-B-R	O-B-R	O-B-R
Biotita-hornblenda gnaiss	Ocorrência	B	MB-B	B-R
	Contatos	O-R	O-B	O-B
Migmatito	Ocorrência	B-R	B	B-R
	Contatos	O	O	O
Biotita-hiperstênio gnaiss	Ocorrência	B	B	B-R
	Contatos	R	R	R
Sienito gnáissico	Ocorrência	O-B	B	B
	Contatos	O-B	O-B-R	B-R
Quartzo-feldspato gnaiss	Ocorrência	B	B	B
	Contatos	B-R	MB-B	B-R
Calco-Silicáticas	Ocorrência	O	O	O
	Contatos	O	O	O
Falhas NW-SE	Definição	O	O-MB	O-MB
Falhas NE-SW	Definição	MB-B	O-MB	MB
Falhas N-S	Definição	MB	MB	MB
Foliações NNE-SSW	Definição	O	MB	MB
Foliações NE-SW	Definição	O	MB	MB

O= ótimo; MB= muito bom; B= bom; R= regular; SD = sem definição

A partir desta tabela, nota-se que em geral o par S7AxS2A apresentou as melhores performances em termos de nitidez das ocorrências e contatos dos litotipos, e como já discutido anteriormente, a percepção tridimensional foi bastante confortável ao observador.

A foliação foi muito bem visualizada em todos os pares estereoscópicos, e as falhas transcorrentes e os contatos entre o migmatito e o biotita-hornblenda gnaiss foram mais facilmente visualizados nos pares *Standard*, em comparação com a imagem *Fine* utilizada na análise monoscópica.

Na região da Serra da Cana Brava, houve um aumento considerável de informações (elementos texturais de relevo) nas análises estereoscópicas. O par S7DxS2A foi o que apresentou melhores resultados quanto à quantidade de informação, embora a visualização em três dimensões tenha sido mais confortável no par S2AxS7A (mesmo sentido).

Nas áreas de relevo plano, não houve muita diferença na identificação das áreas de ocorrência dos principais litotipos, entre os pares S7AxS2A e S7DxS7A. No par S7AxS2A, houve um realce um pouco melhor, mas também não muito significativo.

6.3 Análise por Componentes Principais (ACP)

A transformação por componentes principais foi aplicada em toda a área de estudo, com as imagens de amplitude previamente corrigidas radiométrica e geometricamente.

A Tabela 6.9 apresenta a matriz de correlação das imagens originais. Os valores desta tabela mostram que os dados não são muito correlacionados, de forma que cada imagem contribui de forma distinta devido às diferenças nos ângulos de incidência e azimutes de visada.

Tabela 6-9 – Matriz de correlação das imagens RADARSAT-1.

Imagem	F2A	S2A	S7A	S7D
F2A	1,000	0,574	0,618	0,530
S2A	0,574	1,000	0,656	0,608
S7A	0,618	0,656	1,000	0,631
S7D	0,530	0,608	0,631	1,000

Observa-se que o maior grau de correlação ($r = 0,656$) ocorre com o par de imagens de mesmo feixe, mesmo azimute de visada e com o maior extremo de variação de ângulo de incidência (S2A/S7A). Por outro lado, a menor correlação ($r = 0,530$) ocorre entre o par de imagens gerado de feixes distintos e com diferentes ângulos de azimute e incidência (F2A/S7D). Este resultado sugere que a variação de azimute de visada pode apresentar um papel mais relevante no controle das respostas dos alvos que a variação do ângulo de incidência.

A Tabela 6.10 apresenta os auto-vetores baseados na matriz de covariância, não apresentada neste trabalho. Essa matriz de coeficientes de auto-vetores descreve qual das imagens originais mais contribui na formação de cada componente principal, ou seja, a proporção que cada pixel de uma imagem original é somada para criar o novo valor de pixel para uma dada componente principal (CRÓSTA, 1992). A representação gráfica dos auto-vetores, ou dos componentes principais, de forma a ilustrar a contribuição de cada canal original é ilustrado na Figura 6.16.

Tabela 6-10 – Matriz de auto-vetores ou de transformação, baseado na matriz de covariância.

	F2A	S2A	S7A	S7D
1° CP	0,500	0,401	0,563	0,520
2° CP	-0,745	0,059	0,006	0,663
3° CP	-0,427	0,147	0,737	-0,501
4° CP	0,103	-0,901	0,372	0,193

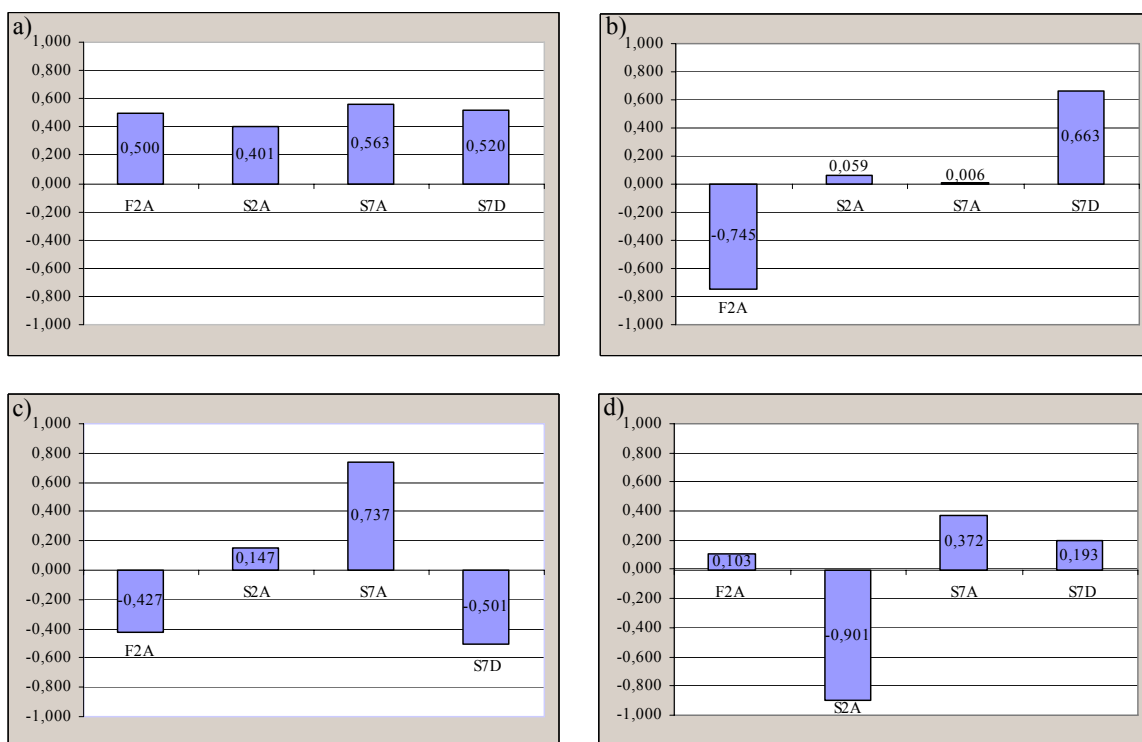


Figura 6-16 – Contribuições dos canais originais para a primeira (a), segunda (b), terceira (c), e quarta componente principal (d).

A tabela 6.11 apresenta os auto-valores após a transformação por componentes principais, a porcentagem de informação (variância) e a porcentagem de informação acumulada.

Tabela 6-11 – Autovalores dos novos canais, com as respectivas porcentagens de informação.

Componentes	Auto-Valor	Variância (%)	Variância acumulativa (%)
1° CP	2,096	70,53	70,53
2° CP	0,377	12,71	83,24
3° CP	0,287	9,66	92,9
4° CP	0,211	7,11	100

A Figura 6.17 ilustra as imagens resultantes da transformação por componentes principais. Estas imagens serão em seguida, discutidas e avaliadas segundo os mapas geológicos de referência, a fim de se entender a contribuição das variações de ângulos de incidência e azimute de visada.

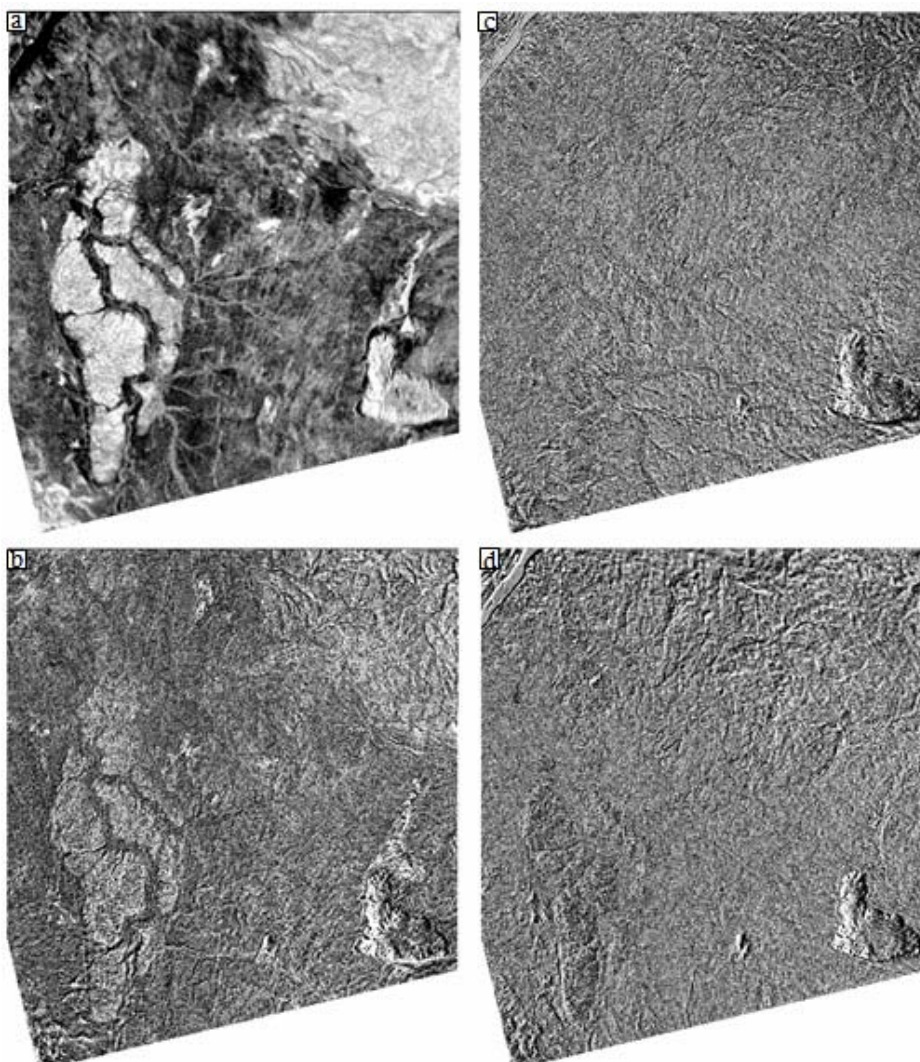


Figura 6-17 – Imagens componentes principais das imagens RADARSAT-1, modos F2A, S2A, S7A, e S7D. a) Primeira componente principal; (b) Segunda componente principal; (c) Terceira componente principal; (d) Quarta componente principal.

Primeira Componente Principal

A primeira componente principal (CP1) contribui com 70,53% da variância total, e é influenciada pelas quatro imagens (F2A, S2A, S7A e S7D) de forma equivalente, como observado na Tabela 6.10, Figura 6.16-a. A imagem resultante desta primeira componente é ilustrada na Figura 6.17-a.

Em comparação com os mapas geológicos de referência (DELGADO; SOUZA, 1975 ; PARADELLA, 1983) e com o mapa geológico elaborado nas etapas anteriores, observa-se que esta componente distinguiu muito bem os principais litotipos da área de estudo, principalmente os que estão relacionados com a macro-topografia e com uma maior densidade de vegetação e rugosidade superficial.

O mica-xisto, localizado nas porções leste e nordeste da área de estudo, ficou bastante realçado nesta imagem. As regiões com topografia elevada, tais como o mármore da Serra da Cana-Brava e do Serrote do Lajedo e o sienito gnáissico da Serra Redonda também foram bem delimitados nesta componente. Houve também, uma contribuição maior da primeira componente principal na área do biotita hiperstênio gnaisse, em relação ao migmatito.

Na composição colorida R(CP-1) G(CP-2) B(CP-3), estas observações podem ser constatadas (Figura 6.18).

A área onde predomina a biotita hornblenda gnaisse também pode ser separada do migmatito através da análise visual desta componente. Essa região apresenta uma textura e tonalidade particular das porções adjacentes.

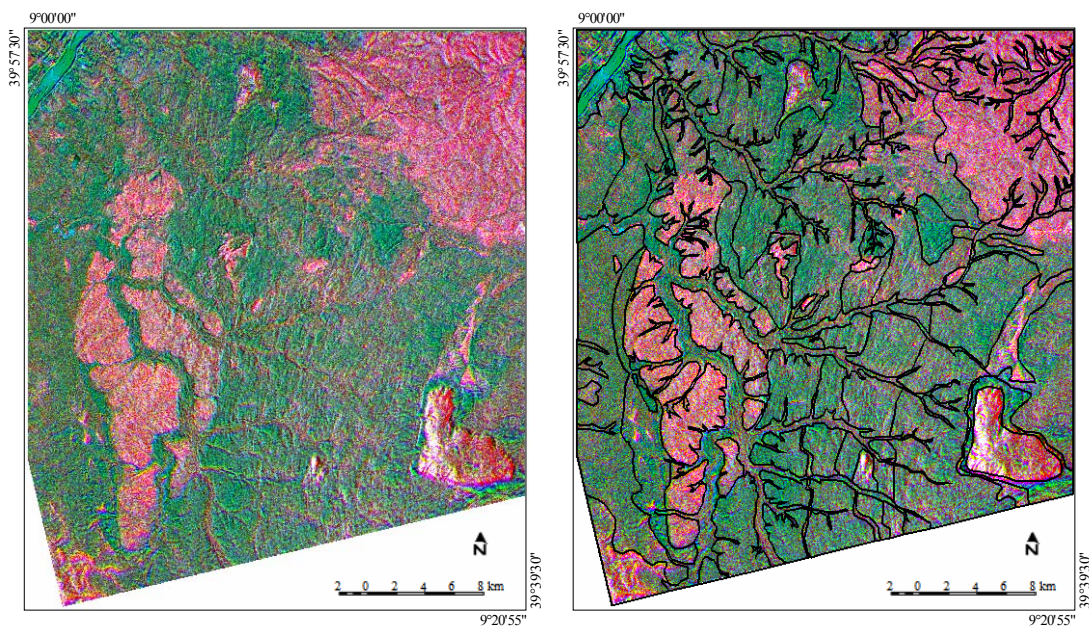


Figura 6-18 – Composição colorida R(CP-1) G(CP-2) B(CP-3), e demarcação dos litotipos.

Segunda Componente Principal

A segunda componente principal (Figura 6.17-b), com 12,71% da variância total, mostra basicamente uma imagem de contraste entre F2A e S7D (Tabela 6.10, Figura 6.16-b), que são imagens de azimutes de visada distintos e incidências média (F2A) para alta (S7D). As imagens S2A e S7A contribuíram muito pouco na formação desta componente principal, perfazendo juntas aproximadamente 4,41% da informação.

A comparação entre a imagem da segunda componente principal (Figura 6.17-b) com os mapas de referência mostra uma pobre discriminação litológica quando comparado com as demais componentes. Entretanto, esta componente otimizou o realce das feições estruturais, tornando-a imprescindível para a identificação das feições topográficas relacionadas aos padrões estruturais da área.

Desta forma, esta segunda componente evidencia a importância do azimute de visada nas respostas detectadas pelo sensor. Isto é evidenciado pelo melhor realce das variações de topografia ligadas à declividade local, já que as estruturas são quase ortogonais aos azimutes de visada (ascendente e descendente).

Terceira Componente Principal

Na terceira componente principal (Figura 6.17-c) (9,66% da variância total), prevalece a contribuição da imagem S7A (40,67% de influência), seguida da imagem S7D (27,65%), F2A (23,56%) e S2A (8,11%).

Esta componente mostra o contraste entre a contribuição de S7A versus as contribuições de S7D e subordinadamente de F2A (Tabela 6.10), de forma a realçar novamente a maior influência do azimute de visada em relação à variação do ângulo de incidência.

Assim como na segunda componente principal, nesta imagem os traços estruturais são bem marcados, de forma a complementar as informações da CP-2.

Quarta Componente Principal

A quarta e última componente principal (Figura 6.17-d) representa 7,10% da variância total (Tabela 6.10). A contribuição relativa de cada imagem na formação desta componente principal mostra que a imagem S2A é a que mais se destaca (57,43% de influência), seguida das imagens S7A (23,71%), S7D (12,30%) e F2A (6,56%).

Esta imagem é dominada por S2A (visada mais verticalizada) e subordinadamente mostra a contribuição da variação das incidências (contraste de auto-vetores para S2A e S7A). Visualmente a imagem é muito pobre, o que pode indicar uma relevância menor da influência da incidência no imageamento RADARSAT-1 na área.

Como a variância desta componente é ainda considerável, composições coloridas foram testadas com esta imagem, de forma que a região nordeste da área foi mais bem definida em termos estruturais que a CP-3. Entretanto, no restante da área, a composição CP-1 (R), CP-2 (G) e CP-3(B) foi a que melhor identificou as falhas, fraturas e foliações.

6.4 Análise da Micro-Topografia

Com a finalidade de estudar o comportamento da micro-topografia no retorno do sinal do radar, e sua influência na caracterização das principais unidades litológicas da área de estudo, foram analisados os perfis de rugosidade levantados em campo (Figura 6.19). Esses perfis foram essenciais para uma abordagem quantitativa deste parâmetro.

No total, foram coletados perfis de rugosidade em 23 pontos da área de estudo (Figura 6.20), correspondentes a 12 litotipos e ao aluvião. Para cada ponto, composto em média por três perfis de rugosidade para cada tipo de órbita (ascendente e descendente), foi realizada a média dos valores da altura RMS, com a finalidade de minimizar erros decorrentes da amostragem em campo.

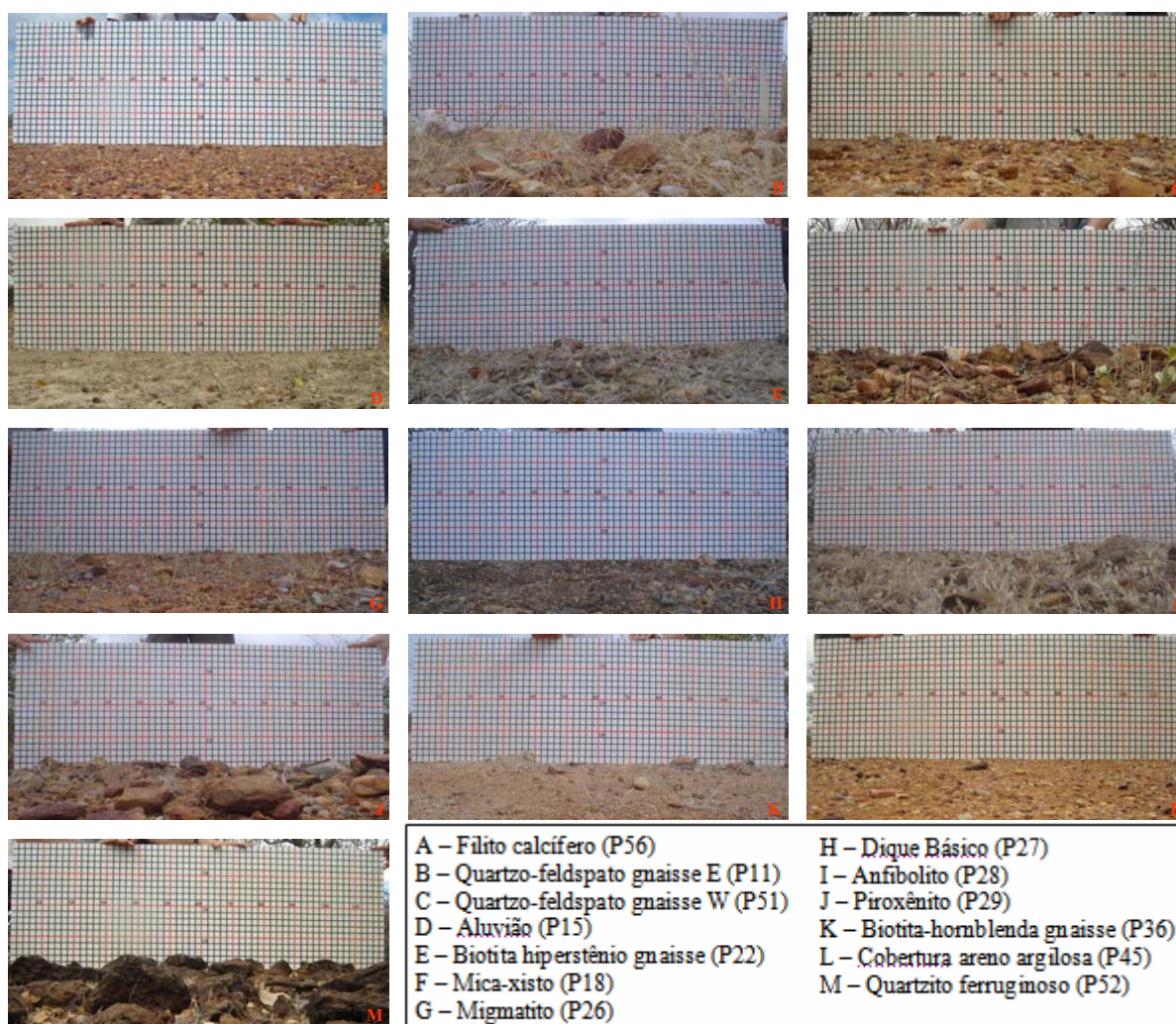


Figura 6-19 – Perfis de rugosidade dos principais litotipos e coberturas da área de estudo.

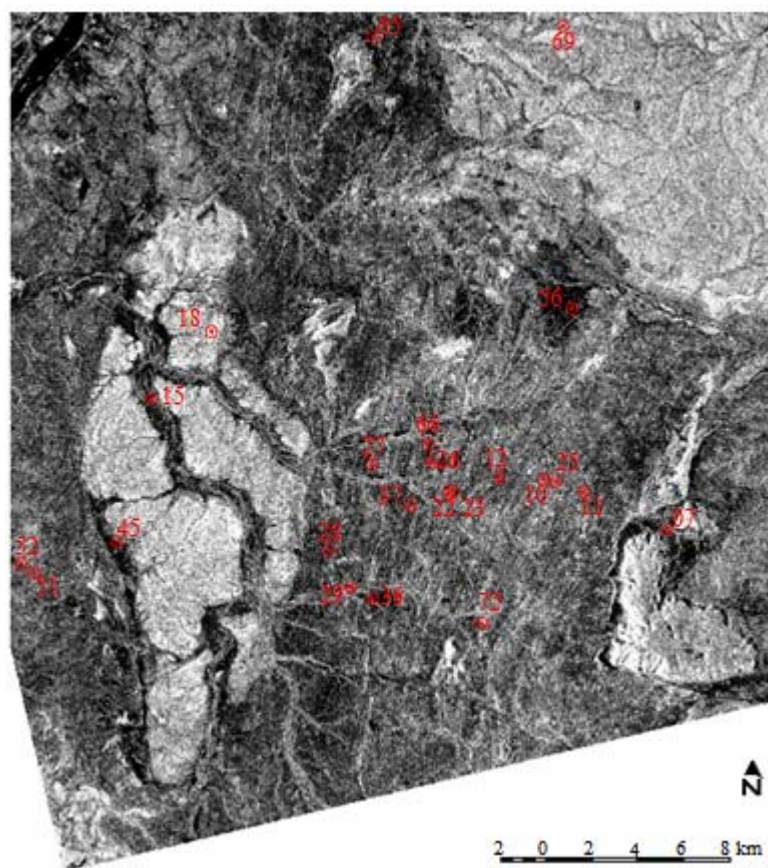


Figura 6-20 – Pontos com medidas de rugosidade de campo.

A Tabela 6.12 apresenta os valores de h_{rms} médios e a análise de cada medida segundo o Critério de Rayleigh. Este critério foi aplicado nas quatro imagens RADARSAT, já que as mesmas possuem ângulos de incidência diferentes (exceto nas imagens S7A e S7D) e, por conseguinte, resultam em valores limites da característica lisa ou rugosa distintos.

Observa-se que para o comprimento de onda do sensor utilizado (banda C), e para os ângulos de incidência das imagens utilizadas na pesquisa, houve uma boa caracterização entre os diferentes alvos. Para geometria de ângulo de incidência menor (S2A) houve mais equilíbrio de medidas, sendo 11 rugosas e 12 lisas. Já para incidências maiores predominam medidas lisas, isto é, tendem a ser mais especulares (F2A com 9 medidas rugosas e 14 lisas; S7A com 8 rugosas e 15 lisas; e S7D com 6 rugosas e 17 lisas).

Tabela 6-12 – Valores de h_{rms} obtidos a partir dos perfis de rugosidade, e análise dos dados segundo o Critério de Rayleigh.

Descrição		Altura rms média (cm)		Imagem F2A		Imagem S2A		Imagens S7A e S7D		
Ponto	Litotipo	Órbita Asc.	Órbita Desc.	Critério Rayleigh	Conclusão F2A	Critério Rayleigh	Conclusão S2A	Critério Rayleigh	Conclusão S7A	Conclusão S7D
P07	Filito calcífero	0,839	0,651	0,927	lisa	0,798	rugosa	1,014	lisa	lisa
P10	Qtz-fd gn	2,664	2,471	0,923	rugosa	0,794	rugosa	1,011	rugosa	rugosa
P11	Qtz-fd gn	1,739	0,961	0,924	rugosa	0,795	rugosa	1,012	rugosa	lisa
P12	Bt-hps gn	0,661	0,381	0,921	lisa	0,793	lisa	1,010	lisa	lisa
P15	Aluvião	0,289	0,291	0,910	lisa	0,784	lisa	1,001	lisa	lisa
P18	Mica xisto	1,261	1,249	0,912	rugosa	0,786	rugosa	1,003	rugosa	rugosa
P22	Bt-hps gn	0,702	0,675	0,919	lisa	0,792	lisa	1,009	lisa	lisa
P23	Bt-hps gn	0,822	0,519	0,920	lisa	0,792	rugosa	1,009	lisa	lisa
P25	Qtz-fd gn	0,517	0,644	0,923	lisa	0,795	lisa	1,012	lisa	lisa
P26	Migmatito	0,519	0,562	0,919	lisa	0,791	lisa	1,008	lisa	lisa
P27	Dique básico	0,998	0,998	0,917	rugosa	0,790	rugosa	1,007	lisa	lisa
P28	Anfibolito	0,729	0,812	0,915	lisa	0,788	lisa	1,005	lisa	lisa
P29	Piroxenito	1,673	1,966	0,915	rugosa	0,788	rugosa	1,005	rugosa	rugosa
P36	Bt-hbl gn	0,492	0,436	0,916	lisa	0,789	lisa	1,006	lisa	lisa
P37	Piroxenito	0,758	0,825	0,918	lisa	0,790	lisa	1,007	lisa	lisa
P45	Cob. areno argilosa	0,345	0,328	0,908	lisa	0,782	lisa	0,999	lisa	lisa
P51	Qtz-fd gn	1,236	1,208	0,905	rugosa	0,780	rugosa	0,997	rugosa	rugosa
P52	Quartzito ferruginoso	1,736	1,913	0,904	rugosa	0,780	rugosa	0,996	rugosa	rugosa
P56	Filito calcífero	0,345	0,388	0,925	lisa	0,796	lisa	1,013	lisa	lisa
P65	Filito calcífero	0,253	0,317	0,920	lisa	0,793	lisa	1,010	lisa	lisa
P66	Migmatito	0,474	0,968	0,919	lisa	0,791	lisa	1,008	lisa	lisa
P69	Mica xisto	1,627	0,981	0,928	rugosa	0,798	rugosa	1,015	rugosa	lisa
P72	Qtz-fd gn	2,181	2,281	0,919	rugosa	0,792	rugosa	1,009	rugosa	rugosa

As regiões com ocorrência do filito calcífero, biotita-hiperstênio gnaiss, migmatito, anfíbolito, aluvião e cobertura areno-argilosa foram consideradas lisas a partir deste nível de aproximação, enquanto que os demais litotipos analisados (quartzo-feldspato gnaiss, dique básico, quartzito ferruginoso e mica-xisto) foram tomados como rugosos. Estas medidas se mostraram coerentes com a análise visual das tonalidades das imagens, como observado na imagem F2A, Figura 6.20.

Os dados de campo também foram analisados segundo o Critério de Peake e Oliver (Tabela 6.13), onde observou-se que o quartzo-feldspato gnaiss (P10 e P72) e o filito calcífero (P65) foram os únicos litotipos que apresentaram característica rugosa e lisa, respectivamente, em todas as imagens. O piroxênio (P29), o quartzito ferruginoso (P52) e o mica-xisto (P69) foram caracterizados rugosos apenas na imagem S2A, e intermediários nas demais cenas. Os demais litotipos/cobertura foram classificados como de rugosidade intermediária.

Além disso, os resultados sugerem dois conjuntos de medidas segundo a geometria de imageamento: (a) a mais verticalizada (S2A), com 6 medidas classificadas como rugosas, 16 intermediárias e 1 lisa; e (b) as menos verticalizadas (F2A, S7A e S7D), com resultados idênticos entre si de 2 medidas rugosas, 19 intermediárias e 2 lisas. Em outras palavras, as medidas de rugosidade do terreno dependem da variação do ângulo de incidência, sendo que com a menor incidência a detecção de superfícies rugosas tende a ser melhor.

Tabela 6-13 - Valores da altura RMS obtidos a partir dos perfis de rugosidade, e análise dos dados segundo o Critério de Peake e Oliver.

Descrição		Altura rms (cm)		F2A			S2A			S7A			S7D		
Ponto	Litotipo	Órbita	Órbita	Limite		Conclusão	Limite		Conclusão	Limite		Conclusão	Limite		Conclusão
		Ascendente	Descendente	lisa	rugosa		lisa	rugosa		lisa	rugosa		lisa	rugosa	
P07	Filito calcífero	0,839	0,651	0,297	1,853	intermediária	0,255	1,595	intermediária	0,325	2,029	intermediária	0,329	2,055	intermediária
P10	Qtz-fd gn	2,664	2,471	0,295	1,845	rugosa	0,254	1,589	rugosa	0,324	2,023	rugosa	0,330	2,062	rugosa
P11	Qtz-fd gn	1,739	0,961	0,296	1,848	intermediária	0,255	1,591	rugosa	0,324	2,025	intermediária	0,330	2,060	intermediária
P12	Bt-hps gn	0,661	0,381	0,295	1,842	intermediária	0,254	1,586	intermediária	0,323	2,020	intermediária	0,330	2,065	intermediária
P15	Aluvião	0,289	0,291	0,291	1,820	lisa	0,251	1,568	intermediária	0,320	2,002	lisa	0,334	2,087	lisa
P18	Mica xisto	1,261	1,249	0,292	1,825	intermediária	0,252	1,572	intermediária	0,321	2,006	rugosa	0,334	2,085	intermediária
P22	Bt-hps gn	0,702	0,675	0,294	1,839	intermediária	0,253	1,583	intermediária	0,323	2,017	intermediária	0,331	2,068	intermediária
P23	Bt-hps gn	0,822	0,519	0,294	1,839	intermediária	0,253	1,583	intermediária	0,323	2,018	intermediária	0,331	2,068	intermediária
P25	Qtz-fd gn	0,517	0,644	0,295	1,846	intermediária	0,254	1,589	intermediária	0,324	2,023	intermediária	0,330	2,062	intermediária
P26	Migmatito	0,519	0,562	0,294	1,838	intermediária	0,253	1,583	intermediária	0,323	2,017	intermediária	0,331	2,070	intermediária
P27	Dique básico	0,998	0,998	0,293	1,834	intermediária	0,253	1,579	intermediária	0,322	2,013	intermediária	0,332	2,073	intermediária
P28	Anfibolito	0,729	0,812	0,293	1,829	intermediária	0,252	1,576	intermediária	0,322	2,010	intermediária	0,332	2,075	intermediária
P29	Piroxenito	1,673	1,966	0,293	1,830	intermediária	0,252	1,577	rugosa	0,322	2,011	intermediária	0,332	2,073	intermediária
P36	Bt-hbl gn	0,492	0,436	0,293	1,831	intermediária	0,252	1,578	intermediária	0,322	2,011	intermediária	0,331	2,071	intermediária
P37	Piroxenito	0,758	0,825	0,294	1,836	intermediária	0,253	1,581	intermediária	0,322	2,015	intermediária	0,331	2,070	intermediária
P45	Cob. areno argilosa	0,345	0,328	0,291	1,815	intermediária	0,250	1,565	intermediária	0,320	1,998	intermediária	0,334	2,088	lisa
P51	Qtz-fd gn	1,236	1,208	0,290	1,809	intermediária	0,250	1,560	intermediária	0,319	1,994	intermediária	0,335	2,092	intermediária
P52	Quartzito ferruginoso	1,736	1,913	0,289	1,809	intermediária	0,250	1,560	rugosa	0,319	1,993	intermediária	0,335	2,093	intermediária
P56	Filito calcífero	0,345	0,388	0,296	1,850	intermediária	0,255	1,592	intermediária	0,324	2,026	intermediária	0,330	2,063	intermediária
P65	Filito calcífero	0,253	0,317	0,294	1,840	lisa	0,254	1,585	lisa	0,323	2,019	lisa	0,333	2,079	lisa
P66	Migmatito	0,474	0,968	0,294	1,838	intermediária	0,253	1,583	intermediária	0,323	2,017	intermediária	0,331	2,070	intermediária
P69	Mica xisto	1,627	0,981	0,297	1,854	intermediária	0,255	1,596	rugosa	0,325	2,029	intermediária	0,331	2,068	intermediária
P72	Qtz-fd gn	2,181	2,281	0,294	1,839	rugosa	0,253	1,583	rugosa	0,323	2,017	rugosa	0,330	2,064	rugosa

6.4.1 Análise do Coeficiente de Retroespalhamento

Na Tabela 6.14, constam as médias e desvio padrão dos coeficientes de retroespalhamento (σ_0 , representado em decibéis) para os litotipos avaliados anteriormente. Para esta análise foram utilizadas apenas as imagens do modo *Standard*, por possuírem resolução espacial mais próxima e por apresentarem processamento *multilook* originalmente.

Tabela 6-14 – Coeficientes de retroespalhamento e desvio padrão para os litotipos analisados.

Litotipo	S2A		S7A		S7D	
	σ_0 (db)	desvio padrão	σ_0 (db)	desvio padrão	σ_0 (db)	desvio padrão
Mica-xisto	-3,776	0,602	-5,172	0,491	-5,702	0,714
Aluvião	-6,840	0,519	-8,993	0,582	-8,677	0,556
Quartzo feldspato gnaisse	-6,895	0,377	-8,481	0,770	-9,723	0,469
Dique básico	-7,462	0,502	-8,649	0,392	-7,888	0,573
Migmatito	-7,773	0,342	-10,004	0,534	-9,540	0,450
Piroxenito	-7,715	0,817	-10,008	0,865	-9,036	0,450
Quartzito Ferruginoso	-8,042	0,576	-10,100	0,473	-7,069	0,892
Anfibolito	-8,077	0,813	-10,478	0,449	-9,766	0,306
Biotita hiperstênio gnaisse	-8,484	0,580	-9,602	0,558	-9,723	0,469
Biotita hornblenda gnaisse	-8,711	0,695	-12,092	0,832	-11,316	0,780
Cobertura areno argilosa	-10,292	0,556	-12,017	0,583	-10,341	0,671
Filito	-10,551	0,654	-12,104	1,563	-12,425	1,233

O pressuposto da normalidade da variável σ_0 foi avaliado e aceito segundo os gráficos QQ-plots e testes estatísticos, como Shapiro-Wilk, ao nível de significância de 5%. Esta normalidade pode ser explicada pela aplicação do processo de filtragem na fase de ortorretificação da imagem (OLIVER; QUEGAN, 1998). Desta forma, considerou-se que os dados apresentam distribuição normal e adotou-se a média amostral como um estimador para as análises posteriores.

Mantendo-se o mesmo azimute de visada (imagens S2A e S7A), observa-se que a imagem S2A é a que apresenta os maiores coeficientes de retroespalhamento. Este resultado é coerente, já que para relevo plano o retroespalhamento é maior quanto menor for o ângulo de incidência (LEWIS; HENDERSON, 1998).

No caso das imagens S7A e S7D, no qual se tem a situação oposta (mesmo ângulo de incidência, e azimutes de visadas diferentes), os valores de σ_0 apresentam uma variação de valores menor quando comparados com a imagem S2A.

O mica-xisto é consideravelmente o litotipo que apresenta os maiores valores de σ_0 em todas as imagens. Esse destaque deve-se principalmente à elevada micro-topografia desta região, como explicado anteriormente no tópico 6.4 pelo critério de Rayleigh. Os demais litotipos possuem valores de retroespalhamento mais homogêneos entre si, pois apresentam valores de h_{rms} mais próximos. A cobertura areno-argilosa e o filito são caracterizados em campo pela escassez de vegetação e por apresentar em baixos valores de h_{rms} , o que reflete nos baixos valores de σ_0 .

Com relação à separabilidade dos litotipos em cada imagem, a análise de variância (ANOVA) foi a técnica utilizada. Esta técnica foi aplicada para comparação das múltiplas médias de σ_0 segundo os litotipos considerando-se o pressuposto de normalidade da variável σ_0 . A comparação global das médias foi feita através da estatística F. Os resultados de ambas as imagens indicam que pelo menos um dos coeficientes médios difere dos coeficientes médios dos demais litotipos ($p < 0,0001$).

Uma vez que o resultado da ANOVA foi significativo, foi de interesse determinar quais os litotipos eram diferentes entre si. Neste caso, múltiplos testes *t-Student* foram realizados para comparação dos litotipos par a par. Um problema, no entanto, com este tipo de procedimento, é que há inflação do nível de significância (alfa), já que cada litotipo é comparado com todos os demais litotipos. Para corrigir este problema, utilizou-se a Correção de Bonferroni.

Os resultados destas análises encontram-se nas Tabelas D1, D2 e D3, em anexo. O p-valor e os intervalos de confiança destas tabelas já estão corrigidos para as comparações múltiplas. Por exemplo, o primeiro resultado da Tabela D1 pode ser interpretado como: a diferença média entre o coeficiente de espalhamento do mica-xisto e do aluvião é de 3,06, ou seja, o coeficiente de retroespalhamento é em média 3,06 unidades maior para mica-xisto do que para o aluvião. Esta diferença é estatisticamente significativa (p-valor $< 0,0001$, ou seja, sig=0,000). O intervalo de 95% de confiança para a diferença das médias do nível de retroespalhamento entre o mica-xisto e o aluvião é: (2,49; 3,64). Quando o valor 0 (zero) não está contido no intervalo, indica uma diferença estatisticamente significativa.

Os gráficos da Figura 6.21 resumam os resultados obtidos através das análises estatísticas para as imagens S2A, S7A e S7D. Cada elipse compreende um conjunto de litotipos que estatisticamente são iguais com 0,05 de significância.

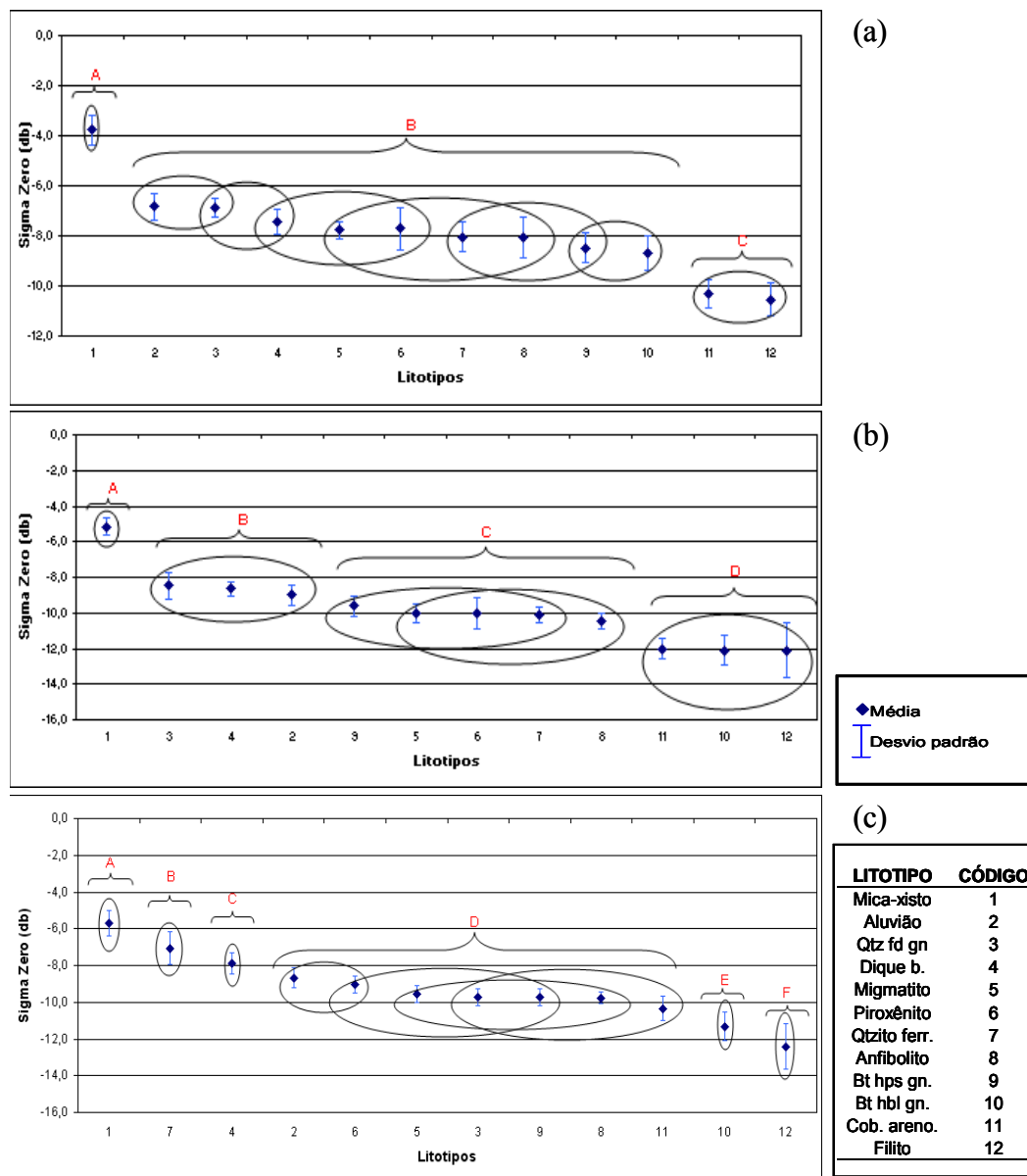


Figura 6-21 – Coeficiente de retroespalhamento σ_0 versus litotipos analisados. As elipses indicam os litotipos que apresentaram médias iguais, e as letras em maiúsculo representam os grupos definidos através da análise dos dados. (a) Resultados com a imagem S2A; (b) imagem S7A; (c) imagem S7D.

Na imagem S2A, foi possível separar três conjuntos litológicos diferentes, sendo que apenas o mica-xisto foi caracterizado individualmente. O segundo grupo, representado pela letra maiúscula B da Figura 6.21-a, abrange ao todo 9 litotipos. Esses litotipos não são todos iguais como observado pelas elipses da figura, entretanto há uma grande sobreposição dos valores médios amostrais segundo o teste-t com correção de Bonferroni. Já o grupo C abrange os litotipos cobertura areno-argilosa e o filito calcífero.

Com relação à separabilidade da imagem S7A (Figura 6.21-b), caracterizaram-se ao todo quatro conjuntos de litotipos, sendo novamente apenas o mica-xisto caracterizado individualmente. Participam do conjunto B da imagem S7A os litotipos quartzo-feldspato gnaiss e dique básico, além do aluvião. O grupo C é composto por um total de cinco litotipos (vide Figura 6.21-b), e o grupo D por três litotipos: cobertura areno-argilosa, filito calcífero e o biotita-hornblenda gnaiss.

A imagem S7D foi a que apresentou a melhor delimitação dos litotipos, como pode ser observado na Figura 6.21-b. Apenas o conjunto de litotipos D foi sobreposto, sendo que o restante dos litotipos aceitou a hipótese de médias diferentes. Desta forma, foram caracterizados individualmente os seguintes litotipos: mica-xisto (grupo A), quartzito ferruginoso (grupo B), dique básico (grupo C), biotita hornblenda gnaiss (grupo E) e o filito calcífero (grupo F).

A análise dos resultados apresentados acima permite concluir que mantendo-se constante o azimute de visada, e variando-se apenas o ângulo de incidência das imagens (S2A e S7A) houve uma melhora na separabilidade dos litotipos. Este resultado reforça o fato de que a utilização de imagens com ângulos de incidência maiores podem caracterizar melhor as informações à cerca da micro-topografia (rugosidade superficial na escala de comprimento de onda do SAR) para regiões de relevo plano devido ao maior contraste textural (NASA, 1988). Este fato é ilustrado a partir da plotagem dos valores médios do ângulo de incidência das imagens S2 e S7 no gráfico $\sigma_0 \times \Theta_i$ (Figura 6.22).

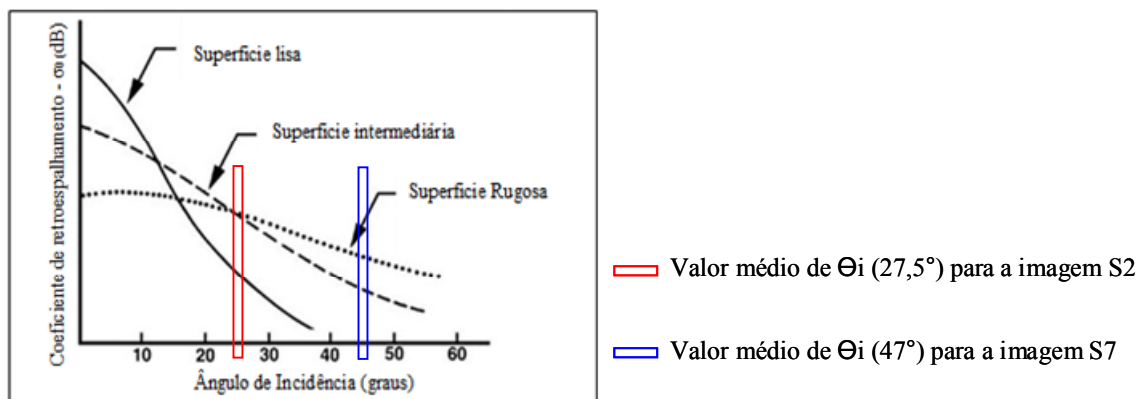


Figura 6–22 – Curvas de retroespalhamento para superfícies lisas, intermediárias e rugosas, em função do ângulo de incidência.
 Fonte: modificado de NASA (1988).

No caso de fixação do ângulo de incidência e variação do azimute de visada (S7A e S7D), a imagem com órbita descendente foi a que apresentou melhores resultados. Os traços estruturais e as principais orientações das feições de relevo foram realçados com o azimute de visada de 282° , devido à perpendicularidade entre os mesmos.

6.4.2 Análise das relações entre coeficiente de retroespalhamento x h_{rms}

A análise de regressão simples foi a ferramenta estatística utilizada para analisar a relação existente entre as variáveis h_{rms} (rugosidade superficial média, relacionada à micro-topografia) e o coeficiente de retroespalhamento da imagem *Standard S7D*, já que nesta imagem houve uma maior separabilidade de litotipos em relação as demais imagens.

O conjunto de observações para a variável dependente (σ_0 da imagem S7D) e a sua correspondente para a variável independente (h_{rms} descendente) são apresentadas na Tabela 6.15. Dos dados iniciais foram excluídas as amostras consideradas “não puras”, tais como o mica-xisto e o aluvião, por apresentarem em campo, um controle de respostas ligada à associação “rocha + solo + vegetação”.

Conforme mencionado na metodologia, e segundo Neter et al. (1996), a teoria da regressão linear é edificada em algumas premissas básicas. Dessa forma, tais premissas serão apresentadas a seguir.

Tabela 6-15 - Conjunto de observações para a variável dependente (σ_0 da imagem S7D) e independente (h_{rms} descendente).

Pontos	Litotipo	h _{rms} descendente	σ_0 (db) S7D
P07	filito calcifero	0,5249	-10,021
P56	filito calcifero	0,3878	-13,375
P65	filito calcifero	0,3174	-12,425
P10	quartzo feldspato gnaiss	2,4712	-8,552
P11	quartzo feldspato gnaiss	0,9615	-8,070
P25	quartzo feldspato gnaiss	0,6445	-8,335
P72	quartzo feldspato gnaiss	2,2806	-8,346
P51	quartzo gnaiss Bogó	1,2078	-7,367
P12	biotita-hiperstenio gnaiss	0,3806	-9,723
P22	biotita-hiperstenio gnaiss	0,6748	-9,195
P23	biotita-hiperstenio gnaiss	0,5192	-7,696
P26	migmatito	0,5623	-9,553
P27	dique básico	0,9980	-7,888
P28	anfíbolito	0,8115	-9,766
P29	piroxênito	1,9664	-8,970
P37	piroxênito	0,8246	-9,018
P36	biotita-hornblenda gnaiss	0,4358	-11,316
P45	cobertura areno argilosa calcifera	0,3279	-10,341
P52	quartzito ferruginoso	1,9134	-7,091

6.4.2.1 Análise Exploratória dos Dados

Inicialmente foi avaliada a normalidade de distribuição da variável dependente (σ_0 da imagem S7D). A Figura 6.23 expõe graficamente este processo comparando os dados disponíveis com uma distribuição normal esperada.

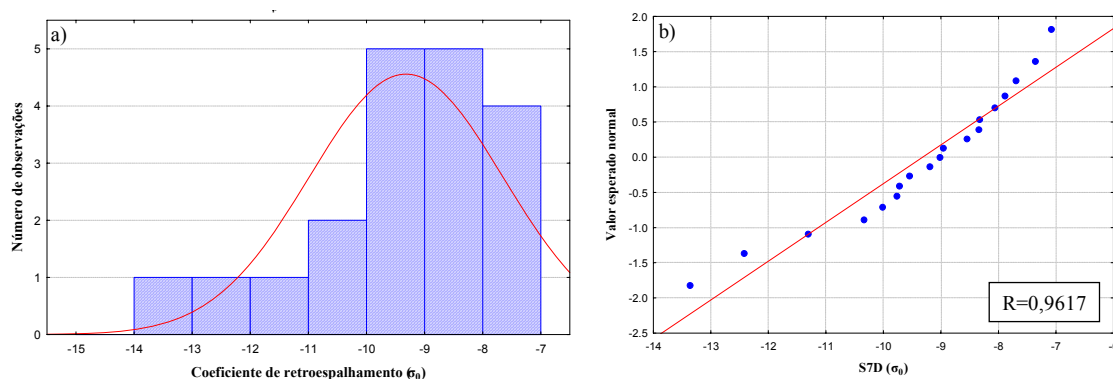


Figura 6-23 – Estudo da normalidade da variável dependente (σ_0 -S7D): (a) Histograma de frequência; (b) Probabilidade normal.

A partir da análise da Figura 6.23a, bem como a partir do teste de Shapiro-Wilk, constatou-se a normalidade da variável dependente, com resultados de $W=0,92509$ e valor $p=0,14057$. A Figura 6.23b corrobora com o histograma de frequência, uma vez que os dados ajustam-se em torno do valor normal esperado, e o coeficiente de correlação (R) foi superior ao valor crítico extraído da tabela organizada por Looney e Gullledge (1985), que é de 0,946 para 19 observações, a 5% de significância.

No que diz respeito à variável independente (h_{rms} descendente), foram testadas transformações aritméticas com a finalidade de se aumentar a correlação com a variável dependente. O melhor resultado foi obtido através do inverso da variável h_{rms} , como pode ser constatado na Tabela 6.16.

Tabela 6-16 – Matriz de correlação linear das variáveis independentes e dependentes antes e após a transformação aritmética da variável independente.

	hrms descendente	log hrms	exp hrms	raiz hrms	1/hrms
σ (db) S7D	0,54	0,67	0,40	0,60	-0,75

Desta forma, foi utilizada como variável dependente o coeficiente de retroespalhamento, e como variável independente a transformação $1/h_{rms}$.

6.4.2.2 Construção do Modelo de Regressão Linear Simples

A Tabela 6.17 apresenta os parâmetros estimados para a regressão simples, com coluna *p-valor* (teste t) denotando a significância da relação, já que tanto o estimador B como o intercepto resultaram em valores de p menores que 0,05.

Tabela 6-17 – Parâmetros da regressão linear simples.

	B	Erro Padrão	p-valor
Intercepto	-7,113920	0,539626	0,000000
1/hrms desc.	-1,418170	0,304181	0,000223

Portanto, a relação entre as variáveis é dada por:

$$\hat{Y} = -7.114 - 1.42 X_1 \tag{6.1}$$

Onde:

\hat{Y} é coeficiente de retroespalhamento da imagem S7D

X_1 é o valor estimado do inverso da micro-topografia (h_{rms});

Essa regressão apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,57.

De forma que as premissas básicas fossem respeitadas, as análises dos resíduos foram realizadas.

Análise da Variância dos Resíduos

A Figura 6.24 relaciona os resíduos padronizados com a variável independente, e pela sua análise não é evidenciado tendenciosidade. O teste de Levene modificado confirmou com 5% de significância, que a variância dos resíduos é constante, com um $|t^*| = -0,48$ e t crítico = 1,72.

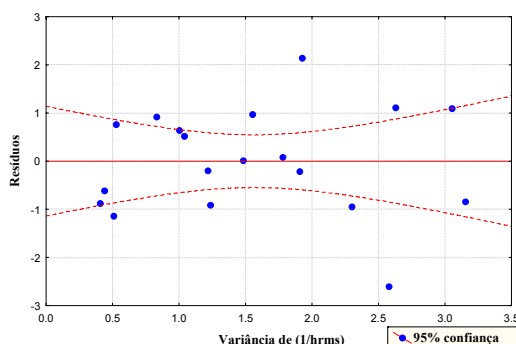


Figura 6-24 – Relação dos resíduos padronizados com a variável explicativa variância ($1/h_{rms}$).

Análise da Normalidade dos Resíduos

O teste de Shapiro-Wilk aceitou a hipótese de normalidade com 5% de significância, uma vez que resultou um valor $p = 0,67047$ para um $W = 0,96484$. O histograma de frequência dos resíduos padronizados (Figura 6.25a), bem como o gráfico de probabilidade normal (Figura 6.25b) mostram a proximidade à curva normal esperada.

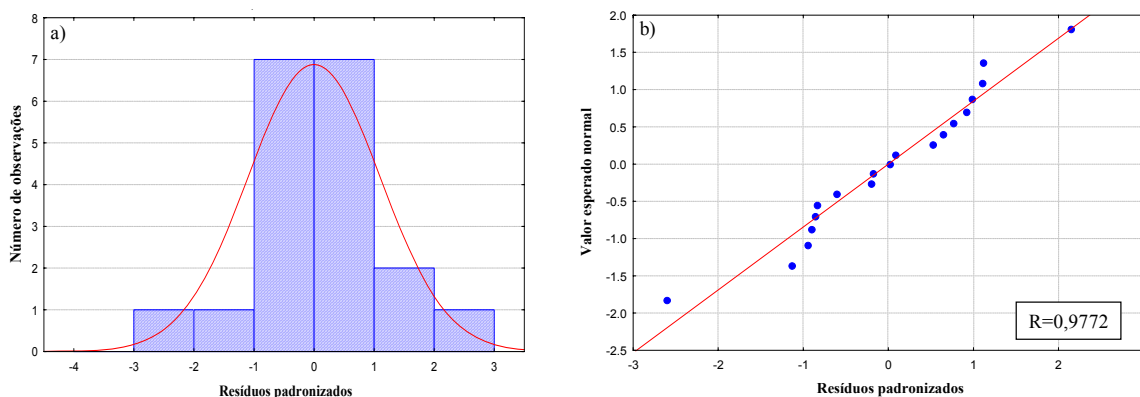


Figura 6-25 – Estudo da normalidade dos resíduos padronizados: (a) Histograma de frequência; (b) Probabilidade normal.

Identificação de Outliers Influentes

Para identificação de outliers influentes, foi calculado o DFFITS. A partir desta análise não foi encontrado outlier influente, uma vez que o maior valor absoluto de DFFITS foi de 0,2838, ou seja, menor do que 1.

Validação da Regressão Simples

Segundo Neter (1996), o critério utilizado para validar modelos de regressão com número de amostras reduzidas é o PRESS(p) comparado com o valor da soma dos quadrados dos resíduos (SQR). Esses dois parâmetros devem estar próximos para que a validação seja comparada, entretanto não há uma medida de quão próximas devem estar esta relação. Desta forma, como o PRESS (p) = 28,03 e o SQE = 27,93, o modelo foi considerado válido.

6.4.2.3 Considerações ao modelo de regressão simples

A abordagem adotada permitiu analisar a relação entre os valores de retroespalhamento obtidos na imagem com os valores de micro-rugosidade (h_{rms}) medido em campo, com a regressão simples fornecendo um coeficiente de determinação (R^2) de 0,57. Isto implica que a micro-rugosidade do terreno exerce uma influência direta no controle dos valores de retroespalhamento da imagem, explicando quase 60% das variações encontradas de σ_0 .

Considerando a ausência de influência da umidade nas respostas retroespalhadas (imagem adquirida com ausência de precipitação prévia), outros fatores que corroborariam para estas variações de σ_0 seriam as variações locais de declividade (*local slope*) e as limitações inerentes à caracterização de rugosidade pelo rugosímetro em campo.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos através das análises qualitativas e quantitativas das imagens RADARSAT-1, com diferentes geometrias de observação em ambientes de clima semi-árido, mostraram-se satisfatórios para fins de mapeamento geológico. Assim, considerando os parâmetros do sistema sensor e dos alvos, as seguintes conclusões são pertinentes quanto aos resultados e contribuições da pesquisa:

A análise visual monoscópica da imagem Fine-2 com órbita ascendente possibilitou a confecção do mapa geológico da área de estudo, que em comparação com os mapas geológicos de referência mostrou resultados similares quanto à discriminação das maiores unidades litológicas. Entretanto, os corpos máficos-ultramáficos (potenciais hospedeiros de cobre) não puderam ser identificados devido à sua pequena dimensão no terreno e por apresentarem características geométricas (rugosidade superficial) semelhantes aos litotipos vizinhos. Uma grande contribuição foi dada em relação à caracterização das estruturas geológicas, principalmente às mais ortogonais à direção de visada do sensor. A forte estruturação das feições lineares de relevo e de drenagem possibilitou a identificação visual das foliações NNE-SSW e NE-SW, antes não representadas no mapa de referência de Delgado e Souza (1975). Além disso, definiu-se melhor os contatos entre os litotipos, bem como delimitou-se de forma eficiente os sistemas de falhas transcorrentes com cinemática sinistral e a falha de empurrão.

Apesar da área de estudo ser predominantemente plana, a análise estereoscópica das imagens do modo *Standard* auxiliou na identificação das principais estruturas do Vale do Rio Curaçá. A melhor percepção das pequenas variações de declividade do terreno conjuntamente com as áreas de macro-topografia, trouxeram informações importantes quanto ao entendimento das estruturas planares da área de estudo, sendo portanto, uma ferramenta importante e necessária.

Quanto à análise dos pares estereoscópicos, o par S7AxS2A foi o que apresentou melhores resultados devido ao baixo ângulo de interseção estereoscópica (19,5°) e ângulo de interseção entre órbitas de 0°. Estes parâmetros ocasionaram uma maior

similaridade radiométrica, e facilitaram a visualização em três dimensões. Apesar do par S7DxS2A possuir a maior razão de paralaxe vertical (RPV), a grande disparidade radiométrica e geométrica do par ocasionou uma baixa visibilidade estereoscópica. Este resultado aparentemente contraditório (TOUTIN; GRAY (2000) sugerem que as configurações de sentidos opostos são mais eficientes em áreas planas) indica que a similaridade radiométrica foi um fator mais decisivo na avaliação dos pares do que a diferença de paralaxes entre eles.

A análise por componentes principais mostrou ser uma técnica interessante para o estudo da influência da variação do ângulo de incidência e azimute de visada das cenas RADARSAT-1. Os resultados indicaram que a variação do azimute de visada apresenta um papel mais relevante no controle das respostas dos alvos que a variação do ângulo de incidência. A segunda e a terceira componente principal confirmam esta evidência, uma vez que há um melhor realce das variações de topografia ligadas à declividade local.

A abordagem quantitativa, através da análise dos valores de retroespalhamento das imagens *Standard* permite concluir que mantendo-se constante o azimute de visada e variando apenas o ângulo de incidência, há uma melhora sutil na separabilidade dos litotipos da região. Já com a fixação do ângulo de incidência e variação do azimute de visada, há uma grande contribuição na discriminação dos litotipos, de forma a reiterar os resultados obtidos através da análise por componentes principais.

A análise dos coeficientes de retroespalhamento com os valores de rugosidade superficial medidos em campo, através da regressão simples, mostram que para a imagem S7D o efeito da micro-rugosidade do terreno explica grande parte das variações de σ_0 ($R^2=0,57$). Neste resultado excluiu-se a influência da constante dielétrica, restando as variações locais de declividade e as limitações inerentes ao rugosímetro para explicar o restante das variações de σ_0 .

Com base nestas informações constata-se que para terrenos de relevo predominantemente plano e com escassez de vegetação, as variações de azimute de visada tendem a trazer uma maior quantidade de informações geológicas que a variação

do ângulo de incidência. Todavia, outros parâmetros e observações podem auxiliar na otimização dos resultados obtidos, e nesse sentido torna-se recomendável em trabalhos futuros:

Incluir na pesquisa imagens RADARSAT-1 obtida em estação chuvosa, de forma a investigar o papel da constante dielétrica no controle da variação de respostas de σ_0 . Acredita-se que os corpos de piroxênio, principais hospedeiros de cobre, serão discriminados das encaixantes devido à maior retenção de água nos vertissolos característicos de tal litotipo, conforme verificado em trabalhos com banda L na região (RABELO et al., 2007).

Fazer o uso de estéreo-pares de imagens do modo *Fine*, com variação de azimute de visada, de forma que se torne possível a estereoscopia de imagens de maior resolução espacial.

Realizar uma maior amostragem de medidas de rugosidade superficial em campo, de forma que sejam minimizados os erros decorrentes deste tipo de análise, e tornar possível uma análise estatística mais específica, por litotipos.

Por último, há uma grande expectativa em relação ao lançamento do RADARSAT-2, previsto para o final de 2007. A possibilidade de imageamentos em banda C com novos atributos de polarimetria (amplitude e fase), elevada resolução espacial (3 metros) e maior versatilidade de azimute de visada (4 azimutes de visada) ampliará as condições de extração de informação geológica neste tipo de ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v.7, n.4, p. 349-364, 1977.

AMARAL, S.; SHIMABUKURO, Y.E. Sensoriamento Remoto por Radar (SAR): pré-processamento de imagens RADARSAT ("Fine Mode") na região da Floresta Nacional do Tapajós. In: Latino-American Seminar On Radar Remote Sensing: Image Processing Techniques, 1., 1996. Buenos Aires, Argentina. **Proceedings...**Buenos Aires: ESA Publications Divisions, 1996. p. 37- 42.

ANGELIN, L.A.A. ; KOSIN, M. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil (PLGB)**. Aracaju NW – Folha SC.20-V, Estado da Bahia, Pernambuco e Piauí. Escala 1:500.000. Brasília: Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais CPRM/DIEDIG/DEPAT (CDD 553.0981), 2001. Texto explicativo.

BARBOSA, O.; MACHADO, I.F.; WINGE, M.; COELHO, A.L.; BATISTA, M.B.; DYER, R.C.; COSTA, M.J.; CALHEIROS, J.A.; BRAUN, O.P.G. **Geologia econômica de parte da região do médio São Francisco, nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro: DFPM-DNPM, 1964. 99p. (DFPM-DNPM – Bol. 140).

BARBOSA, J.S.F.; SABATÉ, P.; MARINHO, M.M. O Cráton do São Francisco na Bahia: uma síntese. **Revista Brasileira de Geologia**, v. 33, n.1, p. 3-6, 2003.

BRISCO, B.; BROWN, R.J. Agricultural applications with radar. In: LEWIS, A.J.; HENDERSON, F.M. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar**. 3 ed. New York: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. 866p.

Centro Canadense de Sensoriamento Remoto. **Conceitos fundamentais do radar imageador: nível básico**. Canadá, Ottawa: CCSR, 1997. 91p.

COLWELL, R.N. **Manual of remote sensing**. 2 ed. Falls Church: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASP), 1983. 2724p.

CORDANI, U. G.; SATO, K.; TEIXEIRA, W.; TASSINARI, C. C. G.; BASEI, M. A. S. Crustal evolution of the south american plataform. In: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D.A. **Tectonic evolution of South América**. Rio de Janeiro: FINEP, 2000. Cap. 1, p. 19-40. XXXI International Geological Congress.

CRÓSTA, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170 p.

CUNHA, E. R. S. P. **Integração digital de imagens de radar e landsat-TM dados geológicos e aerogamaespectrométricos no auxílio ao mapeamento geológico da região do complexo granítico estrela - Pará (PA)**. 2002. 147 p. (INPE-9858-

TDI/868). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/rep-/sid.inpe.br/jeferson/2003/08.01.13.19>>. Acesso em: 20 ago. 2006.

CURLANDER, J.C. Utilization of spaceborne SAR data for mapping. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, v. 22, n. 2, p. 106-112, 1984.

DALLEMAND, J.F.; LICHTENEGGER, J.; RANEY, R.K.; SCHUMANN, R. **Radar imagery: theory and interpretation: lecture notes**. Rome: FAO/ESA, 1993. (RSC Series 67).

DELGADO, I. M.; SOUZA, J.D. **Projeto cobre Curaçá – relatório final – geologia econômica do distrito cuprífero do Rio Curaçá, Bahia, Brasil**. Salvador: DNPM, 1975. 30 volumes. Convênio Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) / Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM).

DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. **Metalogênese do Brasil**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2001. 349 p.

D'EL-REY SILVA, L.J.H. Geologia e controle estrutural do depósito cuprífero Caraíba, Vale do Curacá, Bahia. **Geologia e Recursos Naturais do Estado da Bahia**, SME, Série Textos Básicos, v.6, p. 51-123, 1985.

D'EL-REY SILVA, L.J.H. Implication of the Caraíba deposit's structural controls on the emplacement of the Cu-bearing hypersthenytes of the Curaçá Valley, Bahia-Brazil. **Revista Brasileira de Geologia**, v. 26, n.3, p. 181-196, 1996.

DIERKING, W. Quantitative roughness characterization of geological surfaces and implications for radar signature analysis. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 5, p. 2397-2412, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA (EMBRAPA Semi-Árido). **Tabela de precipitação pluviométrica mensal (mm) da estação agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina - PE)**. Petrolina, 1975-2007. Disponível em: <http://www.cpatsa.embrapa.br/servicos/dadosmet/cem-chuva.html>. Acesso em: 10 ago. 2006.

FORD, J.P.; BLOM, R.G.; COLEMAN, J.L.; FARR, T.G.; PLAUT, J.J.; POHN, H.A.; SABINS, FF. Radar Geology. In: LEWIS, A.J.; HENDERSON, F.M. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar**. 3 ed. New York: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. 866p.

GRUNSKY, E. C. The application of principal components analysis to multi-beam RADARSAT-1 satellite imagery: A tool for land cover and terrain mapping. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 6, p. 758-769, 2002.

HOEKSTRA, P.; DELANEY, A. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. **Journal of Geophysical Research**, v. 79, n. 11, p. 1699-1708, 1974.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Barro Vermelho (SC. 24-V-D-II)**. Rio de Janeiro: 1977. 1 mapa. Escala: 1:100.000.

JARDIM DE SA, E.F.; MCREATH, I.; BRITO NEVES, B.B.; BARTELS, R.L. Novos dados geocronológicos sobre o Cráton do São Francisco no estado da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29, Ouro Preto, 1976. **Anais...** Belo Horizonte: SBG, vol. 4, p. 185-204.

JARDIM DE SA, E.F.; ARCHANJO, C.J.; LEGRAND, J.M. Structural and metamorphic history of part of the high-grade terrain in the Curaçá Valley, Bahia, Brazil. **Revista Brasileira de Geologia**, v. 12, n.1-3, p. 251-262, 1982.

JET PROPULSION LABORATORY (JPL) **Shuttle imaging radar-C science plan**. Pasadena: JPL/NASA, 1986. v. 1 p. 86-29.(JPL Publication 86-29).

JORDAN, H. O calcário bambuí e o Grupo Canudos na região de Curaçá, Bahia. Recife. Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), **Boletim de Estudos**, v. 4, p. 59-63, 1968.

KOSIN, M.; MELO, R.C.; SOUZA, J.D.; OLIVEIRA, E.P.; CARVALHO, M.J.; LEITE, C.M.M. Geologia do segmento norte do orógeno Itabuna-Salvador-Curacá e guia de excursão. **Revista Brasileira de Geologia**, v. 33, n.1, p. 15-26, 2003.

LEE, J. S. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar. **Optical Engineering**, v. 25, n. 05, p. 636-643, 1986.

LEWIS, A. J., HENDERSON, P.M., HOLCOMB, D.W. 1998. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: LEWIS, A.J.; HENDERSON, F.M. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar**. 3 ed. New York: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. 866p.

LOONEY, S. W.; GULLEDGE, T.R. Use of the correlation coefficient with normal probability plots. **The American Statistician**, v. 39, n. 1, p. 75-79, Feb. 1985.

LOPES, A.; TOUZI, R.; NEZRY, E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 6, p. 992-1000, 1990.

LOUREIRO, H. S. C. **Mundo Novo, folha SC.24-Y-D-IV**: Estado da Bahia. Convênio: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM)/Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM). Brasília, DNPM/CPRM, 1991. 177p.

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 Geoscience Remote Sensing**, v.GE25, n.1, p.55-66, 1987.

MASUOKA, P.M.; HARRIS, J.; LOWMAN, P.D.; BLODGET, H.W. Digital processing of orbital radar data to enhance geologic structure: examples from the

Canadian Shield, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 5, p. 621-632, May 1988.

MATHER, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 2 ed. London: John Wiley & Sons, 1999. 210 p.

MELLO, S.L.J.; POUNCHAIN, E.B. **Relatório sobre a jazida de cobre da Caraíba, estado da Bahia**. Rio de Janeiro: DFPM-DNPM, 1946, 137 p. (Boletim 117).

MOOM, W.M.; SINGHROY, V.; YAMAUCHI, Y.; KUODA, R. Tectonic investigation of Nahanni earthquake area Northwest Territories (Canadá) using JERS-1 and ERS-1 SAR data. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 10-14 jul 1995, Firenze, Italy. **Proceedings...** Firenze, Italy: INSPEC, 1995, p. 2197-2199. ISBN (0-7803-2567-2).

MORAIS, M. C. **Discriminação de lateritas mineralizadas em ferro no depósito de N1 (Carajás-PA) por radar imageador: uma avaliação através de classificação textural**. 1998. 193 p. (INPE-7165-TDI/673). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 1998. Disponível na biblioteca digital *URLib*: <http://iris.sid.inpe.br:1912/rep-/sid.inpe.br/deise/1999/08.18.16.12>. Acesso em: 13 jan. 2006.

NASA. **SAR Synthetic Aperture Radar: instrument panel report**. Washington, DC.:1988. (Earth Observing System, v.2).

NETER, J.; KUTNER, M. N.; NACHTSSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. Boston: WCB/McGraw-Hill, 4 Ed., 1996, 791 p.

OLIVER, C.; QUEGAN, S. **Understanding synthetic aperture radar images**. Norwood, MA: Artech House, 1998. 478 p.

PAGANELLI, F.; GRUNSKY, E.C.; RICHARDS, J.P.; PRYDE, R. Use of RADARSAT-1 principal component imagery for structural mapping: a case study in the Buffalo Hills area, northern central Alberta, Canada. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.29, n.1, p. 111-140, 2003.

PARADELLA, W. R. **Discriminação de unidades litológicas no baixo vale do Rio Curaçá (Bahia), através de realces por processamento digital de dados MSS-Landsat 3**. 1983. 250 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1983.

PARADELLA, W.R.; VITORELLO, I. Geobotanical and soil spectral investigation in the "caatinga" environment (Brazil) Base on multitemporal remote sensing data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.21, n.1, p. 52-59, 1995.

PARADELLA, W. R.; KRUG, T.; LANDRY, R.; PIETSCH, R. W. O Programa de avaliação dos dados do RADARSAT nas geociências. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 4, p. 403-406, 1997.

PARADELLA, W. R.; SANTOS, A. R.; DALL'AGNOL, R.; PIETSCH, R. W.; SANT'ANNA, M.V. A Geological Investigation Based on Airborne (SAREX) and Spaceborne (RADARSAT- 1) SAR Integrated Products in the Central Serra dos Carajás Granite Area, Brazil. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.21, n. 4, p. 376-392, 1998.

PARADELLA, W. R., SANTOS, A. R., VENEZIANI, P., MORAIS, M. C. Synthetic aperture radar for geological applications in the moist tropics: experiences from the brasilian Amazon region. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 538-542, 2000.

PARADELLA, W. R.; CECARELLI, I. C. F.; LUIZ, S.; OLIVEIRA, C. G.; COTTINI, C. P.; OKIDA, R. Produção de carta topográfica por estereoscopia de alta resolução do RADARSAT-1 integrada com dados TM-Landsat 5: uma avaliação para terrenos planos na floresta nacional de Tapajós (PA). **Revista Brasileira de Geociências**, v.33, n.2, p. 99-110, 2003.

PCI Geomatics Enterprises Inc.®. **Geomatica Focus User Guide**. Geomatica Versão 10.0, Ontário, Canadá, 2005.

RABELO, T.N.; PARADELLA, W.R.; SANTOS, A.R.; RENNÓ, C.D.; GALVÃO, L.S.; MURA, J.C.; KNUST, S.S.A. Evaluating the discrimination of Cu-mineralised rock alteration products from simulated MAPSAR images in the Curaçá Valley, Brasil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 01, p.1-15, 2007.

RADARSAT geology handbook. [S.l.]: RADARSAT International, 1997. 70p. Disponível em: <http://www.aeromap.com/downloads/radar/rghb.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2005.

RANEY R.K. Radar Fundamentals: Technical perspective. In: LEWIS, A.J.; HENDERSON, F.M. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar**. ed.3. New York: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. 866p.

SABINS JR, F. F. **Remote sensing: principles and interpretation**. 3. ed. New York: W.H. Freeman and Company, 1996. 494p.

SANT'ANNA, S.J.S. **Avaliação do desempenho de filtros redutores de "speckle" em imagens de radar de abertura sintética**. 1995. 181p. (INPE-6125-TDI/586). São José dos Campos. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 1995. Disponível na biblioteca digital *URLib*:

<http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.20.06.48.47/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2006.

SANTOS, A.R.; PARADELLA, W.R.; VENEZIANI, P.; MORAIS, M.C. A estereoscopia com imagens RADARSAT-1: uma avaliação geológica na província mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, v.7, n.4, p.627-632, 1999.

SANTOS, A. R; VENEZIANI, P.; PARADELLA, W. R.; MORAIS, M. C. Curso: **Radar aplicado ao mapeamento geológico e prospecção mineral**: aplicações. São José dos Campos, 2001. 94 p. (INPE-8117-PUD/099).

SHI, Z., FUNG, K.B. A comparison of digital speckle filters. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. Pasadena, USA. **Proceedings...** Ottawa, Canadá: Canadian Crown Copyright, 1994.

SINGHROY, V.; SAINT-JEAN, R. Effects of relief on the selection of RADARSAT-1 incidence angle for geological applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 3, p. 211-217, 1999.

SOARES, P.C.; FIORI, A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Noticiário Geomorfológico**, v.16, n.32, p. 71-104, 1976.

TEIXEIRA, L. R. 1997. **O complexo Caraíba e a suíte São José do Jacuípe no cinturão Salvador-Curaçá (Bahia-Brasil)**: petrologia, geoquímica e potencial metalogenético. Tese (Doutorado em geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 202p.

TEIXEIRA, W.; SABATÉ, P.; BARBOSA, J.; NOCE, C.M.; CARNEIRO, M.A. Archean and Paleoproterozoic Tectonic evolution of the São Francisco Craton, Brazil. In: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D.A. **Tectonic Evolution of South América**. Rio de Janeiro: FINEP, Cap.4, 2000. p.101-138. XXXI International Geological Congress.

TERUIYA, R. K. **Integração digital de dados multifontes no estudo geológico do granito cigano, província mineral de Carajás - PA**. 2002. 137 p. (INPE-10102-TDI/894). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002. Disponível em: <<http://mtcm12.sid.inpe.br/rep-/sid.inpe.br/marciana/2003/04.14.11.47>>. Acesso em: 20 jan. 2006.

TOUTIN, T.; VESTER, C. Understanding RADARSAT data in stereo. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the era of RADARSAT, 1997, Ottawa, Canadá. **Proceedings...** Ottawa, Canadá: ADRO 453, 1997. 1CD-ROOM.

TOUTIN, T. Generating DEM from stereo image with a photogrammetric approach: examples with VIR and SAR data. **Journal of Advances in Remote Sensing**, v. 4, p. 110-117, 1995.

- TOUTIN, T. Opposite Side ERS-1 SAR Stereo Mapping over Rolling Topography. **IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing**, v. 34, n. 2, p. 543-549, 1996.
- TOUTIN, T. Stereo RADARSAT for mapping applications. In: RADARSAT ADRO Symposium, 1998, Montreal, Canada. **Proceedings...** Montreal, Canadá: ADRO 453, 1998. 1 CD-ROOM.
- TOUTIN, T.; GRAY, L. State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 55, p. 13-33, 2000.
- ULABY, T.F. Radar response to vegetation. **Antennas and Propagation, IEEE Transaction**, v. 23, n. 1, p. 36-45, 1975.
- ULABY, F.T. E BATLIVALA, P.P. Optimun radar parameters for mapping soil moisture. **IEEE Transations Geoscience Eletronics**, v. 14, n. 2, p. 81-93, 1976.
- ULABY, F. F.; MOORE, R. K.; FUNK, A. K. **Microwave remote sensing: active and passive**. Reading. MA, Addison-Wesley, v.2. 320p. 1982.
- ULABY, F.T.; MORE, R.K.; FUNK, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive**. Reading, Addison-Wesley, 1986. v.2. 360p.
- VENEZIANI, P.; ANJOS, C.E. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia**. São José dos Campos: INPE, 1982. 61p. (INPE-2227-MD/014).
- WERLE, D. **Radar remote sensing: a training manual**. Ottawa, Canadá: Dendron Resource Survey Inc., 1988. 129p.

APÊNDICE A

Tabela A1 – Pontos cadastrados em campo

PONTO	UTM_X	UTM_Y	LITOTIPO	DESCRIÇÃO
P01	420539	8983483	---	Fazenda Cabaceira.
P02	423533	8981892	---	Fazenda Cara Brava.
P03	427333	8976462	filito/micaxisto	Base da Serra Cara Brava.
P04	424957	8980468	filito/micaxisto	Área bastante exposta, com pouca vegetação.
P05	424636	8980683	filito/micaxisto	Baixa frequência vegetacional. Blocos rolados de ordem centimétrica.
P06	424167	8981115	quartzito-micaxisto	Vegetação seca de médio porte.
P07	423418	8981440	filito/quartzito-micaxisto	Base da Serra Cara Brava, sem vegetação.
P08	422554	8982619	cataclasto	Afloramento de ordem métrica, com presença de blocos rolados.
P09	422428	8982767	cataclasto	Afloramento decamétrico sem vegetação.
P10	418051	8983652	quartzito-feldspato gnaisse	Blocos rolados de grande a médio porte na Lagoa dos Mornos (lagoa seca).
P11	419785	8983101	quartzito-feldspato gnaisse	Caminho da Lagoa dos Mornos para a fazenda Cabaceira. Relevo suave ondulado.
P12	416123	8983747	biotita-hiperstênio gnaisse	2 km a oeste da Lagoa dos Mornos em direção a Fazenda Monte Alegre. Vegetação esparsa.
P13	400865	9001814	micaxisto	Afloramento na estrada – no sentido Popo de Fora.
P14	405711	8993952	mármore	Afloramento de ordem decamétrica, localizado próximo à estrada de terra. Indicadores cinemáticos, dobras de arrasto.
P15	400908	8987143	aburão	Rio Curuçá, próximo à linha de alta tensão.
P16	401562	8987926	micaxisto	Vegetação seca de médio porte, com muita componente vertical. Blocos rolados.
P17	402773	8989268	micaxisto	Vegetação seca de médio porte, com muita componente vertical. Blocos rolados.
P18	403532	8990096	micaxisto	Solo amarelado do micaxisto. Muitos blocos rolados de sílica.
P19	404841	8991529	Filito/quartzito-micaxisto	Afloramento na beira da estrada de terra.
P20	406432	8992610	micaxisto	Afloramento na beira da estrada Curuçá - Barro Vermelho.
P21	413712	8983415	migmatito-biotita-hiperstênio gnaisse	Contato marcado pela diferença na tonalidade do solo. Mapeada a falha (espelho de falha).
P22	413870	8983121	biotita-hiperstênio gnaisse	Ambiente com vegetação bastante esparsa. Blocos rolados são mais escassos.
P23	414101	8983081	biotita-hiperstênio gnaisse	Solo acinzentado, com vegetação esparsa e blocos rolados de bt-hips gnaisse.

(continua)

Tabela A1 – (continuação)

P24	4 14954	8983340	biotita-hiperstênio gnaíse	Afloramento métrico.
P25	4 18568	8983543	quartzo-feldspato gnaíse	Provável zona de falha (blocos de quartzo). Solo amarelado.
P26	4 15158	8984390	migmatito	Solo mais avermelhado, afloramento decamétrico (lajedo). Signóides sinistrais.
P27	4 10544	8984361	dique básico	Solo vértico escuro.
P28	4 08663	8980554	anfíbolo	Vegetação mais densa, solo cinza escuro.
P29	4 09616	8978924	piroxênio-hornito	Solo com mais blocos rolados, vegetação mais esparsa que anfíbolitos. Afloramento.
P30	4 11235	8974381	calci-silicática	Relevo mais ondulado. Macro rugosidade que influencia um elevado retrospalhamento.
P31	4 11849	8973244	calci-silicática	Relevo mais movimentado. Macro rugosidade responsável pelo clara na imagem.
P32	4 14576	8960899	piroxênio-hornito	Fora da área de estudo.
P33	4 10457	8975133	calci-silicática	Pequena serra de calci-silicática encimada no bt-hbl gnaíse e cortada por dique de diabásio. Indicador cinemático sinistral. Próximo ao Córrego Olhos d'Água.
P34	4 10549	8976386	calci-silicática	Blocos rolados de aproximadamente 0,8 cm de altura.
P35	4 14864	8976486		Porção norte da Serra Redonda
P36	4 10543	8978396	biotita-hornblenda gnaíse	Porção mais escura da imagem, sem afloramento, vegetação mais esparsa
P37	4 12196	8982503	piroxênio-hornito	Área com vegetação esparsa, solo vértico escuro, com gretas.
P38	4 09507	8989205	biotita-hornblenda gnaíse / mármore	Cortado entre o biotita-hornblenda gnaíse e o piroxênio-hornito. A uns 20 metros, o contato com o mármore. Afluente da margem direita do Riacho Melancia.
P39	4 08657	8989263	mármore secundário (calice)	Solo marrom claro, vegetação mais densa. Alteração do calcário.
P40	4 07964	8989318	mármore	Solo avermelhado resultante da alteração do mármore.
P41	399562	8985736	micaxisto	Vegetação mais densa e muitos blocos rolados centimétricos.
P42	397786	8983728	micaxisto/quartzo-feldspato gnaíse	Solo avermelhado.
P43	399606	8982835		Caminho para a fazenda Campo Formoso. A 10 metros de um açude (lagoa).
P44	398738	8982379		Fazenda Minas.
P45	399414	8980914	cobertura areno-argilosa calcifera	Área bastante plana, pouca vegetação.
P46	398560	8979996		Ponto de controle.
P47	398455	8979851	mármore	Afloramento e blocos rolados com aproximadamente 50cm.
P48	397955	8978944	quartzo-feldspato gnaíse	Zona de falha. Contato.

(continua)

Tabela A1 – (continuação)

P49	397720	8978564	mármore/quantzo feldspato gnaíse	Contato entre as duas unidades (solo).
P50	397027	8978656	quantzo feldspato gnaíse	Solo amarelado com poucos blocos. Vegetação de médio porte e pouco densa.
P51	395788	8979553	quantzo feldspato gnaíse	Vegetação seca menos densa, e solo com cascalho de ordem centimétrica.
P52	395198	8979961	quartzito ferruginoso	Contato entre o quartzito ferruginoso e o quantzo feldspato gnaíse. Solo avermelhado escuro com blocos centimétricos de 20 a 40cm sob vegetação pouco mais densa que o gnaíse.
P53	421511	8991711	mármore	Fazenda Humaitá. Solo avermelhado com poucos fragmentos de rocha.
P54	420467	8991406	mármore	Afloramento em lajedos de mármore, alto retroespalhamento.
P55	420045	8991252	filito/mármore	Área aberta sem vegetação, solo avermelhado com fragmentos centimétricos (2-3 cm).
P56	419275	8991099	filito calcífero	Área bastante plana, sem vegetação. Pavimento formado por fragmento de rochas (2 cm). 500m a sul ocorre afloramento de filito.
P57	419100	8994697	micaxisto	Vegetação mais densa de pequeno a médio porte.
P58	418014	8995738	micaxisto	6,5km a norte da Fazenda Humaitá.
P59	417530	8996566	micaxisto	Blocos rolados um pouco mais escassos.
P60	414531	9002149	micaxisto	Sob o linha de alta tensão. Vegetação de grande a médio porte.
P61	411786	9000285	mármore	Topografia mais ondulada. Afloramento em lajedos e solo avermelhado areno-argiloso.
P62	410955	9000717	mármore	Solo avermelhado próximo a Serra Salinas.
P63	409545	9001432	mármore	Oeste da Serra Salinas.
P64	408522	9003036	mármore	Contato entre o biotita-hornblenda gnaíse e o mármore. Sem afloramentos.
P65	410608	9003002	filito calcífero	Fazenda Salinas. Área sem vegetação, bastante plana.
P66	413002	8985167	migmatito	Fazenda Concoórdia. Solo marrom com vegetação mais esparsa.
P67	412752	9004479		Fazenda Macambira.
P68	417508	9003686	micaxisto	Drenagem a 1,5km a leste da linha de alta tensão. Drenagem seca sem fragmentos de rocha, solo argiloso com vegetação de pequeno a médio porte.
P69	418892	9003455	micaxisto	Afloramento na estrada Curuçá - Botocudo. Vegetação seca densa de pequeno a médio porte. Solo arenoso vermelho-amarelado

(continua)

Tabela A1 – (conclusão)

P70	422408	9002923	micaxisto	Vegetação de pequeno porte com forte componente vertical. Blocos milados da ordem de 4 cm de altura.
P71	415340	8977691		Fazenda Bangüê.
P72	415338	8977340	quartzofeldspato gnaisse	Próximo a Fazenda Bangüê. O pavimento é composto por fragmentos de rocha de até 3 cm. Relevo mais ondulado resultante das intercalações de filito e gnaisse. Vegetação esparsa de pequeno porte, nas drenagens vegetação verde de médio porte.
P73	415432	8976259	biotita-augen gnaisse	Cabeceira do Córrego Bangüê. Relevo ondulado com afloramento de 10m de altura.
P74	415259	8976142	biotita-augen gnaisse	Cabeceira do Córrego Bangüê.
P75	416966	8975679	piroxenitohornito-hornito	Vertissolo escuro com gretas de contração e vegetação esparsa.

APÊNDICE B

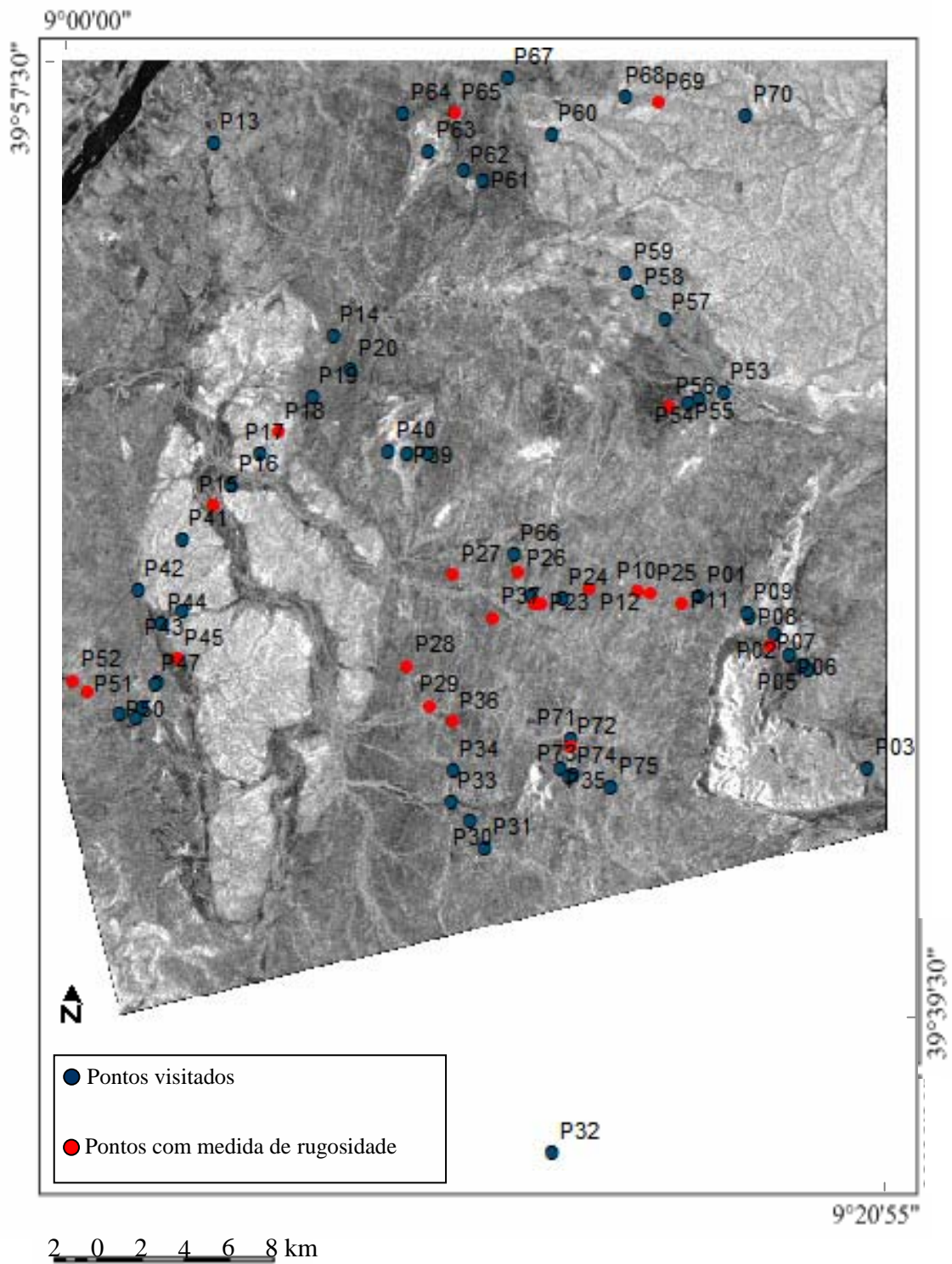


Figura B1 – Localização dos pontos de campo.

APÊNDICE C

Tabela C1 – Medidas estruturais coletadas em campo

PONTO	DIREÇÃO (DIP)	MERGULHO	TIPO
P01	240	45	foliação
P01	60	80	fratura
P05	300	30	foliação
P06	355	20	foliação
P06	330	15	foliação
P07	256	13	foliação
P08	150	35	foliação
P09	110	50	foliação
P09	310	80	fratura
P10	310	70	foliação
P11	300	75	foliação
P14	20	75	foliação
P14	18	70	foliação
P14	340	72	fratura
P14	350	85	fratura
P14	120	80	fratura
P14	118	75	fratura
P14	95	84	fratura
P14	245	81	fratura
P14	255	79	fratura
P14	278	85	fratura
P20	255	40	foliação
P20	30	80	fratura
P20	25	80	fratura
P20	90	76	fratura
P21	310	50	foliação
P21	310	60	foliação
P23	310	50	foliação
P24	310	50	foliação
P24	272	76	fratura
P24	290	79	fratura
P24	260	81	fratura
P26	30	85	fratura
P26	175	79	fratura
P26	90	75	fratura
P26	105	69	fratura
P26	85	78	fratura
P26	170	85	fratura
P26	110	75	foliação
P26	355	76	fratura
P26	110	70	fratura
P26	25	60	fratura
P26	15	70	fratura

(continua)

Tabela C1 – (conclusão)

P26	353	69	foliação
P26	10	72	fratura
P26	75	76	fratura
P27	0	0	fratura
P29	340	55	foliação
P33	170	75	fratura
P33	90	85	foliação
P47	90	55	foliação
P48	300	51	foliação
P50	230	82	fratura
P50	305	50	foliação
P53	130	65	fratura
P53	15	25	foliação
P53	60	85	fratura
P53	300	80	fratura
P54	2	28	foliação
P54	75	60	fratura
P54	330	75	fratura
P54	40	80	fratura
P55	0	45	foliação
P59	60	20	foliação
P61	20	25	foliação
P61	20	30	foliação
P61	330	80	fratura
P65	20	75	foliação
P69	80	45	foliação
P72	300	70	foliação
P72	0	80	fratura
P74	290	70	foliação
P74	320	65	fratura
P74	30	55	fratura
P75	290	80	foliação

