



Universidade Federal do Pará
Centro de Geociências
Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**“METODOLOGIA DE INTERPRETAÇÃO RADARGEOLÓGICA: EXEMPLO DA
SINÉCLISE DO PARNAÍBA E DE SEU EMBASAMENTO”.**

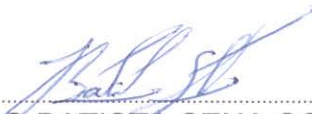
TESE APRESENTADA POR

MÁRIO IVAN CARDOSO DE LIMA

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em
Ciências na Área de GEOLOGIA

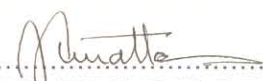
Data de Aprovação 29/ 09 / 95

Comitê de Tese:


JOÃO BATISTA SENA COSTA (Orientador)


ALBERTO PIO FIORI


LIU CHANG CHIANG


JUÉRCIO TAVARES DE MATTOS


WALDIR RENATO PARADELLA

BELÉM

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA

TESE DE DOUTORADO

METODOLOGIA DE INTERPRETAÇÃO RADARGEOLÓGICA:
EXEMPLO DA SINÉCLISE DO PARNAÍBA E DE SEU EMBASAMENTO

Autor : Mário Ivan Cardoso de Lima

Orientador: Prof. Dr. João Batista Sena Costa

VOLUME I

BELÉM

1995

SUMÁRIO

VOLUME I

p.

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	3
APRESENTAÇÃO.....	5
1- PRINCÍPIOS BÁSICOS DE RADAR DE VISADA LATERAL (RVL).....	8
1.1 - INTRODUÇÃO.....	8
1.2 -ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.....	10
1.3 BANDAS DE RADAR	16

Dedico este trabalho à "**RADAM**", Comissão Executora do Projeto **RADAM (RADAMBRASIL)**, representada pelos seus diretores, técnicos de nível superior, técnicos de nível médio e auxiliares de campo, cujo levantamento dos recursos naturais - geologia, geomorfologia, pedologia, fitoecologia e uso potencial da terra - de todo o território brasileiro, constituiu um marco importante no conhecimento das potencialidades naturais de nosso país.

Deste modo, se por um lado a metodologia **Sistemática de Elementos Radargráficos**, aqui desenvolvida, representa o *resgate* de uma experiência de pelo menos 23 anos no manuseio de imagens RVL, de outra forma a utilização da área exemplo - Sinéclise do Parnaíba e seu embasamento - coincidentemente, corresponde aos três primeiros volumes editados pelo Projeto RADAM, início de sua longa caminhada no mapeamento dos recursos naturais do território brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Consigna-se os mais sinceros agradecimentos à Fundação IBGE, representada pelo Diretor da Diretoria de Geociências (DGC), e aos chefes do Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais (DERNA) e Divisão de Geociências do Norte (DIGEO/N) pelo apoio técnico fornecido e liberação parcial de minhas atividades funcionais. Contribuições significativas são devidas às biblioteconomistas Maria Ivany Cardoso de Lima (IBGE/DIGEO/NE.1) e Heloisa Maria Meira Rössing (IBGE/DIPEQ/SDDI/PA) pela normalização da bibliografia aqui apresentada, às quais também agradece-se.

Especiais agradecimentos são endereçados ao técnicos do IBGE, geól. Jaime Franklin Vidal Araújo e biblioteconomista Maria Ivany Cardoso de Lima, pelo apoio logístico (xerox, negativos, etc) fornecido em todas as fases da presente obra, nas cidades do Rio de Janeiro e Salvador, respectivamente. De igual modo, agradece-se ao geólogo Pedro Edson Leal Bezerra (IBGE/DIGEO/N)) pelas importantes contribuições na tese como um todo, uma vez que o mesmo acompanhou *pari passu* todas suas etapas. Ao Eng. Agrônomo João Viana Araújo, agradece-se pela leitura crítica dos originais, como também ao geól. Sérgio Roberto Costa Coelho pela dedicação demonstrada na feitura do desenho do Mapa Radargeológico.

Ao Prof. Dr. João Batista Sena Costa, da UFPA, agradece-se pela orientação na condução da tese, como também pelas contribuições apresentadas, as quais, graças a sua notável experiência profissional, enriqueceram sobremaneira o seu conteúdo. Merece citação que as

análises críticas efetuadas pelo Dr. Renato Waldir Paradella (INPE), Prof. Dr. Juércio Tavares de Mattos (INPE), Dr. Liu Chan Chiang (INPE), Prof. Dr. Alberto Pio Fiori (UFPr) e Msc. Francisco Mota Bezerra da Cunha, (Petrobrás), componentes da banca do meu Exame de Qualificação, foram de capital importância para a tese como um todo.

Finalmente, agradece-se às instituições federais: UFPA (Centro de Geociências/ Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica), SUDAM e PETROBRÁS. A primeira pela oportunidade fornecida e investimento aplicado em seu ex-aluno, sob a forma de orientação e ensinamentos técnicos ; a segunda pela cessão dos equipamentos do seu Centro de Sensoriamento Remoto ; e a terceira pela participação em seu seminário de campo , pelas profícuas discussões científicas com seus técnicos e autorização de leitura de seu acervo técnico .

Ao DNPM e CPRM , agradece-se pela cessão, por empréstimo, de importantes publicações de suas bibliotecas.

Para a realização de qualquer trabalho de vulto, o espírito de equipe é essencial. Assim procedendo, conseguiremos atingir o nosso desiderato . Com essa filosofia, foi possível saldar a dívida com “*PARNAÍBA*”.

(O autor)

1.4 - SISTEMAS DE RADAR.....	16
1.4.1 -Orbitais.....	17
1.4.1.1 - Seasat.....	17
1.4.1.2 - Shuttle Imaging Radar (SIR).....	18
1.4.1.3 - Programa Europeu de Radar (ESA).....	19
1.4.1.4 - Japan Earth Resources Satélite (JERS).....	20
1.4.1.5 - Almaz.....	21
1.4.1.6 - Radarsat.....	21
1.4.2 -Equipados em Aeronaves.....	22
1.4.2.1 - Good Year Eletronic Mapping Sistem (GEMS).....	24
1.4.2.2 - Intera.....	25
1.5 - RADAR DE VISADA LATERAL.....	26
1.5.1 - Introdução.....	26
1.5.2 - Sistemas de Abertura Real (RAR) e Sintética (SAR).....	30
1.5.3 - Geometria de Radar.....	35
1.5.3.1 - Sombra de Radar.....	36
1.5.3.2 - Encurtamento de Radar.....	37
1.5.3.3 - Fantasma de Radar (“Radar Layover”).....	38
1.5.3.4 - Paralaxe de Radar.....	39
1.6 - INTERAÇÃO ENTRE ONDAS DE RADAR E SUPERFÍCIES DO TERRENO.....	43
1.6.1- Introdução.....	43

1.6.2 -Comprimento de Onda.....	45
1.6.3 -Ângulo de Incidência.....	46
1.6.4 - Ângulo de Aspecto.....	47
1.6.5 -Polarização.....	48
1.6.6 - Constante Dielétrica Complexa (Permitividade).....	50
1.6.7 -Rugosidade da Superfície.....	52
1.6.8 -Subsuperfície de Rugosidade.....	53
1.6.9 -Volume do Espalhamento.....	54
1.7 - COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS EM RELAÇÃO ÀS MICROONDAS.....	54
1.7.1 -Água.....	54
1.7.2 -Neve e Gelo.....	55
1.7.3 -Vegetação.....	57
1.7.3.1 - Floresta Ombrófila.....	59
1.7.3.2 - Floresta Estacional.....	60
1.7.3.3 - Campinarana (Campinas).....	61
1.7.3.4 - Savana (Cerrado/Campos).....	62
1.7.3.5 - Savana-Estépica.....	63
1.7.3.6 - Estepe.....	64
1.7.3.7 - Formações Pioneiras.....	65
1.7.3.8 - Vegetação de Transição (Tensão Ecológica).....	66
1.7.4 -Rochas.....	66

1.7.5 -Solos.....	67
1.8 - PRODUTOS E APLICAÇÕES.....	72
1.9 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
2- METODOLOGIA DE INTERPRETAÇÃO RADARGEOLÓGICA.....	76
2.1 - INTRODUÇÃO.....	76
2.2 - METODOLOGIA.....	80
2.3 - SISTEMÁTICA.....	85
2.4 - ESTÁDIO RECONHECIMENTO.....	90
2.4.1 -Textura Radargráfica.....	90
2.4.2 -Tom Radargráfico.....	94
2.5 - ESTÁDIO IDENTIFICAÇÃO.....	100
2.5.1 -Forma, Estrutura e Padrão.....	100
2.5.2 -Formas de Relevo.....	101
2.5.2.1 - Topo.....	102
2.5.2.2 - Pendente.....	103
2.5.2.3 - Quebra de Relevo.....	104
2.5.2.4 - Grau de Dissecação.....	104
2.5.3 - Padrão de Drenagem.....	106
2.5.4 - Morfoestrutura.....	113
2.6 - ESTÁDIO ANÁLISE.....	119
2.6.1 - Introdução.....	119

2.6.2 -Feições Planares.....	120
2.6.3 -Feições Lineares.....	122
2.6.4 -Feições Tabulares.....	124
2.7 - ESTÁDIO INTERPRETAÇÃO.....	125
2.7.1 - Introdução.....	125
2.7.2 -Interpretação Litológica.....	126
2.7.3 -Discordâncias.....	130
2.7.4 -Estruturas Circulares.....	131
2.7.5 -Descontinuidades.....	134
2.7.6 -Acamamento e foliação.....	139
2.7.7 -Lineamentos.....	141
2.7.8 -Dobras.....	142
2.7.9 -Redobramentos.....	145
2.7.10 -Sistemas Litoestruturais.....	148
2.7.11 -Interpretação Radargeológica.....	153
2.7.12 - Considerações Finais.....	155
3 - EXEMPLO PRÁTICO: SINÉCLISE DO PARNAÍBA E SEU EMBASAMENTO.....	158
3.1 - INTRODUÇÃO.....	158
3.2 - PROVÍNCIAS GEOLÓGICAS.....	165
3.2.1 - Introdução.....	165
3.2.2 - Embasamento.....	167

3.2.2.1 - Norte.....	167
3.2.2.2 - Nordeste.....	168
3.2.2.3 - És-Nordeste.....	169
3.2.2.4 - Leste.....	170
3.2.2.5-Sudeste.....	171
3.2.2.6 - Sul.....	172
3.2.2.7 -Sudoeste.....	173
3.2.2.8 - Oeste.....	174
3.2.3 - Sinéclise do Parnaíba	175
3.3 - UNIDADES RADARGEOLÓGICAS.....	180
3.3.1.- Introdução	180
3.3.2 - Descrição das Unidades	182
3.3.2.1 - Unidade M_{1a}	182
3.3.2.2 - Unidade M_{1b}	183
3.3.2.3 - Unidade M_{1c}	184
3.3.2.4 - Unidade M_{1d}	185
3.3.2.5 - Unidade MS_{1a}	186
3.3.2.6 - Unidades $MS_{1b,1c,1d}$	186
3.3.2.7 - Unidade MS_{1e}	187
3.3.2.8-Unidade $MS_{1f,1g}$	188
3.3.2.9 - Unidade v_{1a}	189

3.3.2.10 - Unidade $v_{1b,1c}$	189
3.3.2.11 - Unidade λ_1	190
3.3.2.12 - Unidade $\gamma\alpha_1$	190
3.3.2.13 - Unidade γ_1	191
3.3.2.14 - Unidade δ_1	192
3.3.2.15 - Unidades $MS_{2a,2b}$	192
3.3.2.16- Unidade $S_{1a,1b,1c,1d}$	193
3.3.2.17 - Unidades $S_{2a,2b,2c,2d,2e,2f}$	194
3.3.2.18 - Unidade γ_2	196
3.3.2.19 - Unidade ω_1	196
3.3.2.20 - Unidade β_1	197
3.3.2.21 - Unidade $S_{3a,3b}$	197
3.3.2.22 - Unidades $S_{4a,4b}$	198
3.3.2.23 - Unidade S_{5a}	199
3.3.2.24 - Unidade S_{5b}	200
3.3.2.25- Unidade S_{5c}	201
3.3.2.26 - Unidades $S_{6a,6b,6c}$	201
3.3.2.27 - Unidades $S_{7a,7b,7c}$	203
3.3.2.28 - Unidades $S_{8a,8b}$	203
3.3.2.29 - Unidades S_9	204
3.3.2.30 - Unidade S_{10}	205

3.3.2.31 - Unidade S_{11}	206
3.3.2.32 - Unidade S_{12}	206
3.3.2.33 - Unidade β_2	207
3.3.2.34 - Unidade δ_2	208
3.3.2.35 - Unidade ω_2	209
3.3.2.36 - Unidade S_{13}	209
3.3.2.37 - Unidade S_{14}	210
3.3.2.38 - Unidade S_{15}	210
3.3.2.39 - Unidade S_{16}	211
3.3.2.40 - Unidade β_3	211
3.3.2.41 - Unidade S_{17a}	211
3.3.2.42 - Unidade S_{17b}	212
3.3.2.43 - Unidades $S_{18a,18b,18c,18d}$	213
3.3.2.44 - Unidade S_{19}	213
3.3.2.45 - Unidade κ_1	214
3.3.2.46 - Unidades S_{20}	214
3.3.2.47 - Unidade S_{21}	215
3.3.2.48 - Unidade S_{22}	215
3.3.2.49 - Unidade S_{23a}	216
3.3.2.50 - Unidade S_{23b}	216
3.3.2.51 - Unidades $S_{24a,24b,24c,24d,24e,24f}$	217

3.4 - ARCABOUÇO ESTRUTURAL.....	218
3.4.1 - Introdução	218
3.4.2 - Embasamento	219
3.4.2.1 - Norte.....	219
3.4.2.2 - Nordeste.....	220
3.4.2.3 - És-Nordeste.....	221
3.4.2.4 - Leste.....	221
3.4.2.5 - Sudeste.....	222
3.4.2.6 - Sul.....	222
3.4.2.7 - Sudoeste.....	223
3.4.2.8 - Oeste.....	224
3.4.3 - Cobertura	225
3.4.3.1 - Parnaíba.....	225
3.4.3.1.1 - Estruturas Regionais.....	227
a- Arco do Tocantins.....	227
b- Arco Ferrer-Urbano Santos.....	228
c - Arco Xambioá-Teresina.....	228
d - Lineamento Rio Uraim.....	229
e - Lineamento Jacundá-Santa Helena.....	230
f - Lineamento Pio XII.....	230
g - Lineamento Pirapemas.....	231

h - Lineamento Tianguá-Carolina.....	232
i - Lineamento Transbrasiliano.....	233
j - Lineamentos Floriano, Itaueiras e São Inácio do Piauí.....	236
l - Lineamento Senador Pompeu.....	236
m - Lineamento Piripiri.....	237
n - Lineamento Riacho do Mel.....	237
o - Lineamento Picos-Santa Inês.....	238
p - Lineamento São Félix do Piauí.....	239
q - Lineamento Alto Rio Moju.....	240
r - Lineamento Rio Vermelho.....	240
3.4.3.1.2. - Estruturas Locais.....	242
a - Antiforma do Rio Capim.....	242
b - Domo do Igarapé Cupijó.....	242
c - Morfoestruturas da Região de Pedro II- G. do Norte.....	243
d - Morfoestruturas da Região de Teresina-José de Freitas.....	243
e- Morfoestruturas da Região de Parnarama.....	244
f - Morfoestrutura da Região de Presidente Dutra.....	244
g - Antiforma de Barra do Corda.....	245
h - Estrutura Circular de São Miguel do Tapuio.....	245
i - Morfoestruturas da Região da Serra das Alpercatas.....	246
j - Antiforma de Loreto.....	246

l - Morfoestruturas da Região de Fortaleza dos Nogueiras.....	247
m - Morfoestruturas de Carolina.....	247
n - Estrutura Circular de Riachão.....	247
o - Estrutura Circular do Igarapé Macapá.....	248
p - Morfoestruturas da Região de Amarante.....	248
q - Morfoestrutura da Região do rio Canindé.....	249
r - Estrutura Circular de Picos.....	249
s - Morfoestrutura do Uíca.....	250
t - Morfoestruturas da região de Balsas.....	250
u - Estrutura Circular da Serra da Cangalha.....	251
v - Antiforma de Itacajá.....	252
x - Graben de Guaraí.....	252
z - Estrutura Circular da Serra da Boa Vista.....	253
aa - Antiforma da Serra de Bom Jesus de Gurgéia.....	253
bb - Estrutura Circular de Santa Marta.....	253
cc - Domo da Serra do Lajeado.....	254
dd - Estrutura Circular do Rio Lajeado.....	254
ee - Estrutura Circular do Rio Monte Santo.....	254
ff - Estrutura Dômica de Palmeirante.....	254
gg - Estrutura Circular de Miranorte.....	255
3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	255

4 -CONCLUSÕES.....	257
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	263

VOLUME II

FIGURAS

1.1 - Ondas Eletromagnéticas.....	284
1.2 - Espectro Eletromagnético.....	285
1.3 - Parâmetros do Sistema RVL.....	286
1.4 - Tempo e Amplitude de Sinal da Reflexão no Sistema RVL.....	286
1.5 - Tipos de Reflexão.....	287
1.6 - Refletor de Canto. Região do Além São Francisco. Folha SD.23-X-C.....	288
1.7 - Relação entre Alcance no Terreno e Alcance Oblíquo.....	289
1.8 - Rede Quadrada, Apresentação do Alcance no Terreno (AT).....	289
1.9 - Rede Quadrada, Distorção pela Apresentação do Alcance Oblíquo (AO).....	290
1.10 - Resolução Longitudinal.....	290
1.11 - Resolução Transversal.....	290
1.12 - Princípio do Sistema RVL de Abertura Real (RAR).....	291
1.13 - Princípio do Sistema RVL de Abertura Sintética (SAR).....	292
1.14 - Comparação entre Resoluções de Antenas de Aberturas Sintética (SAR) e Real (RAR).....	293
1.15 - Princípios da Formação de Imagens em Antena de Abertura Sintética.....	293
1.16 - Relação entre o Ângulo de Depressão e o Comprimento da Sombra de Radar.....	294

1.17 - "Layover", Normal e Encurtamento.....	294
1.18 - Sombra de Radar, Encurtamento de Radar e 'Grazing'. Região da Serra da Providência (RO). Folha SC.20-Z-A.....	295
1.19 - Sombra de Radar e Encurtamento de Radar. Serra do Imeri (Pico da Neblina) (AM). Limite Brasil/Venezuela. Folha NA.19-Z-D.....	296
1.20 - Sombra de Radar, Encurtamento de Radar e "Layover" (?). Região da Serra do Caparaó (MG/ES). Folha SF.24-V-A.....	297
1.21 - Variação na Inclinação da Topografia e Efeitos do Ângulo de Incidência.....	298
1.22 - Relação de Variação entre o Ângulo de Depressão e o Ângulo de Incidência.....	298
1.23 - Paralaxe de Radar.....	298
1.24 - Ângulo de Depressão versus Ângulo da Pendente não Voltada para a Antena.....	299
1.25 - Sombra versus Altura do Morro para Ângulos de Depressão Idênticos.....	299
1.26 - Relação Geométrica para a Determinação de Desníveis (h) em Imagem RVL.....	300
1.27 - Gráfico para Medida de Altura Relativa em Imagem de Radar.....	301
1.28 - As Influências da Rugosidade e Ângulo de Incidência no Coeficiente de Retroespalhamento de Radar.....	302
1.29 - Relação entre a Constante Dielétrica Complexa da Água e o Comprimento de Onda.....	303
1.30 - Esquema do Imageamento RVL.....	304
1.31 - Feições Antrópicas. Região de Brasília -DF. Folha SD.23.Y-C.....	305
1.32 - Zoneamento das Regiões Brasileiras à Interpretação Radargeológica.....	306
2.1 - Estádios da Interpretação Radargeológica.....	307
2.2 - Ilusões de Ótica.....	308

2.3 - Metodologia da Interpretação Radargeológica.....	309
2.4 - Sistemática da Interpretação Radargeológica.....	310
2.5 - Súmula da Interpretação Radargeológica.....	311
2.6 - Redobramentos em Metassedimentos de Baixo Grau Metamórfico. Região de Rio Pardo de Minas (MG). Folha SD.23-Z-D.....	312
2.7 - Redobramentos em Metassedimentos de Baixo Grau Metamórfico Folha SD.23-Z-D.....	313
2.8 - Textura/Tom (Estádio Reconhecimento).....	314
2.9 - Drenagem/Formas de Relevo (Estádio Identificação).....	314
2.10 - Feições Planares, Lineares e Tabulares (Estádio Análise).....	315
2.11 - Interpretação Geológica (Estádio Interpretação).....	315
2.12 - Área Modelo. Região de Pedra Azul (MG/BA). Folha SD.24-Y-C.....	316
2.13 - Feições Antrópicas. Folha SD.24-Y-C.....	317
2.14 - Exemplos de Texturas Radargráficas de Relevo.....	318
2.15 - Células Texturais versus Texturas.....	319
2.16 - Textura/Tom. Folha SD.24-Y-C.....	320
2.17 - Comprimentos de Onda e sua Penetração na Cobertura Vegetal.....	321
2.18 - Tom em Terreno Plano. Norte do Rio Tacutu (RR). Folha NA.20-X-B.....	321
2.19 - Tom em Terreno Plano. Região da Foz do Rio Parnaíba (PI/MA). Folha SA.24-Y-A.....	322
2.20 - Retroespalhamento versus Vegetação (Banda X).....	323
2.21 - Configuração de Topo-Pendente (Perfil) em RVL.....	323
2.22 - Configurações de Topo e Pendente.....	324

2.23 - Exemplos de Grau de Dissecção de uma região no centro-sul do Pará. Folha SB.22-X-C.....	325
2.24 - Exemplos de Grau de Dissecção de uma região no centro-leste da Bahia. Folha SD.24-V-- D.....	326
2.25 - Formas de Relevo. Folha SD.24-Y-C.....	327
2.26 - Padrões de Drenagem Básicos.....	328
2.27 - Padrões de Drenagem Básicos Modificados.....	329
2.28 - Padrões de Drenagem Básicos Modificados.....	330
2.29 - Padrão de Drenagem Dendrítico. Folha SC.23-Y-A.....	331
2.30 - Padrão de Drenagem Anastomótico. Folha SE.21-V-B.....	331
2.31 - Padrão de Drenagem Paralelo. Folha SE.24-V-B.....	332
2.32 - Padrão de Drenagem Treliça. Folha SD.23-Z-D.....	332
2.33 - Padrões de Drenagem Treliça e Retangular. Folha SF.23-Z-A.....	333
2.34 - Padrões de Drenagem Distributário e Retangular. Folha NA.19-Z-D.....	333
2.35 - Padrão de Drenagem Multibasinal. Folha SD.23-X-D.....	334
2.36 - Padrão de Drenagem Retangular. Folha SD.23-Y-B.....	334
2.37 - Padrão de Drenagem Anelar. Folha SB.24-V-C.....	335
2.38 - Padrão de Drenagem Dendrítico. Folha SC.23-Y-A.....	336
2.39 - Padrão de Drenagem Anastomótico. Folha SE.21-V-B.....	336
2.40 - Padrão de Drenagem Paralelo. Folha SE.24-V-B.....	336
2.41 - Padrão de Drenagem Treliça. Folha SD.23-Z-D.....	337
2.42 - Padrões de Drenagem Treliça e Retangular. Folha SF.23-Z-A.....	337

2.43 - Padrões de Drenagem Distributário e Retangular. Folha NA.19-Z-D.....	337
2.44 - Padrão de Drenagem Multibasinal. Folha SD.23-X-D.....	338
2.45 - Padrão de Drenagem Retangular. Folha SD.23-Y-B.....	338
2.46 - Padrão de Drenagem Anelar. Folha SD.23-V-C.....	338
2.47 - Propriedades da Rede de Drenagem.....	339
2.48 - Rios quanto à Estrutura Geológica.....	340
2.49 - Padrões de Drenagem. Folha SD.24-Y-C.....	341
2.50 - Análise da Forma dos Elementos de Drenagem.....	342
2.51 - Estruturação da Forma dos Elementos de Drenagem.....	343
2.52 - Anomalia de Drenagem do São Tomé (PA). Folha SC.21-V-B.....	344
2.53 - Anomalia de Drenagem do Erepecu (PA). Folha SB.21-X-C.....	345
2.54 - Anomalia de Drenagem. Região do Lago Erepecu (PA). Folha SB.21-X-C.....	345
2.55 - Anomalia de Drenagem do Uíca (PI). Folha SB.23-Z-D.....	346
2.56 - Expressão Topográfica de um Estrato.....	346
2.57 - Regra dos "UV's"	347
2.58 - Bloco Diagrama Ilustrando a Regra dos V's em Estruturas Planares ("cuesta").....	347
2.59 - Regra dos "V's" em Estratos Inclinação.....	348
2.60 - Regra dos V's em Camadas Horizontais, Verticais e Inclinação em Relação a Curvas de Nível.....	349
2.61 - "Cuesta". Folha SD.23-Z-B.....	350
2.62 - "Hog Back". Folha SD.23-X-B.....	350
2.63 - Feições Planares Secundárias. Folha SD.23-Y-C.....	350

2.64 - Feições Planares ("Cuesta"). Folha SD.23-Z-B.....	351
2.65 - Feições Planares ("Hog Back"). Folha SD.23-X-B.....	351
2.66 - Feições Planares Secundárias. Folha SD.23-Y-C.....	351
2.67 - Feições Lineares Curvilíneas e Planares. Folha SD.21-Z-B.....	352
2.68 - Feições Lineares Curvi-Retilíneas e Planares. Folha SD.23-X-D.....	352
2.69 - Feições Lineares Positivas Retilíneas. Folha SF.23-X-D.....	352
2.70 - Feições Lineares Positivas e Planares Curvilíneas. Folha SD.21-Z-B.....	353
2.71 - Feições Lineares Positivas e Planares Curvi-Retilíneas. Folha SD.23-X-D.....	353
2.72 - Feições Lineares Positivas Retilíneas. Folha SF.23-X-D.....	353
2.73 - Feições Lineares Negativas. Região de Aracruz (ES). Folha SE.24-Y-D.....	354
2.74 - Feições Lineares Negativas e Planares. Folha SE.24-Y-A.....	355
2.75 - Feições Lineares Negativas (Retilínea e Elíptica). Folha SE.24-Y-D.....	356
2.76 - Feições Lineares Negativas e Planares. Folha SE.24-Y-A.....	357
2.77 - Terrenos de Alto Grau Metamórfico. Região de Nova Vida (RO). Folha SC.20-Z-A.....	358
2.78 - Técnica dos Polígonos. Redobramentos em Sequências Metamórficas de Alto Grau. Modelo Tipo Laço. Folha SC.20Z-A.....	359
2.79 - Feições Tabulares de Topo Agudo. Folha SA.22-V-D.....	360
2.80 - Feições Tabulares de Topo Convexo. Folha NA.22-V-D.....	360
2.81 - Feições Tabulares de Topo Agudo. Folha SE.23-Z-C.....	360
2.82 - Feições Tabulares. (Zonas de Silicificação). Folha SA.22-V-D.....	361
2.83 - Feições Tabulares. (Diques Básicos). Folha NA.22-V-D.....	361
2.84 - Feições Tabulares. (Diques Ácidos). Folha SE.23-Z-C.....	361

2.85 - Feições Planares, Lineares e Tabulares. Folha SD.24-Y-C.....	362
2.86 - Plutônicas e Vulcânicas Ácidas. Interflúvio Mapuera-Cachorro (PA). Folha SA.21-V-B.....	363
2.87 - Plutônicas Ácidas e Básicas, e Vulcânicas Ácidas. Santa Angélica (ES). Folha SA.21-V-B.....	363
2.88 - Plutônica Ácida e Metassedimentos. Morro da Cara Suja (BA). Folha SD.23-X-D.....	363
2.89 - Vulcânicas Básicas e Psamitos. Serra de Tapirapuã (MT). Folha SD.21-Z-A.....	364
2.90 - Psamitos e Pelitos. Alto Rio Erepecuru (PA). Folha SA.21-X-C.....	364
2.91 - Carbonatos. Região de Sete Lagoas (MG). Folha SE.23-Z-C.....	365
2.92 - Granulitos e Quartzitos. Região de Irajuba (BA). Folha SD.24-V-D.....	365
2.93 - Quartzitos e Gnaisses. Serra de Boritirama (PA).Folha SB.22-X-C.....	366
2.94 - Quartzitos, Xistos e Gnaisses. Região de Belo Horizonte (MG). Folha SE.23-Z-C.....	366
2.95 - Os Quatro Tipos de Discordância.....	367
2.96 - Discordância Erosiva. Lago de Erepecu (PA). Folha SA.21-X-C.....	368
2.97 - Discordância Angular. Leste de Juiz de Fora (MG). Folha SF.23-X-D.....	368
2.98 - Discordância Angular e Erosiva. Nordeste do Rio Jari (AP). Folha SA.21-V-B.....	368
2.99 - Discordância Erosiva. Folha SA.21-X-C.....	369
2.100 - Discordância Angular. Folha SF.23-X-D.....	369
2.101 - Discordância Angular e Erosiva.....	370
2.102 - Astroblema. Serra da Cangalha (TO). Folha SB.23-V-A.....	370
2.103 - Estrutura Circular. Morro dos Seis Lagos (AM). Folha NA.19-Z-D.....	371
2.104 - Estrutura Circular. Região de Santa Angélica (ES). Folha SF.24-V-A.....	371

2.105 - Estrutura Circular. (Astroblema). Folha SC.23-V-A.....	372
2.106 - Estruturas Circulares: Alcalina e Básica. Folha NA-19-Z-D.....	372
2.107 - Estrutura Circular. Corpo Ígneo em Oito: Básica e Ácida. Folha SF.24-V-A.....	372
2.108 - Comportamento dos Corpos em um Diagrama P-T.....	373
2.109 - Relação dos Níveis Estruturais em um Diagrama P-T.....	373
2.110 - Mecanismos de Deformação.....	374
2.111 - Níveis Estruturais.....	375
2.112 - Classificação Descritiva de Fraturas.....	376
2.113 - Falhas quanto ao Movimento Relativo.....	376
2.114 - Falha de Empurrão de Alto Ângulo. Serra do Espinhaço (MG). Folha SD.23-Z-D.....	377
2.115 - Falha de Empurrão de Alto Ângulo. Folha SD.23-Z-D.....	378
2.116 - Elementos Geométricos de uma Dobra.....	379
2.117 - Dobras sem Caimento.....	379
2.118 - Dobras com Caimento.....	379
2.119 - Estruturas Dobradas em Metassedimentos de Baixo Grau. Serra do Tira Sentido (MT). Folha SD.21-Z-A.....	380
2.120 - Estruturas Dobradas em Metassedimentos de Baixo Grau. Folha SD.21-Z-A.....	381
2.121 - Estruturas Dobradas. Região de Cáceres (MT). Folha SE.21-V-B.....	382
2.122 - Estruturas Dobradas em Metassedimentos de Baixo Grau. Folha SE.21-V-B.....	383
2.123 - Padrões de Interferência de Dobras.....	384
2.124 - Redobramentos. Região da Chapada dos Veadeiros (GO). SD.23-Y-A.....	385
2.125 - Redobramentos em Metassedimentos de Baixo Grau. Folha SD.23-Y-A.....	386

2.126 - Falha de Empurrão de Alto Ângulo. Serra da Providência (RO). Folha SC.20-Z-A.....	387
2.127 - Falha de Empurrão de Alto Ângulo. Folha SC.20-Z-A.....	388
2.128 - Falha de Deslocamento Horizontal. Serra do Padre (AM). Folha NA.21-Z-D.....	389
2.129 - Falha de Deslocamento Horizontal em Sedimentos. Folha NA.21-Z-D.....	389
2.130 - Interpretação Radargeológica. Folha SD.24-Y-C.....	390
3.1 - Localização da Área Exemplo.....	391
3.2 - Arcabouço Tectono-Estrutural da Sinéclise do Parnaíba e de seu Embasamento.....	392
3.3 - Províncias Geológicas.....	393
3.4 - Quadro das Unidades Radargeológicas.....	394
3.5 - Zona de Cisalhamento. Região de Fronteiras (CE). Folha SB.24-Y-C.....	395
3.6 - Pseudo-estruturas circulares. Médio rio Turiaçu (MA). Folha SA.23-Y-B.....	395
3.7 - Diagramas de Roseta das Feições Lineares Negativas dos Domínios Estruturais.....	396
3.8 - Zona de Cisalhamento. Região do Médio rio Gurupi (PA/MA). Folha SA.23-Y-B.....	400
3.9 - Interseção de Cinturões de Cisalhamento. Serra da Tabatinga. Norte da Bahia. Folha SC.23-Z-A.....	401
3.10 - Estrutura em Flor (?). Serra da Natividade (GO). Folha SC.23-Y-C.....	402
3.11 - Indícios de Atividade Neotectônica . Região de Presidente Vargas-Urbano Santos (MA). Folha SA.23-Z-C.....	403
3.12 - Lineamento Tianguá-Carolina. Leste de Carolina (MA).....	403
3.13 - Lineamento Tianguá-Carolina. Serra das Alpercatas (MA). Folha SB.23-Y-B.....	404
3.14 - Lineamento Altos. Serra de São Pedro (PI). Folha SB.23-X-D.....	404
3.15 - Lineamento Altos . Oeste da serra de São Pedro (MA). Folha SB.23-X-D.....	405

3.16 - Lineamento Transbrasiliano. Amarante (PI). Folha SB.23-Z-B.....	405
3.17 - Morfoestrutura do rio Canindé. Médio Rio Canindé (PI). Folha SB.23-Z-B.....	406
3.18 - Morfoestruturas da região de Teresina-José de Freitas (PI). Folha SB.23-X-B.....	406
3.19 - Falha de Balsas. Serra do Gado Bravo. Sul de Balsas. Folha SB.23-Y-D.....	407

TABELAS

1.1 - Bandas de Radar.....	408
1.2 - Características dos Sistemas RVL.....	409
1.3 - Modos de SAR (RADARSAT).....	410
1.4 - Superfície de Rugosidade Relativa ao Comprimento de Onda Derivada do Critério Rayleigh.....	411
1.5 - Esquema de Classificação da Vegetação Brasileira.....	412
1.6 - Classificação de Solos.....	413
2.1 - Convenções Utilizadas na Interpretação de Feições Antrópicas.....	414
2.2 - Convenções Utilizadas na Interpretação da Textura/Tom.....	415
2.3 - Índices de Dissecção.....	416
2.4 - Convenções e Abreviaturas Utilizadas na Interpretação das Formas de Relevo.....	417
2.5 - Análise da Drenagem na Interpretação Geológica.....	418
2.6 - Convenções e Abreviaturas Utilizadas na Interpretação da Drenagem.....	420
2.7 - Convenções Utilizadas na Interpretação Estrutural.....	421
2.8 - Convenções e Abreviaturas Utilizadas na Interpretação Litológica.....	422

2.9 - Critérios para Identificação de Litotipos.....	423
2.10 - Identificação de Rochas Ígneas.....	424
2.11 - Identificação de Rochas Sedimentares.....	425
2.12 - Identificação de Rochas Metamórficas.....	426

ANEXOS

Anexo A - -Mapa Radargeológico da Sinéclise do Parnaíba e de seu Embasamento (Inclui seção geológica AA'). Escala 1: 1 000 000

Anexo B - Domínios Estruturais da Sinéclise do Parnaíba e de seu Embasamento. NE do Brasil .
Escala 1 : 2 000 000.

RESUMO

Desenvolve-se nesta tese o Método Sistemática de Elementos Radargráficos, inédito em termos mundiais, na interpretação geológica em imagens de Radar de Visada Lateral (Radargeologia), uma técnica de grande relevância no campo dos recursos naturais, tendo em vista ser a década de 90, a **década do Radar**.

O Método Sistemática de Elementos Radargráficos (SER) revela de forma *sistemática* o roteiro metodológico adotado, quer através do texto, quer através de Figuras esquemáticas ou em imagens Radar de Visada Lateral (RVL), os elementos radargráficos (feições), auferidos em cinco diferentes estádios (etapas): Leitura, Reconhecimento, Identificação, Análise e Interpretação (*stricto sensu*).

O Estádio **Leitura** visa **lêr** o significado dos elementos de imagem no terreno, objetivando entender seu significado; o **Reconhecimento** procura agrupá-los de acordo com a textura e tom radargráficos, a fim de obter zonas radargráficas homogêneas; o **Identificação** visa o estudo das formas de relevo em tais zonas, no que concerne a topo e pendente, como também o estudo dos padrões de drenagem, grau de dissecação e resistência à erosão; e o **Análise** estabelece as relações espacial e temporal das formas de relevo pesquisadas, através das feições lineares, planares e tabulares. De posse de tais informações, atinge-se o Estádio **Interpretação**, propriamente dito, no qual é possível a definição de litologias, estruturas circulares, descontinuidades, dobras e suas inter-relações, objetivando a execução do Mapa Radargeológico. Com efeito, selecionou-se uma área modelo para servir de paradigma aos diferentes estádios metodológicos acima reportados.

Como um exemplo da aplicação do “Método Sistemática de Elementos Radargráficos”, utilizou-se a região abrangida pela Sinéclise do Parnaíba e seu embasamento, com uma área em torno de 925 000 km², envolvendo principalmente os estados do Maranhão e Piauí, dispostos na região nordeste ocidental do território brasileiro. Tal exemplo visa enfatizar a aplicabilidade do sensoriamento remoto em terrenos sedimentares e seu embasamento metamórfico, haja vista a importância acadêmica e econômica que a mesma se reveste. Para a realização desta etapa utilizaram-se 52 mosaicos de imagem de Radar de Visada Lateral, escala 1:250 000, GEMS, banda X, resultando na definição de 39 unidades radargeológicas principais, com posicionamento temporal relativo, e 19 estruturas regionais e 30 locais, em que mais da metade são inéditas. Tais resultados estão expressos em texto explicativo e ilustrações, dentre os quais um Mapa Radargeológico na escala ao milionésimo, e um esboço estrutural na escala 1:2 000 000.

Conclui-se pela potencialidades das imagens de Radar de Visada Lateral em mapeamentos geológicos, cujas dificuldades na definição dos elementos radargráficos (feições), devido principalmente a extensas sombras, encurtamento de pendentes, “layover” e efeitos paralaxe serão superados em Sistemas de Radar mais sofisticados (modo digital, estereoscopia, multifrequência, diferentes ângulos de incidência, etc), a exemplo do SIR-C e RADARSAT . Finalmente, atestou-se a excelência do **Método Sistemática de Elementos Radargráficos**, em vista dos resultados alcançados no estudo da Sinéclise do Parnaíba e de seu embasamento, como seja: definição de unidades radargeológicas, as quais guardam estreita relação com as unidades litoestratigráficas já descritas na literatura; arcabouço estrutural com identificação de quase meia centena de morfoestruturas de caráter regional e local, em sua maioria inéditas ; e perfeita correlação com mapas aeromagnéticos.

ABSTRACT

This thesis develops the **Radargraphic Elements Sistematic** method, unknown throughout the world, in the geologic interpretation with Side-Looking Radar (Radargeology), a technique of major relevance in the field of natural resources, considering that the 1990s are the **Radar's decade**.

The **Radargraphic Elements Sistematic** (SER) method reveals in a **sistematic** form the methodological route adopted, be it through the text, through schematic figures, or in Side-Looking Radar (SLR), with the radargraphic elements (features), ordered in five different stages: Reading, Recognizing, Identifying, Analysis and Interpretation (*stricto sensu*).

The stage **Reading** seeks to understand the meaning of the image elements in the terrain, with the goal of understanding their meaning; the **Recognizing** stages seek to group them according to the texture and tone radargraphic, so as to obtain homogeneous radargraphic zones; **Identification** seeks to study the relief forms in such zones, with regard to top and pending, as well as the studying of the drainage patterns, dissection degree and erosion resistance; and the **Analysis** establishes the spacial and temporal relation of the relief forms researched through linear, planar and tabular features. With such information in hand, the **Interpretation** stage itself is reached, in which it is possible to define lithologies, rounded structures, unconformities, discontinuities, folds and their interrelations, with a view to executing the Radargeological Map. In effect, a model area was selected to serve as a paradigm for the different methodological stages.

To apply the **Radargraphic Elements Sistematic** method, the region encompassed by Parnaíba Sineclyse and its embasement was selected, with an area of around 925 000 km²

,involving mostly Maranhão e Piauí states, located in northeastern region of Brazil. Such an example seeks to emphasize the applicability of the remote sensing in sedimentary terrains and their metamorphic basement, due to academic and economic importance involved.. To carry out this stage, 52 SLR images mosaics were utilized, scale, 1: 250 000, GEMS, X band, resulting in the definition of 39 basic radiogeological units, with a temporal stratigraphy, and 19 regional structures and 30 local ones, of which more than half were unpublished. These results are expressed in an explanatory text with illustrations, including a Radiogeological Map on the millionth scale, and a structural sketch on the scale of 1:2 000 000.

The study reaches a favorable conclusion regarding the potentialities of SLR images in geological whose difficulties in defining the radiographic elements (features) due mainly to extensive shadows, foreshortening, layover and parallax effects, will be overcome with the use of more sophisticated Radar Systems (digital mode, stereoscopy, multifrequency, different angles of incidence,etc), as is the case with SIR-C and RADARSAT. Finally, the study attests of the excellence of **Radiographic Elements Systematic** method considering the results achieved with the study of the Paraíba Sineclyse and its basement, such as: definition of radiogeological units, which maintain a strict relation with the lithostratigraphic units already described in the literature; structural setting with the identification of almost 50 morphostructures of regional and local character, and a perfect correlation with aeromagnetic maps.

APRESENTAÇÃO

O embrião da presente pesquisa surgiu em 1978, quando houve o gentil convite do diretor do Instituto de Geociências da UFMG, por indicação do notável geomorfólogo Getúlio Vargas Barbosa (falecido), para que fosse ministrado um curso de interpretação geológica em imagens de radar aos docentes de geografia e geologia, como parte do Programa "Uso de Sensores Remotos em Recursos Naturais", deste instituto. Posteriormente, prestou-se cursos em várias instituições brasileiras representadas por universidades (UFPA, UFBA, UFOP e UFRJ), RADAMBRASIL (Salvador e Natal), Departamento Nacional da Produção Mineral (Belém e Fortaleza), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Belém e Manaus), Sociedade Brasileira de Geologia (Belém e Salvador), Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Rio de Janeiro e Salvador) e Escola de Informação do Exército (Salvador).

Como consequência natural dessa pesquisa vários trabalhos foram publicados, cuja coletânea resultou em um livro intitulado **Introdução à Interpretação Radargeológica (LIMA, 1995)**, o qual foi concluído em fevereiro de 1991, contudo somente agora editado pelo IBGE, retratando essa experiência, e no qual se baseiam os capítulos 1 e 2 desta tese.

De qualquer sorte já se labutava em imagens de Radar desde 1972, no entanto baseado em princípios da fotogeologia (fotografias aéreas), uma vez que inexistiam compêndios especializados sobre o assunto. Por conseguinte, os procedimentos metodológicos referentes à interpretação geológica em imagens de Radar (radargeologia) aqui apresentados e discutidos, retratam uma experiência de cerca de vinte e três anos, adquirida no decurso do desenvolvimento do então Projeto RADAMBRASIL (RADAM), extinto em 4 de março de 1986, e posteriormente

continuada no IBGE. Deste modo as imagens RVL aqui utilizadas, GEMS-Banda X, com recobrimentos em dois períodos, 1971/1972 e 1975/1976, são as mesmas que foram estudadas pelo referido projeto.

O neologismo radargeológico aqui adotado constitui uma tradução do termo inglês "radargeological" primeiramente utilizado por MEKEL (1972), a fim de definir a interpretação geológica baseada em imagens de Radar de Visada Lateral (RVL). Em tempo, LIMA (1978b) já utilizou o citado termo, ao passo que LIU & RODRIGUES (1986) se referem a "radargeologia".

O objetivo desta tese é desenvolver a Metodologia Sistemática de Elementos Radargráficos, inédita em termos mundiais, na interpretação geológica em imagens de Radar. A mesma foi edificada em imagem de Radar de Visada Lateral (RVL) do sistema GEMS, banda X, contudo perfeitamente adaptável a outros sistemas, relativos às bandas K, C, L e S.

A presente pesquisa deve interessar principalmente a geólogos e geomorfólogos, em vista do seu conteúdo técnico-científico. No entanto, especialistas em pedologia, fitoecologia ou cartografia poderão auferir muitas informações da mesma, em especial àquelas relativas ao capítulo 1. Acredita-se que o presente compêndio terá seu grande campo de aplicação nas universidades, por conta de seu caráter introdutório e essencialmente didático.

Divide-se esta obra em cinco capítulos. No Capítulo 1 - Princípios Básicos de Radar de Visada Lateral - procura-se mostrar os principais parâmetros que devem ser observados, quando da leitura da imagem de Radar de Visada Lateral. O Capítulo 2 constitui o âmago do trabalho, revelando de forma sistemática, o **Método Sistemática de Elementos Radargráficos**, quer através do texto, quer através de ilustrações. O Capítulo 3 é uma aplicação do capítulo anterior, para o qual se utilizou como base a região abrangida pela Sinéclise do Parnaíba e de seu

embasamento, dispostos na porção Nordeste Ocidental do território brasileiro .O Capítulo 4 encerra as principais conclusões da tese como um todo e o Capítulo 5 mostra a bibliografia consultada.

A utilização da Sinéclise do Parnaíba e de seu embasamento como aplicação prática da metodologia aqui exposta, visa tão somente enfatizar a aplicabilidade do **Método Sistemática de Elementos Radargráficos** em terrenos sedimentares e seu embasamento, haja vista a importância acadêmica e econômica que a mesma se reveste, em especial na prospecção de bens minerais como petróleo, gás natural, carvão, urânio, pedras preciosas e ouro, dentre outros, como também na localização de diatremas alcalinos e kimberlíticos. Constitui , em verdade, em mais uma experiência na integração e interação de bacias sedimentares com o seu embasamento .

1 - PRINCÍPIOS BÁSICOS DE RADAR DE VISADA LATERAL (RVL)

1.1 -INTRODUÇÃO

Adjudica-se o princípio de Radar ao norte-americano Hugo Gernsback, em 1911. No entanto, somente em 1934 o mesmo foi acoplado a um navio por Pierre David, e um ano após, em 1935, Maurice Ponte e Henri Gerthon o instalaram a bordo de um avião, tendo como objetivo primacial a navegação. Para fins militares, no entanto, o privilégio deve-se a Robert Watson-Watt, cujas experiências foram concluídas em 1939. No decorrer da II Guerra Mundial o mesmo equipou a Inglaterra com eficiente rede de Radar.

O termo "RADAR" é um anagrama derivado das iniciais da expressão inglesa "Rádio Detecting And Ranging", que significa: detectar e medir distâncias através de ondas de rádio.

A partir da década de 60 os geocientistas procuraram aplicar os princípios de Radar ("Plan Position Indicators") para fins de levantamento de recursos naturais. A grande vantagem do sensor Radar é que o mesmo independe da cobertura de nuvens. Pelo fato de ser um sensor ativo, não depende da luz solar e, conseqüentemente, pode ser usado a noite, o que diminui sobremaneira o período de tempo do aerolevanteamento, a exemplo do que ocorreu em território brasileiro na cobertura efetuada pela Aero Service/Cruzeiro do Sul-LASA.

O primeiro projeto de larga escala para levantamento geológico foi realizado em 1968, na província de Darien (Panamá), Projeto RAMP, em uma área com cerca de 20.000 km², em vista da impossibilidade de aquisição de fotos aéreas verticais, devido a constante cobertura de nuvens, aliado à presença de densa floresta ombrófila densa e espesso manto de intemperismo,

fatores que dificultam sobretudo a interpretação fotogeológica. Tal levantamento foi realizado pela Westinghouse Electric Corporation em cooperação com a Raytheon Company, empregando um sistema de Radar de Abertura Real (RAR). Outros trabalhos de relevância foram também realizados na América do Sul, em especial na região Amazônica, pela Grumman Ecosystems, com um sistema de Radar desenvolvido pela Motorola Inc e Good Year/Aero Service. Esta realizou o levantamento de todo o território brasileiro, com a primeira fase em 1972 (Projeto RADAM) e posteriormente em 1976, na complementação do restante do Brasil (Projeto RADAMBRASIL). De igual modo, cobriu em 1972 a Amazônia Venezuelana, a Amazônia Colombiana em 1978 e a Amazônia Equatoriana e parte andina em 1983.

No continente africano merece citação a cobertura de Radar-SAR (X e K) realizado na Nigéria (NIRAD), na década de 80, objetivando o levantamento de recursos naturais de seu território. De igual modo no sudeste asiático e América Central, vários projetos de pequena escala também foram realizados na década de 80.

Desde o final da década de 70 até o presente momento, uma série de programas de Sistemas de Radar foi executado ou está em avançado estágio de desenvolvimento: SEASAT; SIR-A, SIR-B, SIR-C e EOS (EUA); ERS-1 e ERS-2 (Europa); JERS-1 e JERS-2 (Japão), ALMAZ (Rússia) e RADARSAT (Canadá). Deste modo, os princípios básicos aqui reportados visam construir um alicerce, a fim de possibilitar ao intérprete um melhor entendimento deste sensor na sua aplicação aos princípios geológicos. Sabe-se que todo o território brasileiro encontra-se coberto por imagens de Radar da GEMS, banda X, escala original de 1:400.000, que serviram de base para os levantamentos de recursos naturais efetuados pelo Projeto RADAMBRASIL (RADAM), no período de 1971-1986. Por conseguinte, o presente trabalho se

baseia essencialmente neste sistema de radar, ressaltando-se que os princípios aqui considerados são válidos para outros sistemas, devendo-se, no entanto, guardar as devidas características geométricas de imageamento e atributos físicos de cada sistema sensor (Radar de Visada Lateral - RVL).

Os itens seguintes visam fornecer alguns conceitos básicos sobre ondas eletromagnéticas, com o intuito de se entender melhor a faixa das microondas, na qual se situa o Radar de Visada Lateral (RVL).

1.2 - ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Certa energia somente é caracterizada como calor quando passa de um corpo para outro, em vista de uma diferença de temperatura entre eles. A propagação do calor dá-se de três maneiras distintas: Condução, Convecção e Irradiação. Na primeira, a transmissão de calor se desenvolve através do corpo, quando uma porção do mesmo está mais quente que a outra. O fenômeno da Condução é também encontrado nos líquidos e gases, no entanto, é mais comum nos sólidos. Na segunda, o calor é transportado por movimento de matéria. A água de resfriamento de um motor de automóvel move-se do bloco do motor até o radiador. O calor retirado do motor é transportado pela água. A terceira, no entanto, independe da existência de matéria em seu percurso: Irradiação. A mesma é a grande responsável pela transmissão do calor do Sol para a Terra, à semelhança do aquecimento próximo ao forno de um fogão ou ferro elétrico. A irradiação constitui a maneira mais comum de propagação de calor no domínio do sensoriamento remoto.

Conforme explicitado por SALMERON (1964), sabe-se que uma carga elétrica Q produz ao seu redor um campo elétrico E (Figura 1.1a). Supondo-se que essa carga elétrica entre em movimento, desenvolver-se-á em seu redor uma corrente magnética. Deste modo, uma carga elétrica em movimento produz ao seu redor dois campos: o elétrico, que existe sempre, e o magnético, que ele produz pelo fato de estar em movimento.

Então R é a região abrangida por esses dois campos (Figura 1.1b). Quando a carga Q se desloca, os dois campos também se deslocam. Considerando uma direção r qualquer, os campos elétrico e magnético vão atingindo sucessivamente os pontos A , B , C , etc, à medida que a carga se desloca. Por conseguinte, os campos elétrico e magnético podem propagar-se juntos, desde que uma carga elétrica entre em movimento.

Se o movimento da carga é retilíneo e uniforme, então só há propagação dos campos, enquanto a carga está em movimento. Mas se o movimento não for retilíneo e uniforme, isto é, se a carga for acelerada ou retardada, então se observa que:

- esses dois campos continuam avançando pelo espaço, e em todas as direções mesmo que a carga pare;
- esses dois campos avançam com uma velocidade igual a da propagação da luz.

Chama-se Onda Eletromagnética ao conjunto dos campos elétrico e magnético propagando-se pelo espaço. As ondas eletromagnéticas são sempre conduzidas por cargas elétricas aceleradas ou retardadas. Denomina-se onda pelo fato da variação de sua amplitude (módulo do vetor), como visto na Figura 1.1c.

Deste modo, vê-se que nas ondas eletromagnéticas não existem partículas materiais em movimento ondulatório, como, por exemplo, no caso das ondas sonoras ou das ondas que se formam na superfície da água.

O campo elétrico se propaga em um plano, isto é, os vetores elétricos E se dispõem em um certo plano P_1 . O campo magnético se propaga em um outro P_2 . Uma propriedade importante das ondas eletromagnéticas é que esses dois planos são perpendiculares entre si. Os vetores H estão em um plano perpendicular ao dos vetores E , como indica a Figura 1.1d.

Cognomina-se comprimento de onda eletromagnética é a distância entre dois pontos consecutivos, em que o vetor E (ou H) tem mesmo módulo e mesmo sentido. É a distância λ da Figura 1.1c.

Denomina-se período da onda eletromagnética (T) ao tempo, em segundos, necessário para uma onda completa passar por um ponto.

Representado por V a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, e por T o período, tem-se:

$$\lambda = V/T$$

A velocidade de propagação, idêntica para todas as ondas eletromagnéticas, é igual a velocidade de propagação da luz. O seu valor no vácuo costuma-se representar pela letra (c) e é:

$$c = 299\,796 \text{ km/seg}$$

Na prática aproxima-se para:

$$c = 300\,000 \text{ km/seg}$$

Chama-se frequência (f) ao número de ondas passando por um ponto fixo P , em uma unidade de tempo (ciclos por segundo ou Hertz).

Para referenciar os diferentes comprimentos de onda é comum utilizar-se as seguintes medidas: micrometro (μm), nanometro (nm) e picometro (pm). A conversão dos mesmos com relação ao mm é a seguinte:

- $1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$
- $1 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ mm}$
- $1 \text{ pm} = 10^{-9} \text{ mm}$

A história dos estudos das radiações começa com as pesquisas sobre eletromagnetismo, realizadas pelo físico escocês James Maxwell, em 1873. Até então, conheciam-se inúmeros fenômenos ondulatórios, mas não existia uma teoria globalizadora que os explicasse; somente com os trabalhos de Maxwell foi possível reuni-los em uma classe de fenômenos físicos. As radiações eletromagnéticas são distribuídas em um espectro contínuo, dividido em classes mais ou menos arbitrárias, que refletem o passado histórico de seu estudo. Começa-se pelas frequências mais baixas que são as Ondas de Rádio (OR), Radiação Infravermelha (IV), Visível(V) , Radiação Ultravioleta (UV), Raios X (RX) e finalmente chega-se aos Raios Gama ($R\gamma$) e os Raios Cósmicos que são os de frequência mais alta (Figura 1.2).

Na Figura 2 apresenta-se de forma esquemática o espectro eletromagnético, dando-se destaque para o visível, no qual se tem violeta (VI), azul (A), verde (VE), amarelo (AM), laranja (L) e vermelho (VR), como também o infravermelho próximo (IVP), infravermelho médio (IVM) e infravermelho distante (IVD). Tal divisão visa relacionar as faixas compreendidas pelos sistemas LANDSAT-MSS, LANDSAT-TM e SPOT com o sistema de Radar de Visada Lateral. Observa-se que existe relação entre os três primeiros sistemas , em vista de seus comprimentos de onda semelhantes; tal fato não ocorre com o sistema RVL.

Com base na Figura 1.2, pode-se observar que as radiações eletromagnéticas de menor frequência são as Ondas de Rádio (OR), cujos comprimentos de onda se estendem de centenas de km até 100 cm. Estas radiações são utilizadas pelo homem nas transmissões radiofônicas (ondas curtas, médias e longas). Na natureza as Ondas de Rádio são transmitidas por estrelas e nebulosas. Sua captação por meio de radiointerferômetros e radiotelescópios permite o estudo desses corpos celestes, quando eles se encontram além de distâncias alcançadas pelos telescópios óticos.

Depois das Ondas de Rádio, tem-se as Microondas (MO), cujos comprimentos de onda vão de 100 cm a 1mm. As microondas são utilizadas nas comunicações telefônicas, assim como nas estações retransmissoras de televisão, sistema de radiogoniometria e outros.

As radiações do Infravermelho (IV) estão compreendidas entre o intervalo de comprimento de onda de $0,78 \mu\text{m}$ a 1 mm. Sua descoberta deve-se ao astrônomo Williams Herschel, em 1789. Estudando o arco-íris produzido pela luz solar, Herschel descobriu que as diversas cores aqueciam em grau variável um termômetro; o aquecimento, no entanto, era maior quando o termômetro era colocado antes da faixa vermelha do arco-íris, onde já não há mais luz. O citado cientista interpretou que ali estariam radiações que o olho humano não percebia, daí o nome infravermelho.

Qualquer corpo é emissor de radiações infravermelho. Essa emissão cresce proporcionalmente com sua temperatura. O ferro de passar roupa, um aquecedor e o próprio corpo humano emitem-na. As estrelas, por sua vez, são potentes emissoras. O homem, no entanto, só percebe sua presença quando são muito intensas. A área mais sensível é o dorso das mãos.

A radiação visível (V) constitui a faixa mais estreita das radiações. Engloba as que podem ser percebidas pela visão humana. Seus comprimentos de onda vão de $0,38\mu\text{m}$ a $0,78\mu\text{m}$. O limite inferior da visão é o vermelho (VR) e o superior o violeta (VI).

Além do campo visível situam-se as radiações Ultravioletas (UV) que vão de $0,4\text{ nm}$ a 10 nm de comprimento de onda. A energia que transporta é suficiente para ionizar os átomos, favorecendo, portanto, algumas reações químicas. Os usos mais comuns dessas radiações dizem respeito à esterilização de ambientes, testes industriais não destrutivos e aplicações médicas. Ela é emitida quando os elétrons periféricos de átomos mudam de nível energético. Algumas substâncias quando bombardeadas com radiações ultravioleta armazenam, por breve tempo, a energia que recebem para depois devolvê-las sob forma de luz (fluorescência).

A radiação X ou Roentgen (RX) inclui comprimentos de onda de 10 nm a 10 pm . Os Raios X são produzidos por transições eletrônicas em regiões próximas aos núcleos dos átomos, ou então pelo rápido frenamento dos elétrons livres. Possuem maior energia que os ultravioleta, conseguindo atravessar o corpo humano. Isto torna-os um eficiente auxiliar na medicina e na indústria, no estudo de blocos metálicos, etc.

As radiações eletromagnéticas de comprimento de onda inferior a 10 pm recebem a denominação genérica de Raios Gama ($R\gamma$). De todo o espectro são os mais energéticos e são aplicados principalmente na pesquisa científica relacionada com o núcleo do átomo.

1.3 - BANDAS DE RADAR

O Radar de Visada Lateral (RVL) situa-se na faixa das microondas do espectro eletromagnético, variando entre comprimentos de onda de 100 cm e 1mm e frequência de 0,3 a 50 Ghz.

O RVL contém informações não disponíveis em outras regiões do espectro, como as faixas do visível e infravermelho, as quais são abrangidas pelas fotografias aéreas e imagens LANDSAT, SPOT, MOMS, KOSMOS, dentre outras.

Uma carta código de frequência-comprimento de onda foi arbitrariamente selecionada, para fins militares, sendo hoje amplamente usada (Tabela 1.1).

1.4 - SISTEMAS DE RADAR

Apresenta-se a seguir uma descrição sumária dos diferentes sistemas de Radar existentes, em atividade ou desativados, os quais estão sintetizados na Tabela 1.2.

1.4.1- Orbitais

1.4.1.1 - Seasat

O SEASAT foi lançado em 1978, em órbita circular, na banda L, com uma inclinação de 108° , altitude de 795 km, com ciclo de 152 dias e resolução espacial de 25 m. Consiste de um radar altímetro, um radiômetro de microondas, um escaterômetro e um radar de abertura sintética.

- Os propósitos do SEASAT dirigiram-se para o estudo dos oceanos e regiões costeiras, em oposição ao LANDSAT, embora imagens do interior do continente tenham sido obtidas. Os equipamentos distribuídos no satélite estavam assim discriminados:

- Radar altímetro para obter a medida precisa da altitude do satélite acima da superfície do mar (± 10 cm) para determinação do geóide, e na definição da altura das ondas;

- Radiômetro para medir as temperaturas da superfície do oceano e velocidade do vento em superfície, assim como determinar a cobertura do gelo e suas características;

- Escaterômetro para determinar a velocidade local do vento e mapear campos de vento;

- e Radar de Abertura Sintética (SAR) para obter padrões de onda dos oceanos, para estudar a interação água/terra em zonas litorâneas, além de pesquisas do gelo e seus aspectos dinâmicos.

Problemas em seu sistema elétrico provocaram a sua desativação em outubro de 1978, após 106 dias de operação profícua, em órbitas envolvendo exclusivamente o Hemisfério Norte (FORD et al., 1983).

1.4.1.2 - Shuttle Imaging Radar (SIR)

O programa de Radar norte americano envolve uma série de experimentos de Radares em espaçonaves. Tal programa foi iniciado com a segunda missão STS-2 lançado em 12 de novembro de 1981. Consistindo do SIR-A, SIR-B, SIR-C e SIR-D, dos quais os três primeiros já foram lançados.

O SIR-A consiste de um Radar de Abertura Sintética, banda L e polarização horizontal. Sua órbita é aproximadamente circular, com inclinação de 38° .

O SIR-B, cujo lançamento ocorreu em outubro de 1984, é equipado com radar de abertura sintética (SAR), com polarização horizontal. O aspecto novo do SIR-B é a variação do ângulo de visada compreendido entre 15° e 60° . Tal incremento significa que um mesmo objeto será visto sob a ação de vários ângulos de incidência, o que implica em obtenção de medidas radargramétricas e estereoscopia de radar.

O SIR-C lançado em agosto de 1989, possui Radar multiespectral, em virtude dos diferentes comprimentos de onda, ou seja, bandas X, C e L, assim como polarizações paralela (HH e VV) e cruzada (HV e VH). Deste modo, tanto o SIR-B como o SIR-C possuem combinação de canais, possibilitando a obtenção de produtos falsa cor. Ademais, os sistemas de radar da série SIR são oferecidos em formas digitais, o que facilita seu processamento em computadores.

1.4.1.3 - Programa Europeu de Radar (ESA)

A ESA (European Spacial Agency) lançou , em março de 1991, seu primeiro satélite de observação da Terra, cuja recepção e processamento ocorreram em junho de 1991 pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Designado de ERS-1, à semelhança do SEASAT, objetiva o estudo de zonas costeiras e processos globais do oceano. O equipamento disponível em seu interior, segundo ESA (1989), consiste de:

- instrumentação ativa na região das microondas (AMI), banda C, com 5,3 GHz, incluindo um Radar de abertura sintética (SAR), um dispersômetro para ventos e outro para ondas. Estes dois últimos instrumentos foram criados para observar o vento na superfície do mar e as estruturas das ondas oceânicas, junto com imagens de alta resolução da superfície terrestre e, em particular, das regiões polares e zonas costeiras;
- e um altímetro tipo Radar (RA), na banda k com 13,7 GHz, cujas medidas permitem definir a altitude do satélite, altura significativa das ondas, velocidade dos ventos na superfície oceânica e parâmetros relativos ao gelo.

Instrumentos adicionais no terreno contribuem com os sensores principais para melhor interpretar os processos oceanográficos:

- um Radiômetro de varredura (ATSR), sensor na faixa do infravermelho, para medir a temperatura da superfície do mar, além da temperatura acima das nuvens e a cobertura das nuvens;
- um equipamento de microondas para determinar com precisão a distância (PRARE), cujo objetivo é melhorar os dados do altímetro;

- e Retroprojetores passivos a LASER para permitir uma avaliação dos instrumentos da Terra.

1.4.1.4 - Japan Earth Resources Satellite (JERS)

O JERS-1 (Japan Earth Resources Satellite) renomeado como "Fuyo-1" foi lançado com sucesso em 11 de fevereiro de 1992. O JERS-1 é o primeiro satélite a empregar um sensor ótico (OPS) e um Radar de abertura sintética (SAR). O sistema OPS pode ser dividido em dois subsistemas, um radiômetro do visível e infravermelho próximo (VNIR), e um radiômetro de infravermelho de pequeno comprimento de onda (SWIR). O sistema OPS iniciou a aquisição de imagens em 12 de março, um mês depois de seu lançamento. Depois de alguma dificuldade o MITI (Ministry of International Trading & Industry) e a NASDA (Japanese National Aerospace Development Agency) conseguiram colocar em atividade a antena SAR, a qual apresentou problemas desde seu lançamento (NISHIDAI, 1992).

O sistema SAR possui um ângulo de visada mais baixo do que o ERS-1 e SEASAT. O ângulo de iluminação é ajustado para 35° em relação ao nadir, a fim de evitar distorções do tipo "layover" e encurtamento de pendentes causados por relevo forte. A possibilidade de adquirir dados em direções de iluminação, com ângulo de 24° , das órbitas ascendente e descendente, é de grande importância em aplicações geológicas, regiões de floresta ombrófila densa, altas latitudes em zonas de permafrost e possivelmente em terrenos desérticos (NISHIDAI, 1992.).

1.4.1.5 - Almaz

O ALMAZ é um satélite russo, lançado em 1991, com um sistema SAR na banda S, polarização HH e resolução espacial de 15 a 30 m. Infelizmente não se dispõe de resultados de pesquisas realizados com essa banda (S).

1.4.1.6 - Radarsat

Em 12 de setembro de 1989 foi anunciado em Ottawa que o RADARSAT, Radar de Abertura Sintética do Canadá, foi totalmente aprovado. O governo canadense procederá a construção e iniciará em meados de 1995 a operação da missão.

A "crise do petróleo" na primeira metade da década de 70 provocou a exaustiva pesquisa da região Ártica, no entanto as constantes nuvens, mar de gelo e necessidade de monitorar rotas de navios, fizeram com que o SAR fosse o único sensor de tecnologia aceitável para as condições ambientais da região acima referida. Além do mais, os dados de SAR têm também importantes aplicações no mapeamento de estruturas geológicas em superfície, gelo, oceanos, solos e monitoramento de florestas em regiões constantemente nubladas (LANGHAM et al., 1990).

O projeto RADARSAT tem como parceiros agências norte americanas (NASA e NOAA), governos de províncias canadenses e o setor privado. Representa mais de uma década em pesquisa em RADAR do CCRS (Canada Center Remote Sensing) e coordenação pelo CSA (Canadian Spacial Agency).

Dois requisitos são essenciais no Programa RADARSAT (PARADELLA et al., 1994):

- prover imagens no formato e qualidade comparável aos das missões precedentes (ERS-1, JERS-1, etc);
- e propiciar observações dentro de um intervalo amplo de ângulos de incidência.

O RADARSAT será operado em uma órbita sol-síncrona (quase polar) que cruzará o equador na direção para o sul no nascente (órbita descendente) e na direção para o norte no poente (órbita ascendente). Seu ciclo de repetição de órbita será de 24 dias, período de 100,7 min e terá um subciclo de sete dias para passagens entre trajetórias adjacentes no terreno. Para atender tal configuração será necessária uma altitude de 792,9 km e uma inclinação de 98,59° (plano orbital no equador). O RADARSAT foi concebido para um imageamento em direção ao norte do plano orbital (visada do lado direito). Isto tornará possível a cobertura regular do Ártico, porém inviabilizará o imageamento da Antártida. Este inconveniente será resolvido com a mudança do imageamento para a direção sul do plano orbital (visada à esquerda) que será conduzida durante o intervalo de duas semanas - tempo previsto para a cobertura da Antártida - em épocas de máxima e mínima coberturas de gelo (PARADELLA et al., 1994).

O SAR opera com 5,3 GHz, na banda C e tem a possibilidade de transmitir três pulsos e numerosas seleções de feixes para produzir imagens com várias larguras e resoluções. Estereoscopia pode ser obtida, em virtude dos diferentes ângulos de incidência (Tabela 1.3).

1.4.2- Equipados em Aeronaves

Os principais sistemas de radar transportados em aeronaves são: GRUMMAN, WESTINGHOUSE, GEMS e INTERA. Uma comparação entre os diferentes sistemas RVL é

apresentada na Tabela 1.2. No entanto, far-se-á uma abordagem apenas dos sistemas GEMS e INTERA. O primeiro pelo fato de estar disponível em todo o território brasileiro, como também considerando que o presente trabalho tem como suporte este sistema, inclusive com apresentação de exemplos sob a forma de Figuras (estampas). O outro, assume importância, em vista de ser mais sofisticado que o primeiro, ser digital e com amplas possibilidades de levantamentos em determinadas regiões brasileiras, a exemplo do que já ocorreu com a serra dos Carajás (PA).

Além desses, merece citação, pela sua importância, o experimento SAREX (South American Radar Experiment) correspondente a um programa de imageamento por Radar em aeronave (Convair 580), na banda C, e com polarizações HH e VV, de várias áreas na América do Sul. Na Amazônia brasileira foram imageadas quatro áreas testes, sendo três no Pará (Carajás, Tucuruí e Tapajós) e uma no Acre (Sena Madureira). O escopo principal da missão foi o de simular o RADARSAT e também permitir uma comparação com os dados do ERS-1. O Sistema SAR utilizado no SAREX é capaz de imagear em três modos: Nadir, Faixa Estreita e Faixa Longa. A aeronave opera a uma altitude de 6 km, produzindo imagens na banda C, com polarizações VV e HH, de elevada resolução foram geradas sob ângulos de depressão de 16 a 90 graus (Nadir) e de 14 a 45 graus (Faixa Estreita). O modo Nadir é o mais adequado no imageamento de terreno com relevo acentuado ou para a simulação de geometria de SAR orbital. Imagens de baixa resolução (20 m x 10 m) foram também obtidas através da Faixa Larga com ângulos de depressão variando de 5 a 45 graus (PARADELLA, 1993).

1.4.2.1 - Good Year Eletronic Mapping Sistem

O território brasileiro foi coberto por imagens radargramétricas em dois períodos: 1971/1972 e 1975/1976. O primeiro envolveu praticamente a Amazônia Legal Brasileira e parte leste dos estados da Bahia e Minas Gerais, e norte do Espírito Santo. O segundo cobriu o restante do Brasil. Tais levantamentos serviram de base para o projeto RADAM (RADAMBRASIL) no seu trabalho profícuo de levantamento de recursos naturais do território brasileiro. Com a extinção do Projeto RADAMBRASIL, em 4 de março de 1986, todo o acervo técnico-científico desse importante projeto foi incorporado ao IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), inclusive suas equipes técnica e administrativa.

As principais características desse sistema são:

- Nome: Sistema GEMS-1000
- Aeronave: Caravelle
- Velocidade: 700 km/h
- Altura: 11 000 m
- Linhas de vôo: N-S (principal) e E-O (secundária)
- Espaçamento entre as Linhas: 15'
- Recobrimento: 10%
- Tipo de Antena: Abertura Sintética
- Banda: X
- Comprimento de Onda: 3,12 cm
- Frequência: 9,6 GHz

- Potência: 100 watts
- "Dynamic Range": 20 a 28 db
- Polarização: HH
- Resolução Espacial: 16 m
- Ângulos de Incidência: 77° e 45°
- Escala Original: 1:400.000.

1.4.2.2 - Intera

Atenção especial deve ser reservada ao Sistema STAR da INTERA, uma vez que opera na mesma banda da GEMS, no entanto com resolução espacial superior. Ademais, pode ser armazenado em fitas compatíveis com computador (CCT).

O processamento digital permite variar de escala, desde 1:1.000.000 até 1:50.000, sem distorção, além de eliminar as emendas do mosaico, em vista da superposição computadorizada dos canais próximo e remoto. Tais fatores são de grande importância na interpretação radargeológica, como ver-se-á adiante.

Especificações do STAR-1:

- Comprimento de onda: 3 cm
- Banda: X
- Polarização: HH
- Ângulo de Visada: esquerda ou direita
- Altura de vôo: 5 000-10 000 m

- Alcance no Terreno: 23 a 46 km
- Resolução: 6 e 12 m
- Frequência: 9,6 GHz

HUHN & MORETZSOHN (1994) relatam o programa de aquisição de dados de Radar de Abertura Sintética (SAR), na região da serra dos Carajás, pela Rio Doce Geologia e Mineração S/A - DOCEGEO. O Sistema de Radar utilizado foi o STAR-1 pertencente a INTERA, banda X, com polarização HH, digital, resolução espacial de 6m x 6m, na escala 1: 100 000, com estereoscopia, ângulo de depressão médio de 18° e 23 km de alcance no terreno. Tal sistema foi associado a dados aeromagnéticos utilizando transformação IHS, objetivando informações de superfície e subsuperfície.

1.5- RADAR DE VISADA LATERAL

1.5.1 - Introdução

O Radar de Visada Lateral (RVL) constitui um sensor ativo, aerotransportado, situando-se na faixa das microondas do Espectro Eletromagnético (EMR). Denomina-se de Visada Lateral pelo fato de cobrir uma faixa contínua ao lado da aeronave, ao invés de diretamente abaixo como acontece com as fotografias aéreas verticais.

Pelo fato de ser um sensor ativo a antena posiciona-se com seu eixo longitudinal na parte inferior do bojo da aeronave, emitindo um feixe em forma de leque cuja varredura é que edifica a imagem. Uma série de pequenos pulsos eletromagnéticos são emitidos e os sinais da reflexão de

retorno são registrados. Dois parâmetros são de suma importância: distância em relação a antena e a intensidade da energia refletida. Pela conjugação desses dois parâmetros é que será produzida a imagem de Radar através da composição dos pontos de retorno (Figura 1.3). Deste modo, o RVL constitui um sensor baseado nas características elétrica-geométricas dos alvos nos terrenos.

Deste modo define-se como " elemento de imagem" ao sinal de retroespalhamento referente a um determinado pulso ,cujo conjunto forma a imagem de uma determinada cena. Corresponderia ao "pixel" (picture element") nos sistemas digitais. Todas imagens de Radar estão sujeitas a variações estatísticas, principalmente o "speckle" e o ruído, os quais devem ser levados em consideração tanto na interpretação visual como automática.

Se o transmissor estivesse continuamente operando, seria impossível correlacionar uma transmissão de energia particular para uma reflexão terrena. Por essa razão, pulsações de energia são enviadas intermitentemente, de modo que a próxima pulsação será somente emitida após todas as reflexões de uma pulsação anterior retornarem para a antena que, deste modo, já está apta para receber.

O posicionamento de um determinado alvo na imagem irá depender de sua distância em relação à antena , e seu brilho dependerá da intensidade da reflexão de retorno. A velocidade do filme é sincrônica com a velocidade da aeronave ou espaçonave.

Na Figura 1.4 observa-se a relação tempo versus amplitude do sinal no que tange aos alvos casa e árvore. Saliente-se que a árvore situa-se mais próxima da antena e terá, portanto, um tempo menor de retorno (13), no entanto com menor amplitude que a casa (18).

Torna-se necessária a definição de dois parâmetros que serão abordados continuamente: ângulo de incidência (θ) e ângulo de depressão (β). Ângulo de incidência é o ângulo formado pelo

raio incidente de Radar e a perpendicular com a superfície incidente, sendo igual ao ângulo de reflexão (Lei de Snell). Neste caso com a superfície tem que ser plana, utiliza-se comumente a denominação de ângulo de incidência local". Por sua vez, o ângulo formado entre a linha horizontal que passa pela antena e o raio incidente denomina-se ângulo de depressão (Figura 1.3).

A tonalidade é a média espacial de primeira ordem de brilho de imagem, correspondente ao nível de cinza, onde o brilhante representa o branco e o não brilhante ao preto. Fundamenta-se com o tipo de retorno de sinal, seja ele do tipo especular difuso, frontal agudo, frontal obtuso, "grazing" e refletor de canto (Figura 1.5).

Na Figura 1.5 exemplificam-se as diversas situações que se pode esperar, de acordo com o modelado do terreno. O retorno do sinal emitido será nulo na reflexão especular (tom preto), forte no refletor de canto e frontal obtusa (tom branco), com valores intermediários no frontal agudo, difuso e "grazing" (cinza).

Na Figura 1.6 pode-se observar que devido à direção da linha de vôo (LV) e sentido de visada para oeste (O), as sombras (S) sempre se dispõem para o mesmo lado. Identifica-se a presença de uma marcante quebra de relevo (QR), assim como zonas planas (P) e dissecadas (DI). No quadrante SE da Figura em lide, destaca-se grande incidência de antropismo, dominando a tonalidade cinza e revelando a presença de pequenos polígonos de reflexão especular (RE). No topo do platô é marcante a presença de refletor de canto (RC), em vista da exposição de rochas carbonáticas, em relevo cárstico (lapiás).

Vê-se na Figura 1.7 que a distância entre a antena e o objeto que está sendo imageado denomina-se de Alcance Oblíquo ("Slant Range") e a faixa do terreno coberta pela varredura é codinominada de Alcance no Terreno ("Ground Range"). A porção média deste constitui o limite

entre o Canal Próximo ("Near Range") e o Canal Remoto ("Far Range"). O primeiro com ângulos de depressão maiores e conseqüente menor comprimento de sombra, em virtude de sua maior proximidade da antena. O inverso ocorrendo com o outro canal.

O retorno do pulso do Radar pode ser representado em função da distância do Alcance Oblíquo (AO) e pode ser projetado em planta com conseqüente distorção das verdadeiras distâncias do terreno. A apresentação também pode ser feita pelo Alcance do Terreno (AT), empregando a apropriada correção hiperbólica para a altura da aeronave, e usando a suposição que o terreno ao lado da aeronave é plano. Comercialmente, sistemas disponíveis fazem esta transformação e utilizam a apresentação de AT. Nas Figuras 1.8 e 1.9 mostra-se uma comparação entre apresentações em AT e AO e suas inter-relações.

Como pode ser observado na Figura 1.7, existe uma perfeita correspondência entre os alvos do terreno, em termos de representação no Alcance Oblíquo (AO) e Alcance no Terreno (AT). Considerando que o tempo registrado em uma imagem RVL representa uma distância direta do AO em relação à antena, onde a superfície de cada alvo subentende um ângulo de depressão diferente, provocando uma variação de escala ao longo de sua visada. A imagem é comprimida no Canal Próximo (A'B'), somente se aproximando da verdadeira escala no Canal Remoto (C'D'). Deste modo para se produzir uma escala uniforme tem que se fazer uma transformação hiperbólica, admitindo-se uma superfície plana obtem-se a apresentação em Alcance no Terreno.

1.5.2 - Sistemas de Abertura Real (RAR) e Abertura Sintética (SAR)

Ao imagear o terreno ao lado da aeronave as linhas de varredura divergem, sob a forma de um leque, com a distância (Figura 1.3), resultando na variação da resolução em diferentes porções da imagem. Em outras palavras, a resolução espacial do Canal Próximo (CP) será distinta daquela apresentada no Canal Remoto (CR).

Entende-se por resolução espacial a capacidade que tem o sensor em discriminar dois objetos. Assim, ao especificar-se que a resolução espacial é de 16 m, significa dizer que somente objetos que tiverem uma distância maior do que 16 m, serão individualizados.

A resolução longitudinal, paralela à linha de vôo, é alcançada pelo uso de grandes antenas e pequenos comprimentos de onda. Para abertura real a largura do feixe (radianos) em azimute é dado pela razão comprimento de onda e diâmetro da antena.

A resolução longitudinal (RL) é dada pela equação:

$$RL = \lambda / Da \times AO$$

λ = comprimento de onda

Da = diâmetro da antena

AO = alcance oblíquo

Como consequência, são necessárias grandes antenas para conseguir-se alta resolução. Como pode ser visto na Figura 1.10, pela forma em leque do feixe a resolução do CP será melhor do que no CR, ou seja, melhor em a do que em b.

A resolução transversal (RT), perpendicular a linha de vôo, é proporcional ao comprimento do pulso da microonda. Por exemplo, um período de pulso de 10^{-7} seg. produzirá

uma resolução de 15 m (Figura 1.11). A RT pode ser melhorada com o uso de pequenos pulsos, como pode ser observada na equação abaixo:

$$RT = C \times T/2 \cos \beta$$

C = velocidade da luz

T = comprimento do pulso

β = ângulo de depressão

Na Figura 1.11 pode-se notar que a RT não foi suficiente para discriminar os dois últimos morrotes da direita, uma vez que o retorno será único.

A Resolução de Área (RL.RT) de um Radar é função direta da largura real do feixe do sistema (α) e do alcance oblíquo (AO) em relação ao alvo. Este, controla a resolução longitudinal (RL) e do efetivo comprimento do pulso (τ) do sistema. O ângulo de incidência (θ) afeta a variação da Resolução Transversal (RT).

Para qualquer sistema empregado a largura do feixe e o comprimento do pulso são fixos, enquanto que o alcance oblíquo e o ângulo de incidência são variáveis. A resolução média da faixa imageada (RMFI) é a integral para cada resolução da faixa de célula adicionada, dividida pelo número de células de resoluções tomadas transversalmente ao trajeto (BROWDEN & PRUIT, 1975):

CR

$$RMFI = \sum (RL.RT)/n$$

CP

onde: CP = Canal Próximo

CR = Canal Remoto

RL.RT = Pequenas áreas de resolução

n = Número de células de resoluções transversais ao levantamento

O número médio de amostras independentes (N_i) numa célula de resolução influencia na variância do volume do sinal de retorno. Um maior número de amostras independentes, uma diminuição na variância, dão uma tendência a alisar ou diminuir granulação em tons de cinza da imagem, os quais irão melhorar a resolução da imagem para uma dada resolução nominal.

Segundo BROWDEN & PRUIT (1975) os sistemas de abertura real (RAR) fornecem um número maior de amostras independentes do que o sistemas de abertura sintética, de comparável resolução nominal, provocando deste modo uma escala de cinza mais evidente e menor granulação, o que facilita o trabalho do radarintérprete.

No Sistema de Abertura Real (RAR), uma chave eletrônica liga a antena ora ao receptor, ora ao transmissor, permitindo que após a transmissão de um sinal o sistema fique preparado para receber os sinais de retorno. No tubo de raios catódicos (CRT) a imagem é construída após a recepção de um conjunto de sinais e é montada uma imagem linear semelhante ao gráfico tempo versus intensidade. Essa imagem linear é passada através de lentes para impressionar um filme fotográfico (Figura 1.12).

No sistema de abertura sintética, uma chave eletrônica também controla a emissão e recepção de sinais de radar. O STALO ("Stable Local Oscillator") funciona tanto como transmissor como armazenador, a fim de comparar as fases. Devido a largura do feixe, um ponto do terreno é investigado várias vezes, um em cada pulso transmitido. Como esse ponto move-se relativamente ao avião, haverá uma modificação da frequência do sinal de retorno causado pelo

efeito Doppler. Daí porquê, a cópia do sinal transmitido é guardada e posteriormente comparada com o sinal de retorno. O "Data Film" registra a diferença de fase entre os dois sinais, à semelhança de um holograma unidimensional, pois que trata apenas dos dados longitudinais (Figura 1.12).

Em resumo, o SAR retrata melhor fidelidade geométrica, ao passo que o RAR exhibe melhor gama dinâmica.

A largura angular do feixe da antena é inversamente proporcional ao comprimento da antena, deste modo, para uma melhor resolução torna-se necessária uma antena de grande comprimento. Entretanto, uma antena relativamente curta (2m), se comporta eletronicamente como se tivesse centenas de metros, produzindo feixe sintetizado, com resolução idêntica em todos os seus pontos, denominada de Radar de Abertura Sintética (SAR), em contraposição ao de Abertura Real (RAR) (Figura 1.14). Uma interessante analogia existe entre um sistema de Radar de Abertura Sintética e um sistema holográfico de luz visível. Holografia é o processo de imageamento no qual as ondas de luz de uma fonte de luz coerente, tal como o LASER, ilumina um objeto ou uma cena. Cada ponto sobre o objeto reflete a luz, as ondas refletidas interferem com um feixe de ondas de luz de referência e a resultante multitude de interferência de padrões circulares são registrados sobre um filme fotográfico de grã-fina. Quando o filme desenvolvido é iluminado por um feixe de luz coerente a multitude de padrões de interferência reconstrói o conjunto original de ondas refletidas, as quais formam uma imagem tridimensional da cena original, tendo um surpreendente grau de detalhe e fidelidade. Radar de Abertura Sintética é um processo de imageamento, no qual microondas coerentes iluminam o terreno, para o lado do aeroplano. A antena detecta as ondas de Radar de cada ponto sobre o terreno. No equipamento

eletrônico, a bordo da aeronave, sinais gerados no receptor, pela fila de pulsos de microondas refletidos são combinados com o conjunto dos sinais de referência para criar padrões de interferência. Linha por linha de cada padrão de referência de interferência é exibida sobre um CRT e fotografada sobre uma faixa móvel de "Data Film", cuja velocidade é proporcional ao da aeronave. O "Data Film" pode ser considerado como um "Radar holograma". (JENSEN et al.,1977).

Conforme observado na Figura 1.15.1 uma longa antena pode ser sintetizada por uma pequena antena tomando-se como base o movimento da aeronave (Efeito Doppler). Uma antena real acoplada no seu bojo envia para o terreno uma série de pulsos em intervalos regulares. Cada pulso consiste em um conjunto de microondas polarizadas. Quando um objeto situa-se no raio de ação do feixe emitido pela antena, ele reflete a porção do pulso em direção a antena (Figura 1.15.2). Em alguns pontos do caminho da aeronave, o objeto recebe um número integral de comprimentos de onda em outros não. A aeronave começa a se aproximar do objeto (Figura 1.15.3) até atingir uma distância mínima (Figura 15.4), para posteriormente se afastar (Figura 1.15.5). Deste modo, o comprimento eletrônico da antena será considerado como aquele que inicialmente recebe sinais do objeto até o último pulso emitido pelo mesmo. As séries de ondas refletidas concernentes às diferentes distâncias são combinadas eletronicamente com o comprimento da onda de referência, causando sinais de interferências construtivos e destrutivos. O sinal de interferência emerge com uma voltagem, cujo brilho representa a intensidade do sinal na tela de um tubo de raios catódicos (CRT). O movimento do "spot" marca uma série de traços claros e escuros de comprimento desigual, o qual é registrado em um filme, que se move a uma velocidade proporcional à da aeronave. Resultando no "Data Film", à semelhança de um

holograma de radar. Quando tal holograma é iluminado por um raio Laser forma-se a imagem do objeto (Figura 1.15.6).(JENSEN et al., 1977.).

"Speckle" é definido como a flutuação estatística de incerteza associada com o brilho na imagem de uma determinada cena. O mesmo aparece como um processo multiplicativo randômico cuja variância e correlação espacial são determinados principalmente pelo sistema SAR.

Em virtude das imagens SAR serem geradas utilizando radiação coerente, à semelhança de um holograma, as mesmas apresentam um aspecto granular ou salpicado devido a uma interferência aleatória construtiva e destrutiva das ondas que compõem o elemento de imagem. Devido ao efeito "speckle" os intérpretes, invariavelmente, vão observar que as imagens C-SAR aerotransportado contém menos detalhes que as fotografias aéreas na mesma escala. Aplicações fotográficas não são efetivas para radar como o são para fotografias aéreas (NOVO et al., 1994).

1.5.3 -Geometria de Radar

Para que o intérprete possa entender melhor os produtos radargráficos, torna-se mister que conheça os princípios que regem os parâmetros geométricos das imagens de Radar. Dentre esses merecem destaque: Sombra de Radar, Encurtamento de Radar, Fantasma de Radar ("Radar Layover") e Paralaxe de Radar (BROWDEN & PRUIT, 1975).

1.5.3.1 - Sombra de Radar

A sombra de Radar constitui uma das principais características das imagens de Radar. A mesma é de grande relevância para que o intérprete possa ter a noção de terceira dimensão na análise monoscópica da imagem, o que de certa forma é carente nas imagens de satélite nas faixas do visível e infravermelho (LANDSAT, SPOT, KOSMOS, MOMS e outras).

Em vista do Radar de Visada Lateral (RVL) ser um sensor ativo, pode-se planejar as suas linhas de vôo, o que de certo modo facilita a interpretação de extensas regiões, porquanto de sua homogeneidade na avaliação da média espacial de primeira e segunda ordem do brilho, haja vista a presença da sombra sempre para o mesmo lado. O que de certo modo não acontece com os sensores passivos.

As proposições colocadas a seguir são válidas somente quando a direção da linha de crista for perpendicular a frente de onda do Radar. Observa-se na Figura 1.16 que a sombra de Radar só será produzida em uma feição do terreno se o ângulo de depressão (β) for menor que o ângulo da pendente (α) não voltada para a antena de Radar. Devido a tal relação geométrica ocorrerão situações em que não haverá sombra, até o caso particular em que o ângulo de depressão for igual ao da pendente não voltada para a antena ("grazing"), fato que ocorre sempre no Canal Próximo (CP), a partir de que a sombra sempre se apresentará com maior comprimento. Por conseguinte, o ressaltado das feições geomórficas dar-se-á amiúde no Canal Remoto (CR), em especial em situações em que o posicionamento da feição for paralela à linha de vôo (perpendicular à linha de varredura). As zonas de relevo mais fortes, com maiores desníveis,

terão sombras menores no CP, no entanto os problemas de distorção serão sempre maiores, como será visto adiante (Figura 1.17).

Na Figura 1.18, Serra da Providência (SC.20-Z-A), Estado de Rondônia, pode-se destacar a linha de contato (interface) entre os Canal Próximo (CP) e o Canal Remoto (CR), assim como se observa que as linhas de crista estão quase perpendicularmente à frente da onda do Radar, deste modo sendo válidas as proposições aqui colocadas, consoantes a Figura 1.16. As sombras dispõem-se para oeste, havendo situações em que a mesma inexistente, devido à coincidência do ângulo de depressão e do ângulo da pendente não voltada para a antena (G), constituindo o caso de "grazing". Sombras em (S).

A Figura 1.19 abarca a região da serra do Imeri, Pico da Neblina, fronteira Brasil-Venezuela, Estado do Amazonas, NA.19-Z-D-, evidenciando grandes zonas de sombra (S) no Canal Remoto (CR), ao passo que no Canal Próximo (CP) as mesmas são restritas.

A Figura 1.20 tem em sua porção central a serra do Caparaó (MG-ES), SF.24-V-A, na qual as zonas de sombra (S) estão bem desenvolvidas em vista de estarem dispostas perpendicularmente à varredura do Radar, como também por abranger o Canal Remoto (CR). Observa-se o contato CP com CR, em sua porção mediana.

1.5.3.2 - Encurtamento de Radar

O encurtamento de radar ocorre nas pendentes voltadas para a antena (reflexão frontal aguda), que devido aos seus posicionamentos geométricos terão um único retorno, mostrando-se brilhante (tons brancos no RVL), sob a forma de linhas ou traços grossos. Com relação as

pendentes não voltadas para a antena, também existe encurtamento, havendo uma única situação em que não ocorre tal fenômeno, que é o caso do "grazing".

Na Figura 1.18 tem-se várias situações de encurtamento de pendentes (E), resultando em um maior ressaltado no relevo. Por sua vez nas Figuras 1.19 e 1.20, tais feições provocam fortes distorções em vista do relevo acidentado (E).

Malgrado a distorção que acarreta o encurtamento de pendentes, tal fator é de grande importância para ressaltar desníveis topográficos, especialmente para destacar traços radargráficos em rochas sedimentares horizontais ou com mergulho fraco.

A Figura 1.17c ilustra com propriedade a situação em que ocorre encurtamento de pendentes, pois que a distância do topo (ALt) é igual a da vertente (ALf) e da base da feição (ALb). Ou seja: $ALt = ALf = ALb$.

1.5.3.3 - Fantasma de Radar ("Radar Layover")

Constitui um caso extremo de deslocamento de relevo o que impossibilita a interpretação radargeológica. De uma maneira geral, ocorre no Canal Próximo (CP) e é função direta da distância da antena para a feição imageada, uma vez que o topo da feição estando mais próximo da antena (ALt), terá portanto o seu sinal registrado antes (Figura 1.17a). Em outras palavras, ocorre sempre que o ângulo de incidência for negativo, conforme demonstrado na Figura 1.21.

Em território nacional, com cobertura radargramétrica da GEMS, tal fenômeno não ocorreu por questões da geometria do sistema GEMS, devido seu ângulo de incidência acima de 45° (Figura 1.22). Por outro lado, mesmo assim poder-se-ia ter "layover" na serra de Imeri (Pico

da Neblina,(Figura 1.19) e serra do Caparaó (Figura 1.20), fato não consumado por dois motivos: Ângulos de incidência positivos e imagens no canal remoto. Ademais, deve-se ressaltar que, no Pico da Neblina a morfologia é de tabuleiros, ao passo que na serra do Caparaó é de cristas, no entanto não voltadas em direção à antena. De qualquer sorte, na Figura 1.20 tem-se feições que poderiam sugerir a presença de "layover", indicadas pela letra L, no entanto, pelo que foi discorrido acima, tratam-se de pseudos "layovers".

1.5.3.4 - Paralaxe de Radar

A paralaxe constitui a mudança aparente de posição de um alvo, em vista da mudança do ponto de observação. De maneira distinta das fotografias aéreas, que apresentam uma distorção radial, as imagens de Radar provocam um deslocamento das feições positivas em direção à antena de Radar, o inverso ocorrendo com as negativas (Figura 1.23). Então a soma do deslocamento de relevo evidenciada nos canais próximo e remoto, constitui a paralaxe. Graças a este parâmetro é possível obter-se a estereoscopia de Radar. Em que pese a noção de terceira dimensão das imagens de Radar, a estereoscopia é de grande importância na interpretação de áreas com relevos fortes, em vista do encurtamento das pendentes e extensas sombras (Figuras 1.19 e 1.20).

LANGER (1972) estabeleceu através de equações uma maneira simples na determinação de desníveis na imagem RVL, tendo por base o comprimento das sombras projetadas no CP ou CR. Entende-se ser esta pesquisa de grande valia , uma vez que através de simples operações poder-se-á obter valores de desníveis bastantes aproximados e que, sem dúvida, serão informações adicionais importantes para o radarintérprete.

Como visto anteriormente, o ângulo de incidência sobre uma elevação produzirá sombra no lado oposto, sempre que o ângulo da pendente, não voltada para a antena (α), for maior que o ângulo de depressão (θ) (Figura 1.24). LANGER (1972) estabelece que para um mesmo ângulo de depressão (θ), a sombra (S) será proporcional ao desnível h entre a elevação e o pé da sombra (b) (Figura 1.25).

As sombras nas imagens RVL permitem a avaliação dos desníveis em função dos seus comprimentos e da posição do pé da sombra (ou ângulo de depressão). (LANGER, 1972)

Para imagens nos quais o terreno é apresentado em "ground range" (alcance no terreno), observa-se as seguintes relações geométricas, quando a declividade da face iluminada for menor que o complemento do ângulo de depressão (θ) (Figura 1.26). LANGER (1972) definiu a seguinte equação:

$$h = x \cdot (E \cdot X_2 \cdot H) / (X_2^2 + H_2)$$

$$X_2 = \text{Pé da sombra (terreno)}$$

$$x_2 = \text{Pé da sombra (imagem)}$$

$$S = x = x_2 - x_1$$

$$E = \text{Escala}$$

$$H = \text{Altura de vôo}$$

$$oXo = \text{off set (distância do nadir até o início da varredura)}$$

$$h = \text{desnível}$$

A expressão $E \cdot X_2 \cdot H : (H_2 + X_2)$ denominada por LANGER (1972) de fator, foi tabulada para diferentes valores de H, E, x_2 e oXo, pois que $X_2 = oXo + x_2 \cdot E$.

A obtenção do valor numérico do fator será feita através de um gráfico, por meio do comprimento da sombra (Figura 1.27). Deste modo será obtido o valor do desnível (h) graficamente, ou então através da expressão:

$$h = S \cdot f$$

Onde:

h - desnível

S - comprimento da sombra

f - fator

Para exemplificar o que foi acima descrito utilizou-se como exemplo a serra do Quatipuru localizada no quadrante SE da folha SC.22-X-A, para determinar seu desnível. Para calcular o valor de x_2 e x_1 torna-se necessário utilizar as faixas de Radar ("strips"). Assim sendo:

- $x_2 = 36 \text{ mm}$
- $x_1 = 33 \text{ mm}$

Resultando $x = 3 \text{ mm}$. De posse do valor de x_2 se determina o fator (f) no gráfico da Figura 1.27, cujo valor é de 102,7. Tomando-se com base a equação acima apresentada para o desnível, multiplica-se 0,3 (S) pelo fator (f) de 102,7 encontrando-se o valor $h = 308,1 \text{ m}$.

Analisando este método procedem as seguintes observações:

- os erros advindos do mesmo estão relacionados ao superdimensionamento da Paralaxe (Pr na Figura 1.26);
- por sua vez para se determinar o valor do fator (f) o autor utilizou x_2 , ao invés de x ;
- finalmente, o valor encontrado deve estar em mm e não em m, ou então deve-se multiplicar a equação de desnível por 10^3 .

Analisando-se a Figura 1.26 , pode-se obter o valor do desnível através do comprimento da sombra, contudo utilizando a proporcionalidade de triângulos, conforme sugerido por ROUTIN (1975) e BROWDEN & PRUIT (1975).

Assim sendo, tem-se:

$$h/S=H/AO$$

h - desnível

H - altura do vôo = 11 000 m

S - comprimento da sombra

AO - alcance oblíquo no terreno

Como o ângulo de depressão para o sistema GEMS-1 000 é de 45°, então oxo é igual a 11 000 m. Para x_2 igual a 36 mm na imagem tem-se um valor de 9 km no terreno, em vista da escala ser 1:250 000. Utilizando a equação de Pitágoras tem-se o valor do AO igual a 22,8 km.

Deste modo tem-se:

$$S = 0,50 \text{ km (medido na imagem)}$$

$$H = 11 \text{ km (altura do vôo)}$$

Resultando o valor de h igual a 241 m.

Tal método é bem simples e em que pese o erro na medida da sombra na imagem , uma vez que o valor medido é na verdade a projeção no plano horizontal, mostra valores bem próximos daqueles medidos no terreno. Segundo a carta editada pela Diretoria de Serviço Geográfico (SC.22-X-A), o desnível aproximado fica em torno de 250 m.

1.6 -INTERAÇÃO ENTRE ONDAS DE RADAR E SUPERFÍCIES DO TERRENO

1.6.1 -Introdução

A energia eletromagnética, na faixas das microondas, ao varrer uma superfície do terreno é controlada pelos seguintes fatores:

- geometria, rugosidade , heterogeneidade e propriedades elétricas da superfície do terreno;
- comprimento de onda, polarização e o ângulo de depressão do sistema de Radar que se está operando.

Antes de se abordar essa relação interativa se faz necessário que sejam colocadas algumas definições de grande importância para melhor compreendê-la: seção de choque de radar e coeficiente de retroespalhamento.

A Seção Transversal de Radar ("Radar Cross Section") é a medida da intensidade de energia que é retroespalhada de um alvo pontual. Pode ser imaginada como a energia da área de uma superfície hipotética, que distribui a energia de radar igualmente em todas as direções, a qual produz um eco de intensidade similar a do alvo em questão. Em que pese ser expressa em m^2 , não possui relação direta com a área do terreno. Expressa-se pela seguinte equação:

$$\sigma = (\text{potência refletida/ unidade de ângulo sólido}) : (\text{densidade de potência incidente}/4 \pi)$$

Uma medida da energia retroespalhada de um alvo com uma larga área, não pontual, tal como um campo é o Coeficiente de Retroespalhamento de Radar ("Radar Scattering Coefficient"). É definido como a Seção Transversal de Radar por unidade de área. É

adimensional, sendo expresso dez vezes seu logaritmo em decibéis (dB), através da seguinte equação:

$$\sigma^0 = 10 \log \sigma^0.(\text{dB})$$

Quando a Seção Transversal de Radar por unidade de área projetada , corresponder a área normal à direção de propagação pela qual a área é iluminada tem-se ψ .

O Coeficiente de Retroespalhamento de Radar é uma medida fundamental das propriedades de radar de uma superfície, e governa o brilho (tom) da superfície sobre uma imagem de Radar. Deste modo para alvos pontuais tem-se σ , enquanto para alvos não pontuais tem-se σ^0 e ψ . Os mesmos são expressos pela seguinte relação:

$$\sigma = \sigma^0 \cdot A = \psi (A \cdot \sin \beta)$$

A - área do alvo pontual que interage e emite energia

σ - seção transversal de radar

σ^0 - coeficiente de roetroespalhamento de Radar

β - ângulo de depressão

ψ - seção transversal de radar, por unidade de área, perpendicular à iluminação

Deste modo, o comprimento de onda ,o ângulo de depressão e a polarização da onda incidente constituem parâmetros do sistema Radar que irão influenciar na tonalidade dos alvos na imagem RVL. Por sua vez, ângulo de aspecto, a permitividade (constante dielétrica), a rugosidade da superfície ($\lambda/10$), a rugosidade da subsuperfície e o coeficiente de espalhamento em volume , em meios não homogêneos, constituem parâmetros dos alvos.

Considerando-se que os parâmetros de Radar são constantes para um determinado sistema, tem-se que atentar a quais parâmetros do terreno vão influenciar de modo mais

significativo no coeficiente de retroespalhamento e como consequência a tonalidade. Além do mais, não basta apenas detectar e descrever a tonalidade de um alvo, necessita-se saber o seu significado em termos de um tipo de material, uma vez que existem poucos radares imageadores calibrados, e em vista disso necessita-se de trabalhos de campo para complementar tais informações.

A seguir faz-se uma avaliação expedita de cada parâmetro que influencia a tonalidade das imagens de Radar e, como consequência, sua aparência e interpretabilidade.

1.6.2 -Comprimento de Onda

Variações no retroespalhamento de microondas em relação a rugosidade relativa da superfície, ou frequência, são atribuídos diretamente a dois fatores: comprimento de onda (λ) e permitividade (constante dielétrica complexa).

De uma maneira geral quanto mais rugosa a superfície mais forte o sinal do retroespalhamento, assim sendo uma dada feição pode apresentar um comportamento rugoso para pequenos comprimentos de onda, ao passo que para comprimentos de onda maiores, pelo menos três vezes, tal feição comportar-se-á como uma superfície lisa. Para as superfícies lisas não haverá retroespalhamento em direção a antena, dando como consequência (tons pretos), ao passo que para superfícies muito rugosas ter-se-ão zonas de forte retorno (tom branco) e sombras.

A refletividade da microonda de um alvo é função da magnitude da constante dielétrica, a qual dependerá do seu conteúdo em umidade. Tal fator é que determina a porcentagem da

penetração das microondas. Deste modo, em solos úmidos a penetração será menor do que em solos secos.

De um modo geral, os comprimentos de onda longos - acima de 20 cm - terão uma pequena componente de superfície de espalhamento e uma grande probabilidade de um componente de subsuperfície, em vista da penetração.

Na prática significa que para comprimento de onda em torno de 1 cm a maioria das superfícies é rugosa, enquanto que a penetração é desprezível. De outro modo, para comprimento de onda igual a 100 cm poucas superfícies são rugosas e a penetração é variável. Em solos úmidos será em torno de 30 centímetros, ao passo que em solos secos poderá ser acima de 1 m (SIMONETT & DAVIS, 1985).

Sistemas utilizando vários comprimentos de onda podem ser de grande relevância na identificação de diferentes tipos de solo, em termos de umidade, como também de classes de vegetação e principalmente de litotipos.

1.6.3 -Ângulo de Incidência

O Coeficiente de Retroespalhamento de Radar (CRR) geralmente aumenta com a diminuição do ângulo de incidência, mas quando a superfície torna-se mais rugosa o Coeficiente de Retroespalhamento de Radar independe do ângulo de incidência. Em princípio isto parece contradizer o critério de Rayleigh, no entanto tal situação se deve a uma mudança de referencial. O critério de Rayleigh prediz um aumento da largura no padrão de reirradiação, devido a ambos, aumento na superfície de rugosidade e ao decréscimo no ângulo de incidência. Com o aumento

do ângulo de incidência, o retroespalhamento da polarização paralela (vertical ou horizontal) de uma superfície mostra aumento na dependência da permissividade e menos da superfície de rugosidade. (SIMONETT & DAVIS, 1985)

A Figura 1.28 mostra como o Coeficiente de Retroespalhamento de Radar (σ^0) depende da superfície de rugosidade e do ângulo de incidência. Para baixos ângulos de incidência, superfícies lisas refletem uma larga proporção de energia em direção à antena. Aumentando o ângulo de incidência uma grande proporção de energia é refletida para fora da antena, contudo acima de 40° toda a energia de retroespalhamento é perdida. Deste modo, as superfícies lisas horizontais mostram forte retorno de energia para ângulos de incidência fracos, ou então fortes ângulos de depressão. Por sua vez, superfícies rugosas espalham microondas em todas as direções, independentemente do ângulo de incidência, havendo, todavia, valores mais elevados para ângulos de incidência fracos, **ca** de 20° .

A magnitude do CRR é muito sensível a pequenas variações da pendente voltada para a antena em pequenos ângulos de incidência, assim sendo com ângulo de incidência de 0° a 10° o retroespalhamento será forte.

1.6.4 - Ângulo de Aspecto

O ângulo de aspecto constitui a declividade do terreno versus o ângulo de depressão com respeito ao CRR. Além de afetar a influência do ângulo de incidência, superfície de rugosidade e a permissividade, o ângulo de aspecto é responsável por distorções geométricas nas imagens RVL.

No canal próximo, pendentes voltadas para a antena com 20° em ângulo de depressão de igual valor resultam em um ponto, enquanto a pendente não voltada para a antena resultam em incidência próxima a "grazing", ou então são fortemente sombreadas (SIMONETT & DAVIS, 1985.)

Quanto mais acidentado for o terreno mais difícil se torna a interpretação da rede de drenagem, rodovias, antropismo de uma maneira geral, dificultando sobremaneira a determinação de estruturas geológicas, em vista do efeito de encurtamento de Radar e sombras extensas.

Os efeitos causados pelo declive em áreas de vegetação esparsa podem afetar tanto o coeficiente de retroespalhamento de radar a ponto de tornar-se difícil detecção de diferenças na rugosidade ou permitividade. Este fato ocorre com menos intensidade em áreas florestadas.

1.6.5 - Polarização

De forma semelhante à luz visível, o Radar pode ser transmitido e recebido em diferentes modos de polarização. Radiação polarizada tem sua componente elétrica de vibração de onda em um simples plano perpendicular à direção de propagação. Para transmissão e recepção, a antena é geralmente arranjada para ser horizontal (H) ou vertical (V). A combinação mais comum é transmitir horizontalmente e receber horizontalmente (HH), no entanto pode ocorrer a transmissão vertical e recepção vertical (VV.). Estas são chamadas de plano polarizadas, também podendo ocorrer a polarização cruzada (HV ou VH).

Interação com a superfície do terreno, usualmente, deixa o sentido de polarização sem mudança. Entretanto, pode causar a despolarização e rotação do plano de polarização. Assim sendo, o modo de polarização pode influenciar como os objetos aparecem na imagem. Uma

proporção do componente despolarizado do retroespalhamento e que rotou através de 90° são detectados em imagem de polarização cruzada. Esses efeitos produzidos não são perfeitamente entendidos, mas admite-se que tais fenômenos são devidos a multirreflexões na e abaixo da superfície. Múltiplas reflexões são mínimas em rocha nua ou em solos com elevada constante dielétrica complexa. Onde a vegetação é espessa e variada em estruturas, há grandes chances de múltiplas reflexões entre folhas, troncos e galhos (DRURY, 1987). Aliás, retornos despolarizados são comuns em vegetação, podendo ocorrer o mesmo com solos e estruturas em rochas.

Sistemas de imagem de Radar comumente transmitem radiação eletromagnética (REM) plano polarizada horizontalmente. Quando a REM interage com a superfície do material ela é despolarizada e sofre rotação variável. As componentes horizontal e vertical são recebidas por antenas distintas.

A componente vertical polarizada de uma Seção Transversal de Radar (STR) consiste de ambos, superfície e subsuperfície de espalhamento. Enquanto existe a presente controvérsia do significado do componente de superfície do retorno polarizado cruzado, há boas evidências em consonância com a teoria, que retroespalhamento despolarizado é muito menos dependente da superfície de rugosidade e ângulo de incidência do que o retroespalhamento plano polarizado (BLANCHARD & ROUSE, 1980).

As polarizações plano polarizadas (HH e VV) oferecem ecos mais fortes do que as polarizadas cruzadas (HV e VH), no entanto, estas podem dar importantes informações sobre vegetação, gelo ou neve.

Para terrenos geológicos compostos por camadas com baixo ângulo de mergulho e distintas quebras topográficas - prováveis níveis litológicos - a polarização do tipo HH oferece muito mais informações do que as do tipo VV.

1.6.6 - Constante Dielétrica Complexa (Permitividade)

A constante dielétrica complexa ou permitividade influencia a absorção e propagação de ondas eletromagnéticas, ou seja, a habilidade de refletir ou armazenar energia. Materiais com elevada constante dielétrica complexa, tais como metais e água, são excelente refletores. Quando esta constante é baixa em materiais que compõem o terreno, favorece a penetração das ondas de Radar, a exemplo de areia seca e neve fresca.

Com o aumento do comprimento de onda amplia-se efetivamente, a permitividade da água. Deste modo, como pode ser observado na Figura 1.29, para as bandas Ka e X, a constante dielétrica fica entre 30 e 45, respectivamente, ao passo que para a banda C a mesma fica entre 50 e 60, enquanto que para a banda L o valor gira em torno de 80. Rocha e solo raramente contêm mais do que 15% de água, assim que os efeitos da mistura sobre as propriedades dielétricas são consideravelmente reduzidos com o que é sugerido pela Figura 1.29. Assim sendo, pelo que é mostrado na Figura em lide, a banda Ka, pelo fato de possuir menor valor de permitividade da água, possibilitaria maior penetração das microondas. No entanto, na prática pelo que se tem observado, a banda L é a que fornece maior número de informações de subsuperfície, malgrado seu elevado valor de permitividade.

A parte real da constante dielétrica complexa é a permissividade do meio e a parte imaginária é expressa em termo de condutividade do meio (SIMONETT & DAVIS, 1985). A permissividade sendo entendida com a quantidade de energia que pode ser armazenada na forma de campo elétrico e condutividade a quantidade de energia que pode ser dissipada na forma de calor. Estas propriedades são fortemente dependentes do conteúdo de água líquida da superfície, a estrutura da água sólida (gelo) e a frequência da energia.. Assim sendo, a penetração é maior e a reflexão é menor com baixo conteúdo de água, e inversamente a penetração é menor e a reflexão é maior quando a teor de mistura de água é alta em neve, gelo e solo.

Solos secos e rochas têm permissividade que varia de 3 a 8. Para comprimentos de onda em torno de 25 cm, banda L, a penetração em materiais secos chega em torno de 6 m. A água tem uma permissividade de 80, o que vai influenciar sobremaneira na refletividade de materiais como solo, vegetação e rochas. Recentes estudos indicam que o conteúdo de mistura de água acima de 1% impede qualquer tipo de penetração, de modo que tal fenômeno só pode ser esperado em terrenos hiperáridos (DRURY, 1987). A prática, no entanto, tem mostrado que comprimentos de onda acima de 20 cm têm componente de penetração, mesmo em terrenos úmidos.

Por causa de suas folhas as plantas têm um alto teor em umidade, sendo assim, a vegetação tem uma elevada permissividade, compondo excelentes refletores. Como resultado somente uma proporção de energia de radar é possível penetrar abaixo da superfície, dependendo da natureza e densidade do seu dossel, e isso pode ser melhor obtido em comprimento de ondas maiores.

Devido a natureza polar das moléculas de água e, conseqüentemente, o pequeno tempo de relaxação, a constante dielétrica da água é muito sensível à frequência e temperatura dentro da faixa do espectro.

A refletividade em uma interface lisa é governada pela lei de Snell e o coeficiente de reflexão de Fresnel. Este descreve a variação com o ângulo de incidência e o índice de refração, como expresso pela constante dielétrica complexa. Em qualquer dado ângulo a magnitude da reflexão é proporcional a magnitude da constante dielétrica. Sobre a faixa de frequência da maioria dos sistemas de Radar esta magnitude varia de 20 a 80. Em contraste, a maioria da constante dielétrica de material natural seco varia de 3 a 6. Esta disparidade em termos de constante dielétrica dá a importância do conteúdo de mistura de água na reflexão de materiais do terreno.

1.6.7 -Rugosidade da Superfície

A superfície de rugosidade (T_1) é o fator dominante na determinação da amplitude de retorno, e deste modo o brilho (tom) da imagem. A energia incidente sobre uma superfície é parcialmente refletida, de forma difusa ou especular, dependendo da rugosidade da superfície.

A rugosidade, em termos de interação com radiação eletromagnética, é um termo relativo dependendo do comprimento de onda e do ângulo de incidência e/ou ângulo de depressão. Duas relações a respeito de rugosidade podem ser quantificada, consoante o critério Rayleigh, devido a Lord Rayleigh, conforme pode ser visto nas equações abaixo. Nestas, a altura da irregularidade - rugosidade - é determinada pelo comprimento de onda (λ) e ângulo de

incidência (θ). Nesse caso para uma superfície aparecer lisa a uma radiação tem que satisfazer o seguinte critério:

$$h < \lambda/25 \text{ sen } \theta$$

Por outro lado, para satisfazer uma superfície rugosa tem-se :

$$h > \lambda /4,4 \text{ sen } \theta$$

Pode-se concluir que uma mesma superfície pode ser lisa em grandes comprimentos de onda e rugosa em pequenos comprimentos de onda. De uma maneira geral, os corpos de água-rios, lagos, açudes- são superfícies predominantemente especulares, ao passo que florestas, solos arados, zonas urbanas, funcionam amiúde como superfícies difusas. De igual modo superfícies do terreno arrançadas de forma que suas faces formem ângulos retos, resultam em múltiplas reflexões entre as faces, comportando-se como superfícies refletoras de canto como, por exemplo, a copa de palmeiras, pontes, zonas urbanas, dando como resultado um forte retorno, imprimindo na imagem um brilho forte (tom branco)

1.6.8 - Subsuperfície de Rugosidade

O efeito de subsuperfície é de uma maneira visualmente importante no caso de neve fresca seca ou areia seca e limpa sobre outros materiais. Exemplos podem ser encontrados onde o volume do retorno vem de camadas em subsuperfície.

Tais efeitos são melhores evidenciados em comprimentos de onda acima de 20 cm, i. e. banda L, em que vai existir o retroespalhamento do terreno, em zonas cobertas de vegetação ombrófila densa , na detecção de vales.

1.6.9 -Volume do Espalhamento

Uma porção do retorno em florestas será o volume de espalhamento derivado de múltiplos retornos de folhas, ramos e troncos. Isto pode ser uma contribuição para o estudo relativo do comportamento isotrópico do retroespalhamento dessas superfícies. Em adição a esses retornos, reflexões derivadas de camadas do terreno também pode ser possíveis em comprimentos de ondas grandes (>20 cm).

Na prática, a principal superfície de rugosidade, volume de espalhamento do solo e da vegetação e reflexão de camadas enterradas, todos contribuem para a complexidade da estrutura do alvo e parte da superfície de rugosidade total. No entanto, na polarização cruzada e paralela é possível distinguir quais os parâmetros que afetaram o retroespalhamento.

1.7 - COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS EM RELAÇÃO ÀS MICROONDAS

1.7.1 - Água

As propriedades dielétricas e estruturais da água influenciam no retroespalhamento e, por conseguinte, na interpretação da imagem RVL. A reflexão de retorno da superfície da água vai depender de sua rugosidade e do comprimento de onda usado. O RVL é deste modo capaz de detectar fenômenos de superfície e próximo da mesma, os quais podem afetar a superfície de rugosidade direta ou indiretamente. Ondas de superfície, padrões de superfície de ventos

cisalhantes, correntes e redemoinhos, e ventos ou superfícies polidas de óleo são alguns exemplos destes fenômenos (ELACHI,1980).

O perfeito delineamento da linha de costa nem sempre é factível por interpretação visual, quando houver uma zona de praia plana, em vista das geometrias idênticas, água/terra, mesmo se considerando a superfície " encrespada" da água. Por sua vez, a delimitação de lagos em zonas de florestas ombrófilas é bem marcante , o mesmo não ocorrendo em zonas de savana parque ou savana gramíneo-lenhosa, por questões essencialmente geométricas, como visto anteriormente.

Por sua vez, em regiões de relevo forte as extensas sombras prejudicarão, sem dúvida, a delimitação de corpos de água, lagos, por exemplo, necessitando uma certa experiência por parte do radarintérprete, para sua perfeita delimitação.

Enquanto a rugosidade da superfície da água influencia o tom e a textura radargráficos, ondas de superfície aparecem como uma periódica e regular mudança no tom da imagem. O padrão produzido é o resultado de três efeitos de superfície que são modulados pela ação de uma onda de superfície (ELACHI, 1980): a pendente local; a intensidade e agrupamento de pequenas ondas de gravidade e capilaridade; e a velocidade orbital da onda.

A polarização HH oferecerá retroespalhamentos de maior amplitude, do que a VV e as cruzadas, VH e HV, para um mesmo tipo de superfície de água "encrespada ".

1.7.2 - Neve e Gelo

O retroespalhamento das microondas no gelo é radicalmente diferente da água. O gelo tem uma baixa constante dielétrica complexa, de forma distinta da água, entretanto, o gelo se

apresenta em variedades de formas e estruturas, as quais provocam diferentes Coeficientes de Retroespalhamento de Radar nas microondas. Três dessas formas são aqui analisadas: neve, geleiras e mar de gelo (banquisa).

A neve fresca se apresenta, comumente, em flocos e seca, podendo ser considerada como uma mistura dielétrica de ar e gelo. A permitividade é função direta da densidade da neve. A neve fresca tem baixa densidade e permitividade de 1,6 ou menos. Como a densidade da neve seca aumenta, a parte real da permitividade também aumenta e se aproxima do gelo. Próximo a temperatura de congelamento a água líquida aparece e a neve torna-se uma mistura de ar, gelo e água líquida. A permitividade da neve seca é de 2, enquanto da água líquida é 80.

A acumulação de neve, por compactação e resfriamento, produz uma textura granular referida como nevado ("firn"). Deste modo, a neve velha é granular, compondo granulos de até 3 mm. Quando o ar entre os grânulos é forçado para fora e com a conseqüente redução do espaço, forma-se uma geleira. Esta, geralmente, compõe-se de imensos blocos, os quais tem perfeita representatividade na resolução espacial do RVL e apresenta heterogeneidades em sua superfície.

O mar de gelo (banquisa) funciona para as ondas de radar como uma superfície polida, produzindo deste modo uma reflexão do tipo especular, com reflexão de retorno para as irregularidades de superfície.

Em resumo, pode-se observar que através das microondas é possível individualizar em imagem RVL : água, neve fresca, neve velha ("firn") , geleira e mar de gelo (banquisa).

1.7.3 - Vegetação

A vegetação exerce grande influência no retroespalhamento das microondas, uma vez que se situando à superfície do terreno, irá provocar, uma maior ou menor, variação no Coeficiente de Retroespalhamento de Radar (CRR), dando como consequência modificações tonais, especialmente em regiões de topografia plana. Deste modo, para melhor compreender o significado da cobertura vegetal, necessitar-se-ia observar uma determinada região com suas formas de relevo, vegetadas e não vegetadas. Para terrenos planos o contraste é bem marcante, principalmente se a cobertura for de vegetação ombrófila densa. Assim sendo, quando não existir cobertura vegetal o retorno da ondas de Radar será influenciado diretamente pela geometria da superfície do terreno imageado, enquanto que, com sua presença poderá provocar até uma falsa idéia da topografia do terreno, principalmente no caso de vales e pequenas elevações, devido a diferença de altura das árvores. Tais situações ocorrem em sistemas de Radar da banda X ou K, ou seja quando a reflexão de retorno se dá na copa das árvores.

De uma maneira geral, para as bandas X e K haverá a influência das folhas, enquanto para a banda C folhas e galhos e a banda L, sobretudo galhos. Assim sendo, enquanto as bandas X e K denotam a dependência essencialmente da cobertura vegetal, as bandas C e L já terão influência do terreno, em vista de sua penetração provocada pelo seu maior comprimento de onda. De igual modo, a presença de dossel emergente já terá um significado maior nas bandas X e K, produzindo, inclusive, distintos retroespalhamentos, e conseqüentemente texturas diferentes.

O território brasileiro apresenta-se com cerca de 95% de sua área coberta por vegetação, mesmo se considerando a ação antropogênica, em especial nos estados do sul e sudeste. Dentre

os exemplos mais clássicos de regiões com escassa cobertura vegetal, tem-se àquelas que se apresentam cobertas por dunas: Lençóis Maranhenses (MA), na faixa costeira, e para o interior do continente, na porção do Médio rio São Francisco, região de Xique-Xique-BA

Para melhor entender o comportamento da vegetação com relação às ondas de Radar, necessita-se, antes de mais nada, utilizar uma classificação fitogeográfica, a fim de servir de referencial para as considerações que serão feitas, em especial, de cunho geométrico, das formações florestais. A classificação fitogeográfica adotada é àquela apresentada pelo IBGE (1992), e que serviu de base para os mapas fitoecológicos editados pelo Projeto RADAM (RADAMBRASIL), nas décadas de 70 e 80, em um total de 38 volumes de Levantamento de Recursos Naturais, dos quais 34 já foram editados. Tal classificação é apresentada na Tabela 1.26., de forma simplificada, visando apenas fornecer os parâmetros necessários para as considerações que serão feitas a seguir.

Segundo esta classificação, o Ambiente/Relevo em que as formações florestais ocorrem são divididos em : aluvial, terras baixas, submontana, montana e alto-montana. O aluvial ocorre na planície de inundação dos cursos de água; as terras baixas correspondem aos tabuleiros que orlam as planícies costeiras; o submontana relaciona-se a terrenos dissecados; montana a planaltos situados entre 600 e 2 000 m de altitude e alto-montana para altitudes acima de 2 000 m.

Para análise desse comportamento, deve-se estudar os fatores do sistema Radar e das formações fitogeográficas que influenciam diretamente no retroespalhamento das microondas

Vários parâmetros são de grande importância com respeito ao comportamento das formações vegetais em relação ao retroespalhamento das ondas de Radar: fisionomia, clima/deficit hídrico, forma da copa, porte dos indivíduos, disposição dos ramos, densidade dos

indivíduos, ambiente/relevo e tipo de dossel. Por sua vez o sistema de Radar irá influenciar no que tange ao seu comprimento de onda e polarização.

As considerações apresentadas, a seguir, são válidas para sistema de Radar de banda X, com polarização paralela (HH), em que a premissa fundamental é que a reflexão de retorno se dá na copa das árvores. Deste modo, para outros sistemas de Radar, nas bandas C (ERS-1, RADARSAT) e L (SIR-A, -B, -C e SEASAT) serão necessárias considerações adicionais, uma vez que a reflexão de retorno não se dá apenas nas copas das árvores, havendo penetração, com reflexões nos níveis inferiores.

1.7.3.1 - Floresta Ombrófila

O termo Ombrófila, de origem grega, significa " amigo das chuvas", higrófila, podendo ser de acordo com sua fisionomia: densa, aberta e mista.

A **Floresta Ombrófila Densa** apresenta copa de forma circular e topo convexo, com árvores de porte médio e grande, de ramos divergentes e bem adensadas, ocorrendo sob um clima sem período seco (Floresta Amazônica/Floresta Atlântica). Assomam em terrenos do tipo aluvial, terras baixas, submontana, montana e alto-montana. Seu tipo de dossel pode ser uniforme ou emergente (IBGE, 1992).

A maioria dos parâmetros analisados indica uma tendência de forte retroespalhamento, retratado por um tom cinza a cinza claro. Para os terrenos aluviais e terras baixas a distinção será provocada pela morfologia do terreno. No entanto, nos terrenos do tipo submontana, montana e

alto-montana a influência maior será da topografia do terreno, fato agravado nos dois últimos ambientes, em vista da grande incidência de sombras extensas e encurtamento de pendentes.

A **Floresta Ombrófila Aberta** (Floresta de Transição) ocorre em área de clima semelhante a da Floresta Ombrófila Densa, no entanto, mostra-se associada a quatro fisionomias específicas:: palmeira, cipó, bambu e sororoca (IBGE, 1992). Dessas, apenas as palmeiras irão influenciar no Coeficiente de Retroespalhamento de Radar, em virtude da forma de suas copas, às quais são semelhantes a refletor de canto. Contudo, se comparada com a Floresta Ombrófila Densa apresenta menor intensidade de reflexão de retorno das ondas de Radar. Pode ocorrer em terrenos do tipo: terras baixas (baixos platôs), submontana e montana.

A **Floresta Ombrófila Mista** (Mata dos Pinheiros) é um tipo de vegetação do Planalto Meridional, onde ocorria com maior frequência (IBGE, 1992). As araucárias tem como característica fundamental a presença de copa bem peculiar, de topo plano, com médio e grande porte, ramos divergentes e médio adensamento. Expõe-se em terrenos do tipo aluvial, submontana, montana e alto-montana, com dossel uniforme ou emergente. As considerações feitas para a Floresta Ombrófila Densa são válidas para a formação florestal em lide, mesmo se admitindo que as mesmas fornecem texturas radargráficas distintas, desde que ocorram em um mesmo tipo de terreno.

1.7.3.2 - Floresta Estacional

O conceito ecológico deste tipo de vegetação está condicionado pela dupla estacionalidade climática, uma tropical com épocas de intensas chuvas de verão, seguida por

estiagem acentuada; e outra subtropical, sem período seco, mas com seca fisiológica provocada pelo intenso frio do inverno, com temperaturas médias inferiores a 15°C (IBGE, 1992). A Floresta Estacional divide-se em Semidecidual e Decidual. Na primeira, a percentagem das árvores caducifolias no conjunto florestal e não das espécies que perdem as folhas individualmente, situam-se entre 20 a 50% na época desfavorável. Ocorre na região sudeste (SP, MG, RJ e ES), como também no norte do Mato Grosso. A Mata Caducifólia ocorre em área de clima semelhante da Mata Semicaducifólia, contudo a percentagem das árvores caducifólias é superior a 50%. Dispõe-se principalmente no sul da Bahia e centro-norte do Maranhão.

Este tipo de vegetação está condicionado ao clima/deficit hídrico, 4 a 6 meses secos ou 3 meses abaixo de 15 °C, fatores que irão influenciar no retroespalhamento, em vista da maior permissividade e um maior ou menor adensamento das espécies individuais, dando como consequência uma tonalidade cinza clara a cinza escura. O dossel pode ser uniforme ou emergente, como também pode assomar em terrenos do tipo aluvial, terras baixas (baixos platôs), submontana e montana, ressaltando que somente nos dois primeiros não haverá influência da topografia, ou seja a cobertura vegetal terá uma influência significativa no Coeficiente de Retroespalhamento de Radar (CRR).

1.7.3.3 - Campinarana (Campinas)

Os termos Campinarana e Campina são sinônimos e significam "falso campo". A prioridade contudo cabe ao primeiro, porque Ducke e Sampaio, apud (IBGE, 1992) o empregaram para a região ecológica do alto rio Negro (AM), embora já tenha sido denominada

por esses autores de " caatinga do rio Negro". Em território brasileiro ocorre essencialmente na bacia do rio Negro, sendo caracterizada por ecótipos raquíticos amazônicos, ombrófila, higrófila, tipificando-se por árvores finas e altas que revestam áreas pediplanadas arenosas e quase sempre encharcadas, ou então aluviais, com ou sem palmeiras (IBGE, 1992).

Esta classe de formação é dividida em três subgrupos de formações: arborea densa ou florestada, arborea aberta ou arborizada e gramíneo-lenhosa.

O subgrupo arborea densa, pelas suas características geométricas, mostra um retroespalhamento de maior amplitude, em vista da maior densidade de seus indivíduos em relação ao subgrupo arborea aberta. Ao passo que, o gramíneo-lenhosa por se constituir de espécies rasteiras, campestre pantanosa, produzirá uma tonalidade cinza bem escuro a preto. Nos tipos arbóreos, a maior incidência de palmeiras produzirá um retroespalhamento mais forte.

1.7.3.4 - Savana (Cerrado/Campos)

A Savana é definida por IBGE (1992) como uma vegetação xeromorfa preferencialmente de clima estacional (mais ou menos 6 meses secos), não obstante podendo ser encontrada em clima ombrófilo. Caracteriza-se por árvores baixas e tortuosas, casca grossa e rugosa, com folhas grandes e duras, revestindo um tapete graminoso contínuo. Distribui-se principalmente pelo centro-oeste (MT, MTS e GO), nordeste (BA, MA e PI), norte (TO) e sudeste brasileiros..

A Savana (Cerrado) foi subdividida em quatro subgrupos de formação: Savana Florestada (Cerradão), Savana Arborizada (Campo-Cerrado), Savana Parque e Savana Gramíneo-

Lenhosa (IBGE,1992). Tendo por base os parâmetros densidade , porte dos indivíduos e disposição dos ramos pode-se afirmar que a Savana Florestada apresenta médio retroespalhamento das ondas de Radar, contudo a amplitude de retorno é menor se comparada com as florestas ombrófilas. No entanto, a Savana Arborizada terá um retroespalhamento fraco, considerando os parâmetros acima considerados. Por sua vez, os subgrupos de formação Savana Gramíneo-Lenhosa e Savana Parque produzirão uma tonalidade cinza bem escuro a preto, por não possuírem praticamente retroespalhamento, mesmo se considerando que a Savana Parque possui algumas espécies de médio porte, contudo muito espaçadas uma das outras.

A Savana pode se apresentar associada com floresta-de-galeria ou sem-floresta-de-galeria, sendo as primeiras bem marcadas quando se associam a Savana Parque ou Savana Gramíneo-Lenhosa. De igual modo, este tipo de vegetação (Savana) é bem caracterizado quando associado a pediplanos ou planaltos tabulares. No entanto, quando associado a relevo montanhoso muito de suas características são influenciadas pela topografia do terreno.

1.7.3.5 - Savana-Estépica

O termo foi empregado para designar a área do "sertão nordestino" com dupla estacionalidade, uma área disjunta no norte do Estado de Roraima e duas outras áreas, também disjuntas chaqueanas - uma no extremo sul do Estado do Mato Grosso do Sul e outra na barra do rio Quaraí quando desemboca no rio Uruguai, no Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 1992).

A Savana-Estépica é composta , em geral, por plantas lenhosas espinhosas, de pequeno porte, com copa de forma circular, ramos de disposição radial e pouco adensados, revestindo um tapete graminoso contínuo.

Esta classe de formação subdivide-se em quatro subgrupos de formações: Savana-Estépica Florestada, Savana-Estépica Arborizada, Savana-Estépica Parque e Savana-Estépica Gramíneo-Lenhosa.

Fazendo-se uma comparação, pode-se afirmar que a Savana-Estépica apresenta uma menor intensidade de retroespalhamento do que a Savana, analisada anteriormente, tendo por base os parâmetros densidade, porte dos indivíduos e disposição dos ramos. De igual modo, com referência aos subgrupos de formações os tipos florestados vão apresentar maior retroespalhamento, seguido pelo tipos arborizados, sendo que para os subgrupos parque e gramíneo-lenhosa praticamente não haverá reflexão de retorno, por motivos já explicitados no item anterior. Pode apresentar-se associada ou não com floresta de galeria.

Em termos de imagens de radar de visada lateral (RVL), a presença da savana-estépica só será sentido em terrenos planos, ao passo que para áreas montanhosas a submontanhosas a influência da retrodifusão será praticamente dos tipos rochosos.

1.7.3.6 - Estepe

O termo Estepe de procedência russa foi empregado originalmente na Zona Holártica e extrapolado para outras áreas mundiais, inclusive a Neotropical sul brasileira, por apresentar homologia ecológica (IBGE, 1992).

Esta área subtropical, onde as plantas são submetidas a dupla estacionalidade - uma fisiológica provocada pelo frio das frentes polares e outra seca, mais curta, com déficit hídrico - apresenta uma fisiologia fisionômica, embora seja diferente da área original Holártica (IBGE, 1992).

Em território brasileiro, podem ser divididas em três subgrupos de formação: arborizada, parque e gramíneo-lenhosa. Dispõe-se em dois grandes tipos de relevo: pediplano gaúcho (campanha gaúcha) e pediplano nordestino (caatinga), e o planalto meridional (campos gerais).

Em suma, a Estepe (Caatinga/Campanha Gaúcha) apresenta árvores com folhas pequenas, muitas vezes providas de espinhos, entremeadas de cactáceas, revestindo um tapete graminoso estacional. Pode apresentar-se com ou sem floresta de galeria.

Apenas a Estepe Arborizada apresenta características geométricas de fraca reflexão de retorno, ao passo que a gramíneo-lenhosa e a parque apresenta tonalidade escura, devido a ausência de retroespalhamentos.

1.7.3.7 - Formações Pioneiras

Ao longo do litoral, bem como nas planícies fluviais e mesmo ao redor das depressões aluvionares (pântanos, lagoas e lagoas), ocorrem freqüentemente terrenos instáveis cobertos de vegetação. Trata-se de uma vegetação de primeira ocupação de caráter edáfico que ocupa os terrenos rejuvenescidos pelas seguidas deposições de sedimentos marinhos nas praias e restingas, como também dos aluviões fluviomarinhos nas embocaduras dos rios e os solos ribeirinhos aluviais e lacustres. São essas as formações que se consideram como pertencendo ao

complexo vegetacional edáfico de primeira ocupação (formações pioneiras) (IBGE, 1992). Ocorrem ao longo do litoral, na desembocadura dos rios no mar, como também ao longo de rios e lagoas.

Pode ser dividida em vegetação com influências: marinha (restingas), fluviomarinho (manguezal e campo salino) e fluvial.

De uma maneira geral, a vegetação ligada a restingas é de pequeno porte e praticamente sem representatividade em termos de retroespalhamento. No entanto, as formações pioneiras de caráter fluviomarinho são bem realçadas em imagem RVL, dando com resultado um médio a forte retroespalhamento, com tonalidade cinza claro a cinza bem claro. Por sua vez, as de caráter aluvial são bem marcadas muito mais pelas suas feições fisiográficas do que propriamente pela sua tonalidade.

1.7.3.8 - Vegetação de Transição (Tensão Ecológica)

São assim denominados os contatos entre dois ou mais tipos de classes de formações. Geralmente constituem uma área de transição, entre uma classe e outra.

1.7.4 - Rochas

Por ser um dos objetivos desta obra, apenas algumas considerações serão aqui feitas sobre as características das rochas em imagens RVL, com o intuito de servir de preâmbulo para o item seguinte : solos.

Neste ítem não serão consideradas as influência provocadas pela cobertura vegetal e o clima sobre as rochas.

Geralmente, é possível, em primeira instância, determinar em imagem RVL se a rocha é ígnea, sedimentar ou metamórfica, como será visto com mais detalhes no capítulo 2.

As rochas ígneas não mostram orientação, são geralmente de topo convexo a convexo-agudo, com pendentes verticais a inclinadas, expondo em seu interior intenso fraturamento.

As rochas sedimentares dispõem-se sob a forma de extensos tabuleiros de topo plano ou com pequeno caimento, sem orientação preferencial, com pendentes verticais a ravinadas, podendo exhibir intenso fraturamento.

As rochas metamórficas mostram marcante orientação em suas exposições na imagem RVL, em vista de seus topos agudos, pendentes amiúde ravinadas e com fraturamento transversal.

1.7.5 - Solos

A identificação de solos em imagem RVL, constitui-se em uma tarefa bem difícil, uma vez que o mesmo(solo), amiúde, apresenta-se encoberto. Deste modo, torna-se necessário para sua identificação, uma análise dos fatores físicos do terreno: formas de relevo e drenagem. Acrescente-se, ainda, material de origem (rochas), cobertura vegetal e principalmente a ação do clima e dos organismos. Desses fatores as formas de relevo, drenagem, material de origem e cobertura vegetal são factíveis de extração em imagem RVL e serão aqui abordados.

De qualquer sorte, dois lembretes são importantes:

- o clima é de grande importância na formação dos solos, uma vez que uma mesma rocha poderá formar solos diferentes se decomposta em climas diferentes;
- solos úmidos, ou então, com grande teor de metálicos exibem maiores retroespalhamentos na imagem RVL, se comparados com outros tipos de solos.

Segundo PRISMA (1977), os solos podem ser classificados conforme Tabela 1.27.

Na ordem zonal estão agrupados os solos com características bem desenvolvidas que refletem a influência dos fatores ativos na formação do solo: clima e organismos. Na ordem intrazonal estão reunidos os solos que tem características que refletem a influência dominante do relevo ou do material de origem, em relação aos efeitos produzidos pelo clima e pelos organismos, de grande significado na imagem RVL. Na ordem azonal estão incluídos os solos que não têm características bem desenvolvidas, seja devido ao pouco tempo de sua formação, ou à natureza do material original e do relevo que impediram o desenvolvimento de características típicas de zonas climáticas onde ocorram (PRISMA, 1977).

Dentro da ordem zonal tem-se: latossolo, podzólico, podzóis, brunizem, brunos não cálcico, desértico e tundra. Conforme será observado a seguir dois fatores são preponderantes: clima e ação de organismos. Deste modo sua definição através de fatores físicos do terreno e material de origem desempenham papel secundário, tendo como consequência uma maior dificuldade de sua identificação em imagem RVL.

Os latossolos são solos maduros, desenvolvidos em clima tropical úmido muito profundos, bastantes porosos, de textura variável, assomando em zonas de forte intemperismo e com pequena diferenciação entre os horizontes pedológicos. Os latossolos ocorrem em zonas de aplanamento inumados, compondo extensos chapadões de topo plano, com fraco ou sem

caimento, geralmente associados à rochas sedimentares, podendo, no entanto, ocorrerem relacionados à rochas ígneas (basalto, granitos, etc), e até com rochas metamórficas (xistos, filitos, etc). A drenagem é comumente de baixa densidade. A delimitação em imagem RVL é facilitada pelo ressaltado dos chapadões, com suas vertentes verticais ou ravinadas.

Os solos podzólicos, com diferenciação marcante entre os horizontes pedológicos de forma bem distinta dos latossolos, ocorrem em terrenos dissecados, de grau baixo a médio, e significativa a média densidade de drenagem. São solos profundos e moderado a fortemente intemperizados. Deste modo, enquanto, em linhas gerais, os latossolos se desenvolvem em chapadões os solos podzólicos têm seu maior desenvolvimento em zonas dissecadas, em relevos de porte médio.

Os solos podzóis possuem uma acumulação de óxido de ferro e material húmico no horizonte B. Desenvolvem-se em terrenos planos, amiúde arenosos, em clima quente-úmido a super-úmido. Tipificam-se em imagens RVL em zonas com elevado grau de dissecação, drenagem escassa, com grande incidência de lagoas. Associam-se geralmente a terrenos sedimentares de acumulação pleistocênica, a exemplo do que ocorre na região do alto rio Negro (AM).

Solos Brunizem são relativamente rasos, não muito intemperizados e possuem um horizonte A₁ escuro, rico em matéria orgânica e cálcio. Associam-se a regiões planas, com cobertura de gramíneas (Savana Estépica e Estepe) e é comum desenvolverem-se em rochas sedimentares de constituição pelítica.

Os solos Brunos não-Cálcicos são moderadamente rasos e apresentam horizonte superficial de coloração marrom (bruna). Tais solos são comuns em regiões semi-áridas do

Nordeste brasileiro, com vegetação da classe Estepe (caatinga). Associam-se principalmente a rochas metamórficas.

Os solos Desérticos são bastantes rasos, pouco intemperizados e ocorrem em regiões áridas, com uma vegetação bem escassa. Sem exemplo em território brasileiro.

Os solos Tundra associam-se a regiões frias, com uma vegetação característica do mesmo nome. Não se tem exemplo em território brasileiro.

Os solos da ordem intrazonal sofrem mais influências do relevo e do material de origem, sendo por isso identificados com mais facilidades em imagem RVL. Constituem-se pelos solos: hidromórficos, salinos e grumossolos.

Os solos hidromórficos sofrem grande influência do lençol freático, e deste modo estão geralmente saturados com água. Tal situação ocorre em clima úmido, em terrenos planos, nas planícies de inundação de rios e lagos. Recebem denominações especiais: Glei Húmico, Glei Pouco Húmico, Planossol, Podzol; Hidromórfico e Laterita Hidromórfica. A definição dos mesmos em imagem RVL é facilitada, tendo em vista seu relacionamento com corpos de água acima citados.

Os solos salinos apresentam uma concentração muito alta de sais solúveis, predominando o cloreto de sódio, com vegetação bem escassa. Tais solos ocorrem nos locais mais baixos de relevo, nas regiões áridas e semi-áridas, e em áreas próximas ao mar. Tais situações ocorrem no Nordeste brasileiro. Correspondem, mormente, a um baixíssimo Coeficiente Retroespalhamento de Radar.

Os Vertissolos são solos normalmente cinza-escuros, com elevado teor de montmorilonita, que tem a propriedade de expansão com o umedecimento, e contração com a

secagem. Situam-se normalmente em baixadas planas a quase planas. Sua característica mais importante é a presença de fendas. Ocorrem principalmente no Nordeste brasileiro em terrenos planos, de constituição pelítica.

Os solos pouco desenvolvidos ou azonais tem seu horizonte A jacente diretamente sobre o horizonte C, o qual guarda feições estruturais e litológicas do material de origem: litossolo, regossolo, aluvial e cambissolo.

O Litossolo corresponde praticamente ao afloramento rochoso, em geral ocorre em rampas muito inclinadas, área de relevo montanhoso.

O Regossolo é solo em início de formação sobre mantos de intemperismos muito profundos. O relevo é geralmente plano, ou então, com declives suaves, dispondo-se, comumente, na base de zonas montanhosas.

Quando o solo se desenvolve em sedimentos muito arenosos, pode ser denominado de Areias Quartzosas. A vegetação que capeia estes solos é variável, e é a sua classe florestal que vai definir o tipo de tonalidade determinante na imagem RVL.

O solo Aluvial é desenvolvido em sedimentos recentes, geralmente de origem aluvial, cuja delimitação em imagens RVL é bem típica e será abordada no Capítulo 2.

O Cambissolo apresenta características de Litossolos, Regossolos e/ou solos Aluviais, o qual apresenta um horizonte B pouco desenvolvido, ou em estado incipiente.

1.8- PRODUTOS E APLICAÇÕES

As imagens de radar são apresentadas sob a forma de faixas ou mosaicos, nas escalas 1:250.000, 1:200.000 e 1:100.000. As escalas originais são, amiúde, pequenas: GEMS (1:400.000 e 1:250.000), STAR SISTEM (1:200.000) e SIR (1:500.000). No entanto, é possível apresentá-las em escalas maiores (1:50.000). A GEMS (Good Year Eletronic Mapping Sistem) possui a tecnologia de transformar os negativos preto e branco em coloridos, objetivando exibir maiores detalhes do terreno. Por outro lado, o uso da estereoscopia é de grande valia nas interpretações, como também as combinações LANDSAT/RADAR, conforme metodologia apresentada por AGUIRRE et al. (1978).

A grande vantagem dos produtos do SIR e ERS-1, e futuramente RADARSAT, é a possibilidade de apresentação em modo digital, o que possibilita melhorar a qualidade da imagem e utilizar alguns aplicativos.

O melhor exemplo de aplicabilidade das imagens de Radar no levantamento de recursos naturais, em termos mundiais, deve-se ao profícuo trabalho efetivado pelo então projeto RADAM (RADAMBRASIL), no período de 1971 a 1986, envolvendo os campos da cartografia, geologia, geomorfologia, pedologia, fitoecologia e uso potencial da terra em todo o território brasileiro. Os produtos de tão significativo trabalho estão consubstanciados em 38 volumes, denominados LRN, dos quais foram até hoje publicados 34. Com a extinção do referido projeto em 4 de março de 1986, a responsabilidade da publicação dos volumes restantes ficou a cargo da Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pertencente a Secretaria de Planejamento, Orçamento e Coordenação.

A grande utilização das imagens de Radar se concentra nos campos da geologia, geomorfologia, cartografia, pedologia e fitoecologia, como também é de grande relevância no estudo das dinâmicas do gelo e do mar, e zonas costeiras.

Em vista de sua independência com relação às nuvens, as imagens de Radar são de grande valia nos estudos dos planetas que apresentam suas superfícies encobertas pelas mesmas, como acontece com Vênus e um satélite de Saturno (Titã).

Finalmente, deve-se enfatizar que com o lançamento do satélite ERS-1, em março de 1991, e dentro em breve, do RADARSAT, no segundo semestre de 1995, ter-se-á oportunidade de reavaliar as regiões já estudadas pela GEMS, em território nacional. Isto devido à visão dinâmica, radar digital, radar multiespectral e estereoscopia, que estão sendo oferecidas pelo sistema RADARSAT.

1.9- CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fim de constituir um exemplo do que foi explanado até aqui, idealizou-se uma região hipotética com formas de relevo e cobertura vegetal específicas, conforme pode ser visto na Figura 1.30. Na parte superior da mesma é exposta de forma esquemática uma região costeira, exibindo para seu interior a presença de chapadões com cobertura de vegetação tipo savana, a qual dá lugar a uma floresta densa associada com "hog backs". Na parte inferior esquematiza-se um diagrama relacionando tempo versus intensidade do sinal de retorno. Pela análise da Figura 1.30 observa-se que o RVL não discrimina na zona costeira, água e terra (1 e 2), em vista de suas idênticas geometrias, ou seja uma superfície plana, em que pese a constante dielétrica díspares, a

reflexão é sempre especular. No entanto, se a superfície da água estiver dominada por ondas, então ter-se-à heterogeneidades no alvo 1 e neste caso a discriminação dos alvos 1 e 2 dependerá da relação do comprimento de onda utilizado do Sistema RVL (λ), altura da rugosidade (h) e ângulo de incidência (θ). Para se ter uma superfície lisa é necessário que $h < \lambda / 25 \text{ sen } \theta$ e rugosa $h > \lambda / 4,4 \text{ sen } \theta$ (Critério de Rayleigh). Por sua vez, caminhando para o interior é possível discriminar a zona colinosa sem vegetação (3) em vista da reflexão difusa. Em 4, vai ocorrer encurtamento de pendentes e em 5, no topo do chapadão, a reflexão volta a ser difusa com tonalidade cinza escura, em vista do tipo de vegetação pouco densa. Em 6, 7 e 8, malgrado ser um terreno plano, distinções serão feitas no tipo de sinal de retorno, porquanto da presença de formações florestais distintas. Em 9, devido à presença de terrenos cársticos, haverá forte retorno em vista do efeito de canto (Figura 1.6). Em 10 e 11, os sinais de retorno serão muito semelhantes, devido a relação topografia / cobertura vegetal. Em 12, tem-se o resultado de um retorno do tipo frontal obtuso, e em 13 frontal agudo, este último com maior retroespalhamento para a antena.

A Figura 1.31 retrata a região de Brasília (DF), Folha SD.23-Y-C, na qual pode ser observada a grande atividade antrópica na região, mesmo se considerando que a imagem é relativa a 1975/76. A reflexão especular está evidenciada nos lagos (L) e desmatamentos em (D), assim como refletores de canto, com tonalidades brancas, estão bem representados em Brasília e nas suas cidades satélites. Na zona de relevo plano, domina uma tonalidade cinza, produto do retorno da vegetação do tipo cerrado que domina a região (C), além das matas ciliares com tonalidade branca (CI). Nas zonas dissecadas (DI), percebe-se a presença de encurtamento de

pendentes (E) e sombra (S), dando como consequência um maior ressaltado da morfologia. Quebras de relevo estão indicadas em (QR) e rodovias em (R).

Apresenta-se na Figura 1.32 um zoneamento aproximado do território brasileiro, no que tange à interpretação radargeológica, em termos de grau de resolução (interpretabilidade). Este, aqui entendido como a forma que se apresentam nas imagens RVL as feições geológicas, fundamentado na influência exercida pela fisiografia, clima e geologia. Uma vez que relevos com baixo desnível altimétrico produzirão menores comprimentos de sombras e quase ausência de encurtamento de pendentes. Por outro lado, a constituição litológica dos terrenos e sua complexidade, em termos de eventos tectono-estruturais, associado a fatores climáticos poderão maximizar ou minimizar o delineamento de elementos de imagem.

Assim sendo, os terrenos fanerozóicos das regiões norte e nordeste do Brasil são as que apresentam melhor grau de resolução de interpretabilidade, ao passo que o sudeste brasileiro (serras do Mar e Mantiqueira) e parcela da Amazônia (serras Imeri e Parima) são as que exibem pior grau de resolução de interpretabilidade. Zonas intermediárias, grau de resolução alta e média, situam-se em parte no nordeste oriental, e grande parte dos terrenos pré-cambrianos da Amazônia.

2 - METODOLOGIA DE INTERPRETAÇÃO RADARGEOLÓGICA

2.1.- INTRODUÇÃO

Interpretar, do latim *interpretari*, significa traduzir, ajuizar a intenção, o sentido de, buscar o significado, etc. Deste modo, para que o "intérprete" de imagens obtidas através de sensoriamento remoto consiga rastrear os vestígios ou pegadas das feições que está estudando, necessário se faz que entenda a totalidade de sinais eletromagnéticos produzidos, a fim de compreender a mensagem que os mesmos transmitem. Tal procedimento requer, para sua plena consecução, antes de qualquer pesquisa, um perfeito conhecimento do sensor que se está operando, como também um domínio do tema que se está perquirindo.

Imagem é o termo genérico aplicado a toda forma pictórica de representação, independentemente do comprimento de onda ou sistema utilizado para a produção da imagem. Embora seja um termo generalizado, é normalmente aplicado a Figuras provenientes de métodos que não se utilizam de filmes fotossensíveis, embora o produto final de um sistema radarmétrico seja uma fotografia preto e branco. Neste caso, no entanto, a detecção é um sistema não fotográfico (GARCIA, 1982).

Então, interpretar uma imagem, consiste em esquadrinha-la visando acumular informações que indiquem ou sugiram a verdadeira natureza das feições que se está estudando, de sorte que seu trabalho de pesquisador seja facilitado.

A metodologia clássica denominada "Método das Chaves" utilizada em fotografias aéreas na interpretação geológica, desde a década de 50, através dos trabalhos de LUEDER (1959),

posteriormente desenvolvida por MILLER (1961), RAY (1963), RICCI & PETRI (1965), ALLUM (1966) e VERGARA (1971), trouxe grandes subsídios para o conhecimento geológico. Contudo apresenta vários inconvenientes : necessidade de conhecimento prévio por parte do intérprete das imagens da área; estabelecimento de padrões de imagens, os quais podem ser ambiguos; e ausência de uma sistemática e lógica na caracterização das feições do terreno da área estudada. Por outro lado, na década de 60 surge outra importante escola na arte de fotointerpretação através de GUY (1966), denominado de "Método Lógico de Fotointerpretação", posteriormente inserida no Brasil através de RIVEREAU (1970) e SOARES & FIORI (1976).

GUY (1966) definiu seu método partindo de dois pontos de vista distintos: um completamente teórico, que consiste em estudar a estrutura da informação contida em uma fotografia, o outro , mais concreto, analisa os mecanismos utilizados na prática pelo intérpretes.

Tal metodologia tem tido grande aceitação por parte dos fotointérpretes. No entanto, a maior deficiência da mesma reside no fato de que seguindo as " regras do jogo", o produto pode ficar sem aplicação prática, a exemplo da frase " O vegetal como ar", que mesmo gramaticalmente correta, não tem sentido plausível. Além do mais, esta metodologia tem que ser utilizada por profissionais do ramo, uma vez que, para um intérprete não geólogo fica difícil distinguir uma crista de duna de uma cuesta, no que concerne a uma camada geológica (RIVEREAU, 1970).

No que tange a imagens de satélite envolvendo as faixas do visível e infravermelho, merecem destaque os inúmeros trabalhos desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), dentre os quais se tem os estudos desenvolvidos por VENEZIANI & ANJOS (1981) objetivando estabelecer uma metodologia para a interpretação de imagens LANDSAT,

seguindo a diretriz filosófica aplicada por SOARES & FIORI (1976.). Por sua vez, com relação às imagens de Radar de Visada Lateral (RVL), menção especial deve ser creditada aos trabalhos desenvolvidos pelo projeto RADAM (RADAMBRASIL) em todo o território nacional, embora, apenas LIU & RODRIGUES (1986) e LIMA (1989) dão enfoque especial a procedimentos metodológicos.

LIMA (1989) introduziu a metodologia de interpretação geológica em imagens de Radar codinominada de " Lógica das Chaves " , constituindo, segundo este autor, um somatório envolvendo vários aspectos dos métodos "das Chaves" e "da Lógica", cujos contextos foram percorridos em parágrafos anteriores. Posteriormente, LIMA (1995) renomeou-o como Sistemática das Chaves, explicando que o mesmo constitui uma sistematização de “chaves”. Este termo aplicado no sentido de “elementos radargráficos”. No entanto, a fim de evitar qualquer conotação do termo “chaves”, com o Método das Chaves, redenomina-se tal método de **“Sistemática de Elementos Radargráficos” (SER)**. Elementos radargráficos significando “feições”, ou seja conjunto de elementos de imagem, os quais são sistematizados nos quatro primeiros estádios (Leitura, Reconhecimento, Identificação e Análise), a fim de fornecer subsídios para o estágio Interpretação (s. s.).

Com respeito aos métodos Lógico e das Chaves, tornam-se necessárias algumas considerações:

- por serem métodos (Lógico e das Chaves) baseados em princípios básicos antagônicos, torna-se difícil estabelecer um método intermediário entre eles;
- deve-se evitar a utilização do termo "lógico", uma vez que tal utilização indica que os demais métodos são ilógicos.

Em vista do acima exposto, prefere-se renomear tal método denominando-o de "Sistemática de Elementos Radargráficos" (SER), o qual se fundamenta nas seguintes premissas, algumas das quais utilizadas nos métodos das Chaves e Lógico, sem, no entanto, constituir um meio termo entre ambos:

- é um método específico para o sensor RVL, uma vez que utiliza as propriedades inerentes do mesmo, como geometria, textura radargráfica, tom radargráfico, etc;
- tais parâmetros são obtidos em diferentes estádios, ou etapas, de forma "**sistemática**", a fim de se obter elementos radargráficos ,ou elementos de imagem de radar ("feições"), na identificação de estruturas, litotipos, litoestruturas, morfoestruturas, lito-morfoestruturas, etc, fundamentado na pesquisa e análise das formas de relevo, padrões de drenagem, geometria das feições lineares, planares e tabulares, e suas interações.

Em resumo, a metodologia "Sistemática de Elementos Radargráficos" apesar de evidenciar tendências geométricas mais inerentes ao método da "Lógica", por um lado, e sob outro aspecto no estabelecimento de critérios que mais se coadunam com o método "das Chaves" pretende ser um método independente de qualquer das duas escolas citadas, sendo dirigido , principalmente, ao geólogo recém-formado, ou então ao geólogo que trabalha intensamente com mapeamento geológico básico, ou ainda o geomorfólogo cuja atividade fim é elaborar um mapa geológico, em consonância com as características fisiográficas da área pesquisada.

Ademais, utiliza-se o termo " estágio " no sentido de fases ou etapas que devem ser alcançadas para a sua perfeita consecução.

Tal metodologia será percorrida e analisada nos itens seguintes desta obra e retrata uma experiência profissional de cerca 23 anos, a qual já teve a oportunidade de ser discutida e criticada em diversas formas técnico-científicas, através de cursos com enfoques variados.

Dentre os trabalhos de cunho geológico efetuados em território nacional, que abordam a utilização de imagens RVL combinada, ou não, com outros sensores, merecem citação: PEDREIRA (1974), LIMA (1975), LIMA (1978c), SOARES et al. (1981), CUNHA (1982a), MIRANDA (1983), LIMA (1984), CUNHA (1986), CUNHA (1988), LIMA (1988) , LIMA et al. (1990) e PARADELLA (1993), dentre outros.

2.2 - METODOLOGIA

Consoante à linha metodológica estabelecida por LIMA (1989), em princípio cinco estádios devem ser alcançados: Leitura, Reconhecimento, Identificação, Análise e Interpretação (s.s.) (Figura 2.1). Tais estádios serão descritos a seguir de forma resumida, a fim de proporcionar ao leitor um melhor entendimento dos mesmos.

O Estádio LEITURA consiste no exame minudente dos elementos de imagem que compõem uma determinada cena, a fim de entender seu significado no terreno, o que implica em conhecimento teórico dos princípios do sensor Radar por parte do intérprete. O primeiro passo é identificar o posicionamento da sombra a fim de se entender o significado espacial das formas de relevos e atividades antropogênicas. Por exemplo: identificações de cidades, estradas, pontes, culturas, drenagens, morros, zonas com ou sem vegetação, etc. Deste modo traços serpentiniformes negativos podem representar uma drenagem, igualmente feições convexas ou agudas positivas

devem constituir morros; traços escuros ou claros retratando polígonos regulares na imagem poderiam evidenciar antropismo e assim por diante. A própria prática deste estágio é sua condição primordial. Fazendo-se analogia com a gramática configura a fase de alfabetização onde o abecedário comporia os elementos de imagem (Figura 2.1.I), por exemplo:

- a ,b,c,d...

O Estádio RECONHECIMENTO visa agrupar os elementos de imagem já identificados no estágio anterior, de acordo com suas características radiométricas e seu significado espacial, com o fito de individualizar "zonas homogêneas", através dos parâmetros textura/tom radargráficos. A textura pode ser codinominada de lisa, grossa, muito grossa, média, fina e muito fina, ao passo que os tons serão classificados dentro dos matizes do cinza, tendo como extremos o preto e o branco. Na gramática compreende a fase de formação de slabas e a reunião das que forem idênticas (Figura 2.1.II), por exemplo:

- a, a, a, a,;
- bra, bra, bra, bra,;
- çe, çe, çe, çe,

O Estádio IDENTIFICAÇÃO consiste em estudar as "zonas homogêneas" dentro da ótica de textura e tom radargráficos, a fim de se identificar formas e codificar suas características, propendendo compará-las. Patenteia um estudo mais minudente da morfologia, principal parâmetro realçado no RVL, através das formas de relevo e padrão de drenagem. Para as formas de relevo necessário se faz a caracterização da configuração de seu topo, vale, pendente, quebra de relevo e avaliação de seu grau de dissecação. Consiste no arranjo das sílabas, visando a formação de palavras compreensíveis, em termos gramaticais (Figura 2.1.III). Por exemplo:

- CA+MA+RO+TE = CAMAROTE (com significado em português);

- PA+RAN+GA+RI+CU+TI+RI+MI+QUA+RU = PARANGARICUTIRIMIQUEARU

(sem significado em português);

- NI+RO+MJIM = NIROMJIM (sem significado em português).

Com o término do Estádio Identificação conclui-se a primeira fase de armazenamento de dados, ressaltando-se que a mesma consistiu essencialmente em obter, selecionar, codificar e sistematizar dados da imagem, os quais servirão de subsídios para os estádios seguintes.

O Estádio ANÁLISE tem como princípio estabelecer o relacionamento espacial das formas pesquisadas no estágio precedente. Visa detectar se as mesmas guardam uma disposição, ordem e relação no seio da imagem. Deste modo ter-se-á: feições sob a forma de linha (feições lineares), feições sob a forma de planos (feições planares) e feições alongadas, cujo comprimento é várias vezes maior que sua largura (tabulares). De posse de tais informações haverá condições de estabelecer as relações espaciais e geométricas das formas de relevo. As feições planares envolvem formas orientadas, representadas por um plano, retratando geologicamente acamamento, foliação e planos de fratura ou de zonas cisalhamento. Por sua vez, as feições lineares, que podem ser tanto negativas como positivas, podem constituir traços de fraturas, ou foliações ou acamamento vertical ou fortemente inclinado. As feições tabulares devem ser delimitadas, consistindo em uma feição linear de maior espessura, e podem retratar um nível litológico mais resistente (quartzito), diques ou zonas de silicificação. Em termos gramaticais, compreenderia a ordenação de palavras objetivando uma mensagem inteligível (estruturada) ou enigmática (não estruturada) (Figura 2.1), Por exemplo:

- O MENINO CORRE (1); MENINO O CORRE (3); CORRE O MENINO (5);
- O CORRE MENINO (2); MENINO CORRE O (4); CORRE MENINO O (6);

Das frases acima observa-se que apenas a (1) e (5) transmitem uma mensagem inteligível, ao passo que as demais são enigmáticas.

De outro modo, malgrado a preocupação do intérprete em descobrir fatos concretos na imagem, muitas vezes traços absolutamente reais, mas devido sua disposição espacial, podem levar o intérprete a imaginar pseudofeições, provocada pela ilusão de ótica. Como pode ser visto na Figura 2.2, o radarintérprete visualiza formas estruturadas em áreas não estruturadas, desde que tenha em mente àquelas feições. Para acontecer isso basta que o leitor fixe a visão em uma das feições estruturadas da parte superior da Figura acima referida e posteriormente tente observá-las na porção inferior da mesma. Admite-se, por exemplo, que os traços evidenciados na parte superior da Figura 2.2 sejam relativos a feições lineares, em terrenos metamórficos, ao passo que na parte inferior da citada Figura constitua um batólito granítico, em que os traços sejam representativos de seus topos com cristas agudas.

Por ser o sensor Radar essencialmente geométrico, tal situação mesmo extremamente diacrônica, pode levar o radarintérprete a cometer erros crassos.

Finalmente, o Estádio INTERPRETAÇÃO compreende, em essência, o agrupamento de dados de imagem observados nos estádios anteriores, visando a descoberta e avaliação por métodos comparativos e/ou dedutivos de tipos litológicos e seu posicionamento estrutural e quiçá estratigráfico. Para se atingir esta fase, torna-se necessário que o radarintérprete tenha conhecimento prévio dos parâmetros que procura, em especial, aqueles dispostos no terreno e suas representatividades na imagem de Radar. Em termos gramaticais, corresponderia a

interpretação de textos (Figura 2.1). Assim sendo, o provérbio popular " Água mole em pedra dura, tanto bate até que fura.", pode ser interpretado como perseverança .

Para ilustrar uma interpretação de texto toma-se como exemplo fragmentos da descrição do historiador Jacques Le Golf sobre um Atlas de 1574:

" Em posição proeminente encontramos a Europa (...). Esta retratada com vestes de soberana, com coroa e cetro, e segura um globo imperial (...).À esquerda uma princesa oriental ornada de jóias (...) personifica a Ásia das especiarias; em frente, do outro lado, a África tem um aspecto de uma negra pobremente vestida (...) com a cabeça de um homem sentado na mão (...) a indicar que se alimenta de carne humana (...) na ignorância de qualquer forma de organização civil e política. Ao lado está uma cabeça feminina que se ergue sobre um pedestal, a Oceania, justamente privada de corpo porque o continente austral era quase que completamente "terra incógnita".

Interpretar um texto é parafrasea-lo, dando-lhe uma roupagem estilística, que varia de pessoa para pessoa. Deste modo, pode-se interpretar o texto acima como cada continente representando uma comunidade através de seu nível social, cultural, econômico e político, com destaque para a Europa como seu grande centro, ladeada pela Ásia com suas riquezas. A África e Oceania ocupam papel secundário. A primeira pelo seu estado primitivo e a segunda pelo desconhecimento de seu território.

Como natural complemento desta metodologia se apresenta nesta obra alguns exemplos brasileiros clássicos de tipos litológicos, dobras, falhas, discordâncias e estruturas circulares, como forma de fixação, e paralelamente, várias evidências são analisadas para que a interpretação

não seja essencialmente comparativa ou indutiva, evitando deste modo a ambigüidade (Figura 2.3).

2.3 - SISTEMÁTICA

Um fator que deve ser sempre considerado na sistematização diz respeito as características inerentes do sensor que se está trabalhando. Desse modo, a metodologia utilizada na interpretação de imagens de Radar (LIMA, 1989), faixa das microondas, não deve ser a mesma para fotografias aéreas, imagens LANDSAT/TM e SPOT, que estão nas faixas do visível e IV, em vista das resoluções espacial e radiométricas distintas. Assim sendo, acredita-se que uma única metodologia seja aplicável para as imagens LANDSAT/TM e SPOT (VENEZIANI & ANJOS, 1981), da mesma forma que as fotografias aéreas devem ter a sua própria metodologia (SOARES & FIORI, 1976).

Em vista do acima exposto, a interpretação geológica em imagens de Radar deve calcar-se fundamentalmente em aspectos relacionados a elementos de relevo e de drenagem, ou seja morfologia, secundado pelo tom. A morfologia é bastante realçada em relevos médios (desníveis de dezenas de metros) e fracos (desníveis de metros), ao passo que o tom tem sua melhor variação, em níveis de cinza, em relevos fracos e arrasados (terrenos planos). Para relevos fortes (desníveis de centenas de metros), com grande incidência de cristas, tanto a morfologia como a tonalidade são bastantes prejudicadas.

Em termos digitais, NOVO et al. (1994) relatam que o conceito de tonalidade começa a se aplicar às imagens RVL quando se considera a média com vários pixels vizinhos. Acrescentam,

ainda ,que intérpretes experimentados em imagens RVL sabem que a tonalidade é menos importante para a detecção e identificação de detalhes do que nas imagens obtidas em sensores óticos.

Para um melhor desenvolvimento do Estádio LEITURA pelo radarintérprete torna-se necessário um conhecimento teórico sobre geometria de Radar e percepção da relação imagem/terreno. (Figura 2.3).

Ao se concluir o Estádio Leitura, com o traçado da drenagem e estradas principais, e locação de cidades, pontes, hidrelétricas, campos de pouso, etc , assim como a plotação de topônimos dos principais acidentes topográficos, obtem-se deste maneira o Mapa Base, uma vez que vai constituir a a planimetria básica preliminar (Figura 2.4).

Pela avaliação dos elementos de imagem, deve-se reconhecer em primeiro lugar os elementos texturais e elementos tonais, constituindo-se pela textura e tom radargráficos. Os mesmos devem ser individualizados utilizando-se as faixas de radar, em virtude de sua melhor resolução do que nos mosaicos, além de propiciar uma melhor ordenação racional na interpretação. Compreende o Estádio RECONHECIMENTO (Figura 2.3). A seguir procede-se um estudo mais acurado dos sistemas homogêneos individualizados, em termos de textura/tom radargráficos, partindo-se para a definição dos elementos de relevo e elementos de drenagem. Após a caracterização desses "elementos de imagem" dá-se por concluído o "Estádio IDENTIFICAÇÃO". (Figura 2.3).

Para esses estádios utiliza-se o grafite "marrom" na delimitação dos contatos referentes à textura, tom e quebra de relevo. Para drenagem deve-se usar o "verde", ao passo que para a atividade antrópica sugere-se o "amarelo".

Como complemento, acrescenta-se que a delimitação do padrão de drenagem pode ser feita tanto preliminarmente ou com traçado total. O primeiro acontece geralmente em áreas com alta densidade de drenagem, terrenos metamórficos, o que torna inexecutável sua delimitação total devido à baixa resolução espacial do sensor. Para tais situações sugere-se traçar apenas a drenagem de 5ª, 4ª e 3ª ordens. O segundo caso abarca geralmente terrenos sedimentares, no qual é viável a delimitação total da drenagem, principalmente quando associado a relevos fracos a médios.

A textura e tom radargráficos devem ser inicialmente traçados com lápis dermatográfico nas faixas de Radar (Canal Próximo e Canal Remoto) e posteriormente transportados para o Calco I do mosaico por estereoscopia. De igual modo, as informações concernentes às Formas de Relevo (Topo, Vale, Pendente e Quebra de Relevo) e Padrão de Drenagem, devem ser delineados no Calco I. Com as informações até aqui auferidas obtém-se o Mapa de Formas de Relevo (Figura 2.4).

O Estádio ANÁLISE objetiva inicialmente classificar as formas de relevo em feições orientadas e não orientadas (homogêneas). As primeiras são subdivididas em: feições planares, feições lineares, positivas e negativas, e feições tabulares. As não orientadas corresponderão às feições homogêneas (Figura 2.3.IV):

As feições orientadas são definidas da seguinte maneira:

- feições planares envolvem formas orientadas representadas por um plano, ou seja, com duas dimensões bem definidas. Identifica-se pela feição "U" ou "V" na imagem. Devem ser delineadas com grafite azul. Representam a foliação ou acamamento, ou planos de fratura, falha ou falha;

- feições lineares positivas correspondem aos traços dos planos (feições planares) verticalizados realçadas pela visada lateral do Radar sob a forma de "Encurtamento de Radar". Retrata os "Lineamentos de Radar". Delimita-se com grafite azul na parte positiva. Por outro lado, as feições lineares negativas podem representar traços de fraturas e devem ser delineados com grafite vermelho na parte negativa;

- feições tabulares são formas de relevo em que seu comprimento é muitas vezes maior que sua largura, dando como resultado feições alongadas, à semelhança de um "lápis" ou um "charuto". Geologicamente retratam diques, zonas de silicificação ou então camadas guia, e são de grande relevância na interpretação estrutural; delimita-se com grafite azul.

As feições homogêneas representam àquelas que não denotam uma orientação preferencial nas imagens RVL, quer sejam linhas ou quer sejam planos.

Após a conclusão do Estádio ANÁLISE, praticamente já se exauriram as informações que podem ser obtidas do sensor Radar, cujos resultados deverão variar de acordo com a experiência e sensibilidade do intérprete.

Na obtenção das informações constantes do Estádio Análise, deve-se utilizar o Calco II. Procedendo-se desta forma a identificação e caracterização das feições planares, lineares e tabulares serão facilitadas, haja vista a experiência adquirida nos estádios anteriores.

A consecução do Estádio Interpretação, propriamente dito, será obtida pela superposição dos Calcos I e II, sendo para tal necessário a utilização do Calco III, como pode ser observado no esquema da Figura 2.5 .

A fim de ilustrar, em uma primeira aproximação, a metodologia aqui discorrida utiliza-se uma imagem de Radar RVL-GEMS, banda X, da região de Rio Pardo de Minas (MG),

concernente à Faixa de Dobramentos Araçuaí (Proterozóico Superior) exposta na Figura 2.6 e respectiva interpretação geológica na Figura 2.7. Os diversos estádios são exemplificados nas Figuras 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11.

O último estágio, INTERPRETAÇÃO, é inteiramente dedutivo e poder-se-á interpretar tipos litológicos, discordâncias, ambos de grande importância na definição da Estratigrafia; assim como parâmetros ligados à Geologia Estrutural como dobras, fraturas, foliações e lineamentos. As interpretações relativas à Geologia Econômica poderão advir da definição de grandes lineamentos, faixas de concentração de deformação, a exemplo da parte central de uma zona de cisalhamento e estruturas transtensionais. Acrescente-se ainda a detecção de estruturas circulares, ou então com respeito a litotipos ou associação dos mesmos (Figura 2.3).

Se o intérprete seguir "pari passu" os estádios aqui descritos, obterá parâmetros radargráficos, em bases cada vez mais seguras, para a seleção dos alvos a serem checados no terreno, como também subsídios importantes para a consecução do "Mapa Radargeológico" (Figura 2.4).

A fim de ilustrar as diversas etapas metodológicas que serão abordadas neste trabalho, selecionou-se a região de Pedra Azul (MG/BA), Figura 2.12, para servir como paradigma em virtude de sua fisiografia e ambiente geológico favoráveis.

Ademais, o Capítulo 1 desta tese deve ser entendido como o Estádio LEITURA. Em vista disso, apresenta-se na Figura 2.13, feições antrópicas, como representativa do mesmo. Para as convenções vide Tabela 2.1.

Observando-se a Figura 2.13 pode-se relatar que as feições antrópicas como cidades, culturas, desmatamentos e rodovias principais estão muito bem definidas em sua metade superior,

em vista dos mesmos situarem-se em terrenos planos onde inexistem sombras. Por sua vez, na porção inferior da mesma, onde o relevo, de porte médio, se manifesta sob a forma de morros de topo convexo e agudo, a definição das feições antrópicas fica totalmente prejudicada, porquanto a grande incidência de sombras esconde ou provoca ambigüidade na interpretação das mesmas (Figura 2.12).

Uma síntese da sistemática da interpretação radargeológica é apresentada na Figura 2.5, na qual pode ser perfeitamente observada a utilização dos calcos (overleis) I, II e III e suas interações.

2.4 -ESTÁDIO RECONHECIMENTO

2.4.1 - Textura Radargráfica

A textura fotográfica pode ser definida como a freqüência de mudança de tons na imagem, produzido por um conjunto de feições tão pequenas para serem claramente discernidas individualmente nas fotografias (BROWDEN & PRUIT, 1975). Por sua vez, DRURY (1987) a define como a magnitude e a freqüência de mudança tonal sobre uma imagem. É produzida pelo efeito agregado de pequenas feições que formam uma particular área da superfície. Tais definições, no entanto, são muito específicas à fotografias aéreas para serem aplicadas no sentido do sensor Radar de Visada Lateral (RVL), por conseguinte prefere-se esmiudar melhor esse conceito.

NOVO et al. (1994) referem-se a influência do aspecto granular e salpicado do "speckle" na textura da imagem RVL tipo SAR, como um fator que pode prejudicar a caracterização das feições no terreno.

A textura é a média espacial da segunda ordem de brilho, sendo a variação espacial da refletividade média (NOVO et al., 1994) A textura de imagem é a textura de uma cena mais o efeito "speckle". Com efeito, pelas suas características radiométricas, geométricas e espectrais as imagens RVL fornecem uma variedade significativa de células texturais. Estas, sendo definidas como um conjunto de sinais de retorno, com formas e limites bem delineados e grande repetição espacial. Então, uma "célula textural" pode ser tipificada no terreno por feições que, pelos seus parâmetros radiométricos representem elementos de imagem aproximadamente iguais. Como por exemplo, pode-se citar a superfície de um lago, superfícies planas com espécies idênticas de cobertura vegetal, conjunto de morros de mesma cota, forma e disposição geométrica, etc. Célula Textural equivale a elemento textural de SOARES & FIORI (1976).

Assim sendo, tem-se células texturais de drenagem, de relevo, de feições antrópicas, etc, a depender da cena que se está trabalhando. De uma maneira geral, tem-se diversos tipos de células texturais, as quais deverão ser agrupadas, de acordo com sua forma, propendendo um melhor conhecimento da área que se está pesquisando.

O vocábulo "célula" é aqui empregado no sentido de uma unidade estrutural básica, à semelhança da célula dos seres vivos, cujo conjunto recebe a denominação de tecido. Aqueles, mostram como característica fundamental a repetição espacial e formas bem definidas, daí o porquê preferiu-se utilizar o termo célula textural ao invés de elemento textural. Ademais, este

poderia provocar uma certa confusão com elemento de imagem. Assim sendo, vários elementos de imagem podem compor uma célula textural.

Utiliza-se no presente trabalho a definição de textura como um conjunto de "células texturais", consoante conceituação de RIVEREAU (1970). Assim sendo, textura seria correspondente a tecido.

Após a conceituação de textura, torna-se necessária qualificá-la, a fim de que se possa analisá-la quando da interpretação radargráfica. Em vista disso, utiliza-se as seguintes adjetivações: lisa, muito fina, fina, média, grossa e muito grossa. No entanto, para que se possa identificar e qualificar essas texturas na imagem de radar sugere-se utilizar os seguintes critérios para as classes texturais (Figura 2.14):

- lisa : quando não for possível distinguir uma célula textural. Fato exemplificado em terrenos planos ou em feições voltadas para a antena de radar, provocando o desenvolvimento de retorno de sinal único (reflexão frontal aguda) (Figura 2.14.1);
- muito fina : célula textural entre 125 - 250 m (Figura 2.14.2);
- fina : célula textural entre 250 - 500 m (Figura 2.14.3);
- média : célula textural entre 500 - 750 m (Figuras 2.14.5 e 2.14.6);
- grossa : célula textural entre 750 - 1.250 m (Figura 2.14.7);
- muito grossa : célula textural acima de 1.250 m.

Um procedimento mais prático consiste em classificar as texturas em termos relativos. Deste modo, uma determinada textura A é fina em relação a textura B, no entanto mais grossa que a C, e assim por diante.

Em vista da variedade de situações que será encontrada, a qualificação poderá abranger duas das classes acima definidas. Por exemplo: fina-média e grossa-muito grossa (Figuras 2.14.4 e 2.14.8).

Muitas vezes, a textura poderá ser caracterizada pela sua densidade. Em outras palavras, duas "manchas" podem ter a mesma célula textural, contudo com densidades distintas. De outro modo, a célula textural pode também compor um conjunto orientado ou isótropo (Figura 2.15).

Como pode ser visto na Figura 2.15, tem-se várias células texturais, consoante definição anteriormente citada, a qual tem como caracteres principais a forma e limites bem definidos, aliados a sua distribuição espacial. Nesta Figura, visualiza-se a presença de formas geométricas tais como; círculos, quadrados, trapézios, etc., simples ou combinados, cujos agrupamentos compõem as texturas. As dimensões das células texturais resultam nas adjetivações grossa, média, etc. Por outro lado, deve-se atentar para situações em que a célula textural é a mesma, no entanto com densidades diferentes. De igual modo, deve-se destacar que algumas texturas evidenciam um padrão em ziguezague, em círculo, isótropo, etc. Outro ponto que deve ser alertado é quanto as similaridades entre as texturas, a exemplo do que ocorre entre células texturais do tipo losango e quadrado, cuja distinção vai depender da experiência e acuidade do radarintérprete.

A identificação da textura constitui o primeiro passo na radarinterpretação. Para que se trabalhe sempre com feições homogêneas, sugere-se que a delimitação das manchas seja feita primeiramente nas faixas de radar (Canal Próximo ou Canal Remoto) e posteriormente seja transferida, por estereoscopia, para o mosaico de Radar. Alerta-se para o fato que uma mesma feição do terreno mostra sempre textura distinta quando observada em canais distintos.

Sugere-se a utilização de grafite marrom no traçado das texturas no calco.

A fim de ilustrar o conceito de textura radargráfica aqui aplicado, apresenta-se a Figura 2.16 como exemplo, à qual foi extraída da área modelo (Figura 2.12). As convenções utilizadas são apresentadas na Tabela 2.2.

Analisando-se a Figura 2.16, pode-se notar a riqueza de texturas radargráficas interpretadas, variando desde a textura lisa até a textura muito grossa. Cuidados especiais devem ser voltados para os canais próximo e remoto, uma vez que em vista de possuírem ângulos de depressão e incidência distintos, darão como consequência comprimentos de sombra diferentes para feições do terreno idênticas. Isto poderá causar erros na interpretação. Vide Capítulo 1.

2.4.2 -Tom Radargráfico

O Radar de Visada Lateral, por ser um sensor ativo, exibe característica tonal bem distinta dos sensores passivos, tanto os da faixa do visível como do infravermelho (LANDSAT, KOSMOS, SPOT e Fotografias Aéreas). Tal fato é perfeitamente explicável em vista do tom relacionar-se diretamente à intensidade da reflexão de retorno (retrodifusão), dependendo de parâmetros do Sistema Radar, bem como, de variáveis inerentes ao terreno que está sendo imageado.

O tom é definido como a média espacial de primeira ordem de brilho de imagem (Novo et al., 1994).

Os parâmetros do Sistema Radar são:

- ângulo de depressão;

- polarização;
- comprimento de onda;
- e orientação da linha de vôo.

No que tange às variáveis do equipamento, merecem destaque as frequências e comprimentos de onda distintos do sistema de Radar: Good Year e INTERA (Banda X), Westinghouse (Banda K), ERS-1 da ESA (banda C) e SIR-A, SIR-B, SIR-C (Banda L). Na Figura 2.17 exemplifica-se o comportamento da onda de Radar na sua penetração na cobertura vegetal. Observa-se uma maior penetração nas bandas de maior comprimento de onda, no entanto quanto menor for este (bandas X e K), mais capacidade de detalhamento de feições do terreno terá o sistema de Radar (CUNHA & FORD, 1986). O ângulo de depressão como exemplificado por LIMA (1984), na comparação do SIR-A (Banda L) e GEMS (Banda X), também tem influência no retorno dos sinais. LIMA (op.cit.) ressalta que a menor incidência de sombras no SIR-A é devido ao seu ângulo de depressão, contudo, com menor resolução das feições no terreno em vista de seu maior comprimento de onda. Na Tabela 1.2 apresentam-se os diferentes parâmetros dos sistemas de Radar, com objetivo de compará-los.

Os principais parâmetros do terreno são:

- ângulos das pendentes voltadas ou não para a antena;
- ângulo de incidência local;
- constante dielétrica complexa (permitividade);
- cobertura vegetal;
- e ângulo de depressão (Canais Próximo e Remoto).

Considerando-se que os parâmetros de um mesmo sistema de Radar são constantes, a variação será unicamente com os parâmetros do terreno. Em linhas gerais, a tonalidade tem uma dependência essencialmente geométrica, uma vez que está ligada aos ângulos de incidência/reflexão, relativos à lei de Snell. Os tipos de reflexão mais comuns em imagens de Radar são: reflexão especular, reflexão de canto, reflexão frontal (aguda e obtusa), reflexão difusa e "grazing" (Figura 1.5). Na reflexão especular a energia da reflexão de retorno é totalmente perdida, aparecendo deste modo o tom preto na imagem. No outro extremo a reflexão de canto terá retorno de 100% da energia emitida, uma vez que, pelas suas relações geométricas, em qualquer posição que haja a incidência o retorno será total, produzindo, então, o tom branco das imagens de Radar. Vale salientar que, quando o ângulo de incidência for igual a 0° , o retorno também será total, tendo como resultado o tom branco. Este caso particular, recebe a denominação de reflexão frontal. No entanto, esta pode ser aguda ou obtusa, de acordo com o ângulo da pendente voltada para a antena. O caso mais comum de retorno será o de reflexão difusa que, de acordo com o maior ou menor retorno de energia, fornecerá as tonalidades cinza claro e cinza escuro, respectivamente. A Figura 1.30 mostra com propriedade um terreno hipotético em que são exemplificados diversos tipos de reflexão. Deste exemplo, conclui-se que em regiões de terrenos planos ter-se-á uma gama maior de níveis cinza de que em regiões com relevo forte, devido as extensas sombras e reflexões frontais obtusa e aguda (encurtamento de pendentes).

A Figura 2.18 retrata uma vegetação tipo parque savana, disposta a nordeste de Boa Vista, capital do Estado de Roraima, dominada por terreno plano, a exceção de sua porção setentrional. Em vista do tipo de vegetação dominante a tonalidade é cinza escuro, com destaque

para as matas ciliares (CL) e vegetação que cobre os lagos (V) com tom branco, em oposição ao tom preto dos lagos (L). Para norte o tom branco ressalta a reflexão frontal das pendentes (E).

A Figura 2.19 retrata outra situação encontrada em terrenos planos, em especial na faixa costeira, foz do rio Parnaíba (MA/PI). Observa-se que o sensor RVL não teve a capacidade para discriminar em muitos trechos o limite terra(T)/mar(AG), em vista de se tratarem de superfícies planas. Por outro lado, destaque é dado para as vegetações de mangue(M), dunas(D) e vegetação do tipo cerrado(C), antropismo(ANT) e cidade de Parnaíba(CI). Por sua vez, no âmbito da planície de inundação do rio Parnaíba é marcante a presença de meandros abandonados em um tipo de padrão anastomótico.

O ângulo da pendente vai influenciar substancialmente no sinal de retorno do radar, como pôde ser observado nas Figuras 1.21 e 1.22. Diminuindo o ângulo de incidência aumenta o sinal de retorno para um mesmo ângulo de pendente. Por sua vez, para um ângulo de incidência constante, à medida que diminui o ângulo da pendente diminui a energia de retorno. Por outro lado, o ângulo da pendente, tanto aquela voltada para a antena como a não voltada, terá variações no grau de retorno.

A Constante Dielétrica Complexa constitui um fator cuja influência não apresenta muito significado, em termos de tonalidades nas imagens de RVL, em que pese sua influência em regiões úmidas e secas. A constante dielétrica das rochas varia entre 3 e 8, ao passo que a água tem um valor de 80. Um aumento na constante dielétrica aumenta a refletividade da superfície.

À exceção de regiões desérticas, a grande maioria das regiões do mundo é coberta por vegetação. Deste modo, a vegetação influencia consideravelmente nos sinais de retorno, aliado ao fato de não existirem desertos em território brasileiro. A cobertura vegetal afeta o tom

radargráfico, sendo que tal influência é melhor sentida em regiões planas ou levemente onduladas, com ausência de sombras, ou, caso existente, de comprimento restrito (Figuras 2.18 e 2.19). Deste modo, como a reflexão de retorno se dá na copa das árvores pode-se entender que a geometria das folhas tem controle significativo no sinal de retorno, como acontece com as palmeiras, cuja disposição assemelha-se a um refletor de canto, provocando destarte um retorno total. Em regiões equatoriais úmidas, a floresta traduz uma tonalidade cinza claro nas imagens de RVL. Por sua vez, vegetações tipo caatinga e cerrado terão restrito retroespalhamento nas imagens de RVL em vista do pequeno porte de suas árvores, em especial a caatinga. De outro modo, as regiões de parque terão tonalidade cinza escuro a negro, em vista da dominância de vegetação rasteira (Figura 2.18).

Devido à reflexão de retorno ocorrer nas copas das árvores tem-se a impressão que o RVL retira a vegetação. No entanto, para melhor entender esse fato, sugere-se que seja observado em um terreno plano o efeito das áreas com vegetação e as desmatadas (Figura 2.19).

Ainda com respeito a vegetação, observa-se na Figura 2.20 o efeito do retroespalhamento das ondas de radar (banda X) sob diferentes tipos de espécies vegetais, as quais são distintas entre si pela disposição espacial das copas, como também, pela densidade de folhas. Observa-se que as gramíneas e palmeiras serão os extremos em termos de retorno da reflexão. As gramíneas constituem o caso típico de reflexão especular sem retorno de sinal, ao passo que as palmeiras serão tipo refletor de canto, com retorno total. Para as florestas, as dos tipo folhosa terão uma resposta distinta das coníferas em vista do formato de suas copas, cujo retorno do sinal está também relacionado à densidade de árvores. De outra maneira, as espécies de

caatinga terão menor retorno em vista de seu pequeno porte e densidade de folhas, se comparados com as demais, com exceção das gramíneas.

COUTO et al. (1978), utilizando imagens RVL da GEMS, banda X, na região central do Estado de São Paulo, conseguiram discriminar *Pinus* spp (conífera) de *Eucalyptus* spp (Folhosa). A primeira absorve grande parte das ondas de Radar, em vista de sua radargrafia em tons cinza muito escuro, quase preto. Por sua vez, o *Eucalyptus* spp apresenta um tom muito claro.

O ângulo de depressão, como visto no Capítulo 1 deste trabalho, relaciona-se diretamente com o Canal Próximo ("Near Range") e Canal Remoto ("Far Range"), e como efeito terá implicações no que concerne ao ângulo de incidência, sombras, etc; esses fatores irão influenciar na tonalidade. Em vista disso é que se propõe que a interpretação das texturas seja feita inicialmente nas "faixas de Radar", considerando-se trabalhar-se com ângulos de depressão próximos entre si.

Vide Figura 2.16 relativa à Área Modelo, para interpretação do tom, com relação a textura (Tabela 2.2).

Pela análise da Figura 2.16 observa-se que a imagem RVL não fornece uma grande variedade de níveis de cinza. Existe uma dominância do cinza, tendo como extremos o preto e o branco. Este, amiúde, relacionado a encurtamento de pendentes, ao passo que o tom preto retrata terrenos planos desmatados.

2.5 -ESTÁDIO IDENTIFICAÇÃO

2.5.1 - Forma, Estrutura e Padrão

Forma (feição) pode ser definida como o agrupamento de elementos de imagem, cuja organização espacial fornece ao intérprete a idéia de feições naturais e antropogênicas, como morros, drenagem, pontes, culturas, etc. Quando as formas tiverem idênticas células texturais, dispostas segundo uma ou mais leis geométricas, recebem a denominação de Estrutura ou Feição Estruturada, i.e.: estruturas circulares (círculos), estruturas-linhas (linhas), estruturas-planos (planos), etc. Caso contrário recebem a denominação de feições homogêneas ou feições não estruturadas. Como pode ser observado na Figura 2.15, as células texturas apresentam-se em ziguezague, círculos, etc , ou então sem orientação preferencial.

As estruturas podem se apresentar desde bem estruturadas até fracamente estruturadas, de acordo com o grau de estruturação e ordem de estruturação. (SOARES & FIORI, 1976).

Grau de Estruturação constitui a persistência das estruturas para uma determinada organização, constituindo um sistema , qualquer que seja sua configuração geométrica, i. e : sistema em retas, sistema em ziguezague, sistema em círculos concêntricos.

Por sua vez, Ordem de Estruturação refere-se à presença de uma ou mais configurações geométricas i.e : retas e círculos, retas e planos, círculos e planos, etc.

Deste modo, quanto maior for o grau de estruturação e menor sua ordem de estruturação, mais estruturadas serão as células texturais, e como consequência maior será seu Grau de Confiabilidade.

Ao conjunto de estruturas denomina-se padrão, i.e.: padrão de cristas, padrão de morros, etc.

Nas imagens RVL a morfologia constitui o principal parâmetro a ser analisado, daí porquê é comum o aparecimento de feições circulares, lineares, tabulares, elípticas, meia lua, cônicas e outras associadas ao relevo, como também traços retilíneos, curvilíneos ou formas arborescentes ligadas às bacias hidrográficas.

A identificação e pesquisa das formas de relevo e padrões de drenagem constituem um passo de grande importância no desenvolvimento da interpretação radargeológica. A definição precisa da forma dos alvos será afetada pelo "speckle" de Radar.

2.5.2 - Formas de Relevo

As formas de relevo, direta ou indiretamente, inter-relacionam-se com a litoestrutura geológica, conforme pode ser exemplificado em diversas regiões brasileiras, em que os ambientes geológicos condicionam praticamente as formas de relevo. Assim sendo, pode-se observar que a presença de chapadões interligam-se a seqüências sedimentares horizontais (Sinéclise do Parnaíba-MA/PI), da mesma forma que a ocorrência de cristas e vales associam-se a seqüências metassedimentares dobradas (região do Alto Paraguai-MT), ou então a ocorrência de formas mamelonares e pães de açúcar referenciam-se a complexos ígneos (serra dos Órgãos-RJ) e assim por diante. Por conseguinte, para se proceder o estudo das formas de relevo, o primeiro passo é verificar a configuração de seus topos, pendentes e tipos de vales que os mesmos se associam. Igualmente, especial atenção deve ser dada a quebra de relevo e ao grau de dissecação.

Da relação das formas de relevo com a litoestrutura surge uma importante associação aqui denominada de "Lito-Morfoestrutura", a qual será enriquecida com o estudo dos padrões de drenagem.

Por sua vez, a "Lito-Morfoestrutura" terá forte dependência do clima, ou seja, certos litotipos podem ser resistentes à erosão em determinados climas, enquanto que em outros não. De uma maneira geral, pode-se exemplificar que o calcário em condições de clima semi-árido mostra feições positivas, enquanto que em clima quente super úmido não tem ressaltos morfológicos, devido à ação do ácido carbônico das águas pluviais em sua estrutura iônica, provocando dissolução. Obviamente, não se trata de uma regra, uma vez que muitas variáveis tem que ser analisadas.

2.5.2.1- Topo

Entende-se como topo a parte mais elevada de uma forma de relevo. Pela resolução espacial fornecida pelo sensor RVL, três tipos básicos de topo podem ser definidos: plano, convexo e agudo. Obviamente, existirão situações em que poderá haver um tipo transicional entre os mesmos. Ademais, tanto os de topo agudo e convexo podem ser abertos ou fechados (Figura 2.21).

Cuidados especiais devem ser tomados com respeito aos efeitos de sombra e encurtamento de Radar, na classificação dos topos, em vista da geometria envolvida, como visto no Capítulo 1.

Os morros de topo agudo, se tiverem expressão e extensão podem compor cristas, as quais podem ser subdivididas em simétricas, ou fracamente e fortemente assimétricas. As cristas simétricas e assimétricas referem-se aos ângulos formados pelas pendentes em relação ao terreno (Figura 2.21). No caso de existir uma relação com a estrutura geológica podem ser codinominadas de "cuestas" e "hog back", cujos principais elementos são: frente e reverso. Tais parâmetros serão discutidos mais adiante.

Na Figura 2.22 apresentam-se oito exemplos ilustrando diferentes configurações de topo em RVL.

2.5.2.2 - Pendente

Pelas próprias características do RVL dificilmente ter-se-á uma visão perfeita do perfil de um morro, devido aos efeitos geométricos da sombra e encurtamento de Radar, como relatado no Capítulo 1. No entanto, para as pendentes oblíquas à antena, pode-se distinguir três tipos de vertentes: vertical, ravinada e inclinada. No primeiro caso, o perfil será retilíneo, que o distinguirá do último que apresentará um perfil côncavo. Por outro lado, a encosta ravinada pontificará pela grande incidência de "ravinas", em vista da impermeabilidade do material que a compõe (Figura 2.22). Vale salientar que uma pendente vertical pode apresentar ravinas, no entanto estas não poderão ser observadas na imagem, em vista do efeito geométrico de " encurtamento de Radar". Por sua vez, uma pendente inclinada poderá estar com "ravinas" , ou então sem "ravinas", fato que terá fortes implicações no tipo de litologia como ver-se-á adiante.

2.5.2.3 - Quebra de Relevo

A presença de uma descontinuidade de relevo em fotogeologia, de uma maneira genérica, sempre implica em um relacionamento direto com a estrutura geológica: falhas, discordâncias, contato litológico, etc. Deste modo, aconselha-se sempre delinear as quebras de relevo, a fim de, posteriormente, estabelecer seu significado no terreno, através de trabalhos de campo.

2.5.2.4 - Grau de Dissecação

Diz-se que um relevo dissecado quando o mesmo é trabalhado por agentes erosivos. Dentro dessa filosofia, qualifica-se neste trabalho o grau de dissecação de uma região em três tipos principais: alto, médio e baixo. Assim sendo, o grau de dissecação alto relaciona-se a um tipo de relevo em estágio inicial da ação dos agentes erosivos, com vales em "V" ao passo que o baixo grau de dissecação relacionar-se-ia a um relevo em estágio final de retrabalhamento por agentes erosivos, com vales em "U" e relevo arrasado (peneplanizados). A observação de tais níveis de dissecação, por agentes erosivos, pode estar ligada a fatores climáticos, litológicos ou tectônicos, ou então a uma conjugação desses. Sua análise poderá ser feita em conjunto com os elementos de drenagem, e será de grande valia na análise das formas de relevo.

NASCIMENTO & PRATES (1976), no levantamento geomorfológico da Folha NA.19 - Pico da Neblina para o Projeto RADAMBRASIL, implantaram importantes modificações na representação das formas dissecadas, através da colocação de dois dígitos, ao tipo de topo que

está sendo analisado. Ex: a_{12} . Neste caso " a " de agudo. O primeiro índice referindo-se à extensão da forma, e o segundo ao aprofundamento da drenagem, referidos como "Índices de Dissecação". Entretanto, para a presente metodologia, preferiu-se dar uma conotação mais simples na avaliação do grau de dissecação. Utilizar-se-á dois parâmetros, o primeiro com relação a forma do vale, e a outra ao espaçamento entre os mesmos. Como referencial a tais parâmetros apresenta-se a Tabela 2.3.

De acordo com os índices de dissecação apresentados na Tabela 2.3, pode-se qualificar, de forma bem generalizada, o grau de dissecação de uma região em baixo, médio e alto. Nas Figuras 2.23 e 2.24 procura-se exemplificar, sob a forma de radargramas, o grau de dissecação (relativo) em duas regiões : amazônia e nordeste brasileiros. Deste modo, as adjetivações alto, médio e fraco não estão relacionados a Tabela 2.3.

De outro modo, tais índices de dissecação servirão de referência para a forma de topo dominante, em uma determinada região. Por conseguinte, caso o topo seja principalmente plano, usa-se a letra **p** acrescida dos índices, i.e.: p_{13} . Após análise relativa ao grau de dissecação pode-se estabelecer, em termos relativos, o grau de resistência à erosão dos litotipos, assim como pode constituir em mais um parâmetro na distinção de classes de texturas radargráficas

Pela análise da Figura 2.25 observa-se perfeitamente a individualização de três regiões distintas, tendo como base suas características morfológicas. A região exposta mais ao norte, compondo extenso tabuleiro com topo plano ocupa mais da metade da área modelo. Representa-se a mesma pelo índice de dissecação p_{11} - p_{12} , tipificando grau de dissecação baixo a médio, em vista dos vales com formas em "V" a transição. A região intermediária dispõe-se na porção centro-oriental da área modelo e tipifica-se por morros alinhados segundo E-O , os quais

desenvolvem topo agudo com pendentes ravinadas, com grau de dissecação baixo, em virtude da grande incidência de vales encaixados, com índice $a_{11} - a_{12}$. Dentro desse contexto, pode-se observar a presença de cristas bem relevadas, indicando a presença de litotipos mais resistentes à erosão. Por sua vez, na região inferior, disposta a sul, caracteriza-se principalmente por morros de topo convexo, sem orientação marcante, e pendentes pedimentadas a escarpadas. Nesta região o grau de dissecação é baixo a médio, em razão da presença de vales mistos, com índice entre $cx_{11} - cx_{12}$ a cx_{22} .

Para ilustrar o que foi discorrido, obtem-se um índice de 22 a 32 para a Figura 2.23.e, ao passo que para a 2.23.a tem-se um índice de 12. Para o primeiro caso o topo é plano, então p_{22-32} , enquanto que para este último é agudo, i.e.: a_{12} . Vide Tabela 2.4.

A Figura 2.25 retrata as formas de relevo interpretadas conforme a Área Modelo (Figura 2.12).

2.5.3 - Padrão de Drenagem

Drenagem é aqui definida como uma feição linear negativa produzida por água de escorrência, que modela a topografia de uma região. Ao conjunto de drenagens ou cursos de água dá-se o nome de padrão (Tabela 2.5), que, de acordo com sua configuração espacial, são chamados de Padrões de Drenagem Básicos, Figura 2.26, a saber:

- 1- Dentrítico - Lembra uma castanheira pelo aspecto arborescente de sua copa;
- 2- Paralelo - Assim chamado pelo paralelismo de suas drenagens);

3- Treliça - Constitui um padrão caracterizado por drenagem subsequente bem desenvolvida, com tributários nos lados opostos de aproximadamente mesmo tamanho;

4- Retangular - Tipificado pela geometria angular de suas drenagens;

5- Radial - Caracterizado pela geometria radial ;

6- Anelar - Caracterizado pela geometria circular ;

7- Multibasinal - Tipificado pela presença de pequenas depressões;

8- Contorcido - Retratado pela sua forma contorcida ;

9- Complexo - Tipifica-se pela grande mistura de padrões, dando como resultado tipos complexos;

10- Palimpsesto - Constitui pretéritas drenagens, atualmente superimpostas por padrões mais novos;.

Os padrões modificados são mostrados nas Figuras 2.27 e 2.28, e estão descritos na Tabela 2.5.

As drenagens de ordem menor são indicativas de estruturas planares tipo foliação ou acamamento, ao passo que as de ordem mais elevadas vão se relacionar com grandes descontinuidades e dobras. No caso de uma recorrência tectônica em uma determinada área, neotectonismo, por exemplo, as drenagens de menor ordem é que darão as pistas para detecção do mesmo, uma vez que as de maior ordem serão apenas reativadas. As drenagens de menor ordem se juntam para formar as de ordem mais elevadas. Por exemplo, duas drenagens de 1ª ordem formam uma de 2ª ordem e assim por diante (STRALHER, 1952).

Nas imagens de RVL da GEMS, que recobrem o território brasileiro, não se pode delinear totalmente a drenagem de determinadas regiões em vista da ambigüidade provocada pela

baixa resolução espacial do sensor Radar. Deste modo, sugere-se o traçado de drenagens de 5ª, 4ª e 3ª ordens para se obter informações dos padrões de drenagem. Geralmente tais situações ocorrem em regiões com alta densidade de drenagem, encaixada em relevos fortes. Por outro lado, para relevos fracos a médios é possível o traçado total da drenagem (Tabela 2.6).

Objetivando dar uma conotação essencialmente prática, aos estudos dos padrões de drenagem, selecionou-se nove Figuras em imagem RVL (Figuras 2.29 a 2.37) e respectivas interpretações (Figuras 2.38 a 2.46) a fim de mostrar a representatividade dos padrões na imagem RVL. As interpretações das Figuras 2.38 a 2.46 apresentam além do traçado da drenagem, fruto da interpretação das estampas, representações alfa-numéricas indicativas do tipo litológico do terreno: S (sedimentar), I (ígneio) e M (metamórfico). Dentro dessa filosofia, procurou-se ilustrar os seguintes padrões: Dendrítico (Figura 2.29/Figura 2.38), Dendrítico Modificado - Anastomótico (Figura 2.30/Figura 2.39), Paralelo (Figura 2.31/Figura 2.40), Treliça (Figura 2.32/Figura 2.41), Treliça e Retangular (Figura 2.33/Figura 2.42), Distributário e Retangular (Figura 2.34/Figura 2.43), Multibasinal (Figura 2.35/Figura 2.44), Retangular (Figura 2.36/Figura 2.45) e Anelar (Figura 2.37/Figura 2.46).

A drenagem de determinada região sofrerá influência dos seguintes fatores:

- condições climáticas;
- formas de relevo;
- estrutura geológica;
- composição mineralógica das rochas;
- propriedades físicas das rochas;
- solos;

- vegetação;
- e ação antrópica.

Segundo LUEDER (1959) os principais parâmetros que devem ser estudados nos padrões de drenagem são (Figura 2.49):

- grau de integração;
- densidade;
- tropia;
- grau de controle;
- sinuosidade;
- angularidade;
- ângulo de junção
- e assimetria.

A seguir faz-se uma descrição sumária de cada parâmetro.

Grau de Integração compreende a perfeita interação entre as drenagens, de maneira a fornecer um padrão inteiriço. Assim sendo, se ocorrer dificuldade em traçar a drenagem, pode significar que o terreno é muito poroso, como no caso de arenitos; ou então se a mesma desaparecer bruscamente, como no caso de calcários ou de evaporitos, haverá o exemplo típico de baixo grau de integração. No entanto, se o traçado da drenagem for bem marcante, em vales bem encaixados, obtem-se informações sobre a erodibilidade com alto grau de integração. A maior ou menor sinuosidade da drenagem fornece ao intérprete uma noção de sua topografia com grau de integração médio. Deste modo, este parâmetro dá informes sobre:

- permeabilidade;

- porosidade;
- topografia;
- grau de dissolução das rochas;
- e erodibilidade.

Densidade da drenagem correlaciona o comprimento total dos canais de escoamento com a área da bacia ou sub-bacia hidrográfica. Este parâmetro foi inicialmente definido por HORTON (1945), podendo ser calculado pela equação: $Dd=Lt/A$. Onde Dd significa a densidade de drenagem; Lt é o comprimento total dos canais e A a área da bacia ou sub-bacia que se está estudando. De um modo geral, através de uma simples inspeção visual pode-se avaliar a densidade da drenagem de uma determinada área em alta, média ou baixa, desde que se tenha um referencial. Através deste parâmetro pode-se obter informes sobre a ocorrência de terrenos porosos (baixa densidade) , ou então impermeáveis (alta densidade), como também sobre o índice pluviométrico.

Assim sendo,obtem-se dados sobre:

- permeabilidade;
- porosidade;
- e condições climáticas.

Tropia indica se os diferentes canais que compõem um determinado padrão de drenagem mostram uma ou mais orientações preferenciais. Caso isto ocorra, pode-se admitir que existe um fator estrutural controlando aquele padrão.Caso a tropia seja unidirecional pode -se afirmar que o grau de controle é alto. No entanto, caso não se tenha uma orientação preferencial, pode-se afirmar que não existe grau de controle.

Sinuosidade refere-se a drenagem que apresenta curvas anômalas, ou seja, que fujam do padrão normal. Como exemplo pode-se citar o caso de uma drenagem retilínea, a qual bruscamente mostra uma elevada sinuosidade. De qualquer sorte, um padrão anastomótico evidencia uma sinuosidade regular de sua drenagem. Angulosidade e Ângulo de Junção relacionam-se com a geologia estrutural de uma determinada área, sendo que os ângulos agudos indicam ausência de controle, enquanto que os retos mostram a presença de forte controle estrutural. Por outro lado, o obtuso pode indicar inversão de caimento da drenagem (“barbed drainage”).

Assimetria é um parâmetro de grande relevância, por indicar o caimento do terreno, e/ou das estruturas planares primárias ou secundárias. Para se identificar a assimetria de drenagem basta avaliar o comprimento dos afluentes. De um modo geral, a assimetria forte é marcada pela presença de afluentes bem curtos de um lado, ao passo que do outro os afluentes são bem mais longos. Tal fato indica, sem dúvida, o caimento do terreno, o qual pode estar associado a um acamamento ou foliação, ou então a um bloco de falha basculado.

Os cursos de água podem ser classificados em relação a estrutura geológica em (Figura 2.48):

- conseqüentes;
- subseqüentes;
- reseqüentes;
- obseqüentes;
- inseqüentes;
- superimpostos;

- e antecedentes.

Conseqüente é o rio que tem curso controlado pelo caimento da estrutura planar (camada, foliação), a qual geralmente coincide com o pendore do terreno.

Subseqüente é o rio que tem seu curso desenvolvido ao longo de linha de fraqueza, como fratura, contato entre litotipos, discordâncias, etc. Constitui um rio que apresenta controle estrutural ou estratigráfico.

Reseqüente é o rio que tem seu curso disposto no mesmo sentido da drenagem conseqüente, mas em um nível topográfico inferior.

Obseqüente é o rio que ocorre em direção oposta à drenagem Consequente da área.

Inseqüente é o rio que não se apresenta, aparentemente, controlado por qualquer fator, seja estrutural ou estratigráfico.

Superimposto é o rio que estabelece seu curso cortando as estruturas geológicas já existentes. É um rio de formação mais jovem do que as referidas estruturas.

Antecedente é o rio que teve seu curso preservado apesar das novas estruturas que foram criadas. É um rio mais antigo em relação as mais recentes estruturas implantadas na área.

Na Figura 2.49 apresentam-se os padrões de drenagens da Área Modelo (Figura 2.12), a fim de ilustrar os conceitos aqui reportados. Nesta figura pode-se destacar três grandes conjuntos de padrões de drenagem, A, B e C de acordo com HOWARD (1967). O conjunto A evidencia em sua totalidade grande influência dos conjuntos B e C, o que pode ser constatado na zona de contato entre os mesmos. De qualquer sorte, o conjunto A exibe rios de caráter subseqüentes, com baixa densidade e baixo grau de integração em alguns trechos, em vista da elevada permo- porosidade de seu substrato. Deste modo, dominam os padrões dendrítico-angular a dendrítico-

retangular, secundados pelo treliça. O conjunto B mostra uma orientação marcante da drenagem, aproximadamente E-O, com variações para NE e NO. O padrão de drenagem dominante é o treliça básico e os modificados. Os rios são principalmente subseqüentes, com alta densidade e alto grau de integração, o que demonstra seu controle pela estrutura geológica. O conjunto C exibe um padrão dendrítico, dendrítico-retangular a retangular, com terminações em pinça (alta sinuosidade). A densidade é média-alta e o grau de integração médio. Nos três conjuntos, A, B e C, visualiza-se perfeitamente os parâmetros tropia, assimetria, sinuosidade e alinhamento, conforme indicado na Figura 2.49, reportados linhas atrás.

2.5.4 - Morfoestrutura

O termo morfoestrutura foi introduzido por Gerasimov apud GERASIMOV & MESCHERIKOV (1968), que propôs através de análises geomorfológicas, a divisão das formas de relevo em três principais categorias genéticas: geotexturas, morfoestruturas e morfoesculturas.

Os primeiros correspondem as feições maiores do relevo terrestre (maciços continentais, bacias oceânicas, etc.). Os elementos de morfoestruturas complicam as formas de geotextura. As morfoestruturas são complicadas por formas menores, os elementos de morfoesculturas.

Segundo GERASIMOV & MESCHERIKOV (1968) as morfoestruturas consistem naquelas formas da superfície terrestre que são produzidas pela interação de forças endógenas e exógenas. Deste modo, retrata-se pelas formas principais do relevo da terra (cadeias de montanhas, bacias intermontanas, planaltos, depressões, etc.). No entanto, feições de relevo relativamente menores

com anticlinais, bacias, domos, arqueamentos, falhas e outros elementos topográficos formados diretamente por movimentos tectônicos, também constituem morfoestruturas.

BARBOSA et al. (1984) sugeriram o conceito de Domínios Morfoestruturais nos levantamentos geomorfológicos realizados para o Projeto RADAMBRASIL, como grandes conjuntos estruturais, que geram arranjos de relevo, que guardam relação de causa entre si.

Consoante Soares et al. apud CREPANI (1988) o termo morfoestrutura é aplicado para definir uma estrutura suposta, identificada a partir da análise de formas de relevo e padrões de drenagem. Deste modo, o principal objetivo da análise morfoestrutural é obter informes a respeito de estruturas, uma vez que se espera, com a aplicação dessa técnica que a morfologia da superfície de uma bacia, reflita, embora de modo atenuado, as condições estruturais do embasamento.

Adotar-se-á a definição de morfoestrutura no sentido de GERASIMOV & MESCHERIKOV (1968), ressaltando-se apenas que os referidos autores confundiram estrutura geológica com feição de relevo. Deste modo, morfoestrutura denomina-se àquelas feições em que a forma de relevo e a drenagem estão estreitamente relacionadas à estrutura geológica. Podem apresentar feição positiva ou negativa, e podem estar à superfície ou então inumadas por espessa seqüência sedimentar. Quando é possível definir o tipo ou associação de litotipos que compõe a morfoestrutura, denomina-se Lito-Morfoestrutura.

A identificação e análise das morfoestruturas são usadas tanto na solução de problemas da estrutura e evolução da terra, quanto da interpretação geomorfológica da estrutura geológica. Neste caso são de grande importância prática na prospecção de petróleo e gás natural em terrenos

sedimentares, assim como depósitos minerais de forma genérica em qualquer tipo de terreno geológico.

Para definição das morfoestruturas dois parâmetros geomorfológicos são de grande relevância: formas de relevo e padrões de drenagem. Deste modo, a inclusão deste item justifica-se como uma aplicação dos conceitos emitidos sobre os mesmos.

Para as formas de relevo torna-se importante a identificação de feições relativas às cristas assimétricas, conforme os critérios apresentados na seção 2.5.2.1 referente ao mergulho das mesmas. Desse modo, a caracterização de formas assimétricas em feições com topo agudo, plano ou mesmo convexo é o passo mais importante na caracterização das morfoestruturas. No entanto, se a região que está sendo estudada não possui formas de relevo com expressão topográfica, tem-se que usar outro importante parâmetro, qual seja o padrão de drenagem.

Quando da análise da Forma dos Elementos de Drenagem (FED), quatro importantes conjuntos devem ser pesquisados: assimétricos, circulares ou elípticos, lineares e radiais (Figura 2.50).

A Forma dos Elementos de Drenagem (FED) vai permitir identificar uma estrutura planar através da assimetria de drenagem, da mesma maneira que o arranjo circular ou elíptico e/ou radial vai sugerir a presença de estruturas dobradas. Por sua vez, a forma linear da drenagem possibilitará interpretar o condicionamento a lineamentos estruturais.

Uma questão a ser pesquisada é com respeito a intensidade de estruturação das referidas formas, uma vez que se necessita saber se as mesmas compõem-se por drenagens do tipo subsequente, ou seja, se existe uma inter-relação com a estrutura geológica ou não.

Na Figura 2.50 relaciona-se a forma dos elementos de drenagem (FED) versus a intensidade de estruturação dos mesmos através das adjetivações muito fraco, moderado, forte e muito forte. A avaliação da intensidade de estruturação possibilitará a definição do Fator de Confiabilidade. Este indica quão bem estruturadas estão as propriedades da forma analisada, dando certeza de que a morfoestrutura é tal como está representada, segundo conceituação de SOARES et al.(1981). O valor numérico do fator de confiabilidade é aqui expresso em cinco níveis:

- muito fraco - 0 - 0,20
- fraco - 0,21 - 0,40
- moderado - 0,41 - 0,70
- forte - 0,71 - 0,90
- muito forte - 0,91 - 1,00

Com efeito, a FED tem grande aplicabilidade na quantificação de morfoestruturas através de sua Intensidade de Estruturação (IE), merecendo ressaltar que para:

- feições lineares deve-se utilizar a FED linear;
- feições anelares deve-se utilizar as FED's circular e radial;
- feições dobradas deve-se utilizar a FED assimétrico.

Na Figura 2.51 exemplifica-se através de modelos hipotéticos os FED's assimétrico, linear, circular, e anelar, como complemento da Figura 2.50 , para fixação do leitor.

Para a Intensidade de Estruturação (IE) atribui-se os seguintes valores:

- 0,2 - (muito fraco)
- 0,40 - (fraco)

- 0,60 - (moderado)
- 0,80 - (forte)
- 1,00 - (muito forte)

O Fator de Confiabilidade é obtido pelo produto do valor da Intensidade de Estruturação (IE) das Forma dos Elementos da Drenagem (FED) envolvidas. Respalado nessas premissas e tendo por base os dados constantes da Figura 2.50, analisar-se-á a anomalia de drenagem da Figura 2.52, exposta na chapada do Cachimbo (PA), bacia do rio São Tomé:

$$FED(r) = 1 \text{ (radial)}$$

$$FED(c) = 0,95 \text{ (circular)}$$

$$\text{Fator de Confiabilidade (FC)} = 1 \times 0,95 = 0,95 \text{ (muito forte)}$$

Nos domínios da Bacia Paleozóica do Médio Amazonas, Lima & Fernandes apud ARAÚJO et al. (1976) fizeram referência sobre a morfoestrutura do Erepecu, chamando atenção para a possibilidade de relacionar-se a uma intrusão ígnea básica (Figura 2.53). Posteriormente, LIMA (1978c) aventa a hipótese de se tratar de uma estrutura halocinética, porquanto da feição anelar com a porção central deprimida, além da incidência de lagos, em seu interior (Figura 2.54). No início dos anos 80, por indicação do Projeto RADAMBRASIL, tal morfoestrutura foi alvo de exploração geológica, acompanhada por dois perfis ortogonais de magnetometria e gravimetria por parte da CPRM, cujos resultados finais estão expressos em ARAÚJO et al. (1983). Estes autores descartam a possibilidade de um domo salino, no entanto, explicam em seguida que a origem da estrutura circular não encontra uma clara explicação com os resultados da prospecção

geofísica executada, sugerindo, por conseguinte, novos perfis. Tem-se a informação da execução de um furo de sondagem raso no flanco ocidental da estrutura pela CPRM, no qual não foram encontrados sinais de rochas salinas.

Para a morfoestrutura do Erepecu pode-se calcular o Fator de Confiabilidade como segue :

$$FED(c) = 0,6 \text{ (circular)}$$

$$FED(r) = 0,6 \text{ (radial)}$$

$$\text{Fator de Confiabilidade (FC)} = 0,6 \times 0,6 = 0,36 \text{ (fraco)}$$

CUNHA & CARNEIRO (1972) e LIMA et al. (1990) chamam a atenção para um conjunto de morfoestruturas interpretadas no âmbito da Sinéclise do Parnaíba. Dentre essas, apresenta-se na Figura 2.55 a Morfoestrutura do Uíca, interpretada a partir de imagens RVL e LANDSAT, em virtude da escassez de dados geológicos de superfície, porquanto da espessa cobertura de sedimentos recentes na região em questão(Figura 2.55).

Para a morfoestrutura do Uíca pode-se calcular o Fator de Confiabilidade como segue:

1 - para a estrutura anelar;

$$FED(e) = 1,0 \text{ (elíptico)}$$

$$FED(r) = 0,95 \text{ (radial)}$$

$$\text{Fator de Confiabilidade (FC)} = 1 \times 0,95 = 0,95 \text{ (muito forte)}$$

2- para a estrutura linear

$$FED(l) = (1 + 0,8):2 = 0,9 \text{ (muito forte)}$$

$$\text{Fator de Confiabilidade} = 0,9 \text{ (muito forte).}$$

2.6 - ESTÁDIO ANÁLISE

2.6.1 - Introdução

Com o Estádio Análise inicia-se mais uma importante etapa na interpretação radargeológica, uma vez que se dará ênfase às feições morfológicas retratadas na imagem que se apresentam sob forma de planos, linhas, ou ambos, procurando estabelecer suas relações espaciais. Por conseguinte, abordar-se-á as feições planares, lineares e tabulares, constituintes do Estádio Análise, cujas relações com os fenômenos geológicos são colocadas em caráter preliminar, de acordo com as necessidades didáticas.

LIMA (1989) utilizou a denominação de estruturas planares para caracterizar formas orientadas representativas de um plano. Por sua vez, o mesmo autor caracteriza também estruturas lineares, identificando-as como representativas de estruturas planares verticalizadas, além de estabelecer que fraturas são estruturas lineares negativas. De igual modo, estrutura tabular seria uma estrutura linear de maior possança. Na verdade, LIMA (op. cit.) estava procurando relacionar tais feições estruturais, observadas mesoscopicamente no terreno, à sua representatividade nas imagens RVL. Entretanto, tal terminologia tem causado certa confusão uma vez que fratura apesar de ser uma estrutura linear na imagem RVL é planar no terreno. Deste modo, a fim de evitar tais problemas terminológicos, prefere-se utilizar feição planar ao invés de estrutura planar e feição linear em vez de estrutura linear, e por extensão feição tabular ao invés de estrutura tabular.

Assim sendo, feição linear constitui um arranjo linear de elementos de imagem, do mesmo modo que feição planar representa elementos de imagem dispostos sob a forma de planos.

2.6.2 - Feições Planares

Feições Planares, como seu nome indica, constituem planos dispostos na imagem que, para sua perfeita visualização, vão depender da linha de varredura do sensor Radar. A melhor orientação é aquela oblíqua ao "scanner" uma vez que a pendente não está totalmente voltada para a antena, evitando, deste modo, o encurtamento de Radar. No entanto, as imagens de RVL mostram uma infinidade de planos, provocando uma certa confusão ao intérprete com pouca experiência. Em vista disso, sugere-se que sejam rastreados na imagem aquelas superfícies que tenham as configurações em "U" ou "V", cuja abertura será indicativa do sentido do mergulho (Figura 2.56). À medida que o ângulo de mergulho aumenta, a feição em "U" bem aberto passa a "U" ou "V" mais fechado, até atingir o traçado retilíneo, no caso de mergulhos verticais. Tal regra é aqui denominado de Regra dos "UV's" (Figura 2.57). A forma em "U" ou "V" constitui o resultado da ação de agentes erosivos sobre tal feição (Figura 2.58). Deve-se ressaltar que, devido à presença de colúvios e leques aluviais nas encostas das elevações, pseudofeições planares podem ser exibidas.

Em vista de serem planos, regras geométricas com respeito à sua projeção no plano horizontal obedecem a já conhecida Regra dos "V's" (Figura 2.59). No caso de retratarem planos horizontais, comportam-se como se fossem curvas de nível; no outro extremo, em planos verticais, teriam a forma retilínea e nos casos intermediários, em "V" apontados para jusante ou

montante, nos vales (Figura 2.60), de acordo com o ângulo de mergulho em relação à declividade topográfica.

A Figura 2.60 procura exemplificar melhor o comportamento das camadas inclinadas com relação ao vale e sua declividade. No caso de mergulhar para montante o "V" sempre será para montante, no caso de mergulhar para jusante o "V" apontará para jusante somente no caso em que o ângulo de mergulho for maior que a declividade do vale, caso contrário o "V" apontará para montante. O conhecimento de regras tão simples são de grande relevância quando da interpretação radargeológica, no que tange, a disposição dos contatos nos vales: "V" para montante ou para jusante.

Por questões didáticas utilizar-se-á as denominações mergulho fraco (3° - 15°), mergulho médio (15° a 45°), mergulho forte (46° a 75°), subvertical (76° a 89°) e vertical (90°), os quais são estimados visualmente na imagem RVL.

Vale ressaltar que tais feições em "U" ou em "V" não devem ser confundidas com vales em "U" (fundo chato) e vales "V" (fundo agudo), uma vez que tais denominações referem-se ao perfil de um vale, no qual se encaixa uma drenagem.

As estruturas planares podem ser de caráter primário ou secundário. O primeiro caso tipifica-se pelo acamamento sedimentar e ígneo (derrame basálticos), ao passo que no segundo pode constituir uma clivagem de fratura, plano de fratura, ou então uma foliação (xistosidade, bandamento, foliação milonítica). A distinção de uma estrutura primária de uma secundária, em imagem RVL, exige uma boa experiência do radarintérprete. A melhor situação é aquela em que o intérprete consegue identificar dois conjuntos, a que tiver maior ressaltado poderá ser a mais jovem, conseqüentemente a secundária. Sugere-se que sejam traçadas com grafite azul.

Nas Figuras 2.61, 2.62 e 2.63 ilustram-se as feições planares em " U " ou " V " de caráter primário ou secundário. As Figuras 2.64, 2.65 e 2.6 constituem as respectivas interpretações. S e M referem-se à classe de rochas sedimentares e metamórficas, respectivamente.

2.6.3 - Feições Lineares

À semelhança do que foi tratado no item anterior, feições lineares referem-se a linhas nas imagens RVL, as quais podem ser positivas e negativas, constituindo os chamados Lineamentos de Radar (LIMA, 1978a).

A fim de evitar possíveis ambiguidades estabelece-se um paralelo entre os termos lineamento, alinhamento e feições lineares. A introdução do termo lineamento deve-se a HOBBS (1904), o qual foi posteriormente redefinido por O'LEARY et al. (1976) com similar significado: " feição linear, simples ou composta, contínua ou descontínua, da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere substancialmente dos padrões de feições que lhes são adjacentes, presumivelmente, refletem um fenômeno de subsuperfície". SOARES et al. (1981) referem-se a alinhamento à família de feições naturais na superfície terrestre de forma alinhada. Dentro desta conceituação o termo alinhamento é descritivo e genérico. Pode representar tanto o arranjo alinhado de corpos de areias litorâneas, como cristas de camadas inclinadas em uma faixa de camadas homoclinais, etc. Por sua vez, lineação é uma feição linear , retilínea ou arqueada, individual, traçável na imagem (SOARES et al., op. cit.)

As feições lineares são feições que, devido a visada lateral do sensor Radar, representam-se por "linhas" nas imagens RVL, quer sejam claras, em vista da reflexão frontal, quer sejam escuras, porquanto das sombras. Obviamente, tais feições estão ligadas à formas topograficamente positivas ou negativas. Esta distinção é de grande importância no Estádio Análise.

Deve-se enfatizar que o maior realce das feições lineares ocorre quando a feição imageada é paralela à linha de vôo (perpendicular a linha "scanner").Corresponde aos "Lineamentos de Radar".

As feições lineares negativas podem retratar:

- textura de drenagem retilíneas, ou não, como também zonas de descontinuidades das rochas. Neste caso podem constituir fraturas ou falhas.

As negativas, deve-se traçá-las com grafite vermelho, ao passo que sendo positivas devem ser delineadas com grafite azul.

As Figuras 2.67, 2.68 e 2.69 retratam feições lineares positivas (retilíneas e curvilíneas) (L) e feições planares (P) cujas interpretações são representadas nas Figuras 2.70, 2.71 e 2.72, respectivamente. As letras S e M dão indicações da classe de rochas. Por sua vez as Figuras 2.73 e 2.74 exemplificam estruturas-linhas negativas (N) e planares (P), conforme apresentado nas Figuras 2.75 e 2.76, respectivamente. As letras M, S e I indicam a classe de rochas.

As feições lineares positivas podem representar:

- textura de relevo de morro de topo agudo;
- textura de relevo de cristas, simétricas ou assimétricas;

- textura de relevo de morros de topo convexo, os quais, devido suas extensões, darão idéia de orientação pela união de seus pontos mais elevados:

- e pela visada lateral do sensor Radar em zonas de relevo médio a forte, o qual poderá provocar o aparecimento de pseudo-estruturas.

De uma maneira geral, as feições lineares estão ligadas a zonas tectono-metamórficas. As mesmas devem ser traçadas com grafite azul na sua porção positiva.

2..6.4 - Feições Tabulares

Denomina-se "tabular" em virtude de seu maior comprimento em relação a sua largura. Em outras palavras, constitui uma feição linear perfeitamente mapeável, em vista de sua maior expressão espacial, sendo deste modo delimitada na imagem. RVL. Devem ser delineadas propendendo definir a estruturação geral de uma área. No caso de rochas competentes, são de grande valia na identificação de falhas e dobras.

A Técnica dos Polígonos, aqui introduzida, consiste na delimitação de pequenos polígonos, feições tabulares, expostos nas imagens RVL, amiúde em rochas competentes. Ex. quartzito, chert, bif, etc. Tem como objetivo principal a definição de dobras, falhas, etc.

Utiliza-se a Figura 2.77 para exemplificar a aplicação do Método dos Polígonos, conforme demonstrado na Figura 2.78. Pode-se observar na referida ilustração através desta técnica, que é possível ter-se idéia do contexto estrutural de uma região, mesmo se tratando de terrenos de alto grau metamórfico.

Como ver-se-á adiante, as feições tabulares correspondem, geralmente, a diques ou zonas de silicificação, ou então a camadas competentes de grande persistência espacial, como é o caso de quartzitos, bif, chert, etc. Os diques ácidos geralmente expõem topo agudo, ao passo que, os diques básicos, podem evidenciar topo plano ou convexo.

As Figuras 2.79, 2.80 e 2.81 ilustram feições tabulares (t) de topos agudo e convexo, consoante disposição mostrada nas Figuras 2.82, 2.83 e 2.84, respectivamente. As letras M (metamórfica) e S (sedimentar) indicam as classes de rochas.

A Figura 2.85 constitui a interpretação da Área Modelo (Figura 2.12) relativa às feições lineares, planares e tabulares. Vide Tabela 2.7.

Pela análise da Figura 2.85, pode-se observar a grande incidência de feições lineares em sua porção mediana, a qual é expressa pelo conjunto de cristas, ou então pela orientação dos morros, dispostos com orientação E-O, ao qual se associam feições planares e tabulares. Por sua vez, nos domínios inferior e superior abundam feições lineares negativas.

Com as feições tabulares conclui-se o Estádio Análise.

2.7 - ESTÁDIO INTERPRETAÇÃO

2.7.1 - Introdução

Constitui o último estágio e o mais importante do Método **Sistemática de Elementos Radargráficos**, uma vez que o radarintérprete pode aplicar seus conhecimentos geológicos, tendo por base as informações auferidas nos estádios anteriores.

O Estádio Interpretação inicia-se com a identificação de unidades ou associações litológicas, de grande importância como complemento na definição de Estruturas Circulares, seguido de Discordâncias, Descontinuidades e Dobras. Tais informações são de grande valia para a montagem do quadro geológico, no que concerne tanto à geologia estratigráfica quanto à geologia estrutural, e terão grande significado para aplicação na Geologia Econômica.

2.7.2 - Interpretação Litológica

A identificação de litotipos não é uma tarefa fácil em radargeologia, uma vez que uma série de premissas devem ser consideradas. Deste modo, deve-se, em princípio, identificar a que classe pertencem os litotipos: ígneo, sedimentar ou metamórfico. Após definida a classe, o segundo passo será identificar o litotipo predominante ou então indicar uma associação dos mesmos. Propõe-se utilizar a seguinte notação, para codificar os litotipos através de letra-símbolo, cujos índices estarão dispostos em ordem decrescente de idade (relativa):

- ígneas : $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$;
- sedimentares : $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$;
- metamórficas : $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$.

Pode-se, também, utilizar um índice alfanumérico, caso as unidades radargeológicas sejam cronocorrelatas, i. e.:

- $S_{1a}, S_{1b}, \dots, S_{1n}$;
- $M_{1a}, M_{1b}, \dots, M_{1n}$;
- $I_{1a}, I_{1b}, \dots, I_{1n}$.

Abreviaturas ou letras especiais são indicadas na Tabela 2.8, para os litotipos mais comuns e passíveis de identificação em imagens RVL.

Quando se identificar uma cena de imagem que possua textura/tom radargráficos, formas de relevo e padrões de drenagem similares e com boa distribuição espacial, compatível com a escala 1:100 000, ter-se-á uma Unidade Radargeológica (UR). Deste modo, a presença de extensos tabuleiros e padrão de drenagem dendrítico, com determinada textura/tom será, por exemplo, uma UR.

Muitas vezes necessita-se dar conotação cronológica às unidades radargeológicas definidas, tendo por base, é claro, a literatura geológica da região que se está estudando, através de uma correlação entre as unidades radargeológicas e àquelas do terreno, determinadas através de datação relativa ou absoluta. Sugere-se que a primeira letra (maiúscula) corresponda a Era geológica que a mesma está inserida, i. e. : A (Arqueozóico), P (Proterozóico), Pz (Paleozóico), Mz (Mesozóico) e Cz (Cenozóico). No entanto, no caso do Proterozóico o mesmo pode ser subdividido em Inferior (PI), Médio (PM) e Superior (PS). Por sua vez, a informação pode ser referente ao Período Geológico. Neste caso, deve-se utilizar as abreviações classicamente utilizadas em mapas geológicos, como seja: € (Cambriano), O (Ordoviciano), S (Siluriano), C (Carbonífero), P (Permiano), Tr (Triássico), J (Jurássico), K (Cretáceo), T (Terciário) e Q (Quaternário).

- A segunda letra, neste caso terá que ser minúscula, e pode ser m (metamórfica), s (sedimentar) e i (ígneas), sendo que :

- para as metamórficas tem-se ms (metassedimento), mvs (metavulcanosedimentar), ou então a letra m associada a uma outra para indicar a presença de metamorfismo, i. e. m β (metabásica);

- para as rochas ígneas pode-se indicar tanto por " i ", ou então, por uma letra grega minúscula, para indicar o tipos específicos de rocha, por exemplo: alfa (α), beta (β), gama (γ), teta (θ), tau (τ), delta (δ), lambda (λ), hipsilo (ν), etc;

A seguir apresenta-se um conjunto de critérios que devem ser considerados por ocasião da interpretação litológica, sob a forma de Tabelas. Vide Tabelas 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12.

Obviamente, que os critérios listados nas Tabelas 2.8 a 2.11 não são rígidos, havendo variações em termos de clima, como o desenvolvimento de topos planos em terrenos ígneos/metamórficos, devido a formação de níveis de aplanamento de caráter regional, tendo como consequência a formação de lateritos. Por outro lado, os derrames basálticos terão caracteres semelhantes ao grupo de rochas sedimentares distinguindo-se, apenas, no tipo de pendente e fraturas.

Após a identificação a qual classe pertencem os litotipos, pode-se aventar os prováveis nomes dos mesmos. Para tanto, deve-se observar ,com minudência, as formas de relevo e padrões de drenagem, tendo por base as propriedades físicas das rochas, em termos de resistência à erosão, sempre lembrando a grande influência que o clima exerce sobre as mesmas.

As Figuras 2.86, 2.87 e 2.88 representam exemplos de associações de rochas plutônicas e vulcânicas em imagens RVL. A Figura 2.86 retrata um terreno vulcano-plutônico de composição ácida. As vulcânicas ácidas (a) dispõem-se em relevo fraco, com morros não orientados de topo convexo. Por sua vez, as plutônicas ácidas (gr) compõem zonas de relevo

médio, com feições de topo convexo, escarpado e sem orientação. A Figura 2.87 mostra uma relação semelhante a ilustração anterior, ressaltando-se a presença de corpo básico (b) de forma alongada, topo plano e pendentes com colúvios. Ressalte-se a ocorrência de corpos tabulares tipificando diques básicos (w). Finalmente, na Figura 2.88 tem-se uma relação de um corpo ígneo ácido (gr) com topo convexo, fraturado, sem orientação, cortando metassedimentos (ms) composto por cristas agudas orientadas.

As rochas sedimentares estão expressas principalmente nas Figuras 2.89, 2.90 e 2.91. Na Figura 2.89, apresenta-se uma relação muito interessante entre psamitos (ar) e vulcânicas básicas (b). Ambos têm praticamente o mesmo tipo morfológico, diferindo apenas na configuração das vertentes. Na Figura 2.90 tem-se uma importante relação entre psamitos (ar) e pelitos (fh), ressaltando-se que a distinta resistência a erosão dos dois tipos litológicos é marcada por importante quebra de relevo. Observar a presença de feições planares bem desenvolvidas em ar₁, sob a forma de “V”. A terceira ilustração desta classe de rocha, Figura 2.91, retrata terrenos carbonáticos tipificados pela presença de dolinas (d), escassez de drenagem e zonas com forte retorno, feições relativas a topografia cárstica.

Para a classe de rochas metamórficas, a Figura 2.92 mostra a presença de cristas dominadas por quartzitos (q), associado a rochas granulíticas, compondo estruturas dobradas. A Figura 2.93 retrata uma importante inter-relação entre quartzitos (q), compondo cristas e gnaisses (gn) dominando o terreno arrasado, com intenso ravinamento e certa orientação de seus morros. A Figura 2.94 evidencia uma relação semelhante a da estampa anterior, no entanto, acrescida pela presença de xistos (xi).

Pelo que se pôde observar a identificação de litotipos, em imagens RVL, requer um exame minudente de aspectos relativos as feições planares e lineares, até a configuração de topo e pendente dos morros envolvidos, conforme está explicitado nas Tabelas 2.8 a 2.11.

2.7.3 - Discordâncias

Para o identificação de discordâncias, em imagens RVL, necessário se faz a delimitação com minudência das feições planares e lineares de um determinado tipo litológico estruturado, a fim de que sejam estabelecidas as relações espaciais do mesmo. Caso o tipo litológico possua a presença de níveis guia, os mesmos devem ser delimitados, os quais em sua maioria representam feições tabulares. Em princípio, para que se possa interpretar uma discordância, basta que as estruturas acima referidas desapareçam, isto é sejam encobertas por tipos litológicos não estruturados ou com estruturas com orientação diversa do primeiro e com litologia diferente.

Dos quatro tipos de discordância conhecidos na literatura geológica apenas a paradiscordância não pode ser interpretada nas imagens RVL (Figura 2.95). A angular, litológica e erosiva serão detectadas desde que haja uma dependência entre formas de relevo e a estrutura geológica. Analisando cada situação verifica-se que a discordância litológica será melhor alcandorada no caso ígnea X sedimentar e sedimentar X metamórfica. Idêntica situação dar-se-á com a discordância erosiva, ressaltando-se que as classes das rochas sedimentares versus metamórficas são mais fáceis de serem observadas. Finalmente, no caso da discordância angular, o fator geométrico pesará bastante na avaliação, assim como a análise das feições lineares, planares e tabulares.

As Figuras 2.96, 2.97 e 2.98 constituem exemplos de discordâncias passíveis de serem observadas, em imagens RVL, cujos produtos da interpretação são retratados nas Figuras 2.99, 2.100 e 2.101, respectivamente. Em tais interpretações procurou-se estabelecer os contatos entre classes de rochas, assim como enriqueceu-se com dados estruturais, sob a forma de feições planares, lineares e tabulares.

A Figura 2.96, exemplifica, em imagem RVL, a situação geológica em que duas seqüências sedimentares se diferenciam pelo fato de uma (S_1) estar cortada por um dique (I_1), ao passo que a outra não (S_2). Na Figura 2.97, a relação, na imagem RVL, é essencialmente geométrica entre feições lineares, em terrenos metamórficos de médio a alto grau. Por sua vez, a Figura 2.98 exemplifica o limite entre uma seqüência metamórfica (M_1) e uma sedimentar (S_1), muito bem exemplificada na imagem RVL.

2.7.4 - Estruturas Circulares

O termo estrutura circular, já bastante enraizado na literatura fotogeológica, teve um grande avanço com o advento das imagens orbitais do tipo LANDSAT, SPOT, KOSMOS, e principalmente com as imagens RVL, cuja principal característica é o ressaltado das feições morfológicas.

Fato interessante é que as chamadas estruturas circulares dificilmente têm a forma circular, havendo dominância da configuração elíptica. Por outro lado, o intérprete que estiver realmente interessado em encontrá-las, poderá ver centenas das mesmas, em especial, se observadas em imagem RVL.

Genericamente, para que se "possa pensar" em uma estrutura circular duas características são deveras importantes: presença de feições lineares e/ou tabulares na periferia e/ou no interior da estrutura circular. Se a estas for acrescida a presença de feições planares (convergentes ou divergentes) e drenagem anelar, caracteriza-se preliminarmente a estrutura circular. Agora resta saber sua conexão com corpos ígneos, dobras ou astroblemas.

As estruturas circulares podem relacionar-se a corpos ígneos intrusivos sob a forma de "stocks" ou bossas, a dobras (domos e bacias), ou então a astroblemas. A seguir apresenta-se os critérios para identificação das estruturas circulares em corpos ígneos. No caso de dobras, os critérios para identificação serão abordados posteriormente.

Critérios para identificação de estruturas circulares (corpo ígneo):

- morfologia geralmente elíptica, secundariamente circular em "oito";
- relevo quando positivo, mostra relação textura/tom díspares com as rochas circundantes;
- feições lineares negativas (fraturas) distintas em relação as rochas encaixantes;
- padrões de drenagem anelar, centrípeto ou radial;
- relacionados a lineamentos estruturais ou na interseção dos mesmos;
- feições tabulares envolvendo a estrutura;
- estruturas lineares dispostas concordantemente na periferia da estrutura;
- efeito da intrusão nas encaixantes;
- presença de zonas deprimidas na porção central do corpo;
- e ocorrência de círculos concêntricos no corpo.

A identificação de astroblemas já é uma tarefa difícil quando investigada no terreno, quanto mais de maneira indireta. No entanto, alguns critérios são válidos para o caso de rochas sedimentares, como seja a presença de mergulho centrípeto das feições planares no centro da estrutura e centrífugo na periferia, além da natural inversão de relevo na porção central (Figuras 2.102 e 2.105). No caso de terrenos metamórficos não existem critérios definidos, merecendo, no entanto, atenção as feições circulares, com a porção central deprimida.

Ainda em relação aos astroblemas ressalta-se que os mesmos podem ser confundidos com estruturas criptovulcânicas e halocinéticas, necessitando, por conseguinte, de verificação de campo.

A fim de exemplificar o item referente a estruturas circulares, selecionou-se três estampas visando ilustrar o que foi discorrido. As Figuras 2.102, 2.103 e 2.104 retratam clássicos exemplos brasileiros de estruturas circulares em imagem RVL, cujas interpretações estão apresentadas nas Figuras 2.105, 2.106 e 2.107, respectivamente. Indicações de informações litológicas e dados estruturais são também mostrados (Tabelas 2.7 e 2.12). A Figura 2.102 representa um astroblema da serra da Cangalha (TO) consoante trabalhos desenvolvidos por BEATTY (1980). Constitui uma feição anômala em terrenos sedimentares de acamamento horizontal. Mostra como caracteres marcantes a presença de feições lineares e tabulares circundando a estrutura, assim como de mergulho divergente na periferia, convergente no centro e inversão de relevo. A Figura 2.103, morro dos Seis Lagos (AM), exibindo em seu interior círculos concêntricos, lagos e conformação circular, além da interação de lineamentos. A direita, para sudeste, ocorre um corpo básico de forma elipsoidal. A Figura 2.104 representa o maciço de

Santa Angélica (ES) em imagem RVL, com relevo distinto, forma em oito e porção central deprimida de composição básica, (b) como principais caracteres radargráficos.

2.7.5 - Descontinuidades

Antes de se iniciar o estudo deste item, torna-se necessário que seja feito um proêmio sobre o comportamento mecânico das rochas, para que se possa, de uma maneira pragmática inserir alguns conceitos que serão de grande valia para a radarinterpretação. Assim sendo, pode-se afirmar que o comportamento mecânico das rochas vai depender de seu posicionamento em profundidade - nível crustal - como também da temperatura, fluidos e tempo de atuação das forças, podendo ser classificado em elástico, rúptil e dúctil. O primeiro restringe-se a um campo limitado, desaparecendo com o aumento da temperatura, da força atuante ou do tempo de aplicação desta; por isso ela não é objeto de maiores considerações (HASUI & COSTA, 1991).

Em condições de baixa pressão/temperatura, as rochas têm um comportamento rúptil. No entanto, com o aumento das condições de pressão e temperatura passam a ter um comportamento dúctil e, alcançando seu ponto de fusão, se comportam ,então, como líquidos muito viscosos (Figura 2.108).

Em condições de comportamento rúptil a deformação se manifestará sob a forma de planos de ruptura. Ter-se-á um domínio sem dobras, pois que, qualquer deformação terá como resultado numerosas fraturas e falhas. Dir-se-á que o mecanismo elementar será essencialmente rúptil. Quando a rocha atinge uma certa ductilidade, a mesma pode deformar-se sem romper-se, formando-se então dobras. Em condições de baixa ductilidade o mecanismo dominante será de

flexão e forma-se-ão dobras isópacas. Um estágio mais evoluído provocará nas rochas um achatamento mais generalizado com o desenvolvimento da xistosidade, sendo as dobras anisópacas. Neste caso, o mecanismo elementar é de achatamento. Finalmente, nas grandes profundidades as rochas estão a uma temperatura próxima ou superior a seu ponto de fusão, se comportando como líquidos mais ou menos viscosos, dando origem as dobras de fluxo. O mecanismo elementar é de fluxo. Formam-se dobras de fluxo (Figuras 2.109 e 2.110).

MATTAUER (1976) define nível estrutural como diferentes domínios da crosta em que mecanismos de deformação parecem iguais. O mesmo definiu três níveis estruturais: superior, médio e inferior.

O Nível Estrutural Superior caracteriza-se pela presença de fraturas e falhas sem o desenvolvimento de dobras. Por outro lado, no Nível Estrutural Médio o mecanismo dominante é de flexão com o desenvolvimento de amplas dobras. No entanto, no Nível Estrutural Inferior o mecanismo dominante é de achatamento, em vista da presença de pressão dirigida e fluxo. Constitui o aparecimento da xistosidade, bandamento e em condições extremas a granitização e migmatização (Figura 2.111).

Fraturas constituem um termo genérico para designar os planos de partição das rochas, no entanto, quando existir deslocamento entre tais planos, a fratura recebe a designação de Falha.

Como já visto, o domínio de fraturas (juntas e falhas) situa-se essencialmente no Nível Estrutural Superior, em vista de seu caráter rúptil. Por outro lado, nos níveis estruturais médio e inferior as fraturas inexistem, dando lugar as falhas de cunho dúctil-rúptil e dúctil, designadas de zonas de cisalhamento. Obviamente, que as falhas no Nível Estrutural Superior serão rúpteis.

Em termos radargeológicos, a identificação de uma fratura é tarefa relativamente simples, constituindo-se uma feição linear negativa, a qual é bastante ressaltada nas imagens RVL, em vista da visada lateral deste sensor.

Para a delimitação de fraturas precisa-se de rígidos critérios, a fim de que o seu traçado forneça o máximo de informações, evitando-se o traçado exaustivo e o escasso, por questões óbvias. Por isso, deve-se traçá-la com grafite vermelho, apenas na parte negativa (feições lineares negativas). Seu comprimento mínimo deve ser de 1,5 cm, a fim de conferir idéia de orientação, pois que se os traços forem muito pequenos darão um aspecto semelhante a um "ciscado de pinto", denotando falta de orientação, quando, em verdade, o problema situa-se no tamanho das fraturas.

Sugere-se aqui uma classificação essencialmente descritiva para as fraturas, uma vez que a de caráter genético é praticamente impossível. Deste modo, defende-se uma classificação baseada em relação a uma feição planar primária ou secundária. Portanto, tem-se fraturas longitudinais, transversais e diagonais. No caso de corpos ígneos, utiliza-se tal classificação em relação a forma geométrica do corpo, sendo as fraturas, longitudinais, transversais, diagonais e circulares. Neste último caso, seriam aquelas que circundam o corpo tanto interna como externamente (Figura 2.112).

Pode-se perfeitamente utilizar as fraturas para identificação de litotipos, em especial àqueles do grupo das rochas ígneas, em vista da grande incidência de fraturas circulares, como também o desenvolvimento de formas elípticas.

A associação dos critérios abaixo, que podem indicar ao radarintérprete a possível indicação de falha são:

- persistência de feições lineares negativas por grandes extensões;
- feições lineares negativas ligadas à feições tabulares e lineares positivas;
- cristas, morros e serras deslocadas;
- facetas triangulares;
- zonas morfológicas retilíneas;
- mudança brusca de tipos litológicos;
- truncamento de feições tabulares e/ou lineares;
- feição geomórfica representativa de escarpa de falha;
- e retilinearidade da drenagem.

Após a identificação da paráclase, torna-se necessário classificá-la. Sugere-se a classificação baseada em seu movimento relativo, assim denominada: gravidade, empurrão e rejeito direcional, indicadas na Figura 2.113 . Obviamente, que além dos critérios acima listados, necessário se faz que algumas formas do terreno possibilitem a utilização da classificação acima.

Tanto a falha normal como a direcional, vão depender exclusivamente da morfologia do terreno, como por exemplo, a formação de escarpa de falha e a presença de formas de relevo deslocadas (“Z” ou “S”). Por outro lado, a feição diagnóstica para identificação de uma falha inversa será , sem dúvida, a grande incidência de feições planares, relacionadas com descontinuidades ou truncamento de estruturas geológicas. O ângulo da feição planar vai determinar se a falha é de baixo, médio ou alto ângulo, cujo mergulho será indicativo do plano de falha, devendo ser concordante com a mesma.

Um fator distintivo entre uma falha e uma zona de cisalhamento, é que a esta última, geralmente, se associam a feições lineares, ao passo que na primeira o rejeito é abrupto, indicativo da atuação em estado rúptil.

A identificação de zonas de cisalhamento normal, direcional e inversa pode ser feita em imagens RVL, desde que sejam traçadas com minudência as feições lineares, positivas e negativas, planares e tabulares.

Para as falhas direcionais, os principais critérios são:

- feições sigmoidais desenhadas por feições lineares positivas e tabulares;
- romboedros esboçados por feições lineares negativas;
- formas em "S" ou "Z" delineadas por feições lineares positivas ou por feições tabulares;
- formas amendoadas delimitadas pelas estruturas lineares positivas;
- presença de duas gerações de feições planares, à semelhança das estruturas S-C, onde S seria a primária e C a secundária.

Para as falhas normais advoga-se como principais critérios:

- formas de relevo positivas, orientadas e com desníveis retilíneos;
- traços da drenagem com alto ângulo de junção, e tropia uni a bidirecional.

Por sua vez, as falhas de empurrão têm como principais características:

- presença de feições planares relacionadas a descontinuidades;
- feições planares com mergulho sempre para o mesmo lado;
- presença de acamamento invertido;
- associação com estruturas lineares positivas sigmoidais ou negativas romboédricas.

HASUI & COSTA (1991) listam e ilustram com propriedade, uma série de critérios cinemáticos utilizados em zonas de cisalhamento de amplitude microscópica, mesoscópica e megascópica. Tomando-se como base que as feições lineares positivas relacionam-se ao traço da foliação ou acamamento, as feições lineares negativas a juntas, e que as feições tabulares correspondem a níveis guias, pode-se perfeitamente adaptar tais critérios à interpretação radargeológica como pode ser visto na Figura 2.114

A Figura 2.114 exemplifica com destaque alguns critérios próprios de zona de falha, como seja: presença de corpos tabulares (t), quebra abrupta de relevo (qr) e grande extensão da descontinuidade. Ressalte-se que a interpretação de falha inversa está ligado às feições planares (p) desenvolvidas, porquanto de sua grande incidência e mergulho sempre para o mesmo lado.. Na Figura 2.115 apresenta-se uma interpretação da Figura 2.114, na qual estão delimitados contatos radargeológicos, classes de rochas e dados estruturais. Observar na Figura 2.115 a presença de feições sigmoidais desenhadas pelas feições lineares positivas, neste caso representativa do traço do acamamento.

2.7.6 - Acamamento e Foliação

O acamamento é uma estrutura planar de origem primária bem evidenciada em rochas sedimentares cuja feição radargráfica é tipificada pela forma em " U " ou "V", cujo mergulho é indicado no sentido de sua abertura (confrontar Figuras 2.61 com 2.64 e 2.62 com 2.65). Vide seção 1.6.1. Os basaltos apresentam também estrutura planar primária (Figura 2.89), podendo

serem confundidos com rochas sedimentares, caso algumas feições não sejam observadas, como por exemplo o sistema de fratura e as pendentes.

A foliação constitui também uma estrutura planar, contudo de origem secundária ligada a ação de processos deformacionais. Representam-se no terreno pela xistosidade, bandamento, foliação de transposição e foliação milonítica, às quais serão denominadas genericamente de foliação, em vista da impossibilidade de discriminá-las na interpretação radargeológica.

A foliação ocorre em terrenos metamórficos, cuja presença em imagem RVL se traduz através das feições lineares positivas e estruturas planares. Ademais, os mesmos princípios colocados para feições planares são válidas para as foliações. Vide item 6.1.

A distinção entre uma estrutura planar primária (acamamento) e uma secundária (foliação) não é uma tarefa fácil em imagem RVL. De qualquer sorte, em terrenos que sofreram metamorfismo de baixo grau o acamamento é preservado através de camadas mais resistentes (níveis guia), que se destacam sob a forma de feições tabulares. Neste caso, a sua relação com outra qualquer estrutura planar tectogênica será facilmente estabelecida. Em terrenos metamórficos de baixo a médio grau metamórfico é comum se identificar vários planos (Figura 2.66), mas se pode apenas estabelecer que o plano s_2 é mais novo que s_1 , no entanto só com controle de campo é que se poderá identificar qual o seu caráter (origem). Em terrenos de alto grau metamórfico a tarefa é bem pior. No entanto, se ocorrer feição tabular tipificada por quartzitos por exemplo, a tarefa de identificação da foliação será facilitada, uma vez que estes litotipos se destacam sob a forma de feição tabular.

A imagem RVL depende muito, como se viu no Capítulo 1, da orientação da linha de vôo e da geometria das formas de relevo que compõem a região imageada. Em vista disso, o

radarintérprete poderá identificar uma série de linhas e planos que poderão confundir-lo. Chama-se bastante atenção para pseudofeições em "V", muito comuns nas encostas de morros, que podem ser interpretadas como plano de foliação, mas que, na verdade, representam colúvios.

Em vista do acima exposto, a regra dos "UVs" explicitada na seção 1.6.1 é perfeitamente válida para a foliação e acamamento, uma vez que se constituem em feições planares.

2.7.7 -Lineamentos

O'LEARY et al. (1976) definem lineamento como uma feição linear, simples ou composta, contínua ou descontínua da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere substancialmente dos padrões de feições que lhe são adjacentes. Deste modo, tal definição se encaixa no campo das feições lineares discutidas no item 2.6.2.

As feições lineares podem ser tanto positivas como negativas e, deste modo, podem envolver tanto juntas como falhas.

A imagem RVL, em vista de sua visada lateral, é muito pródiga na caracterização de lineamentos. devendo-se ter certos cuidados, no entanto, em regiões de relevo forte, como, por exemplo, nas serras do Mar e da Mantiqueira, no sudeste brasileiro, em vista de pseudolineamentos que podem ser provocados pela visada lateral do sensor Radar. De igual forma, o radarintérprete deve atentar para realces de lineamentos provocados em feições paralelas às linhas de vôo, uma vez que nem sempre tais lineamentos constituem a direção preferencial da região estudada.

De outro modo, se o radarintérprete estiver interessado em realçar determinada direção estrutural, por exemplo N35E, à mesma poderá ser observada em imagem RVL, em qualquer sítio da cena que está sendo estudada. Assim sendo, é muito importante se destacar o que o sensor mostra e no que se está interessado em traçar. Daí o porquê a importância dos traços da drenagem, formas de relevo, etc, vistos em itens anteriores.

2.7.8 - Dobras

Para que exista dobramento, necessário se faz que as rochas atinjam o estado plástico, sendo que tal situação só ocorre nos níveis estruturais médio e inferior, embora no Nível Estrutural Superior possam ocorrer amplas dobras (flexões).

Para identificação de dobras em imagens RVL basta que o radarintérprete domine com segurança a identificação de feições planares e seu mergulho, e que não exista o problema de sombras que provoquem o mascaramento ou ambiguidade ,na interpretação de grande parte das feições.

Na Figura 2.116 apresenta-se as partes componentes de uma dobra, destacando-se o mergulho do "eixo", de grande importância da identificação do caráter sinformal ou antiformal, das estruturas dobradas (Figuras 2.117 e 2.118). No caso de antiformal, o eixo mergulha no sentido do fechamento do nariz, o inverso ocorrendo nas estruturas sinformais. Tal critério é de grande importância quando se tem dificuldade em identificar, ou então, estabelecer o sentido do mergulho das feições planares.

Uma técnica bastante utilizada na identificação de dobras é a técnica dos polígonos, que consiste, em essência, na delimitação de feições tabulares, aqui representadas por pequenos polígonos, sob a forma de pequenos retângulos e quadrados, a fim de que seu conjunto caracterizem uma dobra, consoante critérios abaixo, cujo produto está exemplificado na Figura 2.78. Por outro lado, através das feições lineares também é possível interpretar estruturas dobradas, sem, no entanto, precisar seu caráter antiformal e sinformal.

A seguir, apresenta-se os principais critérios utilizados para identificação de estruturas dobradas:

- morfologia sinformal ou antiformal;
- formas de relevo alongadas ou em ziguezague ("Z" ou "S");
- convergência ou divergência de "feições planares";
- terminação periclinal desenhada pelas feições lineares;
- e associação com zonas de cisalhamento de grande amplitude.

As formas em "S" ou em "Z" das dobras, quando observadas no sentido do caimento de seu eixo, poderão ser um bom indicador de seu movimento . Se em "S" sinistral, se em "Z" dextral.

Objetivando ilustrar os principais parâmetros relativos as estruturas dobradas selecionou-se a Figura 2.119, em imagem RVL, como modelo. Ademais, a interpretação relativa a referida ilustração encontra-se retratada na Figura 2.120, com as devidas indicações de contatos, classes de rochas e informações de cunho estrutural. Para as convenções consultar as Tabelas 2.7 e 2.8.

As principais feições morfológicas da Figura 2.119, encontram-se dispostas de forma oblíqua à varredura de radar, o que de certa forma favorece a identificação de feições planares (p)

e lineares (l). Ademais, merece destaque a inversão de feições planares em (pi), a nordeste da Figura 2.119, ressaltando-se sua disposição vertical anterior (pv). Com efeito, tal feição também se repete nas estruturas a oriente e ocidente, porém com menor ressaltamento. Também é marcante a presença do eixo (e) com mergulho para o fechamento do nariz (terminação periclinal), indicativo do carácter antiformal das estruturas em lide. Também pode-se observar as zonas de charneiras dos anticlínios, que devido à erosão apresentam-se desventrados. O limite a sudeste da Figura 2.119 é por falha (f). Pelas feições acima apresentadas interpreta-se tal região como relativa a um sistema de falhas de empurrão, com prováveis componentes direccionais, haja vista a grande incidência de feições planares (acamamento e foliação), associadas a feições lineares positivas compondo desenhos sigmoidais. O componente compressional é interpretado devido ao desenvolvimento de dobras, amiúde de duplo caimento, de orientação NO-SE e vergência para SE. Vale a pena observar a atitude da feição planar ora em posição normal (p), passando a vertical (pv) e invertendo-se em direcção a NE da Figura 2.119 (pi), dando um aspecto "helicoidal" às dobras. Vide Figura 2.120, a qual retrata a interpretação da Figura 2.119.

Ainda dentro do contexto da Figura 2.119, pode-se interpretá-la como sendo:

- dobras em "olho";
- duplexes transcorrentes (transtensionais ou transpressionais);
- lenticularização inerente à zonas de cisalhamento;

Pela interpretação exposta na Figura 2.120 é factível a presença de duplexes transcorrentes transpressionais, em vista de seus contatos geológicos, bem exemplificado na estrutura disposta no canto inferior direito da Figura 2.120.

A Figura 2.121, referente a imagem RVL, da região de Cáceres (MT) procura exemplificar a potencialidades deste sensor na identificação de estruturas dobradas, em metassedimentos (M_1) de baixo grau metamórfico (Figura 2.122). Observa-se primeiramente que a orientação das estruturas é aproximadamente paralela a linha de vôo, provocando, destarte, sombras extensas no canal remoto (CR). De qualquer modo, as feições planares e eixos de dobras estão bem alcandorados, sendo possível a definição de sinformas e antiformas. Por outro lado, o limite entre as dobras é marcado por falhas, também com orientação meridiana. A ocorrência de camadas invertidas e redobramentos, em laço, são dignos de nota. Além desse conjunto metassedimentar, individualizou-se seqüências eluviais (S_1), aluviais (S_2) e coluviais (S_3).

2.7.9 - Redobramentos

O estudo tridimensional de estruturas relativas a superposição de dobras e sua representação no plano, em escala mesoscópica, teve seu início na década de 50, no continente europeu. No entanto, somente na década seguinte RAMSAY (1962) e RAMSAY (1967) apresentam uma análise minudente e classificação dessas estruturas, cognominadas de "Padrões de Interferência". Com efeito, deve-se a WHITTEN (1969) uma abordagem mais profunda da representação de tais modelos em escala regional.

A superposição de dobras é uma feição estrutural que pode ser relacionada a um dos seguintes eventos geológicos (RAMSAY, 1967):

- cruzamento de faixas orogênicas;
- fases de deformação distintas em um único ciclo orogênico;

- dobramentos sucessivos em uma única fase de deformação progressiva;
- e dobramento simultâneo em diferentes direções, em uma única deformação.

Outrossim, os modelos de interferência são identificáveis em qualquer escala, seja ela micro, meso ou megascópica, e parece existir uma correspondência entre as mesmas, ou seja, se determinado modelo de interferência for identificado em escala megascópica, tal fato deve se repetir em outras escalas. Acrescente-se ainda que para nucleação de tais estruturas é necessário que as fases de dobramento tenham aproximadamente a mesma ordem de grandeza.

A classificação desses modelos e suas relações geométricas são adjudicadas à RAMSAY (1967), que identificou três tipos distintos. Para individualização dos mesmos o citado autor utilizou os seguintes parâmetros (Figura 2.123):

- ângulo entre os eixos das duas fases de dobras (α);
- ângulo entre o pólo da superfície axial da primeira dobra e a perpendicular ao eixo da segunda dobra, contida no seu plano (β);

Em resumo, os modelos de interferência têm as seguintes características:

- tipo 1 (Domo e Bacia ou Caixa de Ovos): A direção do fluxo do movimento superposto (a_2) é próxima a direção das superfícies axiais das primeiras dobras ($\alpha > 0$; $\beta < 70^\circ$);
- tipo 2 (Bumerangue ou Cogumelo): a direção de fluxo do movimento superposto (a_2) forma um ângulo grande com a superfície axial das primeiras dobras, e o eixo das primeiras dobras configura um ângulo de valor mediano a grande com a direção de b_2 ($\alpha > 20^\circ$; $\beta > 70^\circ$);
- tipo 3 (Laço ou Coaxial): direção de fluxo do movimento superposto (a_2) forma um ângulo grande com a superfície axial das primeiras dobras, e o eixo das primeiras dobras se aproxima da direção b_2 ($\alpha = 0^\circ$; $\beta < 70^\circ$).

Para interpretação de "Modelos de Interferência" mais uma vez se torna necessário o discernimento de feições lineares e planares. Os principais critérios são:

- encurvamento de feições lineares e planares;
- presença de dois ou mais "sets" de feições lineares;
- interação entre feições lineares e tabulares; e
- conformação em "laços", "bumerangue" ou "circular" das feições tabulares e/ou lineares.

A presença de duas fases de dobras está bem evidenciada nas Figuras 2.6, 2.77 e 2.92 dentre os exemplos até aqui apresentados e nas três ilustrações fica evidente a presença do modelo de interferência tipo 3 (laço).

A região da Chapada dos Veadeiros (GO) constitui um dos exemplos mais clássicos do território brasileiro, no que concerne a identificação de dois eixos de dobras em sensoramento remoto. Vide Figura 2.124 e respectiva interpretação na Figura 2.125.

As rochas envolvidas são metassedimentos de baixo grau de composição preferencialmente psamítica e secundariamente pelítica. A orientação das principais estruturas é paralela a linha de vôo, o que por um lado favorece o ressaltado das feições e por outro imprime extensas sombras. A fim de melhor interpretar as feições estruturais traçou-se inicialmente as feições lineares, planares e tabulares. De posse de tais informes, delineou-se as dobras, salientando a presença de uma fase mais antiga com eixos meridianos e superfície axial mergulhando para oeste, a qual foi posteriormente redobrada, por dobras amplas, com eixos orientados E-O. Observa-se a ocorrência de padrões de interferência tipo 2 (bumerangue ou cogumelo). As

associações litológicas tornaram-se necessárias em virtude da presença de um capeamento detrítico (S_1), em tabuleiros, o qual em alguns sítios não está bem definido (S_1/M_1).

2.7.10 - Sistemas Litoestruturais

Até o presente momento, no Estádio Interpretação, vários parâmetros geológicos foram descritos de forma isolada, havendo a necessidade, no entanto, de uma integração entre os mesmos, a fim de que se possa inter-relacioná-los e integrá-los, visando fornecer uma visão holística, que será de grande valia para a interpretação radargeológica.

Deste modo, introduz-se o conceito de Sistemas Litoestruturais a fim de suprir esta lacuna.

Sistemas Litoestruturais constituem a íntima associação de um ou mais litotipos, condicionados a um determinado regime tectônico. Em outras palavras, seria uma definição de Sistemas Estruturais condicionando aos mesmos uma associação litológica. Os sistemas litoestruturais podem ser classificados em: compressivos, direcionais, distensivos e mistos.

Os sistemas litoestruturais compressivos envolvem movimentos horizontais, cujos limites são denominados de rampas, as quais de acordo com seu posicionamento com relação ao deslocamento principal são cognominadas de frontais, oblíquas e laterais. O primeiro essencialmente horizontal, o segundo combinado, horizontal e direcional, e o último principalmente direcional. O segundo é o tipo de movimento mais comum de ocorrer nos cinturões móveis.

Uma das características dos sistemas compressivos é o desenvolvimento de uma série de fatias ou escamas, que se empilham umas sobre as outras, com a conseqüente inversão estratigráfica, limitadas por zona de cisalhamento. Acontece que tais fatias são, amiúde, de baixo ângulo o que dificulta sobremaneira a identificação das mesmas em imagens RVL, principalmente se a direção de tais escamas for perpendicular a linha de vôo. De qualquer sorte, para ângulos acima de 10 graus ter-se-á como resultado feições semelhantes a mergulhos homoclinais. Além disso, deve-se identificar as estruturas mais características deste sistema: quilha, feição triangular e os duplexes (HASUI & COSTA, 1991).

Os litotípos que geralmente se associam a tais sistemas são da classe das rochas metamórficas, em especial metassedimentos de fraco a baixo e de baixo a médio grau metamórfico, no caso de alto ângulo. Para os sistemas estruturais compressivos de baixo ângulo é comum o aparecimento de rochas catazonais.

Assim sendo os principais critérios para a identificação de sistemas litoestruturais compressivos, em imagem RVL, são (Figuras 2.126 e 2.127):

- grande incidência de feições planares (foliação) nos sistemas compressivos de baixo a médio ângulo;
- grande incidência de feições lineares (lineamento) e planares (foliação) nos sistemas compressivos de alto ângulo;
- convergência e divergência de feições planares (foliação) relativos a quilha e feições triangulares;
- feições planares (foliação) invertidas;
- sigmóides desenhados por feições lineares;

- presença de falhas de empurrão, tipificadas por descontinuidades, associadas a feições planares (foliação, clivagem, acamamento), com mergulho sempre com o mesmo sentido.

A região da serra da Providência (RO) (Figuras 2.126 e 2.127) procura exemplificar o sistema litoestrutural compressivo de alto ângulo, entre rochas metassedimentares de fraco a baixo grau metamórfico, com grande incidência de feições planares e lineares, e uma sequência vulcano-plutônica com deformação rúptil, cujo limite é feito por falha de empurrão de alto ângulo. O embasamento metamórfico (M_1) é tipificado por um terreno arrasado com grande incidência de material eluvial, em vista da textura lisa evidenciada na imagem RVL. Por sua vez, a sequência vulcano-plutônica é tipificada por morros orientados em duas direções, em virtude do intenso fraturamento NE-SO e NO-SE, relevando formas circulares e elípticas. Quando possível, individualizou-se alguns corpos de granitóides (γ). A sequência metassedimentar (S_1) é condicionada por relevo de cristas agudas, ravinadas ou escarpadas, ressaltando perfeitamente as feições lineares e planares. Estas, com orientação meridiana e mergulho para oeste, em alguns casos invertidas. Várias paráclases foram delineadas, sendo a mais marcante àquela disposta no limite entre as sequências metassedimentares e ígneas. Tal falha foi interpretada como deempurrão, em vista da grande incidência de feições planares sempre mergulhando com o mesmo sentido. Ao longo do rio Machado, individualizou-se sedimentos aluviais (S_2). Observa-se também a presença de sigmóides desenhados por feições lineares positivas, feições planares invertidas, eixo de dobras com flanco invertido e falhas direcionais associadas.

Os sistemas litoestruturais direcionais envolvem movimentos horizontais, cujo traçado pode ser linear ou curvo , mergulho comumente vertical e de caráter dextral ou sinistral. As principais feições associadas são (HASUI & COSTA, 1991):

- encurtamento e estiramento de blocos;
- desnivelamento de blocos;
- raro magmatismo;
- - fraco metamorfismo;
- e rejeitos diversamente orientados das dobras e empurrões .

As principais estruturas resultantes são:

- estrutura em flor;
- estrutura em rabo de cavalo;
- duplexes;
- dobras e/ou fraturas " en echelon".

Os sistemas litoestruturais direcionais se associam principalmente com rochas metamórficas de baixo a alto grau, sendo , no entanto, comum também sua associação com rochas ígneas e sedimentares no Nível Estrutural Superior.

Os principais critérios para identificação, em imagem RVL , dos sistemas litoestruturais direcionais são (Figuras 2.128 e 2.129):

- associação de dobras "en echelon" com feições lineares (lineamento);
- feições lineares com terminação em "rabo de cavalo";
- existência de feições lineares anastomosadas (duplexes);
- feições lineares em forma de amêndoas ou romboedros;

- feições lineares e planares tipificando uma " estrutura em flor".

A fim de ilustrar este sistema litoestrutural, selecionou-se a imagem RVL (Figura 2.128) da região da serra do Padre no NO do Estado do Amazonas objetivando evidenciar principalmente a atuação de falhamentos direcionais em rochas sedimentares (S_1), assim como estabelecer suas relações com o seu embasamento (Figura 2.129). Este, está representado a NE por zonas serranas (M_2) e zona arrasada com topo convexo aberto (M_1) e maciços isolados de topo convexo interpretados como granitóides (γ). A seqüência sedimentar (S_1) que se expõe na serra do Padre caracteriza-se por topo agudo, com feições planares (acamamento) bem desenvolvidas e intensamente cortada por falhas direcionais destrais, destacando-se duas em sua porção central de orientação, em torno, de E-O. Sedimentos mais recentes são representados por S_2 , S_3 e S_4 relativos a depósitos eluviais, aluviais e coluviais, respectivamente. Atentar para a presença de duplexes, terminação em rabo de cavalo e feições lineares sigmoidais, na porção central da Figura 2.128, na zona limitada por duas falhas direcionais principais. Observar o caráter rúptil das deformações envolvidas nesta Figura.

Os sistemas litoestruturais distensivos envolvem movimentos verticais, resultando em formas de relevo elevadas e abatidas, limitadas por zonas de cisalhamento normais. As feições mais comuns são falhas de gravidade (sintéticas e antitéticas), dispostas em padrão lítrico ou dominó.

O padrão lítrico é caracterizado pelo volteio ("roll over") cujo forma em superfície é a de uma antiforma (HASUI & COSTA, 1991).

O sistema litoestrutural distensivo ocorre comumente em rochas sedimentares, compondo, muitas vezes, cinturões de grande amplitude.

Os principais critérios , em imagem RVL ,para identificação dos sistemas litoestruturais distensivos são:

- formas de relevo elevadas e abatidas, intimamente associadas;
- quebra de relevo retilínea e grande incidência de feições lineares negativas associadas;
- padrão de drenagem retangular;
- mudança brusca dos padrões texturais;
- e finalmente, os critérios acima descritos, desde que associados a lineamentos de grande extensão.

Bons exemplos desse sistema litoestrutural podem ser observados no âmbito da Sinéclise do Parnaíba, região de Itacajá (TO) , compondo o arco homônimo (LIMA, 1991) ou então nos domínios da Bacia do Recôncavo, bem exemplificado em LIMA et al.,1981, p.140; Fig. 1.51, em imagem RVL.

2.7.11 -Interpretação Radargeológica

Neste ítem, pretende-se concluir a Metodologia Sistemática de Elementos Radargráficos através da apresentação da Figura 2.130 , concernente a imagem RVL da Figura 2.12, cognominada de Área Modelo, a qual foi pesquisada nos estádios Leitura, Reconhecimento, Identificação e Análise, cujos resultados foram apresentados sob a forma de Figuras, enfocando os parâmetros relativos a feições antrópicas (Figura 2.13), textura/tom radargráficos (Figura 2.16), formas de relevo (Figura 2.25), padrões de drenagem (Figura 2.49) e feições lineares,

planares e tabulares (Figura 2.85). Por conseguinte, a interpretação apresentada na Figura 2.130 constitui o fecho da metodologia aqui apresentada.

Na Figura 2.130 pode-se observar a presença de três grandes compartimentos, os quais apresentam feições bem características. O primeiro, ao norte, relativo a sequência sedimentar (S_1), o segundo representado na porção mediana da mesma por metamorfitos (M_1) e o terceiro, a sul, tipificado por rochas ígneas (I_1).

O embasamento é composto por metamorfitos (M_1), os quais dispõem-se cerca de E-O, paralelos à linha de vôo, com visada para sul, cujas feições planares (foliação) evidenciam orientação **ca** E-O, com sentido de mergulho para sul. Morros orientados com topo agudo e pendentes ravinadas, cuja estruturação é ratificada pela presença de cristas assimétricas de grande extensão, são as formas de relevo que sustentam os metamorfitos. Consoante informações de campo, afloram nessa região gnaisses (gn), xistos (xi) e quartzitos (q), todos de origem sedimentar. Aos gnaisses e xistos associados é possível visualizar na imagem RVL uma grande incidência de feições lineares, como também planares, com seus "V's" característicos. Os quartzitos (q) assomam sob a forma de cristas assimétricas.

Para sul, nos domínios das rochas ígneas (I_1), ocorrem granitóides caracterizados por morros de topo convexo e pendentes escarpadas ou inclinadas, sem uma orientação preferencial, ou então fracamente orientados. Neste domínio é bem marcante a grande incidência de fraturas, sob a forma de feições lineares negativas, assim como a ausência de feições lineares positivas, a exceção da porção sul da Figura 2.130, onde se observa certa orientação.

O conjunto sedimentar (S_1) constitui-se por elúvios formados "in situ", relativos a níveis de aplanamento que afetaram a região. Neste domínio assomam tabuleiros de topo plano com

leve caimento para norte, como também se observa a influência dos domínios M_1 e I_1 sob os mesmo, em virtude da pequena possança de seus sedimentos, através dos padrões de drenagem. Em vista disso, foi possível delinear a extensão das sequências metamórficas e do complexo ígneo sob a cobertura, através de contato encoberto, baseado na drenagem e formas das pendentes. Ademais, a unidade S_1 tem extensão para sul, apresentando-se sob a forma de tabuleiros sobre as unidades M_1 e I_1 , compondo uma flagrante discordância erosiva.

Tal região pode ser enquadrada dentro do sistema litoestrutural compressivo de alto ângulo com componentes direcionais, o qual afetou o domínio M_1 , sendo tipificado por estruturas lineares e planares relativas ao Nível Estrutural Inferior. Pela disposição das feições planares, mergulhando sempre para sul, com possível fechamento (terminação periclinal) a oeste, admite-se a presença de um eixo de dobra invertida E-O. De igual modo, pela anastomose das feições lineares interpreta-se a presença de falhas com orientação E-O, de caráter inverso (empurrão), com rejeito direcional, com transporte para norte. Posteriormente, a região sofreu a ação de regime distensivo com o "emplacement" de um batólito de composição granítica (I_1), bem caracterizado pela tectônica rúptil sob a forma de fraturas. Finalmente, o conjunto foi alvo de processos de aplanamento com o desenvolvimento de coberturas detríticas (S_1), encontrando-se, atualmente, em franco processo de dissecação.

2.7.12 - Considerações Finais

A metodologia aqui exposta e discutida, é exclusiva para sensores da faixa das microondas, podendo, deste modo, ser estendida para as bandas K (Westinghouse), L (SIR), C

(RADARSAT, ERS-1 e outros) e S (ALMAZ). Neste caso, o radarintérprete deve atentar, principalmente, para o comprimento de onda e ângulos de depressão do sistema a ser utilizado.

Torna-se importante para o radarintérprete ter o máximo de acuidade na extração das informações da imagem, nos diferentes estádios, uma vez que tal procedimento lhe fornecerá mais segurança na sua interpretação final.

A imagem RVL apresenta restrições para relevos fortes, em vista da grande incidência de sombras, encurtamento de pendentes, etc, no entanto, com a estereoscopia tais restrições serão minimizadas.

A utilização de diferentes comprimentos de onda associado a distintos ângulos de depressão possibilitarão uma melhor discriminação de tipos litológicos.

Pode-se dizer que a metodologia "Sistemática de Elementos Radargráficos" é plenamente exeqüível, uma vez que a mesma procura de forma sistemática, analisando diversos elementos de imagem (feições), a extração de dados da imagem RVL. Tais informações se resumem na textura e tom radargráficos, os quais associados a um estudo acurado das formas de relevo e drenagens, possibilitarão a identificação de feições planares, lineares e tabulares. Este conjunto de procedimentos propiciará ao radarintérprete subsídios na elaboração de seu mapa radargeológico.

Ademais, a interpretação radargeológica obtida na Figura 2.130, fruto do Método Sistemática de Elementos Radargráficos, referente a Área Modelo, região de Pedra Azul (MG/BA), só foi possível graças ao procedimento sistemático adotado, uma vez que se analisaram inicialmente diversos elementos radargráficos, no intuito de extrair informes das imagens RVL, de forma sistemática, através dos diferentes estádios (etapas).

No que tange a extração de informações, cuidados especiais são endereçados a caracterização de topo e pendente das formas de relevo, como também na delineação de feições lineares, planares e tabulares. Tais dados poderão ser decisivos no Estádio Interpretação.

3 - EXEMPLO PRÁTICO: SINÉCLISE DO PARNAÍBA E SEU EMBASAMENTO

3.1 - INTRODUÇÃO

A região escolhida para exemplificar a metodologia **Sistemática de Elementos Radargráficos**, exhaustivamente abordada no capítulo anterior, engloba a Sinéclise do Parnaíba e seu embasamento, a qual abarca o Estado do Piauí, grande parte do Estado do Maranhão, e parcelas dos estados do Pará, Tocantins, Ceará e Bahia, perfazendo uma área aproximada de 925 000 km² (Figura 3.1), que corresponde a cerca de 11% do território brasileiro, 175% da França e 266% da Alemanha. Encerra 52 folhas, na escala 1:250 000, com as seguintes notações, de acordo com o Corte Cartográfico Internacional:

- SA.22-Z-B/Z-D ;
- SA.23-Y-A/Y-B/Y-C/Y-D/Z-A-Z-B/Z-C/Z-D ;
- SA.24-Y-A/Y-C;
- SB.22-X-B/X-D/Z-B/Z-D;
- SB.23-V-A/V-B/V-C/V-D/X-A/X-B/X-C/X-D/Y-A/Y-B/Y-C/Y-D/Z-A/Z-B/Z-C/Z-D;
- SB.24-V-A/V-C/Y-A/Y-C;
- SC.22-X-B/X-D/Z-B;
- SC.23-V-A/V-B/V-C/V-D/X-A/X-B/X-C/X-D/Y-A/Y-B/Y-C/Z-A;
- SC.24-V-A;
- SC.22-X-B/X-D/Z-B.

Grande parte da área envolvida pela Sinéclise do Parnaíba e seu embasamento é coberta pela classe de formação florestal Estepe (Caatinga), a qual dispõe-se essencialmente em sua

porção oriental, tendo como limite o meridiano que passa em Teresina, capital do Estado do Piauí. A partir daí, distribui-se para ocidente a classe de formação florestal Savana (Cerrado/Cerradão), dando lugar na região do rio Araguaia para a Floresta Ombrófila. Da região do rio Araguaia para norte domina a Floresta Ombrófila Densa, até a região do rio Gurupi; ao passo que para sudoeste (Estado do Tocantins) ocorre a Floresta Ombrófila Aberta. A zona costeira é dominada por um tipo particular de formação florestal que é chamada de Formações Pioneiras. Obviamente, que entre as classes de formação florestais acima citadas, existem as zonas de transição entre elas, constituindo as chamadas zonas de tensão ecológica.

A escolha de tal região respalda-se nas seguintes justificativas:

- compõe uma região cujas formas de relevo favorecem a utilização de imagens RVL (vide Figura 3.1), porquanto de sombras pouco extensas e pequenas distorções provocadas pelo encurtamento de Radar, além da ausência de "layover" ou pseudo "layover";
- ambiência geológica favorável, haja vista os contrastes estrutural e estratigráfico demonstrados por um embasamento expresso por cinturões de cisalhamento pré-cambrianos e uma bacia sedimentar paleozóica não invertida;
- carência de estudos integrados, utilizando principalmente sensoriamento remoto e complementado por métodos geofísicos e informações do terreno;
- ausência de uma linha metodológica específica (Sistemática de Elementos Radargráficos) de interpretação radargeológica para bacias sedimentares e seu embasamento, com ênfase na delimitação de morfoestruturas e suas inter-relações;

- boa distribuição da rede viária em toda a sinéclise e em seu embasamento, dando como consequência uma grande profusão de afloramentos, compondo didáticas exposições rochosas, o que facilita sobremodo as checagens no terreno;

- e pelo conhecimento prévio da relação terreno/imagem da região enfocada, em vista de experiências anteriores em trabalhos de campo e escritório desenvolvidos pelo autor .

Os principais objetivos que nortearam este estudo são:

- estabelecer uma sistematização na aplicação das técnicas utilizadas na interpretação geológica em imagens de Radar de Visada Lateral - radargeologia - em bacias sedimentares não invertidas e de grande dimensões, enfocando seus aspectos estruturais e litológicos, assim como a relação com o seu embasamento;

- e delimitar unidades radargeológicas no contexto da Sinéclise do Parnaíba e de seu embasamento, a fim de melhor facilitar seus estudos em futuros trabalhos de campo, na definição de possíveis unidades litoestratigráficas.

As atividades realizadas no presente estudo podem ser divididas em três etapas: escritório, laboratório e campo.

As atividades de escritório envolveram essencialmente a pesquisa da bibliografia pertinentes à Sinéclise do Parnaíba e de seu embasamento, em especial àquelas envolvendo mapeamento utilizando sensoriamento remoto, ou então trabalhos de integração de dados geológicos. Tal estudo envolveu a confecção de fichas, nas quais se procurou sintetizar as principais informações de cunho geológico, dando-se destaque para os dados factuais.

Dentro dessa filosofia utilizou-se as informações do terreno coletadas e apresentadas por LIMA & LEITE (1978), como também os dados de integração realizada por CUNHA et al.(1979) em

15 folhas na escala 1:250 000, fundamentada em trabalhos de campo realizados pela Petrobrás na sinéclise. De igual modo, adaptou-se à interpretação radargeológica, informações de CUNHA et al. (1981) e MONTES et al. (no prelo), de seus mapas geológicos, envolvendo as porções sul e sudoeste da região trabalhada. Em que pese o uso de informações do terreno, com base na literatura geológica, e aquelas obtidas pelo autor nos trabalhos de campo, procurou-se, sempre que possível, estabelecer um paralelo entre a relação imagem/terreno, e com isso auferindo-se adjutórios para regiões sem controle de campo.

Os trabalhos de laboratório enfeixaram a interpretação geológica de 52 mosaicos de Radar de Visada Lateral (RVL), da Good Year Eletronic Mapping Sistem (GEMS), banda X, escala 1:250 000, abarcando uma área de **ca** 925 000 km², com dois periodos de recobrimento: 1971-1972 e 1975-1976.

Para a radarinterpretação de uma região tão extensa e com cacacterísticas especiais procedeu-se a seguinte sistemática:

- as radarinterpretações foram realizadas em folhas , na escala 1:250 000, segundo o Corte Cartográfico Internacional, e posteriormente reduzidas para a escala ao milionésimo;
- contudo, as integrações foram efetuadas por bloco, cada um patenteando uma província geológica. Deste modo, individualizaram-se oito blocos representativos do embasamento e um de cobertura (sinéclise). Obviamente, que este último ,por ser mais extenso, foi subdividido em quatro blocos menores: a Oeste, a Leste, a Nor-Noroeste e a Sul, de acordo com sua ambiência estrutural e/ou estratigráfica, fato que abordar-se-á com mais profundidade adiante;
- interpretou-se no âmbito da sinéclise, conjuntos de cinco folhas (1:250 000), concomitantemente, sendo uma no centro e quatro radiais, dispendendo-se três dias por folha (15

horas), com o devido revezamento entre elas, até concluir a interpretação do conjunto. Não obstante as folhas (1:250 000) trazerem muita informação, é sempre importante interpretar as que lhe são vizinhas, para melhor integrá-las;

- só procedeu-se interpretação em mosaicos ao milionésimo, após a interpretação dos mosaicos 1:250 000, que lhes compõem, por motivos já explicitados no parágrafo anterior.

A base planimétrica para lançamento das interpretações geológicas fundamentou-se nas cartas ao milionésimo, da série Levantamentos de Recursos Naturais do Projeto RADAM (RADAMBRASIL) de números 1, 2, 3, 4, 5, 21, 22, 23 e 30, em vista das mesmas terem sido extraídas de imagens RVL, evitando deste modo grandes distorções provocadas pelas reduções de 1:250 000 até 1:1 000 000. Por sua vez, a base geográfica foi organizada pelo Departamento de Cartografia (DECAR) do IBGE para o citado projeto.

Os trabalhos de campo foram realizados nas regiões de:

- Picos - Floriano - Teresina no Estado do Piauí, como parte integrante da excursão de campo na Bacia do Parnaíba, realizado pela Petrobrás, no período de 12 a 24 de agosto de 1991, sob a orientação dos geólogos José Carlos Della Favera e Maria das Graças Feitosa da Costa ;

- Sobral-Camocim no Estado do Ceará, no período de 13 a 24 de Outubro de 1991, como trabalho de campo da cadeira Análise Geométrica-Estrutural, sob a orientação do Prof. Dr. Francisco de Assis Matos de Abreu, nos domínios do Cinturão de Cisalhamento do Noroeste do Ceará;

- Santa Inês - Pinheiro no Estado do Maranhão como parte prática da cadeira Sistemas Depositionais do Curso de Pós-Graduação da UFPA, no período de 16 a 21 de novembro de 1991, sob a orientação dos professores Werner Truckenbrodt e Maamar El Robrini;

- Campo Maior - Barras - Luiziana - Teresina no Estado do Piauí sob a orientação da professora da UFPa, Ana Maria Góes, e do prof. da USP, Armando Márcio Coimbra, no período de 11 a 28 de agosto de 1992;

- e Santa Inês - Imperatriz no Estado do Maranhão e Pedro Afonso no Estado do Tocantins, no período de 21 a 30 de novembro de 1992, sob a orientação do prof. João Batista Sena Costa, como excursão de campo da cadeira Sistemas Depositionais do Curso de Pós-Graduação da UFPa, ministrada pelos professores Werner Truckenbrodt e Ana Maria Góes.

Aos trabalhos de campo acima citados deve-se acrescentar as informações obtidas pelo autor quando de sua participação no Projeto Macrozoneamento Geoambiental da Bacia do Rio Parnaíba, no decurso do ano de 1989 e experiências adquiridas na década de 70, quando da implantação do então Projeto RADAM.

Na interpretação radargeológica utilizou-se o Método Sistemática de Elementos Radargráficos percorrido com minudência no Capítulo 2 desta obra, em 52 mosaicos de imagem RVL, tendo como meta a elaboração do Mapa Radargeológico da Sinéclise do Parnaíba e de seu Embasamento, o qual é apresentado, anexo, na escala ao milionésimo. Neste mapa são colocados em evidência:

- unidades radargeológicas;
- principais traços estruturais e morfoestruturas;
- e ocorrências minerais, garimpos, minas e jazidas.

Deve-se ressaltar que a plotação de ocorrências minerais, garimpos, minas e jazidas no Mapa Radargeológico, fundamentado na literatura, tem como objetivo melhor ilustrá-lo e

estabelecer uma correlação entre as unidades radargeológicas. Ressalte-se, portanto, que tais informações não foram obtidas com base em radarinterpretação.

A pesquisa bibliográfica priorizou os dados obtidos em trabalhos de campo, buscando-se sempre que possível a utilização de mapas de caminhamento, a fim de separar os fatos reais dos interpretados ou inferidos. Esta filosofia foi aplicada principalmente nos trabalhos realizados pela PETROBRÁS, Projeto RADAM e CPRM. Aliás, foram de grande valia os mapas integrados realizados por CUNHA et al. (1979) em 15 folhas do Corte Cartográfico Internacional, 1:250 000 da sinéclise, como também os mapas de caminhamento apresentados por LIMA & LEITE (1978).

Nas atividades de laboratório serviram de base para elaboração do mapa radargeológico da Sinéclise do Parnaíba os trabalhos desenvolvidos por LIMA & LEITE (1978), secundados por CUNHA et al. (1979) e MONTES et al. (no prelo). O primeiro concernente a sinéclise como um todo, o segundo ao quadrante SE, enquanto que o terceiro a porção referente a Folha SC.23 - Rio São Francisco.

Como resultado dessas pesquisas elaboraram-se quatro publicações. A primeira abordou as morfoestruturas anômalas na porção centro-oriental da sinéclise (LIMA et al., 1990); a segunda envolveu a análise morfoestrutural de seu quadrante meridional (LIMA, 1991), a terceira relativa a interpretação geométrico-cinemática de toda a sinéclise, envolvendo produtos de sensores remotos (LIMA, 1992a), e mais recentemente na integração geológico-geofísica de seu embasamento (LIMA, 1993).

Para o embasamento, foram fundamentais na elaboração da interpretação radargeológica os trabalhos de NASCIMENTO et al. (1981), GOMES et al. (1981), GAVA et al. (1983), ABREU & LESQUER (1985), ABREU et al. (1988) e HASUI & COSTA (1991).

3.2- PROVÍNCIAS GEOLÓGICAS

3.2.1 - Introdução

Apresenta-se na Figura 3.2 um esboço tectono-estrutural do Nordeste Ocidental brasileiro, a fim de melhor situar o leitor espacial e temporalmente, com respeito a área alvo desta pesquisa: Sinéclise do Parnaíba e seu Embasamento. Objetivando melhor descrevê-la, optou-se por dividi-la em províncias geológicas, no sentido de GARY et al. (1972), que assim se expressam : " An extensive region of which are characterized by similar geologic history or by structural, petrographic or physiographic features."

Utiliza-se o termo sinéclise, no sentido de Pavlov apud BELOUSSOV, 1971, como formas estruturais de suave concavidade, forma circular ou oval irregular, fundo chato e fraco mergulho de seus estratos, cujo paradigma é a Sinéclise de Moscou. Por sua vez, cinturão de cisalhamento constitui a coalescência de zonas de cisalhamento (movimento de blocos) isolando zonas deformadas, pouco deformadas a indeformadas, ao longo de faixas alongadas (HASUI & COSTA, 1991).

Assim sendo, a região estudada foi dividida em duas províncias geológicas. A primeira , retratada pela Sinéclise do Parnaíba, de grande expressão na área estudada, com cerca de 600 000 km² , enquanto que a outra seria tipificada pelo embasamento da Sinéclise do Parnaíba, constituindo , em verdade, cinturões de cisalhamento, alguns já descritos na literatura, inclusive com história geológica distinta, mas que sob o ponto de vista radargeológico será considerado como parte de uma única província. Envolve uma área em torno de 325 000 km² . Para efeito de

descrição, o embasamento será codinominado de acordo com seu posicionamento geográfico em relação a sinéclise, como seja: norte, nordeste, és-nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste e oeste (Figura 3.3).

Dentre as províncias geológicas aqui definidas, àquela do embasamento retrata sistemas litoestruturais compressionais e direcionais, superimpostos por regime distensivo . Por sua vez, a Sinéclise do Parnaíba envolveu essencialmente sistemas litoestruturais distensivos e/ou direcionais.

Na imagem RVL é bem marcante a distinção entre tais províncias, seja através de elementos texturais, seja por elementos de drenagem, ou os de relevo. Assim sendo, a Sinéclise do Parnaíba é tipificada por extensos tabuleiros com textura lisa e pendentes verticais, limitados por zonas dissecadas, em grau variável, de topo geralmente agudo e pendentes ravinadas a inclinadas. O padrão de drenagem varia de dendrítico a retangular e eventualmente anelar. As feições planares são bem comuns, amiúde, de baixo ângulo, caracterizando “cuestas” na zona lideira com seu embasamento. Para o interior da sinéclise dominam os tabuleiros horizontais, praticamente sem caimento. Feições lineares negativas e tabulares tem pouca expressão no contexto desta província. Compõe-se principalmente por sedimentos e secundariamente por vulcânicas e plutônicas básicas.

No embasamento é perfeitamente manifesto que as feições radargráficas são totalmente distintas daquelas da sinéclise, tipificando-se principalmente por feições lineares (positivas e negativas) e tabulares e secundariamente planares, cuja disposição espacial empresta a imagem RVL a noção de orientação, típica de rochas metamórficas, em especial metassedimentos. Nestes, o topo é agudo, inclusive formando extensas cristas. Assomam também corpos ígneos de topo

convexo e vertentes inclinadas . A textura geralmente é média e os padrões de drenagem mais comuns são paralelo, retangular e treliça. A presença de sedimentos mais recentes está ligada a textura lisa , com tom cinza claro , localizando-se essencialmente em terrenos planos, capeando os terrenos mais antigos.

3.2.2 - Embasamento

3.2.2.1 - Norte

Localiza-se ao norte da sinéclise, região do médio rio Gurupi, no limite Pará/Maranhão e nas adjacências da cidade de Rosário (MA), sul da cidade de São Luís, capital do Estado do Maranhão.

A região do médio Gurupi é tipificada por um embasamento metamórfico composto por morros de topo agudo com orientação NNO-SSE, cujos caracteres radargráficos se expressam por feições lineares positivas, havendo feições tabulares dispostas concordantemente, relacionadas provavelmente a zona de silicificação. Tais feições são bem mais evidentes nas imagens RVL, na porção ocidental do que na oriental. A continuidade física desse sistema de relevo é quebrada por morros de topo convexo, indicativos de origem ígnea. Ocorrem , ainda, morros de topo agudo com grande incidência de feições planares relativos a sedimentos deformados , assim como morros de topo plano vinculados a sedimentos não deformados.

Pela grande incidência de feições lineares positivas e negativas em padrões anastomosados, sob a forma de sigmóides , ou então dispostos “ en echelon”, interpreta-se tal

região como correspondente a um cinturão de cisalhamento, na qual são marcantes as zonas de cisalhamento, em especial realçadas por feições lineares positivas dispostas de forma concentrada.

Por outro lado, na região de Rosário (MA), assomam essencialmente morros de topo convexo, contudo guardando uma orientação geral NE-SO, representativos de granitóides

3.2.2.2 - Nordeste

Localiza-se a nordeste da sinéclise, ocupando o quadrante noroeste do Estado do Ceará, tendo como limite o Lineamento Sobral-Pedro II, onde se instalou o Graben de Jaibaras (NASCIMENTO et al., 1981).

As unidades mais antigas sustentam um relevo plano pontilhado por “inselbergs”. No terreno plano se observa na imagem RVL algumas feições lineares positivas e negativas, guardando uma orientação NE-SO a ENE-OSO, sugerindo a presença de rochas metamórficas. Por sua vez, os “inselbergs” estão eivados por cristas de topo agudo, simétricas a assimétricas, constituindo feições planares convergentes e divergentes, como também feições lineares e tabulares, desenhando estruturas sigmoidais, indicativos de metassedimentos.

A tais características se associam marcantes descontinuidades, sob a forma de zonas de cisalhamento, emprestando a imagem RVL um aspecto orientado típico de cinturão de cisalhamento.

O “trend” regional é interrompido por morros de topo agudo a convexo típicos de rochas ígneas , como também de topo plano relativo a sedimentos, e feições tabulares (diques) seguramente mais jovens que os metamorfitos que compõem o cinturão.

Outro aspecto morfológico importante nesta área é a presença de feições lineares negativas que limitam texturas radargráficas díspares, citado na literatura como estrutura grábenforme (Graben de Jaibaras) (ABREU et al., 1988) ,onde afloram sedimentos e vulcânicas.

Encobrendo discordantemente todo o conjunto até aqui descrito ocorrem zonas com textura lisa e tom cinza claro , relativos a sedimentos mais recentes (pedimentos).

3.2.2.3 - És -Nordeste

Localiza-se na porção ENE da sinéclise, dispondo-se entre os lineamentos Sobral-Pedro II e Paraíba (GOMES et al., 1981).

Neste quadrante o embasamento representa-se por terreno arrasado, sem grande incidência de feições lineares, próprio de rochas metamórficas, face a presença de cobertura recente capeando-o, tipificado na imagem RVL por uma textura lisa. Contudo, em seus domínios, foi possível individualizar nas zonas serranas morros com topo agudo, expondo feições lineares e planares, denominados informalmente de gnaisses. Tal unidade se estende até o Graben do Cococi (GOMES et al., 1981), com orientação E-O, e a alguns quilômetros a sul deste, assomam formas de relevo bem orientadas, com marcante incidência de feições lineares positivas, inclusive exibindo uma mega estrutura sigmoidal nas cercanias de Pio IX (CE), própria de zona de cisalhamento.

Imediatamente ao norte do Graben do Cococi , assomam alinhamentos sérreos com orientação meridiana, onde se observa feições planares bem marcantes, próprias de metassedimentos, cuja geometria sugere uma disposição discordante em relação aos terrenos mais antigos.

O Graben do Cococi está muito bem delineado na imagem RVL, em vista da quebra de relevo abrupta sob a forma de feições lineares positivas. Ao norte expõem-se morros de topo convexo e pendentes inclinadas típicas de rochas ígneas, arranjadas discordantemente sobre o embasamento metamórfico.

3.2.2.4 - Leste

Localiza-se na porção a leste da sinéclise, dispondo-se entre dois importantes lineamentos: a sul , o Pernambuco; ao norte, o Paraíba (GOMES et al., 1981).

Constitui-se essencialmentepor feições lineares positivas e negativas orientadas segundo ENE-OSO e ONO-ESE, até cerca de E-O, as quais se anastomosam, compondo estruturas rombóides a sigmoidais, típicas de cinturão de cisalhamento. Zonas de cisalhamento - feições lineares negativas, associadas a feições lineares positivas - são muito comuns nestaporção do embasamento, indicativas de litotipos essencialmente metamórficos. Ademais, em alguns trechos menos deformados, é factível observar a presença de morros convexos abertos a fechados e pendentes inclinadas indicativas de granitóides, sugerindo tratar-se do protólito desses metamorfitos.

As feições lineares e planares que definem este cinturão são encobertas por litotipos de topo ora plano e ora convexo. No primeiro caso, devem se tratar de sedimentos, algo afetados por feições lineares negativas (fraturas) e expondo feições planares. Tal associação litológica é denominado na literatura de Bacia do Araripe (GOMES et al., 1981) e parece constituir uma bacia de afastamento, conforme admitido por LIMA (1991). As formas de topo convexo, por sua vez, devem constituir corpos ígneos discordantes.

3.2.2.5 - Sudeste

Localiza-se no embasamento disposto a SE da sinéclise, entre o Lineamento Pernambuco e as estruturas dobradas da serra dos Três Irmãos, na porção leste do Estado de Pernambuco (GAVA et al., 1983).

O embasamento área tipifica-se por um terreno arrasado em grande parte com textura lisa, em vista da coberturas de sedimentos recentes, embora nos vales seja possível visualizar feições lineares indicativas da origem metamórfica. Por sua vez, formas serranas com grande incidência de feições lineares, planares e tabulares típicas de metassedimentos jazem nesta porção do embasamento, sendo marcados por formas de relevo distintas na imagem RVL, uma de composição psamítica e outra principalmente pelítica.

Tais metassedimentos compõem um importante cinturão de cisalhamento, onde há grande incidência de zonas de cisalhamento e desenvolvimento de estruturas romboédricas e sigmoidais desenhadas pelas feições lineares e planares, com orientação principalmente E-O, paralela ao Lineamento Pernambuco.

Estruturas circulares e restos de sedimentos da Bacia do Araripe, sob a forma de pequenos tabuleiros, dispõem-se discordantemente sobre o cinturão de cisalhamento.

3.2.2.6 - Sul

Corresponde ao embasamento posicionado a sul da sinéclise, envolvendo o sul do Estado do Piauí e norte do Estado da Bahia. Dispõe-se entre a serra dos Três Irmãos e a Chapada das Mangabeiras.

Sua unidade basal, à semelhança do que ocorre em outros segmentos do embasamento, retrata-se por terrenos arrasados, no qual grande parte das estruturas estão mascarada na imagem RVL por sedimentos recentes (pedimentos).

Pela análise das feições lineares, planares e tabulares na imagem RVL, foi possível identificar três conjuntos de metassedimentos, com orientações estruturais distintas. O primeiro, orientado segundo E-O, exhibe morros com topo agudo e vertentes ravinadas; o segundo disposto consoante NE-SO, com cristas assimétricas de topo agudo e vertentes inclinada a ravinada. O terceiro trunca o segundo e tipifica-se por cristas orientadas segundo N-S, com feições planares bem características. Tanto o segundo como o terceiro conjunto parecem retratar cinturões de cisalhamento uma vez que são comuns o aparecimento de zonas de cisalhamento (descontinuidades) e feições lineares e planares compondo estruturas sigmoidais. Na interseção dos mesmos, assomam dobras, as quais são sugestivas de modelo de interferência tipo Laço.

Estruturas circulares (corpos ígneos) e restos de sedimentos da sinéclise, sob a forma de tabuleiros de topo plano sem caimento, dispõem-se discordantemente sobre os metassedimentos desta porção do embasamento.

3.2.2.7 - Sudoeste

Representa o embasamento situado a SO da sinéclise, dispondo-se entre a Chapada das Mangabeiras e o Lineamento Transbrasiliano, norte do Estado de Goiás (CUNHA et al., 1981).

A unidade basal constitui-se por terrenos planos e zonas serranas. No primeiro, tem-se grande incidência de cobertura sedimentar (pedimentos), o que lhe empresta uma textura lisa a muito fina nas imagens RVL e que, de certo modo, impede a delineação de feições lineares, próprias de terrenos metamórficos. Contudo, na zona serrana foi possível destacar granitóides e gnaisses. Onde os primeiros estão representados por morros de topo convexo, com pendentes inclinadas e com muitas feições lineares negativas. Por sua vez, os gnaisses também localizam-se em morros orientados, com grande incidência de feições lineares, tanto negativas como positivas.

Provavelmente discordantes sobre o embasamento, compondo formas de relevo de topo plano a convexo aberto, assomam rochas ígneas máfico-ultramáficas.

Dentro desta porção do embasamento, ainda foi possível individualizar duas associações de metassedimentos. A mais antiga mostra-se bem deformada e com grande incidência de cristas (quartzitos), a outra mostra zonas menos deformadas, sendo possível identificar feições planares, tanto primárias como secundárias, em vista da relação espacial entre as mesmas. Pelas características evidenciadas na imagem RVL, admite-se que este último conjunto compõe um

significativo cinturão de cisalhamento, com zonas de cisalhamento direcionais de orientação NO-SE.

A leste desta fração do embasamento, na base da Chapada das Mangabeiras ocorrem sedimentos , em alguns pontos deformados, exibindo marcantes feições lineares, em especial nas zonas de falhas, que segundo a literatura possuem composição carbonática (MONTES et al., no prelo).

3.2.2.8 - Oeste

Constitui o embasamento posicionado a oeste da sinéclise, situando-se entre o Lineamento Transbrasiliano ,a sul, e a norte é encoberto por sedimentos da sinéclise. Expõe-se ao norte do Estado de Goiás , leste do Estado do Tocantins e sudoeste do Estado do Pará.

A unidade basal tipifica-se por terrenos pediplanados e zonas serranas, à semelhança do que já foi descrito em outrasporções do embasamento que perlongam a sinéclise. Contudo, as feições serranas representam-se por granulitos, conforme dados da literatura apresentados por (CUNHA et al., 1981).

Disposto de modo discordante sobre esta unidade basal assomam metassedimentos tipificados por cristas e morros de topo agudo, em relevo médio a fraco, emprestando uma fraca orientação nas imagens RVL, em vista da presença de feições lineares positivas espaçadas.. Tal conjunto foi individualizado de outro, sustentado por formas de relevo médio a forte ,na imagem RVL, e que devido à grande incidência de feições lineares positivas foi interpretado como gnaisses.

Tal associação litoestrutural parece representar um cinturão de cisalhamento em vista da disposição espacial de suas feições lineares, positivas e negativas, as quais denotam uma orientação preferencial segundo N-S.

Corpos ígneos discordantes cortam os litotipos do cinturão, alguns dos quais evidenciam topo plano (lateritos), provavelmente relacionados a corpos máfico-ultramáficos.

Sedimentos sob a forma de tabuleiros com topo plano assomam em estruturas grábenformes, os quais constituem restos da sinéclise sobre o cinturão.

3.2.3.- Sinéclise do Parnaíba

A Sinéclise do Parnaíba, *stricto sensu*, é uma bacia intercratônica disposta na Plataforma Sul-Americana, desenvolvida essencialmente sobre crosta continental e preenchida por rochas sedimentares, e vulcânicas e plutônicas básicas, cujas idades variam entre o Ordoviciano e o Cretáceo, com uma espessura em torno de 3 000 m (GÓES et al., 1990). Abrange uma área de cerca 600 000 km², distribuída principalmente em território brasileiro, com apenas uma fração no continente africano -bacias Sekondi e Takoradi- conforme interpretação de CUNHA (1986).

Utiliza-se aqui a denominação Parnaíba em virtude de ser o termo com referência mais antiga, haja vista a citação de DERBY (1884, p. 52): " Pôr outro lado pôde-se suppor que os stratos de idade secundaria das bacias do Parnahyba e do S. Francisco se estendem pela divisora de aguas do Tocantins e formam parte do chapadão amazonico ." . Outros termos têm sido usados com uma certa freqüência, em especial, Maranhão (CAMPBELL et al. ,1949), ou então Maranhão-Piauí e

Meio-Norte, conforme trabalhos publicados pela PETROBRÁS. Atualmente esta instituição usa o termo Parnaíba, que de qualquer sorte está consagrado na literatura geológica brasileira.

Com efeito, grande parte da Sinéclise do Parnaíba situa-se no seio da bacia hidrográfica homônima, a qual mostra perfeitamente sua disposição assimétrica, uma vez que os afluentes da margem direita são muito mais extensos do que aqueles da margem esquerda. Tal dissemetria se manifesta nos flancos da sinéclise, uma vez que os do lado oriental são mais suaves do que os do lado ocidental.

Por sua vez, adotar-se-á o vocábulo sinéclise em substituição a bacia intracratônica, o qual já foi utilizado por NUNES et al. (1973a; 1973b; 1973c) e NASCIMENTO et al. (1981). Com efeito, FORTES (1978) utiliza o termo anfíclise ao invés de sinéclise, no que se discorda em vista do papel pouco significativo dos produtos vulcânicos e subvulcânicos no preenchimento da mesma, aliado ao fato da complexa história tectônica de seu embasamento pré-cambriano.

A Sinéclise do Parnaíba ocupa a porção Nordeste Ocidental do território brasileiro, abarcando praticamente todo o Estado do Piauí, grande parte do Maranhão, e parcelas dos estados do Pará, Tocantins, Bahia e Ceará. Possui uma forma aproximadamente elíptica, cujo eixo maior dispõe-se segundo NE-SO e o menor orienta-se para NO-SE; cujos focos dessa elipse localizam-se nas cidades piauienses de Floriano e Santa Filomena, respectivamente. O primeiro eixo com uma extensão de cerca 1 000 km, e o outro com 800 km, perfazendo uma área de cerca de 600 000 km². A espessura máxima dos sedimentos está na ordem de 3 000 m, onde as vulcânicas e subvulcânicas representam um total de cerca de 175 m (MESNER & WOOLDRIDGE, 1964). Seu nome deriva do rio Parnaíba, o qual corre em sua porção oriental com orientação aproximada NE-SO, evidenciando ao longo de seu curso um caráter tipicamente subsequente, em especial nos

domínios dos principais lineamentos estruturais que cortam a sinéclise: Transbrasiliiano, Picos-Santa Inês e Tianguá-Carolina, os quais serão discutidos mais adiante.

O preenchimento da sinéclise foi processado através de três grandes ciclos sedimentares. O primeiro vai do Ordoviciano ao Carbonífero Inferior, sendo composto por terrígenos marinhos e continentais. Os dois últimos ciclos foram depositados após o Pensilvaniano e compõem-se essencialmente por "red beds", com episódios esparsos de atividade vulcânica e plutônica básica toleítica.

O Paleozóico está retratado por seqüências sedimentares do Ordoviciano-Siluriano de composição psamítica-pelítica, seqüências devonianas de composição pelítica-psamítica, seqüências carboníferas de composição psamítica-pelítica-carbonática, e seqüências permianas pelítica-carbonática-psamítica.

O Mesozóico tipifica-se por seqüências triássicas psamíticas, intenso vulcano-plutonismo do Triássico-Jurássico e Cretáceo, assim como sedimentos psamíticos-pelíticos jurássicos e pelítico-psamítico-carbonático do Cretáceo e corpos kimberlíticos do Triássico-Jurássico.

O Cenozóico representa-se por pedimentos e lateritos terciários constituindo importantes níveis de aplanamento, assim como sedimentos psamíticos-pelíticos terciário-quaternários e quaternários pelíticos, nível de aplanamento e terraços, como também sedimentos mais recentes (Holoceno).

Os limites atuais da sinéclise são ora de natureza erosiva, ora de origem tectônica. No primeiro caso, os sedimentos paleozóicos distribuem-se em manchas esparsas na porção oriental, formando a seqüência basal das bacias do Araripe, Mirandiba, Jatobá e Tucano Norte, como

também dispersos no embasamento pré-cambriano relativo aos cinturões móveis da região nordeste brasileira. Por sua vez, os limites de origem tectônica são os seguintes (Figura 3.2):

- Arco Ferrer-Urbano Santos no limite norte com as bacias de Barreirinhas e São Luís;
- Arco de Tocantins atualmente a separa da Bacia do Marajó;
- e Arco do Médio São Francisco constitui o limite com a Bacia do São Francisco.

No contexto tectônico tem-se importantes lineamentos no embasamento pré-cambriano que influenciaram no desenvolvimento da sinéclise, a saber: Tocantins-Araguaia a ocidente, Remanso no quadrante sul-sudeste, Paraíba, Pernambuco, Sobral-Pedro II e Senador Pompeu a oriente, e a norte tem-se o Lineamento Gurupi .

Os estudos pioneiros sobre a sinéclise datam dos trabalhos dos geólogos da Inspetoria de Obras contra as Secas, com destaque para SMALL (1914) e LISBOA (1914), seguido dos trabalhos desenvolvidos pelo Departamento Nacional da Produção Mineral através de DUARTE (1936) e PAIVA & MIRANDA (1937). No entanto, a partir das investigações dos geólogos do Conselho Nacional do Petróleo, com trabalhos de campo e furos de sondagem, especialmente com os trabalhos de PLUMMER (1946), é que houve marcante progresso na evolução da estratigrafia da sinéclise do Parnaíba. Com a criação da Petrobrás em 1953, uma nova fase de trabalhos exploratórios foi iniciada. No interregno, 1956 a 1966, realizaram-se trabalhos de mapeamento geológico , interpretação fotogeológica, gravimetria, sísmica e a perfuração de 22 poços exploratórios. A partir da década de 70 merece destaque a utilização de imagens de Radar de Visada Lateral pelo então Projeto Radam e imagens de satélite Landsat pelo INPE , cujos resultados contribuíram para que a Petrobrás reiniciasse nova fase exploratória , sob a forma de linhas sísmicas, aeromagnetometria e a perfuração de poços pioneiros, estes perfazendo hoje cerca

de 36 poços. No final da década de 70 a CPRM (LIMA & LEITE, 1978), através do convênio CPRM/DNPM, realizou uma integração geológico-metalogenética abrangendo toda a Sinéclise do Parnaíba, contribuindo sobremaneira no conhecimento de sua geologia de superfície, constituindo até o presente momento no seu levantamento mais atualizado. Recentes contribuições a estratigrafia de seqüências são devidos aos trabalhos de FAVERA & ULIANA (1979) e FAVERA (1990) e constituem significativos avanços para um melhor entendimento da evolução da sinéclise do Parnaíba.

Indícios de gás e óleo foram detectados nas regiões de Floriano (PI) e Balsas (MA), respectivamente. Contudo, o melhor resultado alcançado para hidrocarbonetos foi através do poço 2-CP-1-MA, considerado subcomercial de gás (GÓES et al.,1990). Por outro lado, a sinéclise é produtora de diamantes, opala, calcita ótica, calcário, gipsita, caulim e bauxita além de possuir indícios de urânio, carvão, atapulgita, hidrocarbonetos e fosfatos.

Na imagem RVL, o delineamento dos limites da Sinéclise do Parnaíba com relação a seu embasamento é uma tarefa relativamente fácil, em virtude do contraste morfológico exibido. Enquanto que a sinéclise expõe relevo em “cuestas”, com abrupta quebra de relevo do “front”, o embasamento é caracterizado por feições lineares, positivas e negativas, as quais são encobertas na interface com os sedimentos da sinéclise.

Para o interior, a sinéclise tipifica-se por extensos chapadões, em cujos vãos expõem-se zonas dissecadas em diferentes estágios, relativos a níveis de aplanamento.

Os sedimentos de uma maneira geral exibem topo plano a agudo, pendentes verticais a inclinadas, padrões de drenagem dendrítico a retangular e textura radargráfica média a fina.

Assomam também, vulcânicas básicas e secundariamente plutônicas básicas. As primeira exibem topo plano com bordas bem ravinadas, o que aliás constituiu um aspecto distintivo entre as mesmas e os sedimentos, ao passo que as plutônicas exibem topo convexo e padrão de drenagem anelar.

Por toda a sinéclise é muito comum a presença de feições lineares negativas, representativas de fraturas, as quais constituem importantes lineamentos em seu interior. Feições planares são menos comuns, e geralmente de baixo ângulo. As de ângulo mais forte ocorrem geralmente associadas aos grandes lineamentos.

3.3 - UNIDADES RADARGEOLÓGICAS

3.3.1 - Introdução

Este item objetiva apresentar uma descrição sintética sobre as Unidades Radargeológicas (UR) definidas a partir da radarinterpretação de 52 mosaicos de imagem RVL, relativos a Sinéclise do Parnaíba e seu embasamento, fundamentado na Metodologia "Sistemática de Elementos Radargráficos", constante do Capítulo 2 desta obra.

O termo Unidade Radargeológica para imagens RVL tem o mesmo significado de Unidade Fotogeológica para fotografias aéreas, o qual já se encontra bastante enraizado na literatura geológica. Assim sendo, conforme explicitado na seção 2.7.1 do Capítulo 2, Unidade Radargeológica constitui-se de polígonos delineados em uma cena de imagem RVL, mapeáveis na

escala 1:100 000, com textura e tom radargráficos homogêneos, formas de relevo e padrões de drenagem similares e que expressem um significado geológico.

A utilização de Unidades Radargeológicas visa tão somente dar uma conotação descritiva ao Mapa Radargeológico, com isso evitando-se a utilização de Unidades Litoestratigráficas, muitas das quais mal definidas e sem controle no terreno. Por sua vez, determinada Unidade Radargeológica poderá ser transformada em Unidade Litoestratigráfica, desde que os trabalhos de campo estabeleçam sua constituição litológica e uma seção tipo.

A notação das Unidades Radargeológicas está indicada na seção 2.7.1 do Capítulo 2, a qual para facilitar a compreensão do leitor é aqui sumarizada:

- as letras maiúsculas I (ígneas), S (sedimentar) e M (metamórfica) identificam a classe de rocha a que pertencem a UR. Letras gregas são também indicativas de rochas ígneas;
- os índices que acompanham cada letra maiúscula ou letra grega (1, 2, 3,.....n) estarão dispostos em ordem decrescente de idade (relativa). No caso de ocorrerem unidades homotaxiais (cronocorrelatas), os índices serão acrescidos de letras (1a, 1b,1c,1d,.....1n);
- uma conotação temporal poderá ser dada a UR utilizando a Era ou Período geológico, a qual será indicada por letra maiúscula e a classe da rocha será deste modo minúscula, acrescidos dos índices acima citados. Contudo este procedimento não será aqui adotado, uma vez que se pretende fazer um empilhamento das unidades radargeológicas de acordo com suas características geométricas (feições planares, lineares e tabulares).

Na Figura 3.4 mostra-se um quadro onde as Unidades Radargeológicas estão distribuídas de acordo com sua cronologia relativa e respectiva província geológica.

Como principal produto deste trabalho de radarinterpretação expõe-se no Anexo A o Mapa Radargeológico, ao milionésimo, da Sinéclise do Parnaíba e seu Embasamento, com área de cerca 925 000 km², disposto no Nordeste brasileiro. Neste mapa estão expressas as unidades radargeológicas, traços estruturais e ocorrências minerais, fornecendo ao leitor uma visão regionalizada da geologia da região. Para uma melhor visualização do leitor elaborou-se uma seção geológica, segundo AA", com orientação aproximada NO-SE, e que corta as principais estruturas e unidades radargeológicas da região estudada.

3.3.2 - Descrição das Unidades

3.3.2.1 - Unidade M_{1a}

Distribui-se nos quadrantes oeste, sudoeste e sul do embasamento, sendo aqui considerada como unidade basal, uma vez que na imagem RVL não se encontrou evidências de que esta unidade trunque outra, além de constituir a de mais baixa cota altimétrica.

Dispõe-se essencialmente em relevo fraco, com restritas zonas de relevo forte.

Nas faixas de fraco relevo evidencia morros de topo convexo aberto, cujas vertentes são inclinadas e seus vales são mistos. Exibe marcantes quebras de relevo com as unidades adjacentes, com grau de dissecação alto a médio. A textura é média a média-grossa e o seu é tom cinza a cinza escuro. Os padrões de drenagem mais comuns são o retangular e o contorcido. Os canais das drenagens mostram: alto grau de integração, densidade média, fortes tropia e grau de controle, fraca sinuosidade, alta angularidade, ângulo de junção reto e fraca assimetria. Pela fraca

incidência de feições lineares admite-se sua origem ligada a metamorfitos ortoderivados, em que pese a grande cobertura de sedimentos mais recentes (pedimentos).

Nas faixas de forte relevo pode exibir topo agudo a convexo (granulitos), e topo convexo e vertentes inclinadas (granitóides) (CUNHA et al., 1981).

3.3.2.2 - Unidade M_{1b}

Localiza-se no embasamento, nas frações norte, nordeste, és-nordeste, sudeste e oeste, sendo aqui considerada unidade basal pelos motivos explicitados na seção anterior.

Dispõe-se principalmente em relevo fraco, cujos topos são convexo aberto a plano. Seus vales são mistos e grau de dissecação alto, onde é evidente, na imagem RVL, a marcante quebra de relevo com as unidades circunjacentes. A textura é fina e o seu tom varia de cinza a cinza-cinza escuro. Os padrões de drenagem mais usuais são retangular, contorcido e complexo. Por sua vez, os canais das drenagem exibem: forte tropia, densidade média, médio grau de controle, fraca sinuosidade, média a alta angularidade, ângulo de junção reto a agudo e fraca assimetria.

Esta unidade apresenta grande incidência de cobertura de pedimentos, contudo é possível identificar algumas feições lineares em seu interior. Na porção sudeste exhibe zonas localmente ricas em feições lineares, sendo constituídas por metacarbonatos (GAVA et al., 1983). Esta unidade é admitida como cronocorrelata da Unidade Radargeológica M_{1a} , uma vez que as mesmas não estão em contato, sendo, deste modo, consideradas basais neste trabalho.

Entretanto, no seio desta unidade foi possível delimitar alguns tipos litológicos, em vista de suas características radargráficas peculiares. Deste modo, na porção sudeste os quartzitos (q) são

marcados por cristas compondo feições tabulares, enquanto que os metacarbonatos (ca) exibem grande incidência de feições lineares. Por sua vez, os gnaisses (gn) dispostos nas frações nordeste e és-nordeste do embasamento se destacam por constituírem relevo médio a forte e quebra de relevo abrupta em relação as unidades adjacentes, além de exibirem feições lineares e planares bem típicas.

3.3.2.3 - Unidade M_{1c}

Distribui-se nas frações és-nordeste e leste do embasamento. Na porção és-nordeste parece constituir uma continuação da unidade M_{1b} , com a qual é admitida cronocorrelata. Na porção leste, constitui, sem dúvida, a unidade basal, uma vez que não é truncada por outra UR. De uma maneira geral, compõem os terrenos de mais baixa cota altimétrica.

Malgrado distribuir-se em diferentes porções do embasamento mantém uma característica fundamental, qual seja a presença de cristas com orientação diversa, imprimindo às imagens RVL um aspecto bem orientado, em face da grande incidência de feições lineares, planares e tabulares (Figura 3.5). As cristas são simétricas em sua maioria, no entanto, podem ocorrer cristas assimétricas, cujas pendentes variam de inclinada a vertical. Os vales são em “V”, e as quebras de relevo com as unidades adjacentes são marcantes, em virtude de exibir grau de dissecação baixo a médio. A textura radargráfica é média, enquanto a tonalidade varia de cinza a cinza escuro. Os padrões de drenagem dominantes são do tipo treliça, retangular e complexo. Os ramos das drenagem exibem as seguintes características: densidade média a baixa, com marcante

tropia, forte grau de controle , fraca sinuosidade, alta angularidade, ângulos de junção reto e reto-agudo e média a forte assimetria.

Pela grande incidência de feições lineares e pendentes verticais a inclinadas, aliada a sua textura média, admite-se que esta unidade compõe-se essencialmente por gnaisses. A orientação dominante é principalmente ENE-OSO a SSE-NNO.

3.3.2.4 - Unidade M_{1d}

Localiza-se na porção leste do embasamento, mantendo limites gradativos com a unidade M_{1c} , com a qual é aqui admitida ser cronocorrelata.

Sua característica principal é a presença de cristas orientadas segundo NE-SO a ENE-OSO, permeadas por morros de topo convexo aberto típico dos granitóides. As cristas apresentam topo agudo simétrico com pendentes verticalizadas, ao passo que os morros de topo convexo exibem pendentes inclinadas. O grau de dissecação é baixo a médio. A textura é média e a tonalidade é cinza a cinza escuro. Os padrões de drenagem, mais comuns, são do tipo treliça, retangular e complexo. Os canais das drenagens exibem as seguintes características: média a baixa densidade, com marcante tropia, forte grau de controle , fraca sinuosidade, alta angularidade, ângulos de junção reto a reto-agudo e média a forte assimetria.

Pelos elementos radargráficos (feições) acima expostos, esta unidade deve constituir-se principalmente por rochas granitóides deformadas, às quais sofreram a ação de cisalhamento, em vista de seu aspecto anastomosado desenhado pelas feições lineares negativas e positivas.

3.3.2.5 - Unidade MS_{1a}

Expõe-se nas frações sul e sudoeste do embasamento, dispondo-se discordantemente sobre a unidade basal (M_{1b}), haja vista a disposição espacial de suas feições lineares.

Dispõe-se em relevo médio, o qual manifesta-se sob a forma de cristas, simétricas e assimétricas, orientadas, cujas pendentes apresentam-se ora ravinadas, ora inclinadas. Os vales são em “V”, com quebras de relevo abrupta, em virtude de seu grau de dissecação baixo a médio. A textura varia de fina a média com nível radiométrico exibindo tons cinza a cinza claro. Os padrões de drenagem mais comuns são treliça e contorcido. Os canais das drenagens exibem: médio grau de integração, densidade alta, forte tropia e forte assimetria.

Pela grande incidência de feições lineares e planares, com pendentes ravinadas a inclinadas, interpreta-se esta unidade como formada por metassedimentos. No entanto, podem-se associar a mesma corpos básicos, em vista da presença morros de topo plano a convexo aberto, com intenso ravinamento em suas bordas, a exemplo do que ocorre na porção sul do embasamento, imediatamente a leste da serra dos Três Irmãos.

3.3.2.6 - Unidades MS_{1b,1c,1d}

Estas unidades localizam-se essencialmente na porção oeste do embasamento, estando dispostas concordantemente sobre a unidade M_{1b}

Representam-se essencialmente por morros de topo agudo aberto ou fechado, pendente ravinadas a inclinadas, vales em “V” ou em “U”, quebras de relevo abrupta a gradacional com as

unidades adjacentes e grau de dissecação médio a alto. As suas texturas variam de média a fina-média e os níveis de cinza dominantes variam de cinza claro a cinza escuro. Os padrões de drenagem, mais comuns, são do tipo treliça, retangular e complexo, com os canais de drenagens apresentando: alto a médio grau de integração, densidade média a alta, forte tropia, fraca sinuosidade, alta angularidade, ângulo de junção reto a agudo e assimetria média a fraca.

A grande incidência de feições lineares positivas e negativas, assim como feições planares e tabulares foram os parâmetros considerados para interpretar este conjunto como metassedimentos. O contato entre as unidades $MS_{1a,1b,1c}$ é essencialmente gradativo, sendo bem marcante seu controle em relação às formas de relevo, as quais são mais dissecadas em direção a oeste.

Outro fator decisivo, para admitir estas unidades como metassedimentos é devido a presença de quartzitos (q), os quais dispõem-se sob a forma de cristas com topo agudo e vertentes inclinadas a escarpadas, materializados por feições tabulares bem alcandoradas nas imagens RVL. Segundo a literatura associam-se a estes quartzitos corpos máficos (v) (COSTA&HASUI, 1988).

3.3.2.7 - Unidade MS_{1e}

Dispõe-se nas porções norte, nordeste, é-s-nordeste, sudeste e sul do embasamento, concordantemente sobre as unidades $M_{1a,1b,1c}$

Tipifica-se por formas de relevo positivas, em sua maioria de porte médio. As quebras de relevo marcantes, cujas vertentes são inclinadas a mistas e grau de dissecação baixo. Sua textura é média e a tonalidade é cinza a cinza claro. Os padrões de drenagem mais comuns são treliça,

contorcido a complexo, e os canais de drenagens apresentam as seguintes características: forte tropia, alto grau de integração, alta densidade, fraca sinuosidade e ângulo de junção reto a agudo.

A grande incidência lineares e tabulares associadas a feições planares com vertentes ravinadas sugerem uma inter-relação desta unidade com metassedimentos de constituição psamítica, em que quartzitos pontificam como feições tabulares.

3.3.2.8 - Unidades MS_{1f,1g}

Localizam-se nas frações norte, nordeste, és-nordeste, sudeste e sul, e à semelhança da unidade descrita na seção anterior dispõem-se concordantemente sobre as unidades M_{1a,1b,1c}, aqui consideradas como unidades basais.

A unidade MS_{1f} expõe-se em relevo médio a forte, sendo caracterizada por morros de topo agudo, simétricos, com marcante quebra de relevo em relação as unidades circunjacentes e médio a alto grau de dissecação. A textura varia de média a fina e sua tonalidade é cinza a cinza claro. Os padrões de drenagem mais freqüentes são treliça e misto, com os canais de drenagens mostrando :alta densidade, forte tropia e alto grau de integração.

Estas características são indicativas de uma constituição a base de metassedimentos de origem psamo-pelítica.

A unidade MS_{1g} exhibe na imagem RVL características que mais se assemelham com a unidade MS_{1e}, em vista do relevo forte com a presença de cristas simétricas e assimétricas, com pendentes inclinadas a ravinadas. Os vales são em “V”, denotando um estágio de dissecação incipiente. No entanto, de outro modo alguns elementos radargráficos similares a unidade MS_{1f},

são exibidos, como seja a presença de alta densidade dos canais de drenagens nas zonas de relevo médio a fraco, levando a admitir-se que sua constituição é principalmente psamítica e secundariamente pelítica.

3.3.2.9 - Unidade v_{1a}

Distribui-se essencialmente na porção sudoeste do embasamento, dispondo-se discordantemente sobre a unidade M_{1a} .

Apresenta-se sob a forma de morros de topo plano, com vertente inclinada, vales em “V e quebra de relevo abrupta, com respeito as unidades circunjacentes . O grau de dissecação é baixo a médio. Sua textura é fina a fina-média e o tom é cinza escuro. Os padrões de drenagem mais comuns são anelar a radial. Os canais das drenagens apresentam médio grau de integração e densidade baixa. Ocorrem feições lineares positivas internas, dando uma conformação circular a elíptica as exposições desta unidade.

Pelas características apresentadas deve constituir um corpo máfico-ultramáfico.

3.3.2.10 - Unidades $v_{1b,1c}$

Apresentam pequena distribuição espacial nas frações oeste, sul, és-nordeste e sudeste do embasamento , dispondo-se discordantemente sobre as unidades basais já descritas.

Na porção oeste mostram-se associadas a extensas cristas de topo agudo , sob a forma de feições tabulares, tipificadas por quartzitos. Deste modo seu reflexo nas imagens RVL deve-se a presença de quartzitos.

Nas porções sudeste e sul exibem topo plano, em vista da formação de crosta laterítica, com pendentes ravinadas (v_{1c}) , enquanto que na porção és-nordeste mostra textura lisa e tom cinza escuro em terreno plano (v_{1b}).

Pelas características apresentadas tais unidades devem constituir corpos ígneos de composição máfica-ultramáfica.

3.3.2.11 - Unidade λ_1

Situa-se na porção sul do embasamento da sinéclise. Ocupa terreno arrasado sem qualquer indicativo que a identifique em termos radargráficos. Segundo MONTES et al. (no prelo) representa-se por alcalinas carbonatíticas com cerca de 500 m de diâmetro e é intrusivo na unidade MS_{1d} .

3.3.2.12 - Unidade $\gamma\alpha_1$

Situa-se na porção norte do embasamento, dispondo-se discordantemente sobre a unidade M_{1b} e truncando a MS_{1b} .

Expõem-se em relevo médio, sendo caracterizado por morros de topo convexo e vertente inclinada a ravinada. Os vales são mistos , com quebra de relevo variável, indo desde gradativo até abrupto, com grau de dissecação médio a alto. A textura é média a grossa e sua tonalidade é

cinza. Os padrões de drenagem mais freqüentes são retangular a dendrítico. Os canais de drenagens exibem as seguintes características: médio grau de integração, média tropia, médio a fraco grau de controle, fraca sinuosidade e alta a média angularidade, ângulo de junção reto a agudo e fraca assimetria.

Pelas características apresentadas interpreta-se a presença de rochas granitóides, contudo, conforme dados de ABREU & LESQUER (1985), existem vulcânicas ácidas associadas.

3.3.2.13 - Unidade γ_1

Localiza-se nas frações norte, és-nordeste, sudeste e oeste do embasamento, cujas relações com as unidades basais são marcadas pela distinta textura e truncamento de feições lineares .

Exibem relevo médio a forte com topo convexo aberto e vertente inclinada. Os vales são ora em “V” ora em “U” , com quebra de relevo mista e grau de dissecação baixo a médio. A textura é média e sua tonalidade predominantemente cinza. Os padrões de drenagem mais comuns são dendrítico e retangular, e os canais das drenagens exibem as seguintes características: densidade média a baixa, fraca tropia, médio grau de integração, forte sinuosidade, ângulo de junção agudo e fraca assimetria. Pelas suas feições de topo e drenagem, constitui uma UR típica de rochas granitóides.

3.3.2.14 - Unidade δ_1

Aflora na porção oeste do embasamento, dispondo-se discordantemente sobre a unidade MS_{1c} , uma vez que trunca as feições lineares dessa unidade.

Encontra-se modelada sob a forma de morros de topo convexo aberto, com pendente ravinada e vales em “V”. Sua textura é principalmente média e a tonalidade varia de cinza a cinza escuro. Padrões de drenagem mais comuns são anelar e radial, sugerindo a presença de corpos básicos conforme sugerido por LIMA (1975).

3.3.2.15 - Unidades $MS_{2a,2b}$

Localizam-se nas frações norte, sul e sudoeste do embasamento e mostram relação de discordância angular com as unidades $MS_{1c,1f,1g}$, através das feições lineares e planares. A unidade MS_{2a} expõe-se na porção norte do embasamento e mostra restrita distribuição espacial, ao passo que a unidade MS_{2b} dispõe-se nas frações sul e sudoeste, com regular distribuição espacial.

Tais unidades exibem os seguintes elementos radargráficos: textura média e tonalidade cinza a cinza claro; grande incidência de cristas de topo agudo, simétricas e assimétricas, com pendentes ravinadas a inclinadas, marcantes quebra de relevo e baixo grau de dissecação.

A tais características se associam feições lineares, planares e tabulares típicas de metassedimentos, inclusive determinadas feições planares interpretadas como estruturas primárias (acamamento), em vista do seu traçado regular e situarem-se em zonas fracamente deformadas.

3.3.2.16 - Unidades S_{1a,1b,1c,1d}

Distribuem-se nas frações norte, nordeste e sudoeste do embasamento, mostrando relação de discordância com as unidades de índice MS.

A unidade S_{1a} é identificada na porção norte do embasamento, ocorrendo sob a forma de tabuleiros com topo plano e pendentes inclinadas, textura muito fina a lisa e tom cinza, e escassa densidade de drenagem. Tais feições são típicas de sedimentos de constituição psamítica.

A unidade S_{1b} ocorre na porção nordeste do embasamento, distribuindo-se principalmente em terrenos de relevo fraco, com extensa cobertura de sedimentos recentes (pedimentos), o que lhe confere uma textura lisa e tom cinza a cinza escuro. Nesta unidade é marcante a concentração em uma faixa E-O de feições lineares, sugerindo a existência de zona de cisalhamento, fruto da deformação a que esta unidade foi submetida. Contudo, para melhor identifica-la, tornou-se necessário a análise das formas de relevo de porte médio, dispostas em seu interior. Nestas, tem-se o topo plano, pendente escarpada e escassa rede de drenagem, indicativas de sedimentos psamíticos. Por sua vez, nas formas de relevo fraco, os morros são de topo agudo e vertentes inclinadas, com rede de drenagem densa, sugerindo a presença de tipos pelíticos.

Por outro lado, a unidade S_{1c} assoma na porção sudoeste do embasamento, exibindo relevo positivo, de porte médio, com morros de topo agudo, bem orientados, o que lhe confere importantes feições lineares., indicativas de deformação. Pelas características apresentadas sugere-se tratar de sedimentos de composição pelítico-psamítica, observando-se contudo a ocorrência de diminutas depressões, prováveis dolinas, o que implicaria em uma composição carbonática, ratificado na literatura por MONTES et al. (no prelo).

Finalmente, a unidade S_{1d} localiza-se na porção oeste do embasamento, com restrita área de exposição. Dispõe-se discordantemente sobre a unidade M_{1b} , com a qual mantém contato direto. Exibe relevo médio de topo plano com caimento e vertentes ravinadas. A textura é média a fina e o tom é cinza. O padrão de drenagem é retangular, cujos canais mostram pouca densidade e fraco grau de integração. Encontra-se intensamente cortada por feições lineares negativas e com feições planares de mergulho fraco. Suas características radargráficas sugerem a presença de rochas psamíticas.

3.3.2.17- Unidades $S_{2a,2b,2c,2d,2e,2f}$

Localizam-se nas frações norte, nordeste, é-s-nordeste, leste e oeste do embasamento, dispondo-se de forma discordante em relação às unidades do embasamento até aqui descritas, uma vez que estão limitadas por feições lineares negativas, representativas de descontinuidades (falhas). Por sua vez, assomam principalmente na base dos sedimentos que compõem a Sinéclise do Parnaíba, com as quais mantêm contato discordante, feição bem visível nas imagens RVL.

Na porção norte do embasamento ocorre a unidade S_{2a} , com área de exposição restrita, dispondo-se em terreno arrasado, com textura fina e tom cinza. A baixa densidade de drenagem e ausência de feições lineares, sugerem tratar-se de sedimentos psamíticos.

Na porção nordeste do embasamento, a unidade S_{2b} ocupa uma estrutura grábenforme, em cujos domínios exibe-se em terreno fraco a arrasado, com textura lisa e tonalidade cinza escuro a preto. O padrão de drenagem é retangular, cujos canais exibem baixa densidade e baixo grau de integração e não há feições lineares. Tais características são indicativas de sedimentos psamíticos.

No quadrante és-nordeste do embasamento expõem-se as unidades S_{2c} e S_{2d} , também preenchendo uma estrutura grábenforme, onde há marcante quebra de relevo e textura radargráfica bem distinta das unidades circunjacentes. Nesta estrutura a primeira unidade (S_{2c}) exhibe uma textura muito fina a lisa, tonalidade cinza escuro, densidade baixa de drenagem e ausência de feições lineares, própria de rochas de constituição psamítica. Por sua vez, a outra unidade radargeológica (S_{2d}) evidencia em imagem RVL características radargráficas bem distintas, como seja: textura fina a fina-média, tom cinza claro, morros de topo agudo e alta densidade de drenagem. Tais elementos radargráficos 1.1. são mais típicos de rochas pelíticas.

Na porção leste do embasamento, a unidade S_{2e} localiza-se também em estrutura grábenforme, disposta discordantemente sobre a unidade M_{1c} compondo morros de topo plano, textura lisa a muito fina e tom cinza. Estas características associadas a baixa densidade de drenagem sugere a presença de sedimentos de constituição psamítica.

Na fração oeste do embasamento, assoma a unidade S_{3f} , a qual está sobreposta às unidades de índice MS e sotoposta às unidades que compõem a Sinéclise do Parnaíba. Seus principais elementos radargráficos são: relevo médio a forte, topo plano e pendentes ravinadas a inclinadas; textura média e tom cinza. Tais parâmetros indicam a ocorrência de sedimentos psamo-pelíticos.

3.3.2.18 - Unidade γ_2

Distribui-se nas porções norte, nordeste, és-nordeste e sudeste do embasamento, dispondo-se discordantemente sobre as unidades de índice M, MS e S, uma vez que trunca as feições lineares e/ou planares dessas unidades.

Apresenta relevo positivo, geralmente de porte médio, amíude com topo convexo, excepcionalmente agudo, com vales em “V”, marcantes quebras de relevo e baixo grau de dissecação. A textura é média e a tonalidade situa-se dentro da faixa do cinza. Padrões de drenagem dendrítico, anelar e radial são os mais comuns. Os canais das drenagens exibem: média a baixa densidade, média tropia, fraco grau de controle, alta sinuosidade, ângulo de junção agudo e fraca assimetria.

Apresentam forma circular a elíptica, excepcionalmente em “oito”, com a presença de feições lineares de conformação circular tanto interna como externa. Muitas vezes devido a presença de descontinuidades exibe feições negativas e positivas, guardando uma certa orientação preferencial.

Os elementos radargráficos acima referidos são indicativos de rochas granitóides.

3.3.2.19 - Unidade ω_1

Localiza-se nas porções nordeste e és-nordeste do embasamento, sendo a unidade mais jovem das até aqui descritas. Mostra, contudo, relações diretas com as unidades M_{1b} e S_{1b} . Ocorre

sob a forma de feições tabulares (diques), de topo convexo,, e em vista disso são interpretados como corpos ígneos básicos .

3.3.2.20 - Unidade β_1

Localiza-se na porção nordeste do embasamento, dispondo-se em estruturas grábenformes ,sobrejacentes ou em mesma cota altimétrica da unidade S_{2b} , com a qual parece manter idêntica relação de idade ou então mais jovem.

Expõe-se em relevo fraco a arrasado, em pequenas elevações de topo agudo com bordas ravinadas e vales em “V”. Denota na imagem RVL textura muito fina-fina e sua tonalidade varia de cinza claro a cinza. Os padrões de drenagem mais comuns são anelar e retangular.

Tais características sugerem a presença de rochas ígneas , as quais devido ao seu caráter planar são extrusivas. NASCIMENTO et al. (1981) citam a presença de basaltos nesta região.

3.3.2.21 - Unidade $S_{3a,3b}$

Localizam-se principalmente na Sinéclise do Parnaíba, contudo exibem testemunhos nas frações nordeste e sul do embasamento. Constituem as unidades radargeológicas basais da sinéclise, expondo-se sob a forma de ““cuestas””, uma vez que estão em contato direto com as unidades do embasamento, constituindo marcante discordância angular.

A unidade S_{3a} , pode ser identificada nos flancos oriental e meridional da sinéclise, expondo-se em relevo médio a forte, sob a forma de extensas “cuestas”, com mergulho fraco e

pendentes ravinada a inclinada. Os vales são em “V”, com marcante quebra de relevo em relação as unidades do embasamento, em vista de seu baixo grau de dissecação. A textura ‘é média-fina e seu tom é comumente cinza claro. Os padrões de drenagem mais comuns são dendrítico e retangular, cujos canais de drenagens mostram: médio grau de integração, densidade média a baixa, fraco grau de controle, alta sinuosidade, fraca angularidade e fraca assimetria. São freqüentes feições planares nesta unidade.

No flanco ocidental (unidade S_{3b}) dispõe-se principalmente nos vales, em pequenas exposições, amiúde sob controle de feições lineares negativas.

Os testemunhos observados nas frações nordeste e sul do embasamento, tem como característica principal a exposição em chapadões de topo plano e pendentes ravinadas.

Pelas características acima citadas esta unidade tem padrões de sedimentos psamíticos.

3.3.2.22 - Unidades S_{4a,4b}

Expõem-se essencialmente no flanco oriental da Sinéclise do Parnaíba , mantendo contatos diretos com as unidades S_{3a} e S_{5a} , dispondo-se sobrejacente a primeira e subjacente a segunda.

A unidade S_{4a} exibe relevo médio, com morros de topo plano e pendentes inclinada a vertical. Os vales são em “V”, com marcante quebra de relevo em relação as unidades adjacentes, em virtude do seu baixo grau de dissecação. O padrão de drenagem mais comum é o retangular, havendo grande incidência de feições planares com fraco mergulho e feições lineares negativas

referentes a descontinuidades (fraturas). As características anteriores sugerem a presença de rochas principalmente de constituição psamítica.

A unidade S_{4b} dispõe-se imediatamente a sul da unidade S_{4a} , podendo, inclusive, constituir uma continuação da mesma, contudo foi aqui individualizada sobre outro índice alfanumérico, em vista de seus radargráficos radargráficas díspares. Mostra essencialmente um relevo médio, eivado de cristas de topo agudo e verticalizadas, resultando em uma grande incidência de feições lineares, positivas e negativas, planares e tabulares, produtos de intensa deformação a que foram submetidos tais litotipos. Deve constituir-se essencialmente de sedimentos de constituição psamítica.

3.3.2.23 - Unidade S_{5a}

Distribui-se essencialmente na Sinéclise do Parnaíba, em seu flanco oriental, sob a forma de “cuestas”, com mergulho fraco, sobreposta às unidades radargeológicas S_{3a} e S_{4a} , com as quais mantém contato direto.

Expõe-se em relevo médio, modelado em “cuestas” de reverso plano e fraco mergulho, cujas “frentes de reversos” são comumente escarpadas. Os vales são em “V” em virtude de seu grau de dissecação baixo. A textura é média-grossa e o tom varia de cinza a cinza a cinza escuro. A tonalidade cinza escuro relaciona-se principalmente a zona de vegetação tipo parque, ou então a quase ausência de vegetação, em vista da presença de solos litólicos. Os padrões de drenagem dendrítico e retangular são os mais freqüentes, os quais são marcados por matas galerias.

Os canais de drenagens exibem as seguintes características: médio grau de integração, densidade média a baixa, fraca sinuosidade, alta angularidade e fraca assimetria.

Nos domínios das “cuestas” são bem comuns a presença de feições planares, assim como feições lineares negativas concernentes a fraturas. Esta unidade exhibe evidências de rochas principalmente pelíticas e secundariamente psamíticas.

3.3.2.24 - Unidade S_{5b}

Dispõe-se nos quadrantes sudeste e sul da Sinéclise do Parnaíba, sob a forma de “cuestas” com fraco mergulho. Está sobreposta a unidade S_{3a}, em mantém contato direto com as unidades do embasamento, sob a forma de testemunhos.

Expõe-se em relevo médio, onde sustenta “cuestas” de pendentes ravinada a escarpada. Os vales são em “V”, com quebras de relevo abruptas a medianas, porquanto de seu médio a baixo grau de dissecação. A textura é fina a muito fina e o tom cinza a cinza claro. O padrão de drenagem é comumente dendrítico-retangular, com canais de drenagens exibindo: médio grau de integração, densidade média, médio grau de controle, fraca sinuosidade, alta angularidade, ângulo de junção reto e fraca assimetria.

Nos domínios desta unidade é comum a presença de feições planares, como também feições lineares negativas. Evidencia elementos radargráficos de sedimentos de constituição essencialmente pelítica.

3.3.2.25 - Unidade S_{5c}

Localiza-se na Sinéclise do Parnaíba, ocupando seu flanco ocidental, com grande expressão espacial, sob a forma de “cuestas”, com ângulos de mergulho mais fortes do que os do flanco oriental, como também compondo testemunhos na porção oeste do embasamento. Sotopõe-se à unidade radargeológica S_{6c}, ou então mantém contato por falha com as unidades de índices S₉ e S₁₀.

Os elementos radargráficos desta unidade se assemelham aos da S_{5a}, contudo com densidade de drenagem mais alta.

Os testemunhos que se expõem na porção oeste do embasamento, exibem-se em relevo de porte médio, cujos morros apresentam topo agudo e pendentes ravinadas. Os vales apresentam-se em “V”, devido seu baixo grau de dissecação. A textura radargráfica dominante é fina e o tom mais comum é o cinza.

Pelas características até aqui expostas a unidade acima descrita constituem-se por sedimentos principalmente pelíticos.

3.3.2.26 - Unidades S_{6a,6b,6c}

Localizam-se na Sinéclise do Parnaíba, ocupando suas bordas sob a forma de “cuestas”, assim como compondo testemunhos, em estruturas grábenformes, na porção oeste do embasamento. Sobrepõe-se às unidades de índice S₅ e sotopõe-se as unidades de índice S₇, ou então mantém contato por falha com as unidades de índices S₈ e S₉.

A unidade S_{6a} disposta no flanco oriental, forma estrutura cuestiformes , com fraco mergulho, cujo reverso mostra textura fina a muito fina e tonalidade cinza. Mostra pendentes inclinadas a verticais , com grande número de quebras de relevo, sugerindo tratar-se de variações litológicas. Os vales são em “V”, em vista de seu grau de dissecação médio a forte. Os padrões de drenagens mais comuns são o dendrítico e o retangular, e os canais de drenagens mostram : baixo grau de integração, baixa densidade, fraca tropia , média sinuosidade, média angularidade, ângulo de junção reto a agudo e fraca assimetria.

A unidade S_{6b} expõe-se no flanco meridional da sinéclise, onde também forma “cuestas” de mergulho fraco e reverso com grande área de exposição. Nesta porção o grau de dissecação é médio a forte e os vales são em “V”. A textura é fina a muito fina e o tom é cinza. Os padrões de drenagens mais comuns são o dendrítico e o retangular, cujos canais de drenagem evidenciam baixa integração e baixa densidade. Tais elementos radarográficos sugerem a dominância de sedimentos de constituição psamítica.

A unidade S_{6c} dispõe-se essencialmente no flanco ocidental da sinéclise e seus elemntos radarográficos em muito se assemelham aos da unidade S_{6b} , contudo com densidade de drenagem mais baixa e textura muito fina a lisa, devido ao capeamento de sedimentos recentes (pedimentos). Por sua vez, os ângulos de mergulho de suas feições planares são mais fortes do que a unidade do flanco oriental (S_{6a}).

3.3.2.27 - Unidades $S_{7a,7b,7c}$

Localizam-se na Sinéclise do Parnaíba e mostra ampla distribuição espacial. Sobreposição às unidades de índice S_7 , cujos contatos são bem marcados, em vista do contraste litológico. Por outro lado, seus contatos com as unidades sobrejacentes, de índice S_8 , são gradativos.

Esta unidade apresenta mergulhos muito fracos, em vista de seu posicionamento próximo ao centro da sinéclise, o que dificulta sobremaneira estabelecer seu posicionamento espacial em relação às unidades circunjacentes.

De uma maneira geral, os elementos radargráficos são bastantes similares às das unidades radargeológicas de índice S_5 . Deste modo, necessita-se estar localizado na *estratigrafia*, a fim de saber o posicionamento da unidade na “coluna estratigráfica” que se está empilhando. Assim sendo, a unidade S_{7a} é similar a S_{5a} , a S_{7b} compara-se a S_{5b} e a S_{7c} com a S_{5c} . Representam-se essencialmente por pelitos.

3.3.2.28 - Unidades $S_{8a,8b}$

Distribuem-se principalmente na Sinéclise do Parnaíba, ocupando as porções centro-sul e oeste, como também no interior de estruturas grábeniformes na fração oeste do embasamento. Em vista de seu posicionamento próximo ao centro da sinéclise, seus mergulhos são muito fracos.

A unidade S_{8a} , ocorrente na porção centro-sul, mostra contatos gradativos com as unidades de índice S_7 que lhe são sotopostas e com as de índices S_9 que lhe são sobrepostas. De uma maneira geral, ocorre nos vãos, em morros de topo agudo, vales em “V”, com médio grau de

dissecação e alta densidade de drenagem. A textura é fina a muito fina e o tom varia de cinza a cinza escuro, em vista de sua associação com classes florestais do tipo parque.

Nas porções ocidental e centro-ocidental, onde aflora a unidade S_{8b} , os contatos são comumente tectônicos e estão associados a falha de gravidade, marcada pela quebra de relevo e por feições lineares negativas retilíneas. Apresenta topo plano com caimento ou então agudo simétrico, e pendentes ravinadas. A textura é lisa a fina-muito fina e tonalidade cinza a cinza escuro e preta. Os vales são mistos, em virtude do grau de dissecação médio. O padrão de drenagem mais comum é o retangular, e os canais de drenagens exibem: alto grau de integração, densidade média, médio a forte grau de controle, fraca sinuosidade, alta a média angularidade, ângulo de junção reto a agudo e assimetria fraca.

As características expostas acima são indicativas de rochas pelítico-psamíticas.

3.3.2.29 - Unidade S_9

Expõe-se na Sinéclise do Parnaíba principalmente em sua fração centro-sul, onde exhibe fracos mergulhos, o que dificulta, de certo modo, o estabelecimento de seu posicionamento estratigráfico relativo em relação às unidades vizinhas. Ademais, os contatos desta unidade com as que lhe são sotopostas de índice S_8 e com as que lhe são sobrepostas de índice S_{10} , são comumente gradativos.

Esta unidade radargeológica expõe-se ora na encosta dos chapadões, ora nos vales (vãos) entre os chapadões. As encostas são bem escarpadas, podendo, no entanto, expor intenso

ravinamento. Os vãos são dominados por morros de topo agudo, com pendentes inclinadas e vales em “V”. A textura varia de média a fina e o tom é cinza .

Os elementos radargráficos são sugestivos de uma constituição principalmente psamítica e secundariamente pelítica.

3.3.2.30 - Unidade S₁₀

À semelhança da unidade descrita anteriormente, distribui-se principalmente na Sinéclise do Parnaíba e ocupa o interior de estruturas grábeniformes na porção oeste do embasamento. Mostra grande distribuição espacial na fração centro-sul e ocidental da sinéclise. Na primeira, os mergulhos de suas feições planares são fracos, o que de certo modo dificulta seu posicionamento espacial com as unidades circunjacentes.

Dispõe-se ora na encosta dos chapadões, ora ocupando os vales, caso em que seus elementos radargráficos são deveras semelhantes aos da unidade S₁₀. Por sua vez, nos arredores de Teresina apresenta-se com feições bem típicas, como seja pela presença de chapadões com a parte central erodida, parecendo sugerir a presença de grandes flexuras cujo núcleo foi desventrado.

Na porção ocidental está limitado por falhas de gravidade e exhibe várias quebras de relevo e marcante contato com a unidade S₁₁. Mostra tom cinza a cinza escuro e textura lisa a fina. Apresenta feições planares com caimento fraco a médio.

3.3.2.31 - Unidade S₁₁

Apresenta restrita distribuição espacial na província Sinéclise do Parnaíba, expondo-se nas frações central e ocidental. Por se constituir em uma unidade com elementos radargráficos bem marcantes, amiúde pela sua textura e tonalidade radargráficas, tem seu posicionamento estratigráfico bem definido, estando sotoposto a unidade de índice S₁₀.

Ocorre na fração ocidental da sinéclise, sob a forma de “cuestas”, onde seus contatos com a unidade S₁₀ são bem marcados nas imagens RVL. Nesta fração, a densidade de drenagem é alta a média. Por sua vez, a textura radargráfica que lhe é mais característica ocorre no núcleo da anticlinal do Loreto, região de Loreto, município do Estado do Maranhão, expondo-se na imagem RVL com textura lisa e tom cinza escuro a preto, sendo ressaltado pela presença de matas galerias com tons brancos. O padrão de drenagem é dendrítico (pinado), com alta densidade dos canais de drenagem.. No entanto, para leste perde estes elementos radargráficos e passa a ocupar a encosta de platôs, com alto grau de ravinamento.

Os elementos radargráficos percorridos sobre esta unidade sugerem uma constituição essencialmente pelítica.

3.3.2.32 - Unidade S₁₂

Localiza-se principalmente nas frações centro-ocidental e sul da Sinéclise do Parnaíba, estando sobreposta à unidade S₁₁, através de marcante quebra de relevo, a exemplo do que ocorre na região de Carolina (MA), fração centro-ocidental da sinéclise. Por outro lado, no flanco

ocidental da Sinéclise a unidade em epígrafe mostra mergulho fraco em direção ao centro da bacia, estando sotoposta a unidade S_{11} .

Esta unidade radargeológica tem elementos radargráficos bem marcantes, como seja: relevo de porte médio, com morros de topo plano e pendente vertical. Os vales são em “V”, em vista de seu grau de dissecação médio a baixo. A textura é fina a lisa, dominando a tonalidade cinza. Os padrões de drenagem mais comuns são o dendrítico e o retangular. Os canais de drenagens evidenciam: baixa densidade, baixo grau de integração e forte angularidade. Por sua vez, exhibe grande incidência de feições planares nas exposições dispostas na aba ocidental da sinéclise.

Pelas características acima expostas constitui um exemplo típico de rochas sedimentares de constituição psamítica, cujas elementos radargráficos são deveras semelhante a unidade de índice S_6 .

3.3.2.33 - Unidade β_2

Dispõe-se nas frações ocidental e centro-ocidental da Sinéclise do Parnaíba, onde jaz discordantemente sobre a unidade S_{12} .

É formada por morros com topo plano a convexo bem aberto, cujas bordas exibem intenso ravinamento, ou então com pendentes ravinadas a inclinadas. Os vales são em “V”, com marcantes quebras de relevo, resultado do grau de dissecação baixo a médio sofrido por esta unidade. A textura é lisa a fina-muito fina e tom dominante varia de cinza escuro a cinza. Os padrões de drenagem dendrítico-retangular e anelar são os mais comuns, com os canais de

drenagens apresentando: baixo a médio grau de integração, baixa densidade, forte tropia, sinuosidade média, média a alta angularidade, ângulo de junção reto a agudo e fraca assimetria.

Tais elementos radargráficos sugerem a presença de sedimentos pelo seu topo plano, contudo, as bordas dos topos bem ravinadas são indicativas de rochas básicas extrusivas.

3.3.2.34 - Unidade δ_2

Distribui-se por toda a Sinéclise do Parnaíba, sob a forma de corpos discordantes ou concordantes em relação as unidades adjacentes. Corta praticamente todas as unidades aqui descritas, sendo admitida ser cronocorrelata a unidade β_2 .

Representa-se, em relevo de porte médio, por morros com topo plano a convexo e pendentes ravinadas. Os vales em “V” retratam o médio a baixo grau de dissecação a que foi submetida esta unidade. A textura varia de fina a muito fina e tom dominante é cinza. Os padrões de drenagem mais comuns são anelar, radial e centrípeto. Os canais de drenagens exibem as seguintes características: baixa densidade, baixo a médio grau de integração, média angularidade, média tropia e fraca assimetria. Nas pendentes, pode-se observar na região a sudoeste de Elesbão Veloso (PI), a presença de feições lineares, provável indicação de traço de feição planar.

A drenagem e a forma do topo são indicativos de rochas ígneas, as quais investigadas por LIMA & LEITE (1978) revelaram uma composição básica.

3.3.2.35 - Unidade ω_2

Apresenta fraca distribuição em toda a sinéclise e caracteriza-se pela presença de feições tabulares, com topo convexo, a maioria disposta perpendicular ou oblíquamente a visada do sensor Radar .

Representam , em verdade, diques de corpos básicos (LIMA & LEITE, 1978.), ratificado pela forma de seus topos. É aqui admitido serem cronocorrelatos as unidade β_2 e δ_2 .

3.3.2.36 - Unidade S_{13}

Localiza-se na porção centro-ocidental da Sinéclise do Parnaíba, ocupando o centro da Sinclinal da Serra das Alpercatas, assentando-se sobre a unidade S_{12} , aflorante nos flancos da referida estrutura.

Expõe-se em terrenos arrasados, com alto grau de dissecação. Possui um capeamento de sedimentos recentes (pedimentos), em vista de sua textura fina a lisa e tom cinza a cinza escuro nas imagens RVL. Os padrões de drenagem mais freqüentes são dendrítico e retangular. Os canais de drenagens exibem densidade média a média-baixa e baixo a médio grau de integração.

Suas características indicam uma constituição principalmente psamítica e secundariamente pelítica.

3.3.2.37 - Unidade S₁₄

Expõe-se na porção centro-ocidental da sinéclise sobreposta a unidade S₁₃, cuja relação é bem visível na Sinclinal da Serra das Alpercatas, uma vez que a unidade em epígrafe ocupa a posição central.

Apresenta elementos radargráficos semelhantes ao da unidade S₁₂, em especial nas exposições jacentes na serra das Alpercatas. Para àquelas expostas mais para oriente, sul da cidade de Elesbão Veloso (PI), sua característica principal é a presença de intenso ravinamento nas pendentes.

Mostra a presença de feições planares, em sua maioria denotando fraco mergulho.

Pelas características radargráficas acima exposta deve constituir-se por sedimentos psamíticos.

3.3.2.38 - Unidade S₁₅

Distribui-se na porção ocidental da sinéclise, ao sul da cidade Imperatriz (MA), e apresenta caracteres radargráficos bem típicos, como seja: presença de uma textura lisa e tom cinza escuro a preto, com destaque para as matas galerias em tons brancos. O padrão de drenagem é dendrítico-retangular, com canais de baixa densidade e baixo grau de integração. Não mostra a presença de feições planares e lineares.

Seus elementos radargráficos indicam para esta unidade uma constituição de sedimentos principalmente pelíticos.

3.3.2.39 - Unidade S₁₆

Localiza-se na porção norte da sinéclise, ocupando essencialmente os vales, os quais são geralmente em “U”. A textura varia de lisa a muito fina e o tom é cinza a cinza claro. A drenagem exibe baixo grau de integração e densidade fraca. Sua textura lisa pode estar relacionada a cobertura de sedimentos mais recentes (pedimentos).

Segundo LIMA & LEITE (1978) tal unidade compõe-se por calcários e argilitos.

3.3.2.40 - Unidade β_3

Mostra distribuição na sinéclise restrita a região ao sul da cidade de Barra do Corda (MA), ocorrendo sob a forma de pequenos platôs de topo plano e pendentes verticais, dispendo-se na base da unidade de índice S₁₇.

Segundo LIMA & LEITE (1978) tal unidade constitui-se de basaltos.

3.3.2.41 - Unidade S_{17a}

Localiza-se na porção norte da sinéclise, sendo considerada a unidade basal dessa região, por ocupar a cota altimétrica mais baixa, em uma seqüência de sedimentos horizontais.

Dispõe-se em terrenos de relevo fraco, com alto grau de dissecação, vales em “U” e marcantes quebras de relevo em relação às unidades adjacentes. A textura varia de média-fina e o tom é predominantemente cinza. Os padrões de drenagem mais comuns são dendrítico e retangular.

Os canais de drenagens exibem: médio grau de integração, média a fraca tropia, médio a fraco grau de controle, ângulo de junção agudo a reto e fraca assimetria. Ausência de feições planares e tabulares, e presença de feições lineares negativas.

Os elementos radargráficos sugerem sedimentos de constituição psamo-pelítica.

LIMA & LEITE (1978) indicam em seu mapa geológico a presença de duas estruturas circulares nesta unidade, na região do Médio rio Turiaçu (MA), as quais retratam, em verdade, desmatamentos (Figura 3.6). Tal equívoco foi provocado pela conformação perfeitamente circular de tais antropismos, o que exemplifica perfeitamente o *engano* que o radarintérprete pode cometer em áreas de intensa atividade humana.

3.3.2.42 - Unidade S_{17b}

Ocupa a porção sul da sinéclise, sendo também a unidade basal da região, devido ser a unidade de mais baixa cota altimétrica, em um contexto geológico de sedimentos horizontais. Expõe-se em imagem RVL com textura e tons tradargráficos bem característicos.

Ocupa terrenos com relevo fraco. Sua textura radargráfica varia de lisa a muito fina e a tonalidade dominante é cinza escuro a preto, com destaque para as matas de galeria em tons brancos. O padrão de drenagem mais comum é o dendritico (pinado), com variações para retangular. Os canais de drenagens exibem alta densidade e com alto grau de integração.

Tais parâmetros são bem típicos de sedimentos de composição principalmente pelítica.

3.3.2.43 - Unidades $S_{18a,18b,18c,18d}$

Distribuem-se nos quadrantes norte (S_{18a} e S_{18d}) e sul (S_{18b}) da Sinéclise do Parnaíba, como também nas frações leste e sudeste do embasamento (S_{18c}).

Tais unidades radargeológicas expõem-se em terrenos com baixo grau de dissecação, representando as vertentes dos chapadões que assomam nessas regiões. Retratam-se por morros de topo agudo, vertentes ravinadas, vales em “V” e marcantes quebras de relevo com as unidades circunjacentes. O padrão de drenagem mais comum é o dendrítico-retangular. Os canais de drenagens exibem: alta densidade, fraca a média tropia, fraca angularidade, ângulo de junção agudo e fraca assimetria. Ausência de feições planares, lineares positivas e tabulares.

Representam sedimentos de constituição psamo-pelítica, em vista das características radargráficas acima apresentadas.

3.3.2.44 - Unidade S_{19}

Localiza-se essencialmente na fração meridional da Sinéclise do Parnaíba, com elementos radargráficos semelhantes às unidades de índice S_{18} , porém em um nível estratigráfico superior, haja vista seu posicionamento direto em relação a unidade S_{18c} .

3.3.2.45 - Unidade κ_1

Dispõe-se na porção centro-sul da Sinéclise do Parnaíba sob a forma de estruturas circulares cujos diâmetros não excedem a 1 km.

Três estruturas são bem conhecidas na região, segundo a literatura: Redondão, Apicuns e Picos. A estrutura do Redondão é uma depressão circular, ao passo que Apicuns forma uma "estrutura em oito" desenhada por feições tabulares. Picos é uma estrutura circular delineada por feições lineares, com três corpos kimberlíticos em seu interior (SOPEMI apud GONZAGA & TOMPKINS, 1991). Tendo por base tais elementos radargráficos interpretou-se outra estrutura ao norte do Redondão.

Segundo GONZAGA & TOMPKINS (1991) tais estruturas circulares são compostas por kimberlitos.

3.3.2.46 - Unidades S_{20}

Esta unidade dispõe-se principalmente no quadrante sul da Sinéclise do Parnaíba, Chapada das Mangabeiras, onde apresenta melhor distribuição espacial. Restritas exposições ocorrem na porção sudeste da sinéclise.

Constitui a superfície de aplanamento cimeira da região estudada representando, em verdade, uma superfície de aplanamento degradada inumada, composta por pedimentos, em nível altimétrico em torno de 500 m.

Representa-se na imagem RVL por chapadões de topo plano com fraco caimento para norte, e pendentes verticais a inclinadas. A textura é lisa e o tom varia de cinza a cinza escuro. Os canais de drenagem são escassos, em vista de sua permo-porosidade,.

3.3.2.47 - Unidade S₂₁

Esta unidade apresenta grande distribuição geográfica na Sinéclise do Parnaíba, com extensão para as porções és-nordeste, sudeste, leste e sul do embasamento. Retrata-se sob a forma de extensos chapadões de topo plano, textura lisa e tonalidade cinza, evidenciando um recobrimento por sedimentos inconsolidados (pedimentos) e lateritos, guardando , no entanto, estreita relação com a estrutura dos sedimentos, daí o porquê foi denominada por LIMA (1991) como superfícies estruturais tabulares. Representa, em verdade, uma superfície de aplanamento degradada inumada de altitude , em média, de 300 a 400 m.

Tem importância econômica, uma vez que aos lateritos se associam importantes depósitos de caulim e bauxita

3.3.2.48 - Unidade S₂₂

Expõe-se essencialmente na porção norte da Sinéclise do Parnaíba. Representam-se por tabuleiros , com grau de dissecação baixo. Mostram textura lisa e tonalidade cinza. Os vales são em “V”, contudo de pouco aprofundamento. O padrão de drenagem mais comum é o

dendrítico-retangular, cujos canais evidenciam: baixa densidade, médio grau de integração, fraca tropia e ângulo de junção agudo a reto.

Representam sedimentos de constituição psamo-pelítica.

3.3.2.49 - Unidade S_{23a}

Constitui-se de superfícies planas, ao nível de base dos principais rios que drenam a porção norte da Sinéclise do Parnaíba. Representam uma superfície de aplanamento retocada inumada, em torno de 200 m. Exibem textura lisa e tonalidade cinza.

3.3.2.50 - Unidade S_{23b}

Distribui-se essencialmente na porção norte da Sinéclise do Parnaíba, constituindo tabuleiros de baixa altitude, representando um importante nível de aplanamento retocado inumado, com altimetria em torno de 100 a 200 m. A textura é lisa e o tom é cinza.

Na região costeira ocorre sob a forma extensa superfície plana contínua, coberta por pedimentos, cuja padrão de drenagem dominante é o dendrítico-retangular, em vista de marcante controle estrutural obedecendo a orientação NE-SO. Para o interior tal superfície mostra-se intensamente dissecada, podendo-se observar a presença de testemunhos com topo plano e bordas ravinadas, sugerindo a presença de lateritos.

Compõe-se principalmente por lateritos e pedimentos.

3.3.2.51 - Unidades S_{24a,24b,24c,24d,,24e,24f}

Representam os sedimentos mais novos da região estudada, uma vez que capeiam as outras unidades; no entanto, cada uma tendo elementos radargráficos bem peculiares. Deste modo, tais unidades constituem tanto sedimentos eluviais, coluviais, aluviais, como também dunas. Ademais, uma feição geológica bem marcante composta por sedimentos desta unidade é retratada pelo delta do rio Parnaíba, conforme pode ser atestado na Figura 2.19.

A unidade S_{24a} compreende sedimentos sob a forma de aluviões, sendo dispostos ao longo das principais drenagens. A textura varia de lisa a muito fina e o tom de cinza a cinza claro.

A unidade S_{24b} constitui-se por eluviões, disposto essencialmente na porção norte da sinéclise, sob a forma de pequenas manchas. Na imagem RVL exibe textura lisa e tom cinza a cinza escuro, com ausência de canais de drenagem, sugerindo tratar-se de zonas permo-porosas de constituição psamítica.

A unidade S_{24c} mostra ampla distribuição na região estudada, tanto em seu embasamento e principalmente na cobertura. Constituem superfícies planas, dispostas geralmente nas mais baixas cotas altimétricas. Tem como característica principal a textura lisa e o tom variando de cinza a cinza escuro. Considerando-se que muitas vezes ocupa o sopé de elevações ou então zonas planas de grande extensão com ausência de canais de drenagem, admite-se que pode representar zonas de eluviões e/ou coluviões de constituição principalmente de psamitos e ruditos.

A unidade S_{24d} dispõe-se exclusivamente na porção norte da sinéclise, com elementos radargráficos bem típicos. A textura é fina a muito-fina, com ausência de canais de drenagem,

embora se observe a presença esporádica de lagos. Em verdade, tal unidade retrata a presença de dunas, em que o tipo barcana é o mais freqüente, com sua forma em meia-lua crescente.

A unidade S_{24e} ocorre essencialmente na faixa costeira da região estudada e constitui uma unidade com características radargráficas bem particulares. Exibe textura variando de lisa a muito fina e tonalidade cinza claro. Em termos geomorfológicos representa **rias**, cuja tonalidade cinza claro evidenciada na imagem RVL é devido a forte retrodifusão das ondas de radar na vegetação de mangue.

A unidade S_{24f} ocorre na porção norte da sinéclise e se assemelha a unidade S_{24b} , em vista de sua textura lisa e distribuição espacial em pequenas manchas. No entanto, a tonalidade é cinza escuro a preto, devendo corresponder a zonas eluviais de constituição principalmente pelítica.

3.4 - ARCABOUÇO ESTRUTURAL

3.4.1 - Introdução

As imagens de Radar de Visada Lateral (RVL), de uma maneira geral, fornecem ao radarintérprete uma excelente gama de informações estruturais, consequência natural da visada lateral do sensor Radar. Em vista disso, salta aos olhos o grande número de dados de cunho estrutural constantes do Mapa Radargeológico (Anexo A), e em razão disso apresenta-se no Anexo B, escala 1 : 2 000 000, uma síntese dos principais sistemas de fraturas, falhas e dobras, aos níveis regional e local.

Como fruto dessa análise, dividiu-se a região estudada em dois domínios estruturais. O primeiro relacionado a seu embasamento e o outro a sua cobertura. O domínio estrutural relativo ao embasamento foi subdividido em nove subdomínios, cujos limites são coincidentes com as subprovíncias geológicas definidas na seção 3.2 deste capítulo, recebendo as mesmas denominações, como seja : Norte, Nordeste, És-Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste e Oeste. Para a cobertura utilizar-se-á a denominação Parnaíba.

Procedeu-se uma análise estatística da cada domínio estrutural com relação as feições lineares negativas - fraturas e falhas- utilizando-se para tal o Sistema SGI do INPE/ENGESPAÇO do Centro de Hidroclimatologia e Sensoriamento Remoto da SUDAM, através do algoritmo "**Análise de Lineamentos**" cujos resultados estão expostos na Figura 3.7, nos *Diagramas de Roseta*. Para cada domínio ou subdomínio estrutural utilizou-se um espaço angular de 10°, como também indica-se o número total de feições lineares analisadas e sua frequência relativa. Este procedimento foi de grande importância para uma melhor compreensão dos principais sistemas de fraturas, retratadas pelas feições lineares negativas, que atuaram na região estudada.

3.4.2 - Embasamento

3.4.2.1 - Norte

Localiza-se ao norte da Sinéclise e tipifica-se pela grande incidência de feições tabulares (zona de silicificação) e feições lineares positivas direcionadas principalmente segundo N40°E. Olhando-se este subdomínio como um todo, observa-se que seu quadrante ocidental é contrastante

em relação ao oriental ,uma vez que nestes estão praticamente ausentes as feições lineares e tabulares (Figura 3.8).

A presença de dobras , bem exemplificada por feições planares, com eixos aproximadamente meridianos, e estruturas grábenformes de igual orientação, refletem também a atuação de regime compressivo e distensivo, neste subdomínio.

A Figura 3.7.1 retrata a atuação de intenso fraturamento segundo $N50^{\circ}-60^{\circ}E$, secundariamente $N40^{\circ}E$, as quais mostram continuação nas imagens RVL, através de feições lineares negativas, para o interior da cobertura (Sinéclise do Parnaíba).

3.4.2.2 - Nordeste

Dispõe-se a nordeste da sinéclise, sendo marcante a atuação de zonas de cisalhamento transpressionais, assim como fraturas com orientação dominante segundo $N60^{\circ}E$, apresentando contudo grande densidade para $N40^{\circ}-50^{\circ}E$ (Figura 3.7.2). As dobras associadas exibem padrão em “Z”, indicativo de movimento direcional dextral. As zonas de cisalhamento são tipificadas por grande incidência de feições planares e lineares associadas, com mergulho sempre para o mesmo lado (sudeste).

Outra feição estrutural marcante é a presença de “grábens” e “horsts”, delineados por feições lineares negativas e marcantes quebras de relevo, orientadas segundo NE-SO a ENE-OSO.

3.4.2.3 -És-Nordeste

Expõe-se no embasamento, disposto a és-nordeste da sinéclise, podendo ser subdividido em dois subdomínios: um ao norte e outro a sul, tendo a estrutura grábenforme que assoma em sua porção mediana como referência. Ao norte domina uma foliação (feições lineares positivas) de orientação meridiana em metassedimentos, contudo marcada por intenso fraturamento N40-60°E (Figura 3.7.3). A sul, a estruturação mais relevante é o sigmóide da região de Pio IX (PI), relativa a uma zona de cisalhamento dextral, conhecida na literatura como Lineamento Paraíba (GOMES et al., 1981). Nesta porção as fraturas dominantes orientam-se segundo N40-60°E, embora as feições mais marcantes, e que desenham o citado sigmóide, sejam feições lineares positivas.

Feições lineares negativas, orientadas segundo NE-SO, assim como uma estrutura grábenforme de orientação E-O, com feições lineares positivas, se projetam para o interior da cobertura (Sinéclise do Parnaíba).

3.4.2.4 - Leste

Localiza-se a leste da sinéclise e constitui um dos mais belos exemplos de cinturão de cisalhamento exibido em imagens RVL, cujos limites são essencialmente tectônicos: lineamento Paraíba, a norte, e lineamento Pernambuco, a sul (GOMES et al., 1981).

As falhas e fraturas orientam-se segundo E-O a NE-SO, com grande incidência de feições lineares positivas e negativas, compondo segmentos anastomosados (Figura 3.5). Analisando-se a Figura 3.7.5 observa-se uma maior densidade de feições lineares segundo N50-70°E, ao passo que

as orientações N80-90°E e N80-90°O não são bem alcandoradas no sensor Radar ,porquanto de seu posicionamento quase ortogonal a linha de vôo N-S, do sistema da GEMS. Ademais, as feições lineares negativas orientadas E-O são mascaradas, para essa linha de vôo.

Capeando discordantemente o embasamento deste subdomínio assomam sedimentos relativos a Bacia do Araripe, provavelmente do tipo afastamento, por reativação das falhas dispostas segundo E-O a ENE-OSO (LIMA, 1991).

3.4.2.5 - Sudeste

Situa-se a sudeste da sinéclise e constitui outro exemplo modelo de cinturão de cisalhamento dominado por falhas de empurrão com vergência para sul e movimento direcionais dextrais,. À semelhança do que foi descrito no subdomínio Leste, dominam feições lineares positivas e negativas, e planares, emprestando às imagens RVL forte orientação.

As dobras que assomam na serra dos Três Irmãos, representam um caso bem clássico de antiformais e sinformais com flanco invertido, bem tipificado por feições planares invertidas. com eixo N-S.

3.4.2.6 - Sul

Dispõe-se ao sul da Sinéclise do Parnaíba e constitui um bom exemplo da interseção de cinturões de cisalhamento. Um de orientação NE-SO e outro de posicionamento meridiano.

O cinturão de orientação NE-SO patenteia-se pela grande incidência de feições lineares positivas compondo sigmóides e feições planares com mergulho médio a fraco, característico de zona de cisalhamento de empurrão com vergência para sul, associada a movimentos direcionais

Por sua vez, o cinturão de orientação meridiana tem como característica principal a presença de cristas de topo agudo e feições planares com mergulho médio a forte, assim como feições lineares positivas compondo estruturas sigmoidais. Algumas feições planares estão dispostas de forma (invertida).

Como resultado da interação desses cinturões de cisalhamento, expõe-se uma mega figura de interferência tipo Laço, na serra do Boqueirão (Figura 3.11). Aliás, tal estruturação foi também sugerida por SÁ & HACKSPACHER (1980).

Analisando-se a Figura 3.7.7 pode-se observar a dominância das feições lineares negativas para NO e NE, enquanto que a orientação meridiana está melhor realçada nas imagens RVL pelas feições lineares positivas e tabulares.

3.4.2.7 - Sudoeste

Este domínio localiza-se no quadrante sudoeste da sinéclise, sendo caracterizado pela grande incidência de feições planares, lineares e tabulares, compondo desenhos anastomosados típicos de cinturões de cisalhamento.

Chama-se atenção para a estruturação disposta na serra da Natividade (Figura 3.10), a qual sugere tratar-se de uma “*estrutura em flor*”, em vista da presença de feições planares com mergulho fraco a médio, convergentes, e sua limitação por zonas de cisalhamento direcionais. Por

sua vez, é bem marcante a presença de regime distensivo afetando a Chapada das Mangabeiras com orientação em torno da direção N-S, bem realçado pela quebra de relevo.

Merece citação a penetração para o interior da sinéclise das falhas e fraturas dispostos neste subdomínio estrutural.

3.4.2.8 - Oeste

Este subdomínio estrutural situa-se a oeste da sinéclise e exemplifica a atuação de zonas de cisalhamento compressionais, com baixo a alto ângulo, de orientação preferencialmente meridiana, tipificado pelas marcantes quebra de relevo e grande incidência de feições planares, lineares e tabulares.

Fato marcante é que tal orientação influenciou sobremaneira na formação de falhas distensivas de igual orientação no interior da sinéclise, como sítios de tectônica ressurgente no decorrer do tempo geológico. Pôr conseguinte, é bastante comum a presença de estruturas grábenformes, tanto no subdomínio estrutural oeste, como no interior da sinéclise.

Estruturas circulares relativas a intrusão de corpos ígneos e dobras dispõem-se na zona lindeira com a Sinéclise do Parnaíba.

Analisando-se a Figura 3.7.9 pode-se observar uma grande incidência de feições lineares negativas dispostas para N20-40°O e N40-60°E. As estruturas meridianas estão melhor realçadas por feições lineares positivas, em decorrência disso não apresentam alta frequência no *diagrama de roseta* da Figura 3.9.9, que se baseia em feições lineares negativas.

3.4.3 - Cobertura

3.4.3.1. - Parnaíba

A Sinéclise do Parnaíba constitui uma bacia intercratônica com cerca de 600 000 km² e, malgrado representar uma bacia não invertida, e de não ter sido afetada por eventos tectônicos de grande significado, mostra em seu seio pelo menos três subdomínios estruturais, os quais dispõem-se ao Norte (N), a Sul (S) e a Oeste (O). Os limites entre os domínios Norte e Sul é feito através do Lineamento Transbrasiliano, ao passo que com o domínio Oeste a zona de contato é condicionada pelo Lineamento Rio Vermelho (Anexo A).

O domínio Norte (N.1 + N.2 + N.3) consiste essencialmente de sedimentos, e secundariamente vulcânicas e plutônicas básicas, as quais são cortados por lineamentos orientados segundo NE-SO (Rio Uraim, Jacundá-Santa Helena, Pio XII, Pirapemas e Tianguá-Carolina) e NO-SE (Picos-Santa Inês, São Felix do Piauí e Piripiri), arcos (Tocantins, Ferrer-Urbano Santos e Xambioá-Teresina) e uma grande incidência de estruturas locais, com destaque para as morfoestruturas das regiões da serra das Alpercatas, Loreto, Presidente Dutra e Rio Capim.

Este subdomínio divide-se em três setores: N.1, N.2 e N.3. O setor N.1 envolve essencialmente sedimentos com dominância da orientação das feições lineares negativas segundo N30-50°E relativa aos lineamentos Rio Uraim e Jacundá-Santa Helena (Figura 3.7.10). O setor N.2 também encerra sedimentos e mostra uma dominância de feições lineares negativas segundo N40-60°E, as quais estão relacionadas ao lineamento Pirapemas e Pio XII (Figura 3.7.11). O setor N.3 mostra uma dominância de feições lineares negativas segundo N40°-60°E, o qual é relativo ao

Lineamento Tianguá-Carolina, ao passo que existe outra dominância consoante $N20^{\circ}-40^{\circ}O$ relativa aos lineamentos Picos-Santa Inês, São Félix do Piauí e Piripiri. A Figura 3.7.18 constitui a soma das feições lineares negativas nos setores N.1, N.2 e N.3.

O domínio Sul (S.1 + S.2 + S.3) envolve principalmente sedimentos e secundariamente, vulcânicas e plutônicas básicas. Mostra-se mais rico em estruturas regionais com destaque para o Lineamento Transbrasiliano e suas ramificações (Riacho do Mel, Altos, Floriano, Itaueiras e São Inácio do Piauí) e para o Lineamento Senador Pompeu, ambos com orientação preferencial NE-SO, como também os de orientação NO-SE (Picos-Santa Inês, São Félix do Piauí e Piripiri). Neste domínio as estruturas locais são bem marcantes, com destaque para àquelas de Balsas, Amarante do Piauí, Pedro II e Uíça, e estruturas circulares de São Miguel do Tapuio, Santa Marta, Boa Vista, Picos e Canindé. Aliás, merece ressaltar a presença dos kimberlitos de Redondão e Apicuns, controlados estruturalmente por ramificações do Lineamento Transbrasiliano. O Setor S.1 caracteriza perfeitamente uma ramificação à semelhança de duplexes direcionais com orientação NO-SE, os quais estão cortados por falhas distensivas segundo NO-SE. O diagrama de roseta mostra (Figura 3.7.13) a incidência de feições lineares negativas em tais direções. De igual modo a Figura 3.7.14 e 3.7.15 exemplifica para os setores S.2 e S.3 uma dominância similar, as quais relacionam-se aos lineamentos Floriano, Itaueiras e São Inácio do Piauí no que tange aos quadrantes $N30^{\circ}-60^{\circ}E$ e $N20^{\circ}-40^{\circ}O$. As Figuras 3.7.19 e 3.7.20 retratam a junção dos setores S.1 e S.2, e S.1, S.2 e S.3, respectivamente.

O domínio Oeste (O.1+ O.2) envolve principalmente sedimentos com dominância de feições lineares negativas para $N20^{\circ}-40^{\circ}E$ e secundariamente $N0^{\circ}-30^{\circ}O$, relativos ao Lineamento Rio Vermelho de caráter essencialmente distensivo, com componentes direcionais. Este domínio

sofre grande influência do Lineamento Transbrasiliano de orientação NE-SO, que o corta em sua porção mediana. Neste domínio é freqüente o desenvolvimento de “horsts” e “grábens”, como também a presença de astroblemas, e estruturas circulares, muitas das quais relativas a ação de falhamentos e outras de origem indefinida. A Figura 3.7.21 constitui a soma das feições lineares negativas expostas nos setores O.1 e O.2.

Na Figura 3.7.22 apresenta-se um diagrama de roseta das feições lineares negativas do Domínio Estrutural Parnaíba, observando-se uma dominância para o quadrante NE, em especial $N40^{\circ}-60^{\circ}E$. Por sua vez, o quadrante NO também exhibe certa densidade de freqüência, com destaque para $N30^{\circ}-50^{\circ}O$. As orientações N-S e E-O são pouco freqüentes.

3.4.3.1.1 - Estruturas Regionais

a - Arco do Tocantins

O Arco do Tocantins dispõe-se no quadrante nordeste da região estudada com orientação ao redor de $N40^{\circ}E$, separando a Sinéclise do Parnaíba da Fossa do Marajó. Este arco desenvolveu-se no Mesozóico interrompendo a ligação com a Sinéclise do Amazonas (AGUIAR, 1971).

Esta estrutura não tem ressaltos morfológicos nas imagens RVL, uma vez que se tipifica pela presença de extensos chapadões de idade terciário-quaternária, contudo, em sua parte central, delineada por uma zona mais dissecada, dispõe-se a antiforma do Rio Capim e o Domo do Igarapé Cupijó e nas extremidades norte e sul por descontinuidades NE-SO, aqui denominados de lineamentos Rio Uraim e Jacundá-Santa Helena, respectivamente.

Tal arco interliga-se a NE com o embasamento da região do rio Gurupi e a SO com o embasamento da região dos rios Araguaia-Tocantins.

b- Arco Ferrer - Urbano Santos

O Arco Ferrer-Urbano Santos localiza-se na porção norte da região estudada, com orientação em torno de ONO-ESE, não exibindo uma feição morfológica marcante que denote sua presença na imagem RVL. No entanto, na região de Rosário (MA), a ocorrência de granitóides (γ_1), com elementos radargráficos distintos das rochas sedimentares circunjacentes, constitui a principal indicação. Em parte a orientação do Arco Ferrer-Urbano Santos pode ser inferida a partir da ligação das exposições do embasamento de Rosário com àquelas da região do rio Gurupi. Para leste de Rosário a única feição marcante é o Lineamento Pirapemas, que o trunca obliquamente.

Este arco mostra-se transectado a noroeste pelo Lineamento Jacundá-Santa Helena e a sudeste pelos lineamentos Pio XII e Pirapemas, todos de caráter dextral.

c- Arco Xambioá- Teresina

Este arco foi definido por AGUIAR (1971), o qual separaria os dois principais eixos de subsidência da sinéclise, tendo sido ativo até o Permiano. Dispõe-se no flanco ocidental da Sinéclise do Parnaíba com orientação aproximadamente E-O, passando pelas cidades de Xambioá no Estado do Tocantins, Pôrto Franco, Estreito e São Domingos no estado do Maranhão, e Teresina no Estado do Piauí.

ANDRADE (1983) chama a atenção para a inflexão dos rios Araguaia e Tocantins- região do "Bico de Papagaio" , zona lindeira dos estados do Pará, Maranhão e Tocantins - com convexidade para leste, indicativo da presença de um alto estrutural (Modelo de Lattman), admitindo deste modo a extensão do Arco Xambioá-Teresina em direção a região do Projeto Carajás. Ademais, tal estrutura já havia sido interpretada por CUNHA (1982b), com base em imagens de satélite (Landsat), no flanco oeste da Sinéclise do Parnaíba.

O principal reflexo morfológico deste arco em rios de ordem elevada sugere a reativação desta estrutura em tempos geológicos mais recentes. Deste modo, tal estrutura tem reflexo nas imagens RVL.

d - Lineamento Rio Uraim

Expõe-se no quadrante noroeste da sinéclise com extensão de cerca 360 km na área estudada, e orientação N50°E. O rio Uraim é afluente pela margem esquerda do rio Gurupi e caracteriza-se pela retilinearidade de grande parte de seu trecho, o qual é controlado por este lineamento.

Tipifica-se por feições lineares negativas, cortando os chapadões e áreas dissecadas formados por sedimentos.

Este lineamento limita a fração ocidental da antiforma do Rio Capim.

e - Lineamento Jacundá-Santa Helena

Localiza-se no quadrante noroeste da sinéclise, com cerca de 600 km de extensão na área estudada, passando pelas cidades de Jacundá (PA) e Santa Helena (MA), e orientação aproximada de N50°E. Dispõe-se paralelamente ao Lineamento Rio Uraim e exibe maior ressaltamento morfológico do que aquele, quer através de feições lineares negativas, quer positivas, nos chapadões e dissecados que assomam na área, em especial em drenagens de 3º e 4º ordens. É interpretado como de caráter dextral, consoante trabalhos de campo desenvolvidos por CUNHA & GÓES (1989).

f - Lineamento Pio XII

CUNHA & GÓES (1989) nos estudos realizados na porção norte da sinéclise envolvendo trabalhos de campo e a interpretação de imagens Landsat e Radar, estabeleceram para a região em lide uma interpretação geométrica e cinemática, com a definição de falhas e sistemas de dobras. Dentre as falhas, a de maior expressão foi denominada de Pio XII, em alusão a sede do município maranhense Pio XII, a qual mostra orientação similar as discontinuidades que assomam nesta região, evidenciadas em imagens RVL. Em vista do exposto, e para evitar a profusão de nomes, prefere-se denominar este lineamento de Pio XII.

Mostra orientação N40-50°E, com cerca de 700 km de extensão, sendo de caráter dextral (CUNHA & GÓES, 1989). Estes autores fazem referência a presença de falha de empurrão de alto ângulo afetando rochas da Formação Itapecuru, aqui correspondente a unidade radargeológica S_{16a}.

Caracteriza-se morfologicamente pelos trechos retilíneos dos rios Mearim, Pindaré e Grajaú, que são os de ordem mais elevada, ao longo do lineamento, assim como grande incidência de feições lineares negativas nos terrenos dissecados das unidades de índices S_{15} até S_{22} . Está bem delineado por lineamentos magnéticos conforme interpretação de NUNES (1992), indicada no Anexo B. Vale ressaltar que os granitóides de Rosário (γ_1), mostram-se orientados concordantemente a este lineamento.

g - Lineamento Pirapemas

Este lineamento dispõe-se com orientação principal $N45^{\circ}-50^{\circ}E$, e secundária $N70^{\circ}-80^{\circ}E$, passando pelas cidades de Pirapemas e Estreito, no Estado do Maranhão. Foi originalmente definido por RODRIGUES et al. (1986), a sul da bacia de Barreirinhas, norte maranhense, o qual é aqui estendido para o âmbito da sinéclise, em virtude de sua relevância nas imagens RVL para a região de Estreito-Imperatriz (MA)

RODRIGUES et al. (1986) destacaram o Lineamento Pirapemas como o divisor de duas áreas de padrões de drenagem significativamente distintos. Por sua vez, dados geológicos e geofísicos sugerem o relacionamento deste lineamento com episódios tectônicos que teriam influenciado na sedimentação e estruturação da bacia de Barreirinhas, de idade meso-cenozóica.

Suas principais características morfológicas são feições lineares negativas nos dissecados e chapadões que assomam na região, como também pela retilinearidade dos rios de ordem mais elevada na região em questão. Mostra-se concordante com os lineamentos magnéticos interpretados por NUNES (1992), conforme pode ser observado no Anexo B.

Na região de Presidente Vargas-Urbano Santos, nordeste maranhense, é bem marcante a presença de feições tabulares, com ressaltos topográficos e a presença de lagoas, em sedimentos quaternários, indicativos de falhas de gravidade de ativação recente (neotectônica) (Figura 3.11).

BARTORELLI & PIRES NETO (1991) reconheceram entre Imperatriz e Estreito, no Estado do Maranhão, uma sucessão de blocos alinhados segundo a direção ENE, associados a conspícuas lineações e falhas com movimento sinistral.

Segundo interpretação de HASUI et al. (1991), para a Sinéclise do Parnaíba, entre o Ordoviciano e Jurássico as falhas transcorrentes seriam sinistrais, frente a distensão regional então vigente: NO-SE. A partir do Jurássico até nossos dias os movimentos seriam dextrais. Deste modo extrapola-se para o Lineamento Pirapemas tal interpretação.

h - Lineamento Tianguá-Carolina

Com orientação N40-50°E e extensão de 1 000 km na Sinéclise do Parnaíba, foi originalmente definido por LIMA (1992a), o qual o interpretou como de caráter dextral. Está bem identificado na região de Carolina (MA), cuja feição morfológica mais relevante é sob a forma de chapadões orientados para NE-SO a ENE-OSO tanto de psamitos (S_{12}) como de vulcânicas básicas (β_2) (Figura 3.12). Prolonga-se para NE sob a forma de feições lineares negativas e feições tabulares, passando pela serra das Alpercatas (Figura 3.13) até atingir a região de Tianguá (CE), no limite da sinéclise com o embasamento. Mostra-se cortado, neste último trecho, pelos lineamentos Picos-Santa Inês e Piripiri de orientação NO-SE.

CUNHA & CARNEIRO (1972) interpretaram a presença de mesetas alongadas dispostas entre Carolina e Estreito no Estado do Maranhão, como herdada de feições eólicas ("seif dunes"). Tais mesetas são formadas por sedimentos da Formação Sambaíba, na base, e vulcânicas básicas mesozóicas capeando-as. Por ocasião das extrusões basálticas, estas preenchem as depressões existentes, provocando na superfície atual uma inversão topográfica, em vista dos basaltos serem mais resistentes. No entanto, pela interpretação aqui colocada tal orientação está associada ao Lineamento Tianguá-Carolina.

Ao longo de seu trajeto importantes estruturas ocorrem, sob a forma de dobras (Domos de Carolina, Sinformal e Antiforma da Serra das Alpercatas, como também a Antiforma de Loreto) e possível gráben sigmoidal na região de Tianguá.

BARTORELLI & PIRES NETO (1991) fazem referência a movimentos transcorrentes com orientação E-O, na região entre Estreito e Carolina no Estado do Maranhão.

i - Lineamento Transbrasiliano

Este lineamento foi primeiramente definido por SCHOBENHAUS FILHO et al. (1975), consoante dados de campo e geofísicos (aeromagnetometria), no âmbito da Folha SD.22 - Goiás, o qual cortaria o embasamento da Sinéclise do Parnaíba indo atingir o Graben de Jaibaras, já na Folha SA.24 - Fortaleza. Tal estruturação, com cerca de 2 700 km de extensão em território brasileiro, penetra em terrenos do Paraguai e Argentina, como também prolonga-se para o continente africano. O mesmo foi denominado de Transbrasiliano, que, apesar de ser impróprio, já está enraizado na literatura geológica brasileira. FORTES (1992) denomina tal lineamento de

Tianguá - Pantanal, em alusão a sua grande extensão até terrenos do Pantanal Matogrossense e admite sua movimentação direcional sinistral. CORDANI et al. (1984) destacam a presença de uma faixa bem estruturada, que corta o embasamento da Sinéclise do Parnaíba.

De qualquer sorte, a despeito de tal lineamento ser muito bem rastreado por dados geofísicos (NUNES, 1992), vide Anexo B, contudo os trabalhos de campo até então realizados de caráter geológico regional (NUNES et al., 1973a; 1973b; 1973c; LIMA & LEITE, 1978; FORTES, 1992; MONTES et al., prelo) não expuseram a delineação esboçada no Anexo B, obtidas essencialmente através imagens RVL, com grande riqueza de morfoestruturas.

Um perfil de NE para SO ao longo desse lineamento tem-se as seguintes estruturas:

- a partir do gráben de Jaibaras, no âmbito do Cinturão de Cisalhamento Noroeste do Ceará, onde tem direção N40°E, adentra na sinéclise com mesma orientação, no entanto, com o desenvolvimento de “horsts” e “grábens” (gráben do rio Capivara), sendo limitado pela Falha de Guaraciaba. (NUNES et al., 1973c). Aliás, neste trecho, região de Pedro II (Serra das Cangalhas), como resultado da ação do Lineamento Transbrasiliano assoma um sistema de estruturas dobradas, devido a ação desse lineamento;
- neste trecho bifurca-se para sudoeste (Lineamento Riacho do Mel) e oeste-sudoeste (Lineamento Altos);
- na região de Altos (PI) este lineamento (Transbrasiliano) é interceptado pelos lineamentos São Felix do Piauí e Picos-Santa Inês de orientação NO-SE, como também o Lineamento Transbrasiliano está representado por uma outra bifurcação : Lineamento Altos (Figuras 3.14 e 3.15);

- na região de Amarante do Piauí assomam estruturas circulares relativas a exposição de vulcânicas e plutônicas básicas (β_2) (Figura 3.16);

- na altura de Benedito Leite (PI) tal lineamento sofre marcante inflexão para sudoeste dividindo-se pelo menos em três segmentos, parecendo a representar duplexes transcorrentes, voltando a manter a orientação N50-55°E na altura de Lizarda (TO), onde é interceptado pelo Lineamento Rio Vermelho de orientação aproximadamente meridiana;

- de Lizarda até o gráben de Monte do Carmo o Lineamento Transbrasiliano exhibe a clássica estrutura "rabo de cavalo".

Seus rasgos morfológicos mais marcantes são a presença de feições lineares negativas (fraturas), especialmente ao longo dos rios de maior ordem, em especial o rio Parnaíba e seus principais afluentes.

De um modo geral, no âmbito da Sinéclise do Parnaíba o Lineamento Transbrasiliano é definido por falhas de orientação NE-SO, cortando tanto as seqüências paleozóicas como as mesozóicas. Deste modo, tem-se o Lineamento Sobral-Pedro II (NASCIMENTO et al., 1981) no embasamento (Cinturão de Cisalhamento Noreste do Ceará de ABREU et al., 1988), passando no interior da sinéclise para a Falha de Guaraciaba em seu flanco nordeste. Para sudoeste assomam as falhas Ponte Alta do Norte e de Lizarda. Na região centro-leste, nas cercanias de Floriano (PI) tem-se as falhas do Descanso e do São Francisco (CUNHA, 1986). Na região do Alto Parnaíba foram definidas a Falha do Bote (CUNHA, op. cit.) e a Falha do Escondido (NORTHFLEET & NEVES, 1966).

COSTA & HASUI (1988) advogam, consoante dados de campo e geocronológicos, para a região de Pôrto Nacional (GO), porção oeste do embasamento, domínios do Lineamento Transbrasiliano, embasamento sudoeste da sinéclise, uma tectônica transcorrente sinistral dúctil

relativa ao Arqueano-Proterozóico Inferior. De igual modo, associam um binário dextral para o Proterozóico Médio e regime tectônico distensivo para o meso-cenozóico. Por sua vez, ABREU et al., 1988 fazem referência a falhas transcorrentes sinistrais no Eopaleozóico, responsável pela fraca inversão estrutural da Bacia de Jaibaras, domínio do Lineamento Transbrasiliano, Província Noroeste do Ceará, embasamento nordeste da sinéclise.

As feições evidenciadas em imagens RVL demonstram que o Lineamento Transbrasiliano tem-se mantido ativo até o presente momento, como um exemplo típico de neotectônica, uma vez que uma série de eventos estão ligados as suas descontinuidades influenciando sobremaneira em sua morfologia atual, como visto nas linhas acima.

j - Lineamentos Floriano, Itaueiras e São Inácio do Piauí

Tais lineamentos orientam-se aproximadamente segundo N40-50°E e situam-se no quadrante SE da Sinéclise do Parnaíba com extensão de 150 a 400 km. Dispõem-se paralelamente ao Lineamento Transbrasiliano, e a eles se associam falhas de gravidade e estruturas circulares de origem intrusiva (Estrutura do Uíca). Fazendo uma comparação com o Diagrama de Riedel devem corresponder às zonas Y ou D.

l - Lineamento Senador Pompeu

É assim denominado por se constituir uma extensão da Falha Senador Pompeu (GOMES et al., 1981) no embasamento da sinéclise, porção és-sudeste do embasamento Este lineamento

mostra-se bem marcado na imagem RVL através de feições lineares negativas (drenagens de 3º e 4º ordens), como também é perfeitamente identificado nos mapas aeromagnéticos (Anexo B).

m- Lineamento Piripiri

Dispõe-se no quadrante nordeste da sinéclise, com orientação N20°O e extensão em torno de 240 km. Constitui uma bifurcação do Lineamento Transbrasiliano, provável zona X do Diagrama de Riedel, quicá de caráter sinistral.

n - Lineamento Riacho do Mel

Orienta-se segundo N10°E no quadrante nordeste da sinéclise e extensão em torno de 220 km, constituindo uma bifurcação do Lineamento Transbrasiliano. Deve representar a zona T, fraturas de partição ou tensão, no Diagrama de Riedel.

Seu ressaltó morfológico é bem marcante, tipificando-se pela presença de cristas bem orientadas, ou então, sob a forma de feições tabulares.

Admite-se que a marcante quebra de relevo com deslocamento de feições tabulares relacione-se a falhas de gravidade com movimentação oblíqua, onde o componente direcional teria movimentação dextral e a extensional com abatimento para SSE.

o - Lineamento Picos-Santa Inês

Este lineamento foi primeiramente definido por CUNHA (1986), o qual orienta-se segundo NO-SE, refletindo na morfologia contemporânea, uma série de alinhamentos morfológicos dispostos para noroeste, a partir da Falha do Rio Canindé que, com cerca de 160 km de extensão, e 200 a 300 m de rejeito, condiciona o curso médio do rio do mesmo nome e foi definida com base na interpretação de mosaicos radargramétricos e evidências de campo (Nunes et al., apud CUNHA, 1986).

Este lineamento se estende por cerca de 900 km no âmbito da Sinéclise do Parnaíba, com orientação preferencial N40°E, sendo caracterizado ao longo de seu trajeto, principalmente por feições lineares negativas, condicionando inclusive rios de ordem elevada, a exemplo do rio Canindé, afluente da margem direita do rio Parnaíba, e secundariamente por feições lineares positivas e feições tabulares. Algumas morfoestruturas estão associadas a esta megaestrutura, destacando-se as estruturas circulares do rio Canindé (Figura 3.17) e as de Picos.

O Lineamento Picos-Santa Inês parece constituir uma extensão para a sinéclise das falhas e zonas de cisalhamento que assomam na porção norte do embasamento da sinéclise, região do rio Gurupi, com especial destaque para a Falha Tentugal, de empurrão e com movimento sinistral (COSTA et al., 1988), conforme enfatizado por CUNHA (1986). O mesmo é interceptado na região de Presidente Dutra (MA) pelo Lineamento Tianguá-Carolina- e, em Amarante (PI), pelo Lineamento Transbrasiliano, posicionados ortogonalmente a ambos.

Esta estruturação pode estar relacionada a movimentos direcionais sinistrais e provavelmente compressivos em relação ao Mesozóico, caso se confirme, em superfície, as falhas

de empurrão da região de Presidente Dutra (PI), indicadas pela sísmica em subsuperfície (GÓES et al., 1990).

Em trabalhos de campo realizados na estrada que interliga Porto a Mathias Olímpio (PI), a 20 km de Pôrto, assomam litotipos da unidade radargeológica de índice S_8 expondo flexuras com eixo orientado segundo N-S, com controle por falhas de gravidade. De igual modo, no trecho Mathias Olímpio-Luzilândia (PI), a UR acima referida mostra-se cortada por falhas de gravidade, com orientação NNO-SSE. Por sua vez, na rodovia BR-316, que liga Picos a Expedito Lopes, nas proximidades desta cidade assomam dobras na unidade de índice S_6 , com estilo desarmônico, sendo interpretado como relativo a "slumping". De igual modo, nas cercanias de Oeiras de Piauí, no trecho para Floriano ocorrem falhas de gravidade cortando tal unidade radargeológica.

p - Lineamento São Félix do Piauí

Esta estrutura lineagênica dispõe-se a leste do Lineamento Picos-Santa Inês, com orientação aproximadamente paralela ao mesmo, cerca de $N40^{\circ}-50^{\circ}E$, e extensão na sinéclise cerca de 500 km. Pode estar relacionada a movimentos direcionais sinistrais e compressivos, uma vez que na interseção com o Lineamento Altos são bem evidentes em imagens RVL, em José de Freitas (PI), a presença de dobras "en echelon" e dobras desarmônicas.

Tipifica-se na região de São Félix do Piauí por cristas simétricas de topo agudo chegando a atingir até 50 km de extensão, constituindo feições tabulares, representativas de zona de silicificação e bem provavelmente diques, resultados de reativações em tempos geológicos mais recentes.

Esta feição lineagênica é limitada a sul pelo Lineamento São Inácio do Piauí e ao norte pelo Lineamento Pirapemas.

q - Lineamento Alto Rio Moju

Dispõe-se no quadrante noroeste da área estudada, na região do Alto rio Moju, de orientação NO-SE, cortando a região do Arco do Tocantins e sendo transectado pelos lineamentos rio Uraim e Jacundá-Santa Helena de direção NE-SO.

Este lineamento mostra pequena extensão no âmbito da sinéclise, em torno de 140 km, contudo é bem provável que o mesmo se estenda até a região de Fortaleza dos Nogueiras e Balsas, no Estado do Maranhão, onde existem evidências de feições lineares negativas de igual orientação. Esta orientação está em consonância com um dos eixos deposicionais da sinéclise, definido como Lineamento Marajó-Parnaíba por GÓES et al. (1994).

r - Lineamento Rio Vermelho

A primeira referência a este lineamento deve-se a LIMA et al. (1990), destacando a grande incidência de falhas de gravidade de orientação meridiana. No entanto, posteriormente foi denominada de Lineamento Itacajá por LIMA (1992a), onde este autor destaca a presença do Arco de Itacajá, associado a tal lineamento.. Tendo em vista a prioridade de LIMA et al. (1990), adotar-

se-á a denominação de Lineamento Rio Vermelho, tendo como referencial o importante afluente da margem direita do rio Tocantins.

Dispõe-se na parte oriental da Sinéclise do Parnaíba, de orientação meridiana, com variações para NNE-SSO e NNO-SSE, com cerca de 600 km de extensão e 100 km de largura, indo desde o embasamento -porção oeste da sinéclise- até as cercanias da serra da Cangalha. Tipifica-se principalmente por falhas distensivas, com orientação preferencial N-S, aparecendo falhas direcionais de provável natureza transferente, com orientação NE-SO.

Retrata-se nas imagens RVL por uma sucessão de blocos altos e baixos, muitos dos quais com ressaltos morfológicos, a exemplo da porção ocidental da Chapada das Mangabeiras. Por sua vez, as feições lineares negativas estão alcandoradas nas drenagens de ordem elevada, em especial os rios Vermelho, Manoel Alves Grande e do Sono. Em sua parte mediana é transectado pelo Lineamento Transbrasiliano, de orientação NE-SO.

Uma certa incidência de estruturas locais se associam a este lineamento, algumas das quais de grande abrangência e pequena amplitude como a antiforma de Itacajá, Graben de Guaraí, ou então estruturas menores como o astroblema da serra da Cangalha e estruturas circulares de origem indefinida.

No trecho que interliga Pedro Afonso (TO) a Alto Parnaíba (PI), ainda em construção, em torno de 20 km de Pedro Afonso, tem-se bons exemplos de tectônica glacial que afetou a unidade de índice S_{6c} , os quais são seccionados por falhas de gravidade de orientação em torno de N-S. Tais estruturas foram descritas por COSTA et al. (1994), e não tem ressaltos na imagem RVL.

3.4.3.1.2 - Estruturas Locais

a - Antiforma do Rio Capim

Constitui um didático exemplo de anomalia de drenagem no rio Capim, no quadrante noroeste da área estudada, desenvolvida em sedimentos das unidades S_{17a} e S_{19a} . As formas dos elementos de drenagem, elíptica, assimétrica e radial conferem a esta morfoestrutura uma Intensidade de Estruturação forte e Fator de Confiabilidade de 71 a 90%, conforme Figura 2.51 do Capítulo 2 deste trabalho.

A presença de intrusivas ultramáficas (v_{1b}) a leste, no médio rio Moju, em trecho eivado de cachoeiras, como também a presença de feições lineares E-O, além de seu posicionamento no Arco do Tocantins, reforçam a interpretação de se constituir uma região objeto de movimentação tectônica recente.

b - Domo do Igarapé Cupijó

Representa um exemplo de estrutura dômica desenvolvida em sedimentos da unidade S_{18a} , quadrante noroeste da área estudada, presente no vale do igarapé Cupijó, afluente da margem direita do rio Capim, constituindo, em verdade, uma anomalia de drenagem, retratado pelos padrões anelar e radial. Os critérios de Forma de Elementos de Drenagem indicam uma Intensidade de Estruturação moderado, com Fator de Confiabilidade de 41 a 70%. Vide Figura 2.51.

c - Morfoestruturas da Região de Pedro II - Guaraciaba do Norte

Na zona de interseção do Lineamento Transbrasiliano com os lineamentos Riacho do Mel e Piripiri assomam um conjunto de dobras e falhas, envolvendo a UR S_{6a}.

As dobras que ocorrem na região de Pedro II são de pequena extensão., constituindo uma sucessão de antiformais e sinformais, enquanto que àquelas que ocorrem na região de Guaraciaba do Norte são de extensão quilométrica, porém de pequena amplitude. Nesta região pode-se destacar as estruturas antiformal e sinformal de Guaraciaba e o gráben do rio Capivara, as quais estão limitadas por prováveis falhas de gravidade devido o abrupto desnível topográfico, quiçá associado a movimentos direcionais.

As morfoestruturas da região em epígrafe são alcandoradas devido a grande incidência de feições planares e marcantes quebras de relevo, neste caso provavelmente relacionado a reativação de falhas antigas. Na região de Pedro II há uma grande incidência de feições tabulares de topo agudo indicativas de zona de silicificação, preenchendo zonas de falha, ou então com topo convexo sob a forma de diques básicos.

d - Morfoestruturas da Região de Teresina-José de Freitas

Na região dos municípios de Teresina e José de Freitas (PI) ocorre um conjunto de chapadões exibindo fraco mergulho, cuja parte central mostra-se erodida, indicativo de flexuras, à semelhança de estruturas sinformais e antiformais, o que aliás sóe a acontecer a sul de Teresina, sendo típico da unidade radargeológica S₁₀ (Figura 3.18).

LIMA et al. (1990) admitem que se tratam simplesmente de formas erosivas, no entanto, trabalhos de campo realizados por este autor na região, advoga, contudo, a atuação de regime compressivo, uma vez que na rodovia Teresina-Altos identificou-se a presença de dobras em chevron na unidade sobredita. Ademais, também existem indicações de movimento direcional sinistral no trecho Altos - Benditinos, bem evidenciado pela presença de cristas assimétricas com topo agudo na serra de São Pedro, com dobras " en echelon" dispostas a oeste, região de Matões (MA), e ainda reforça-se constituir em uma zona de interseção do Lineamento São Félix do Piauí (NO-SE) com o Lineamento Altos (NE-SO).

e - Morfoestruturas da Região de Parnarama

A norte e a sul da cidade de Parnarama, no Estado do Maranhão, porção centro-leste da área estudada, assomam duas estruturas antiformais com duplo caimento, em sedimentos das unidades S_9 e S_{10} , com feições planares bem desenvolvidas e marcantes quebra de relevo. Seus eixos orientam-se segundo NE-SO. Dispõem-se entre os lineamentos Transbrasiliano e Altos.

f - Morfoestrutura da região de Presidente Dutra

Dispõe-se ao longo do Lineamento Picos-Santa Inês, na porção central da área estudada, envolvendo a cidade de Presidente Dutra (MA), abarcando sedimentos das unidades S_{16} e S_{18a} .

Tipifica-se pela presença de feições lineares e planares e marcantes quebra de relevo separando as unidades acima referidas. É bastante factível que a esta morfoestrutura se associem falhas de empurrão de alto ângulo.

g - Antiforma de Barra do Corda

Na região da cidade de Barra do Corda (MA) expõe-se uma dobra antiformal de largura quilométrica e de pequena amplitude, elaborada em sedimentos da unidade S_{18a} com eixo orientado para NE-SO. A charneira mostra-se desventrada, exibindo a presença de feições planares em seu interior.

h- Estrutura Circular de São Miguel do Tapuio

Constitui um dos exemplos clássicos de estrutura circular, respaldado através dos padrões de drenagem anelar e circular, e grande incidência de feições lineares e tabulares. Exibe diâmetro em torno de 20 km de. Sua origem é admitida relacionar-se a intrusão, ou então a uma zona de impacto de meteorito (astroblema) (TORQUATO, 1981). Limita-se a leste por uma falha de gravidade, em vista da abrupta quebra de relevo acompanhado de significativa retilinearidade. Esta estrutura situa-se na faixa de ação do Lineamento Riacho do Mel. Para oeste interpretou-se duas outras estruturas circulares, cujas características radargráficas, como feições planares, lineares e tabulares, não são bem evidentes. Envolve a UR S_{6a} .

i - Morfoestruturas da Serra das Alpercatas

A serra das Alpercatas, Estado do Maranhão, disposta na porção centro-oeste da área estudada, sustenta duas dobras: uma sinformal e outra antiformal. Ambas com orientação ENE-OSO, largura e extensão quilométricas, porém de pequena amplitude e com duplo caimento, sendo edificada na unidades S_{12} e S_{13} , e β_2 envolvendo psamitos e vulcânicas básicas, respectivamente.

Tais estruturas são cortadas por fraturas orientadas segundo NO-SE e NE-SO e posicionam-se nos domínios do Lineamento Tianguá-Carolina.

j - Antiforma do Loreto

Esta estrutura foi descrita inicialmente por NUNES et al. (1973b), contudo na época a mesma foi contestada por técnicos da Petrobrás, negando sua existência, o que inclusive motivou a elaboração de perfis sísmicos pela citada estatal, cujos resultados são ainda restritos à Petrobrás.

Considerando a interpretação de imagem RVL e dados de campo, admite-se a existência de tal estrutura, como parte de um contexto mais amplo, como seja a interligada com as morfoestruturas da serra das Alpercatas, e seu condicionamento estrutural ao Lineamento Tianguá-Carolina.

As feições planares e padrão textura/tom radargráficos se constituíram em importantes parâmetros para sua definição. Observou-se, contudo, a ocorrência de feições tabulares de pequena amplitude na zona de contato das unidades S_{10} e S_{11} , provavelmente zonas ricas em sílex.

l - Morfoestruturas da região de Fortaleza dos Nogueiras

A oeste da serra das Alpercatas e a noroeste de Fortaleza dos Nogueiras (MA) assomam dobras, com eixo orientados N-S, de extensão hectométrica e pequena amplitude, envolvendo a UR S_{12} , sendo limitados por fraturas de orientação meridiana e NE-SO.

Para a definição dessas morfoestruturas foi marcante a utilização de feições planares, lineares e tabulares.

m - Morfoestruturas da região de Carolina

Nas cercanias de Carolina, mais precisamente a sul desta cidade maranhense, assomam duas estruturas circulares, aqui interpretadas como dômicas, em vista do padrão de drenagem anelar, suas feições planares e marcante quebra de relevo em sua porção central. Encerra as unidades S_9 e S_{10} .

n - Estrutura Circular de Riachão

Esta estrutura foi definida por NUNES et al. (1973b), a qual dispõe-se a sul da cidade de Riachão (MA), na porção centro-oeste da área estudada, com cerca de 8 km de diâmetro. A mesma chama a atenção do radarintérprete pela presença de texturas e tom radargráficos distintos em sua porção interna, em relação a porção externa. Ocorre em relevo fraco e situa-se nos domínios da unidade S_{10} .

o - Estrutura Circular de Macapá

Esta estrutura localiza-se ao norte de Balsas (MA), sendo que a mesma foi definida em trabalhos de campo realizados por alunos de graduação da UFPA, a qual foi denominada informalmente de Macapá.

Tal estrutura apresenta marcante ressaltos nas imagens RVL, com a presença de feições lineares positivas dispostas de forma circular, assomando no seio de vulcânicas básicas da unidade β_2 , com sedimentos em sua parte central. Exibe um diâmetro em torno de 7 km.

p - Morfoestruturas da região de Amarante

Dispõe-se no médio rio Parnaíba, nas proximidades das cidades de Amarante (PI) e São Francisco (MA). Caracterizam-se pela presença de estruturas circulares de 5 a 7 km de diâmetro, domos e antifomas associadas a vulcânicas básicas da unidade β_2 , e sedimentos das unidades S_8 até S_{11} . Tais morfoestruturas se situam nos domínios de atuação do Lineamento Transbrasiliano de orientação NE-SO (Figura 3.16)

As estruturas circulares devem estar relacionadas ao magmatismo básico, ao passo que as dobras podem relacionar-se aos movimentos direcionais sinistrais do Lineamento Transbrasiliano.

q - Morfoestruturas da região do rio Canindé

Localizam-se na porção centro-leste da área estudada, às margens do rio Canindé, afluente da margem direita do rio Parnaíba.

Tipificam-se pela presença de feições planares dispostas de forma circular, sugerindo a presença de duas estruturas circulares; uma bem definida, com 10 km de diâmetro, e outra mal definida, com 7 km de diâmetro. A primeira bem caracterizada por feições planares e morfologia circular, e a outra apenas pela sua morfologia circular, não sendo possível identificar feições planares (Figura 3.16)

Tais estruturas situam-se no âmbito do Lineamento Picos-Santa Inês e limita-se pela Falha do Rio Canindé (NUNES et al. , 1973b). Abarca sedimentos das unidades S_{7a} e S_{8a} .

r- Estrutura Circular de Picos

Localiza-se na porção sul da Sinéclise do Parnaíba, a sul de Picos (PI). Apresenta um diâmetro com cerca de 8 km e tipifica-se pela presença de feições lineares positivas que lhe conferem a conformação circular.

Situa-se no âmbito da unidade S_{5a} , domínios do Lineamento Picos-Santa Inês, de orientação NO-SE, abrigando em seu interior três corpos kimberlíticos (GONZAGA & TOMPKINS, 1991).

s - Morfoestrutura do Uíca

Dispõe-se na bacia do rio Uíca, afluente do rio Itaueiras, pela margem esquerda, constituindo um didático exemplo de drenagem anelar, inclusive com canais elípticos de Forma de Elementos de Drenagem lhe conferindo uma Intensidade de Estruturação Muito Forte e Fator de Confiabilidade de 95% , como visto na Seção 6.2. do Capítulo 2 desta obra (Figura 2.55).

Situa-se em um dos principais alinhamentos magnéticos interpretados por NUNES (1992), parecendo, contudo, tratar-se de um corpo básico em subsuperfície. Esta estrutura está limitada a leste por um possível gráben com orientação aproximadamente meridiana, em que uma das falhas dispõe-se ao longo do rio Itaueiras, o qual exibe marcante retilinearidade.

Situa-se no âmbito da unidade radargeológica S_{23b}.

t - Morfoestruturas da região de Balsas (MA)

Na porção sudoeste de Balsas (MA), envolvendo os chapadões da serra do Gado Bravo, ocorre feição geomórfica relativa a escarpa de falha com o desenvolvimento de quebra de relevo abrupta (Falha de Balsas), correspondente a falha de gravidade oblíqua de componente direcional, com provável movimento sinistral (Figura 3.19).

Tal região está cortada por outras falhas de gravidade, dentre as quais a Falha Fazendo do Meio, (CUNHA et al., 1979) constituindo marcante baixo estrutural, tipificada por quebra de relevo, exibindo no bloco baixo a ocorrência de pedimentos e a presença de dobras , com eixos E-O,

relacionados a movimentos transcorrentes sinistrais. Envolve sedimentos das unidades S_{8a} , S_9 e S_{10} .

u - Estrutura Circular da Serra da Cangalha

Constitui uma das estruturas circulares mais conhecidas em território brasileiro, a qual foi detectada através dos trabalhos pioneiros realizados por geólogos da Petrobrás na Sinéclise do Parnaíba (.Figura 2.102).

BEATTY (1980) realizou estudos em seu interior e identificou estruturas de impacto típicas de um astroblema. No entanto, as informações obtidas em imagens RVL sugerem a existência de uma estrutura dômica, com a presença de feições planares divergentes e feições lineares circulares, ao invés daquilo que se poderia esperar de uma zona de impacto de meteorito cujos mergulhos das feições planares teriam que ser convergentes com movimentação para fora da estrutura (centrífuga).

Esta estrutura desenvolve-se no âmbito do Lineamento Rio Vermelho e nos domínios da Antiformal de Itacajá de extensão quilométrica e amplitude hectométrica, abarcando sedimentos das unidades S_{7a} , S_8 , S_9 e S_{10} . . Associada a mesma tem-se para oeste a presença de ampla estrutura antiformal e para leste de marcante feição linear negativa de forma circular com 3 km de diâmetro.

v - Antiforma de Itacajá

Localiza-se na porção oeste da Sinéclise do Parnaíba. Constitui uma ampla dobra, representando, em verdade uma zona de intumescência da sinéclise do Parnaíba, cujo ápice foi fragmentado por falhas distensivas, dentre as quais tem-se a Falha de Itacajá, dando lugar ao desenvolvimento de “horsts” e “grábens”.

Envolve essencialmente sedimentos das unidades S_{8a} , S_9 e S_{10} , cujo eixo orienta-se segundo N-S, com extensão quilométrica e amplitude hectométrica, sendo seccionada em sua parte mediana pelo Lineamento Transbrasiliano. A sul deste, exhibe falhamentos distensivos na zona lindeira com a Chapada das Mangabeiras.

x - Graben de Guaraí

Constitui uma estrutura grábenforme, localizada no flanco oeste da sinéclise, edificada em sedimentos das unidades de índice S_9 e S_{10} . Sua orientação é cerca de N-S e controla fortemente o percurso do rio Tocantins. Ademais, nesta região da sinéclise, é bem comum este tipo de estrutura, com reativações no decorrer do tempo geológico.

z - Estrutura Circular da Serra de Boa Vista

Dispõe-se na porção sudeste da sinéclise e foi definida por NUNES et al. (1973b) tendo por base seu padrão de drenagem perfeitamente anelar. Envolve essencialmente sedimentos da unidade S₉.

aa - Antiforma da Serra Bom Jesus de Gurgéia

Dispõe-se no flanco sudeste da sinéclise e foi delimitado com base em seu padrão de drenagem anelar. Situa-se no âmbito do Lineamento Senador Pompeu.

bb - Estrutura Circular de Santa Marta

Dispõe-se na porção sul da sinéclise e constitui um belo exemplo de estrutura circular, com o desenvolvimento de feições lineares positivas em seu interior, formada essencialmente por sedimentos da unidade S_{18b}. Os dados de campo levados a efeito nesta região não determinaram sua origem, inclusive com trabalhos de gravimetria realizados por LIMA & LEITE (1978). Limita-se provavelmente por falhas de gravidade, em vista da marcante quebra de relevo retilínea.

cc - Domo da Serra do Lajeado

Localiza-se na fração sudoeste da sinéclise e assoma em terrenos da UR S_{5c} . Foi delimitada com base na drenagem anular e feições lineares negativas circulares. Mostra um diâmetro de 5 km.

dd - Estrutura Circular do Rio Lajeado

Localiza-se no quadrante sudeste da sinéclise, nos domínios da terminação em "rabo de cavalo" de um dos segmentos do Lineamento Transbrasiliano, ao qual deve estar relacionado. Tipifica-se pela grande incidência de feições lineares positivas de conformação circular.

ee - Estrutura Circular do Rio Monte Santo

Dispõe-se no quadrante sudeste da sinéclise e foi delimitado tendo por base seu padrão de drenagem anelar. Situa-se nos domínios da UR S_{5c} .

ff- Estrutura Dômica de Palmeirante

Localiza-se na fração sudoeste da sinéclise e dispõe-se no Lineamento Transbrasiliano, nos domínios da terminação em "rabo de cavalo", em um dos segmentos desta estruturação. Caracteriza-se pela presença de feições planares e lineares.

Expõe-se na fracção sudoeste da sinéclise e tipifica-se pela grande incidência de feições lineares de conformação circular. Parece representar um reflexo do embasamento. Desenvolve-se em sedimentos da unidade S_{6c} .

3.5 -CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível comprovar a excelência das imagens RVL na interpretação radargeológica, quer seja na delineação de estruturas, quer seja na interpretação de litotipos, haja vista a definição de trinta e nove unidades radargeológicas, posicionadas espacial e temporalmente.

Os dados estruturais obtidos nas imagens RVL, foram, em parte, controlados no terreno através de trabalhos de campo e de forma genérica comparados com dados aeromagnéticos, cujos resultados são bastante convincentes. Vide Anexo B.

Fato muito importante é que foi possível delinear nas imagens RVL a continuação das discontinuidades do embasamento para a cobertura (Sinéclise do Parnaíba), o que ratifica a reativação das mesmas no decorrer do tempo geológico, em alguns casos podendo tratar-se de tectônica ressurgente, como exemplificado na Figura 3.11. Por outro lado, mostra a importância das imagens RVL na descoberta de estruturas (descontinuidades) que estão **inúmeras**, uma vez que com outros sensores da faixa do visível e do infravermelho (LANDSAT, SPOT) tal procedimento nem sempre é possível.

Em termos litológicos , as imagens RVL mostraram-se também muito eficazes, cujos resultados guardam consonância com a literatura geológica atual e com os trabalhos de campo. Ademais, merece destaque o contraste evidenciado pelas unidades que compõem o embasamento (metamórficas) com as da cobertura (sedimentos), e ainda com as intrusivas e extrusivas (ígneas) que assomam tanto na cobertura como no embasamento.

Sob o ponto de vista econômico procurou-se lançar as principais ocorrências , minas ou jazidas e garimpos, que ocorrem na área exemplo, as quais mesmo não tendo sido extraídas das imagens RVL serão de grande valia para futuros trabalhos, uma vez que seu condicionamento estrutural e/ou litológico poderá ser extrapolado para outras áreas como paradigma. Como exemplo, pode-se citar os níveis de aplanamento que existem na Sinéclise do Parnaíba, aos quais se associam depósitos de caulim e bauxita ; de igual modo as inúmeras estruturas delineadas neste domínio estrutural poderão se constituir sítios para seleção de perfis sísmicos com vistas a geologia do petróleo. No que tange ao embasamento, a identificação de zonas , cinturões de cisalhamento e a interseção de cinturões de cisalhamento como sítios favoráveis a localização de bens minerais , foram os principais resultados.

Em suma, pode-se dizer que a região estudada é composta por um embasamento dominado por cinturões de cisalhamento com orientações diversas, com prováveis pontos tríplices, os quais influenciaram sobremaneira na origem e desenvolvimento de sua cobertura: Sinéclise do Parnaíba e Bacia do Araripe.

A bacia do Araripe pode ter sua origem relacionada a sistemas transcorrentes (bacias “pull-apart”), ao passo que a Sinéclise do Parnaíba tem relação com a presença de estruturas grábenformes (aulacógenos ?), dispostos de forma radial em seu embasamento.

4 - CONCLUSÕES

As principais conclusões auferidas desta tese, envolvendo metodologia de interpretação radargeológica e sua aplicação, algumas das quais inéditas, estão abaixo relacionadas:

- por ser ativo, o sensor Radar de Visada Lateral, constitui um fator de grande importância no levantamento de recursos naturais, uma vez que viabiliza o cronograma de aerolevanteamento. O maior exemplo disso é que o território brasileiro com mais de oito milhões e meio de quilômetros quadrados foi praticamente recoberto, em um período de dezoito meses, considerando-se os dois períodos 1971-1972 e 1975-1976, como contínuos;

- a independência do sensor Radar de Visada Lateral (RVL) em relação à cobertura de nuvens constitui outro fator de grande relevância no levantamento de recursos naturais, uma vez que além de minimizar o tempo de aerolevanteamento, "descobre" novas áreas eternamente nubladas, i. e. : noroeste do Amazonas, norte de Roraima, costa do Amapá, dentre outras.

Por sua vez, desde que o sensor Radar seja acoplado a um satélite ter-se-á uma visão dinâmica de qualquer região da face terrestre, a exemplo do que vai ocorrer com o RADARSAT. Como corolário do que foi supracitado, poder-se-á observar determinadas regiões nas épocas em que as chuvas e a cobertura de nuvens são mais frequentes, podendo-se relacionar, deste modo, a fase "seca" com a fase "úmida";

- observou-se que a grande dificuldade na leitura e interpretação de imagens RVL reside em regiões de forte relevo, em especial nas feições com topo agudo, em vista da presença de extensas sombras, significativos encurtamento de pendentes, "layover" e pseudo "layover". Para minimizar tais efeitos, torna-se necessário um recobrimento de 60%, entre os canais próximo e

remoto, ou seja a estereoscopia total. Desta maneira, as sombras extensas no canal remoto serão sensivelmente diminuídas no canal próximo;

- outro grande problema sempre discutido, no que tange às imagens RVL, é o que diz respeito aos seus níveis de cinza, uma vez que sendo monocromático, sua variação será restrita. No entanto, a obtenção de imagens RVL no formato digital possibilitará a melhoria da resolução radiométrica da mesma. Uma outra saída é a utilização de sistemas de radar digitais, com multifrequência (pelo menos três), o que produzirá radar colorido, desde que se coloque cada comprimento de onda (frequência) em um dos canais RGB ;

- a orientação da linha de vôo também é relevante, uma vez que a má escolha poderá acarretar a produção de extensas sombras ou então "fabricar" direções estruturais;

- a possibilidade de estabelecer o desnível pelo comprimento da sombra de Radar ,conforme apresentado nesta tese, é de suma importância para o radarintérprete, uma vez que o mesmo pode estabelecer uma correlação altimétrica entre feições de relevo próximas , em vista da dificuldade em estabelecer-la no comprimento da sombra evidenciado nos canais próximo e remoto;

- de uma maneira geral, as imagens RVL são de grande valia no levantamento de recursos naturais, haja vista o trabalho realizado pelo Projeto RADAM (RADAMBRASIL) efetivado em território brasileiro, no que concerne a geologia, geomorfologia, solos, vegetação, uso da terra e cartografia. Por sua vez, o SEASAT demonstrou perfeitamente sua utilização no oceano , zonas costeiras, , regiões desérticas e regiões cobertas por neve. Deste modo a utilização de imagem RVL em diferentes tipos de materiais e ambiente é inconteste e sua tendência é melhorar cada vez mais, a medida que os sistemas de Radar se tornarem mais sofisticados;

- a metodologia Sistemática de Elementos Radargráficos se caracteriza por sistematizar os elementos radargráficos ("feições"), através de cinco estádios (etapas), visando a elaboração do mapa radargeológico. Para que se atinga o desiderato nesta metodologia, necessário se faz que o radarintérprete saiba extrair as informações das imagens RVL. E para que tal aconteça necessita-se que o radarintérprete domine os princípios básicos de radar de Visada Lateral, os quais foram enfocados nesta tese.

Após a leitura da imagem RVL (estádio Leitura), em que o radarintérprete tem a oportunidade de relacionar imagem/terreno, a fase seguinte consiste no estágio Reconhecimento, com a definição da textura e tom radargráficos, de suma importância no estabelecimento de zonas homogêneas. Definidas essas zonas, o estágio seguinte - Identificação - visa um estudo minudente das formas de relevo em termos de suas formas (topo e pendente); suas relações (quebras de relevo); grau de dissecação e resistência à erosão. De igual modo, o estudo dos padrões de drenagens e as propriedades de seus canais serão de grande relevância no estudo das propriedades físicas do terreno. O estágio Análise visa estabelecer as relações espaciais e temporais, das formas de relevo através das feições lineares, planares e tabulares. Deste modo, neste estágio o radarintérprete deve estar preparado para saber discernir os diferentes tipos de feições, a fim de dar uma melhor credibilidade a sua interpretação.

De posse dessa gama de informações, extraídas diretamente das imagens RVL, o radarintérprete pode dar "asas a sua imaginação", no sentido de interpretar litotipos, estruturas circulares, descontinuidades, discordâncias, dobras, redobramentos e suas inter-relações.

- a Metodologia Sistemática de Elementos Radargráficos é um método independente dos métodos das Chaves e Lógico, já enraizados na literatura, em que pese utilizar alguns procedimentos dos mesmos;

- a metodologia Sistemática de Elementos Radargráficos (SER) é específica para imagens RVL, porque utiliza características peculiares dessas imagens, como por exemplo as feições lineares, as quais, por sua vez, resultam de encurtamento de pendentes; as feições tabulares, inerentes ao ressalto morfológico devido a visada lateral do sensor. Por outro lado, tal método pode ser utilizado para qualquer sistema de Radar, uma vez que os princípios físicos são os mesmos, havendo contudo pequena diferença nos produtos (imagens), melhor sentida entre a banda L, com relação as demais bandas (K, X, C e S), que de forma alguma invalida os conceitos aqui emitidos.;

- a metodologia Sistemática de Elementos Radargráficos (SER) é inédita em termos mundiais, uma vez que se desconhece qualquer publicação que aborde o estudo radargeológico consoante os cinco estádios - Leitura, Reconhecimento, Identificação, Análise e Interpretação - aqui relatados, com a sistemática aqui descrita e de forma interativa. Ademais, por utilizar características próprias do sensor Radar de Visada Lateral o seu produto final (mapa Radargeológico) apresentará resultados bem peculiares, quando comparado com produtos (mapa fotogeológico) obtidos de imagens da faixa do visível e infravermelho;

- a tendência natural é que o método Sistemática de Elementos Radargráficos seja aprimorado com a melhoria dos sistemas de Radar, em termos de resoluções espacial, radiométrica e espectral;

- a utilização da Sinéclise do Parnaíba e seu embasamento, como aplicação do método Sistemática de Elementos Radargráficos foi coroada de êxito, uma vez foi possível discriminar litotipos ou associação dos mesmos, empilhando-os; e delinear estruturas geológicas, de caráter regional ou local.

Nas de amplitude regional, demonstrou-se suas inter-relações com mapas geofísicos (magnetometria) e ,em alguns casos , foi exequível definir feições da superfície do terreno que indiquem sua presença em profundidade, a exemplo dos arcos de Tocantins e Xambioá-Teresina;

- a Sinéclise do Parnaíba é uma bacia intercratônica e seu desenvolvimento foi muito influenciado pelo seu embasamento, haja vista a concordância de seus limites atuais e os principais “trends” estruturais do mesmo, como pode ser perfeitamente observável em imagens RVL.

Ainda dentro dessa mesma linha de raciocínio, observou-se a presença de estruturas grabeniformes em seu embasamento, dispostas de forma radial, os quais podem ser interpretados como aulacógenos; porquanto de suas inter-relações com os lineamentos Picos-Santa-Inês, Transbrasiliano e Tianguá-Carolina, os quais , sem dúvida, foram de grande importância na edificação da Sinéclise do Parnaíba. Aliás, admite-se a presença de junções tríplices no substrato da sinéclise, em vista das orientações distintas dos cinturões de cisalhamento;

- graças a visão regional fornecida pela imagens RVL , foi possível delimitar três importantes níveis de aplanamento na área exemplo . O mais antigo, constituindo a superfície de cimeira, acima de 500 m ; um intermediário entre 300 e 400 m e um mais novo em torno de 100 m. É importante ressaltar o condicionamento econômico de tais superfícies, haja vista a presença de importantes depósitos de bauxita e caulim associados aos mesmos;

- o esquadrinhamento das imagens RVL possibilitou a detecção de várias estruturas geológicas, as quais poderão, em futuro próximo, serem alvos de trabalhos mais detalhados, quer seja sob a forma de mapeamento geológico, quer seja através de levantamento geofísicos, ou então combinados. Assim sendo, se enquadram nesta filosofia as seguintes estruturas, como as mais importantes, devido seu caráter inédito: Antiforma do rio Capim, Domo do Igarapé Cupijó, morfoestrutura de Uíça, Antiforma da Serra das Alpercatas, Antiforma de Itacajá, morfoestruturas da região de Teresina-José de Freitas, morfoestruturas da região de Amarante, morfoestruturas da região do rio Canindé e estruturas grabenformes dispostas na porção oeste do embasamento da Sinéclise, cobertas por sedimentos de índice S_{24c} ;

- de igual modo, o grande elenco de lineamentos que cortam a Sinéclise do Parnaíba, a exemplo dos lineamentos Pirapemas, Tianguá-Carolina, São Félix do Piauí, e especialmente o Transbrasiliano, merecem futuros estudos geológicos detalhados, obviamente acompanhados pela geofísica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, F. A. M. & LESQUER, A. 1985 . Considerações sobre o Pré-Cambriano da região sul-sudeste do Cráton São Luís. In : SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 2., Belém, 1985. Anais... . Belém; SBG - Núcleo Norte. v. 1, p. 7 -21.
- ABREU, F. A. M ; GAMA JUNIOR, T. ; GORAYEB, P. S. S. ; HASUI, Y. 1988. O Cinturão de cisalhamento do Noroeste do Ceará. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA, 7., Belém, 1988. Anais Belém ; SBG. v. 1, p.20-34.
- AERO SERVICE - SAR. 1978. Synthetic Aberture Radar. USA. Houston Texas. 11p.
- AGUIAR, G. A. 1971. Revisão Geológica da Bacia do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., São Paulo, 1971. Anais São Paulo ; SBG. v. 3 ,p. 113-122.
- AGUIRRE, J. B. L ; BARBOSA, M. N. ; PEREIRA, S. P. 1978. Um novo produto do INPE: a imagem do satélite produzida para utilização conjunta com imagem de radar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2. , São José dos Campos, 1978. Anais.... . São José dos Campos: INPE. v. 2, p. 935-54.
- ALLUM, J.A.E. 1966. Photogeology and regional mapping. Oxford, Pergamon Press, 107p.

- ANDRADE, S. M. 1983. Prolongamento do Arco de Xambioá em Direção à Região do Projeto Carajás. Ciências da Terra. Salvador-Ba, (8) : 21-22.
- ARAÚJO, J.F.V. ; MONTALVÃO, R. M. G. ; LIMA, M. I. C. ; FERNANDES, P. E. C. A. ; CUNHA, F. M. B. ; FERNANDES, C. A. C. ; BASEI, M. A. S. 1976. In: PROJETO RADAMBRASIL. Folha SA.21 - Santarém. Rio de Janeiro. (Levantamento de Recursos Naturais, 10).
- ARAÚJO, O.J.B. ; FARIAS, C. A. S. ; CARDOSO, C. E. P. ; PINHEIRO, M. M. 1983. - Projeto Domo do Erepecu. Belém, CPRM/GEBAM. v.1, 80p.
- BARBOSA, G.V.; SILVA, T. C. ; NATALI FILHO, T.; DEL'ARCO, D. M.; COSTA, R. C. B. 1984. Evolução da metodologia para mapeamento geomorfológico do Projeto RADAMBRASIL. Boletim Técnico do Projeto RADAMBRASIL. Sér. Geomorfologia, Salvador, (1) : 3-26.
- BARTORELLI, A. & PIRES NETO, A. G. 1991. Geologia da Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins no Trecho entre Estreito e Imperatriz (Divisa TO-MA). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3., Belém, 1991. Anais... . Belém, SBG - Núcleo Norte. p. 142-155.
- BEATTY, J.K. 1980. Crater Hunting in Brazil. Sky and Telescope. p.464-467.

- BELOUSSOV, V. V. 1971. Problemas Básicos de Geotectónica. Barcelona, Ed. Omega. 854 p.
- BILLINGS, M. P. 1963. Geologia Estrutural. Buenos Aires: EUDEBA. 564 p.
- BLANCHARD, B.J. & ROUSE, W. 1980. Depolarization of electromagnetic waves scattered from an inhomogeneous half space bounded by a rough surface. Radio Science, 15 (4).
- BROWDEN, L.W. & PRUIT, E.L. 1975. Manual of remote sensing; interpretation and applications, Falls Church, Virginia, American Society of Photogrammetry, 2v.
- CAMPBELL, D. F. ; SILVA, S. O. ; ALVES, L. 1949. Relatório Preliminar sobre a geologia da Bacia do Maranhão. Boletim do Conselho Nacional do Petróleo , n.1. Rio de Janeiro - RJ.
- COIMBRA, A. M. 1983. Estudo Sedimentológico e Geoquímico do Permo-Triássico da Bacia do Maranhão. São Paulo: Universidade de São Paulo. 2 v. (Tese de Doutorado).
- COOLYER, T. A. ; RODRIGUES, E. G. ; LIMA, M. I. C. ; MACHADO, J. I. L. ; STILLIANIDI FILHO, B. ; AZEVEDO, L. O. R. ; GRANJEIRO, I. S. 1994. Mapa Gemológico do Estado do Pará. Belém, SUDAM/IDESP. 44p. .

- CORDANI, U. G.; NEVES, B. B. B. ; FUCK, R. A. ; PORTO, R. ; CUNHA, F. M. B. 1984. - Estudo Preliminar de Integração do Pré-Cambriano com os Eventos Tectônicos das Bacias Sedimentares Brasileiras. Rio de Janeiro-RJ. PETROBRÁS/CENPES. 70 p. (Série Ciência-Técnica-Petróleo, n. 15).
- COSTA, J. B. S. & HASUI, Y. 1988. Aspectos do Lineamento Transbrasiliano na região de Porto Nacional - Natividade - Goiás. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA., 30 Belém, 1988. Anais... . Belém; SBG. Vol. 5, p. 2208 - 2216.
- COSTA, J. B. S. ; NOGUEIRA, A. C. R. ; GÓES, A. M. ; TRUCKENBRODT, W. 1994 . Evidências de Tectônica Glacial na Formação Cabeças, Devoniano Superior, SW da Bacia do Parnaíba. SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4. Belém, 1994. Boletim de Resumos Expandidos. Belém : SBG - Núcleo Norte. p. 51-53.
- COSTA, J. B. S. ; PASTANA, J. M. N. ; COSTA, E. J. S. ; JOÃO, X. S. J. 1988. A Faixa de Cisalhamento Tentugal na Folha SA.23-Y-B. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30. Belém, 1988. Anais Belém : SBG. Vol 5, p. 2257 - 2266.

COUTO, H.T.Z. ; SILVA, A. P. ; SALMERON, A. ; BALLONI, E. A. ; KOFFLER, N. F. ; NICOLIANO, N. ; CASTRO, P. S. ; DONZELLI, P. L. ; VALÉRIO FILHO, M. 1978. Levantamento da cobertura florestal através de técnicas de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1., São José dos Campos, 1978. Anais... . São José dos Campos , INPE. v.1, p.223-34.

CREPANI, E. 1988. Análises de fraturas de imagens fotográficas de baixa resolução espacial: uma contribuição ao estudo da evolução tectônica da chapada do Araripe. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., Natal, 1988. Anais... . Natal, INPE. v.2, p.366- 380.

CUNHA, B. C. C. ; POTIGUAR, L. A. T. ; IANHEZ, A. C. ; BEZERRA, P. E. L. ; PITHAN, J. H. L. ; SOUZA JÚNIOR, J. J. ; MONTALVÃO, R. M. G. ; SOUSA, A. M. S. ; HILDRED, P. R. ; TASSINARI, C. C. G. 1981. Geologia. In : PROJETO RADAMBRASIL. Folha SC. 22 - Tocantins. Rio de Janeiro. (Levantamento de Recursos Naturais, 22).

CUNHA, F.M.B. 1982a. Aspectos morfoestruturais do Baixo Amazonas. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1., Belém, 1982. Anais... Belém: SBG, p.75-83.

------. 1982b. Sensoriamento Remoto. Ciências da Terra, Salvador-Ba, (4):16-17.

-----, 1986 Evolução Paleozóica da Bacia do Parnaíba e seu Arcabouço Tectônico.

Rio de Janeiro, UFRJ . Instituto de Geociências, 1986. 107 p. (Mestrado em Geologia) -

Instituto de Geociências, UFRJ, 1986.

-----, 1988. Controle tectônico-estrutural na hidrografia da região do Alto Amazonas.

In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Belém, 1988. Anais... Belém: SBG, v.5,

p. 2267-2277.

CUNHA, F.M.B. da & CARNEIRO, R.G. 1972. Interpretação fotogeológica do Centro-Oeste da

Bacia do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30. , Belém, 1972.

Anais... Belém, DNPM/SBG. v.3, p.65-80.

CUNHA, F. M. B. & GÓES, A. M. O. 1989. Geologia da Parte Norte da Bacia do Parnaíba. Rio

de Janeiro- RJ : Petrobrás/DINOR/DOTEC. (Relatório Interno).

CUNHA, F. M. B. ; CARNEIRO, R. G. ; SIMÕES , I. A. ; SAAD, A. R. 1979. Carta Geológica

da Bacia do Parnaíba. (15 folhas na escala 1:250 000). Convênio PETROBRÁS/DNPM.

CUNHA, R.P.& FORD, J.P. 1986. Radar penetration in the Amazonian Rain Forest. In:

SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Gramado-RS, 1986.

Anais Gramado, INPE/SELPER/SBC, v.6, p.373-4.

DERBY, O. A. 1884. Estructura Geológica e minerais. In: WAPPAEUS, J. E.. A geographia física do Brasil. R. J., G. Leuzinger. 470p . p. 43-59.

DRURY, S.A. 1987. Image interpretation in geology. London : Allen & Unwin, 237p.

DUARTE, A. 1936. Fósseis da sondagem de Terezina. Estado do Piauí. Notas Prel. Est. Serv. Geol. Mineral. (2).

ELACHI, C. 1980 - Spaceborne imaging radar: geologic and oceanographic applications. Science, 209. (4461): 1073-82.

ESA. 1989. ERS-1 a new tool for global environmental monitoring in the 1990's. Paris. 39p.

FAVERA, J. C. D. 1990. Tempestitos da Bacia do Parnaíba. Porto Alegre. Instituto de Geociências. UFRS. Tese de Doutorado. 187 p.

FAVERA, J.C. D. & ULIANA, M. A. 1979. Bacia do Maranhão: ambientes e fácies. PETROBRÁS/DEPEX.(Rel. Interno).

FORD J. P. ; CIMINO, J. B. ; ELACHI, C. 1983. Space Shuttle Columbia Views the World with Imaging Radar: the SIR-A Experiment. Pasadena, California NASA. JPL Publication. 82-95..

- FORTES, F. P. 1978. Geologia Estrutural e Tectônica da Bacia Sedimentar do Meio Norte do Brasil. Uma síntese com implicações metalogenéticas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., Recife-PE, 1978. Anais Recife-PE: SBG. v.1, p. 321-332.
- , 1992. Os grabens Sigmoidais da Bacia do Parnaíba e a Matriz Brasileira. Boletim de Resumos Expandidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37. São Paulo-SP, 1992. Anais São Paulo: SBG. v. 1. p.552-553. .
- GARCIA, G. J. 1982. Sensoriamento Remoto: Princípios e Interpretação de Imagens. São Paulo -SP. Nobel. 357 p.
- GARY, M. ; MACAFEE JR, R. ; WOLF, C. L. 1972 . Glossary of Geology. Washington, D. C. American Geological Institute. 805 p.
- GAVA, A. ; NASCIMENTO, D. A. ; VIDAL, J. L. B. ; GHIGNONE, J. I. ; OLIVEIRA, E. P. ; SANTIAGO FILHO, A. L. ; TEIXEIRA, W. 1983. Geologia . In: Projeto RADAMBRASIL. Folhas SC.24/25 - Aracaju/Recife. Rio de Janeiro - RJ. p. 27-376.(Levantamento de Recursos Naturais, 30).
- GERASIMOV, I.P. & MESCHERIKOV, J.A. 1968. Morphostructure. In: FAIRBRIDGE, Rodhes W The Encyclopedic of Earth Sciences. Series. Reinhold Book Cooperation, v. III, p.731-2.

- GÓES, A. M. O.; SOUZA, J. M. P. ; TEIXEIRA, L. B. 1990. - Estágio Exploratório e Perspectivas Petrolíferas da Bacia do Parnaíba. Boletim Geociências Petrobrás. Rio de Janeiro - RJ. p. 55-64.
- GÓES, A. M. O. ; TRAVASSOS, W. A. S. ; NUNES, K. C. 1994 . Projeto Parnaíba - Reavaliação da Bacia. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4, Belém, 1994. Boletim de Resumos Expandidos . Belém-PA. SBG: Núcleo Norte. p. 11-14.
- GOMES, J. R. C. ; GATTO, C. M. P. P. ; SOUZA, G. M. C. ; LUZ, D. S. ; PIRES, J. L. ; TEIXEIRA, W. 1981. Geologia. In: Projeto RADAMBRASIL. Folhas SB.24/25 - Jaguaribe/Natal. Rio de Janeiro-RJ. p. 27-300. (Levantamento de Recursos Naturais, 23).
- GONZAGA, G. M. & TOMPKINS, L. A. 1991. Geologia do Diamante.. In: PRINCIPAIS Depósitos Minerais do Brasil. Brasília, DNPM/CPRM. v. 4, pt A, p.53-116.
- GORAYEB, P. S. S.; ABREU, F. A. M. ; CORRÊA, J. A. M. ; MOURA, C.A. V. 1988. Relações Estratigráficas entre o Granito Meruoca e a sequência Ubajara-Jaibaras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35. , Belém- PA, 1988. Anais Belém; SBG. v. 6, p. 2678-2688.
- GUY, M. 1966. Quelques principes e quelques experiences sur la méthodologie de la photo-interpretation, In: SYMPOSIUM INTERNATIONAL DE PHOTO-INTERPRETATION, 2., Paris, 1966. Actes... .Paris: Société Internationale de Photogrammétrie. v.16, p.21-41.

HASUI, Y. & COSTA, J. B. S. 1991. Zonas e Cinturões de Cisalhamento. Belém -PA, Ed. Universitária. UFPA. 144 p.

HASUI, Y. ; COSTA, J. B. S. ; BORGES, M. S. ; ASSIS, J. F. P. ; PINHEIRO, R. V. L. ; BARTORELLI, A. ; PIRES NETO , A. G. ; MIOTO, J. A. 1991. A Borda Sul da Bacia do Parnaíba no Mesozóico. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 3., Rio Claro - SP, 1991. Boletim n. 1, p. 93-95.

HOBBS, B.E. ; MEANS, W. D. ; WILLIAMS, P. F. 1976. An outline of structural geology. New York, J.Wiley. 571p.

HOBBS, W. H. 1904. Lineaments of the Atlantic Border Region. Geological Society of America Bulletin, New York, (15): 482-506.

HORTON, R. E. 1945. Erosional Development of Streams and their Drainage Basin: Hidrographical approach to Quantitative Morfology. Geol. Soc. Amer. Bulletin. 56 (3): .275-370.

HOWARD, A.D. 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: summation. Bulletin American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 5 (11): 2246-59.

HUHN, S. R. B. & MORETZSHON, J. S. 1994. Breve Nota Sobre a Aquisição de Dados de Radar de Abertura Sintética (SAR) na Região da Serra dos Carajás. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4. Belém, 1994. Boletim de Resumos Expandidos. Belém, SBG. Núcleo Norte. p. 318-320.

IBGE. 1992. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. Rio de Janeiro : IBGE. 92 p. (Manuais Técnicos em Geociências, 1).

JENSEN, H. ; GRAHAM, L. C. ; PORCELLO, L. J. ; LEITH, E. N. 1977. Side-looking airborne radar. Scientific American, San Francisco, 237 (4): 84-95.

LANGER, B. 1972. Determinação de desníveis, pela sombra projetada em radar de visada lateral, s.l. projeto RADAM, 4p. (Relatório Interno RADAM, 4-T).

LANGHAM, E. J.; SHAW, E. ; RANEY, R. K. 1990. RADARSAT: Canada's microwave satellite. International Journal of Remote Sensing. 11 (3): 527-41.

LIMA, E. A. A. & LEITE, J. F. 1978. Projeto Estudo Global dos Recursos Naturais da Bacia Sedimentar do Parnaíba: Integração Geológica-Metalogenética. Relatório Final. Recife, MME/DNPM/CPRM. Vols 1 e 2. 437 p.

- LIMA, M.I.C. 1975. Padrões de interpretação geológica, em Imagens de Radar do Craton Guianês. In: CONFERÊNCIA GEOLÓGICA INTERGUIANAS, 10., Belém, 1975. Anais... Belém; DNPM 1975. p.715-46.
- , 1978a. A importância das estruturas planares e lineares na interpretação radargeológica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1., São José dos Campos, 1978. Anais... São José dos Campos, CNPq/INPE, v.2, p.500-9.
- , 1978b. Potencialidades das imagens de radar em mapeamentos geológicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., Recife, 1978. Anais... Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p.164-78.
- , 1978c. Modelos radargráficos de estruturas circulares da região amazônica. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE TÉCNICAS EXPLORATÓRIAS EM GEOLOGIA, 2., Gravatal-SC, 1979. Anais... Gravatal-SC: DNPM. 698p. p.319-29.
- , 1984. Identificação de redobramentos em imagens de radar (SLAR). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE TÉCNICAS EXPLORATÓRIAS À GEOLOGIA; Salvador, 1984. Anais... Salvador, Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo da Bahia. 534p. p.215-30.

- , 1988. Lineamentos estruturais na sequência Cenozóica Solimões e suas relações com o Craton Amazônico e Bacia do Alto Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, Belém, 1988. Anais... Belém: SBG. v.6, p.2396-406.
- , 1989. Metodologia da interpretação radargeológica. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCION REMOTE, 4., Argentina - S.C. Bariloche, INTIYUNLU. p.629-39.
- , 1991. Análise Morfoestrutural do Sul da Bacia do Parnaíba, Baseada em Imagens de Radar (RVL). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3., Belém, 1991. Anais... Belém-Pa ; SBG-Núcleo Norte. p.220-231.
- , 1992a. Análise Geométrica-Cinemática da Bacia do Parnaíba com base em Sensoriamento Remoto. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27., São Paulo , 1992. AnaisSão Paulo: SBG. v. 1, p. 135-136.
- , 1992b. Controle Estrutural de Corpos Máficos Mesozóicos do Nordeste da Bacia do Parnaíba. In :CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27., São Paulo, 1992. Anais São Paulo : SBG p. 516-518.

----- . 1993. Integração Sensoriamento Remoto-Geofísica na Interpretação do Embasamento da Sinéclise do Parnaíba: Dados Preliminares. In : SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., Curitiba, 1993. AnaisCuritiba, INPE. p.234-241. 1993.

----- . 1995. Introdução à Interpretação Radargeológica. Rio de Janeiro; IBGE. 124 p. (Manuais Técnicos em Geociências, 3).

LIMA, M. I. C. ; FONSECA, E. G. ; OLIVEIRA, E. P. ; ROCHA, R. M. ; CARMO, U. F. ; SILVA, J. M. R. ; SIGA JR, O. 1981. Geologia. In: PROJETO RADAMBRASIL. Folha SD. 24 - Salvador. Rio de Janeiro (Levantamento de Recursos Naturais, 24)

LIMA, M.I.C. ; MONTEIRO, N. ; SILVA, L. L. ; MARINHO, D. A. 1990. Identificação de morfoestruturas anômalas na porção centro-oriental da bacia do Maranhão (Brasil), através de imagens SLAR e LANDSAT-TM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6., Manaus, 1990. Anais... . Manaus, INPE. v.3, p.663-70.

LISBOA, M. A. R. 1914. The Permian of Northern of Brazil. Amer. J. Sci. 177(221):425:42.

LIU, C.C. & RODRIGUES, J.E. 1986. Radargeologia. São José dos Campos, INPE. 45p. (INPE - 3803 - NTE - 251).

LOCZY, L. de & LADEIRA, E.A. 1976. Geologia estrutural e introdução à geotectônica. São Paulo: E. Blücher; Rio de Janeiro, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. 528p.

LUEDER, D.R. 1959. Aerial photographic interpretation. New York, McGraw- Hill.

MATTAUER, M. 1976. Las deformaciones de los materiales de la corteza terrestre. Barcelona, 524p.

MEKEL, J.F.M. 1972. The geological interpretation of radar images. ITC Text-book of photo-interpretation, Netherlands, 8:1-61.

MESNER, J. C. & WOOLDRIDGE, L. C. P. 1964. Maranhão Paleozoic basin and Cretaceous Coastal Basin, North Brazil. AAPG Bull., 48 (9) : 1475-1512.

MILLER, V.C. 1961. Photogeology. New York, McGraw-Hill, 248p.

MIRANDA, F. P. 1983. Sensoriamento Remoto na prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Amazonas. Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, 26 (4): 208-291.

MONTES, M. L. ; MONTEIRO, N. ; FERNANDES, P. E. C. A. ; MONTES, A. S. L. ; SILVA, L. L. ; SIGA JÚNIOR, O - Geologia da Folha SC.23 - Rio São Francisco. (no prelo).

NASCIMENTO, D.A. do & PRATES, M. 1976. Geomorfologia. In: PROJETO RADAMBRASIL. Folha NA.19- Pico da Neblina. Rio de Janeiro. 374p. p.141-82.(Levantamento de Recursos Naturais, 11)

NASCIMENTO, D. A.; GAVA, A. ; PIRES, J. L. ; TEIXEIRA, W. 1981. Geologia. In: Projeto RADAMBRASIL. Folha SA.24 - Fortaleza. Rio de Janeiro.. p. 23-212. (Levantamento de Recursos Naturais, 21).

NISHIDAI, T. 1992. Japan's Earth Resources Satellite (JERS-1) Update. In : -CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., São Paulo. 1992. Anais ... São Paulo:SBG. . v. 1, p. 170.

NORTHFLEET, A. A. & NEVES, S . B. 1966. Semidetelhe da Região Sudeste de Alto Paraíba. Belém. :PETROBRÁS/DENOR. (Relatório Interno).

NOVO, E. M. L. M. ; KUX, H. J. H. ; AHERN, F. J. 1994. Introdução ao Sensoriamento Remoto por Radar. PRORADAR. Brasil-Canadá. Mini Curso. 50p.

NUNES, A. B.; BARROS FILHO, C. N.; LIMA, R.F.F. 1973a. Geologia . In: Projeto RADAM.

Partes das folhas SC.23- Rio São Francisco e SC.24 - Aracaju. Rio de Janeiro-RJ.

(Levantamento de Recursos Naturais,1)

NUNES, A.B.; LIMA, R.F.F. ; BARROS FILHO, C. N. 1973b. Geologia. In: Projeto RADAM

Folha SB.23 -Teresina.. Rio de Janeiro-RJ. (Levantamento de Recursos Naturais,2).

----- 1973c. - Geologia In: Projeto RADAM.

Folha SA.23 (São Luís) e parte da Folha SB.24 (Fortaleza). Rio de Janeiro -RJ.

(Levantamento de Recursos Naturais, 3).

NUNES, K. C. 1992 . Integração Aeromagnética da Bacia do Parnaíba. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE GEOFÍSICA. . Salvador, 1992: Boletim de Resumos. SBGf. p. 405-407.

O'LEARY, D.W; FRIEDMAN, J. D. ; POHN, H. A. 1976. - Lineament, linear, lineation: some

proposed new standards for old terms. Geological Society of America Bulletin, New York,

87(10):1463-9.

PAIVA, G. & MIRANDA, J. 1937. Carvão Mineral no Piauí. Boletim Serviço Fomento

Produção Mineral, n. 20.

PARADELLA, W. R. 1993 . Radar em Aplicações Geológicas. Os Experimentos SAREX na Província Mineral dos Carajás (Pará) e AIRAM no Vale do Rio Curaçá (Bahia). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7. Curitiba, 1993. Anais... . Curitiba: INPE. v. 3. p. 282-94.

PARADELLA, W. R.; LIU, C. C. ; VENEZIANI, P. ; SANTOS, A.R.; BIGNELLI, P. A. ; DIAS, R.R. 1994. Radarsat: um Avançado e Versátil Sistema de Radar Órbital com Grande Potencialidade de Aplicação em Geologia e Estudos Ambientais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38. Camboriú,. 1994 . Anais... . Camboriú : SBG. v.1, p. 474-76.

PEDREIRA, A.J. 1974. Determinação de estruturas de imagens de Radar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA; 28., Porto Alegre, 1974. Anais... . Porto Alegre: SBG. v. 6,p.279-85.

PLUMMER, F. B. 1946. Bacia do Parnaíba. Relatório Conselho Nacional Petróleo. Rio de Janeiro, p. 87-148.

PRISMA. 1977 . Solos - Formação e Conservação. São Paulo. EDUSP.. 150 p.

RAGAN, D.M. 1980. Geologia estructural; introdución las técnicas geométricas. Barcelona: Omega. 205p.

RAMSAY, J.G. 1962. Interference patterns produced by the superposition of folds similar type.

Journal of Geology, Chicago, (70): 466-81.

-----, 1967. Folding and fracturing of rocks. New York: McGraw- Hill. 568p.

RAY, R.G. 1963. Fotografias aéreas na interpretação e mapeamento geológico. São Paulo; Instituto Geográfico e Geológico. 2v.

RICCI, M. & PETRI, S. 1965. Princípios de aerofotogrametria e interpretação geológica. São Paulo: Nacional ; 226p.

RIVEREAU, J.C. 1970. Fotointerpretação. Revista da Escola de Minas, Ouro Preto, 28 (4) :157-75.

RODRIGUES, J. E. ; LIU, C. C. ; MIRANDA, F. P. 1986. - Alguns Aspectos Geológicos do Lineamento Pirapemas. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO/ SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 4., Gramado-1986. Anais Gramado ; SELPER. v. 1, p. 819-825..

ROUTIN, D.D. 1975. Sensores remotos y principios de percepcion remota. Bogotá, CIAF 157p.

- SÁ, E. F. J. & HACKSPACHER, P. C. 1980. Reconhecimento estrutural na borda noroeste do Cráton São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., Camboriú, 1980. Anais... Camboriú; SBG, v. 5, p. 2719-2731
- SALMERON, R.A. 1964. Introdução à eletricidade e ao magnetismo. São Paulo, Biblioteca Nacional, 1964. 437p.
- SCHOBENHAUS FILHO, C. ; CAMPOS D. A. ; DERZE, G. R. ; ASMUS, H. E. 1981. Mapa Geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente, incluindo Depósitos Minerais. Brasília.. DNPM.
- SCHOBENHAUS FILHO, C ; RIBEIRO, C . L. ; OLIVA, L. A. ; TAKANOHASHI, J. T. ; LINDENMAYER, Z. G. ; VASCONCELOS, J. B. ; ORLANDI, V. 1975. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo. Folha SD.22 - Goiás. DNPM. 113 p.
- SIMONETT, D. S. & DAVIS, R. E. 1985. Image Analysis - Active Microwave... In: MANUAL of Remote Sensing. Falls Church, Virginia, American Society Photogrammetry. 2v.p. 1125-1181.
- SMALL, H. 1914. Geologia e suprimento d' agua subterrânea no Piauí e parte do Ceará. Rio de Janeiro: Inspetoria de Obras Contra as Secas. 146 p. il. map. (Publicação 32; série I. D.).

- SOARES, P.C & FIORI, A.P. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. Notícia Geomorfológica, Campinas, 16 (32): 71-104.
- SOARES, P.C. ; MATTOS, J. T. ; BALIEIRO, M. G. ; BARCELLOS, P. E. ; MENESES, P. R. ; CSORDAS, S. M. 1981. Análise morfoestrutural integrada com imagens de RADAR E LANDSAT da bacia do Paraná. São Paulo; PAULIPETRO. Consórcio IPT-CESP.
- STRAHLER, A.N. 1952. Hipsometric (área - altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, New York , (63) : p.1117-42.
- TORQUATO, J. R. 1981. O Astroblema de São Miguel do Tapuio (PI). Ciências da Terra. Salvador-Ba. (1) : 137.
- VENEZIANI, P. & ANJOS, C.E. 1981. Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia. São José dos Campos; INPE. 76p.
- VERGARA, M.L.L. 1971. Manual de fotogeologia. 2.ed. Madrid, Servicio de Publicaciones de la Junta de Energia Nuclear. 308p. Anexo: Laminas.
- WHITTEN, E.H.T. 1969. Structural geology of folded rocks. Chicago, McNally, 678p.