



Número:370/2007  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

WAGNER DA SILVA AMARAL

*INTEGRAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS E SUA  
CONTRIBUIÇÃO A EVOLUÇÃO GEODINÂMICA DO DOMÍNIO CEARÁ  
CENTRAL, PROVÍNCIA BORBOREMA.*

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geociências, Área de Geologia e Recursos Naturais.

**Orientador:** Prof. Dr. Ticiano José Saraiva dos Santos

CAMPINAS - SÃO PAULO

Março-2007

**Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca  
do Instituto de Geociências/UNICAMP**

Amaral, Wagner da Silva  
Am13i Integração de dados aerogeofísicos e geológicos e sua contribuição a  
evolução geodinâmica do domínio Ceará central, Província de Borborema  
/ Wagner da Silva Amaral .-- Campinas,SP.: [s.n.], 2007.

Orientador: Ticiano José Saraiva dos Santos  
Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto  
de Geociências.

1. Geologia estrutural. 2. Geofísica – Processamento de dados.  
3. Mapeamento geológico – Borborema (CE). I. Santos, Ticiano José  
Saraiva dos. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de  
Geociências. III. Título.

Título em inglês: Airbone geophysical and geologic data integration and its contribution the  
geodynamic evolution of central Ceará Domain. Borborema Province.

Keywords: - Geotectonic;  
- Geophysics – Data processing;  
- Geologic mapping.

Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestre em Geociências

Banca examinadora: - Ticiano José Saraiva dos Santos  
- Carlos Roberto de Souza Filho;  
- Elton Luiz Dantas.

Data da defesa: 23/03/2007



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM  
GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**AUTOR: WAGNER DA SILVA AMARAL**

**INTEGRAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS E SUA  
CONTRIBUIÇÃO A EVOLUÇÃO GEODINÂMICA DO DOMÍNIO CEARÁ  
CENTRAL, PROVÍNCIA BORBOREMA.**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Ticiano José Saraiva dos Santos**

Aprovada em 23/03/2007

**EXAMINADORES:**

Prof. Dr. Ticiano José Saraiva dos Santos

Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Prof. Dr. Elton Luiz Dantas

\_\_\_\_\_  
Presidente

Campinas, 23 de março de 2007

*Para Carol,  
meus pais Maria Inês e Giba, meu  
irmão Luis Henrique e família,  
Simone e minha sobrinha Laís.  
É para vocês que  
dedico este trabalho*

**Nordestino sim, Nordestinado não**

*“Nunca diga nordestino  
Que Deus lhe deu um destino  
Causador do padecer  
Nunca diga que é o pecado  
Que lhe deixa fracassado  
Sem condições de viver*

*Deus o autor da criação  
Nos dotou com a razão  
Bem livres de preconceitos  
Mas os ingratos da terra  
Com opressão e com guerra  
Negam os nossos direitos...*

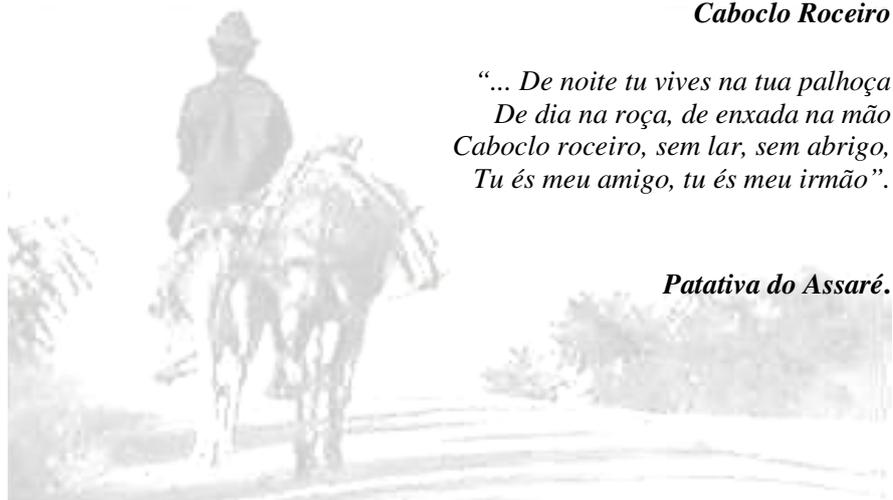
*...Não é Deus quem nos castiga  
Nem é a seca que obriga  
Sofrermos dura sentença  
Não somos nordestinados  
Nós somos injustiçados  
Tratados com indiferença*

*...Já sabemos muito bem  
De onde nasce e de onde vem  
A raiz do grande mal  
Vem da situação crítica  
Desigualdade política  
Econômica e social...”*

**Caboclo Roceiro**

*“... De noite tu vives na tua palhoça  
De dia na roça, de enxada na mão  
Caboclo roceiro, sem lar, sem abrigo,  
Tu és meu amigo, tu és meu irmão”.*

**Patativa do Assaré.**



## AGRADECIMENTOS

---

---

*Deixo aqui registrado os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que de alguma maneira me ajudaram nessa jornada. Não sei se me lembrarei de todos, por isso desde já peço desculpas aqueles que não forem citados nessas breves palavras.*

*Primeiramente agradeço aos meus pais Gilberto Batista do Amaral e Maria Inês da Silva Amaral pelo amor e por todo apoio incondicional durante toda minha vida.*

*À Profa. Dra. Adalene Moreira Silva pela idéia e orientação inicial deste projeto e por me ensinar o que sei de geofísica desde a graduação, por toda atenção a mim dispensada, muito obrigado Dadá; ao Prof. Dr. Ticiano José Saraiva dos Santos, por ter me orientado mais uma vez, pela confiança, disponibilidade, paciência e participação imprescindível e decisiva para a conclusão deste trabalho, valeu Tici, foi bem roots!!!*

*Ficam também registrados meus sinceros agradecimentos ao Prof. Michel H. Arthaud da UFC, pela amizade, paciência e total apoio aqueles que se interessam pela fantástica geologia do estado do Ceará. Ao meu querido amigo e sempre professor Lobão (IG-UNICAMP), obrigado mais uma vez por me mostrar onde devo acertar "... terceiro botão".*

*Aos professores que tive na pós-graduação: Adalene Moreira Silva, Alfonso Schrank, Álvaro Penteado Crósta, Asit Choudhuri, Carlos Roberto de Souza Filho, Elisabete Maria Pascholati, Élson Paiva de Oliveira e Roberto Perez Xavier, por me ensinarem a fazer pesquisa.*

*À banca examinadora, Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho (IG-UNICAMP) e Prof. Dr. Elton Luiz Dantas (IG-UnB) por aceitarem o convite de participação, contribuindo assim com críticas e sugestões relevantes no intuito de aprimorar o trabalho.*

*À minha amável companheira, amiga e namorada Carolina Moreto, pela ajuda no campo, na vida, por confiar em mim e sempre me incentivar.*

*Aos colegas da pós-graduação e da Praça da Paz (Paulão, Lucas, Alemão, Bairral, Aloísio, Retardo, Oderson garoto do surf, Sebastião, Lucíola, Sandra, Janaína, Veridiana, Fanny, Sérgio, Juliano, Creisson, Lixo, Oswaldinho, et al.) pelo bom convívio e amizade.*

*Ao companheiro de rocha, Marcus Leandro de Andrade Teixeira (in memorian) vítima da ignorância dos homens, com certeza está em paz em algum lugar, melhor que esse.*

*À Valdirene e a Edinalva secretárias da pós, nota 1000... nunca vi tanta eficiência, carinho e dedicação com os alunos, obrigado de coração... o Lobinho ama vocês!*

*À CAPES, pela bolsa de pesquisa, e à CPRM, pelos dados aerogeofísicos e ao Projeto Milênio (PRONEX) pelo auxílio de campo .*

*Aos Jows (Jé, Secus, Fignácio, Caveron, Isopor, Pumpers, Téo e a Quinta Xeira pela ajuda de campo), por estarem sempre presentes no café na praça ou churrasqueando...*

*A todas as manifestações divinas, pois sem elas eu não seria nada. A todos, de coração, meu muito obrigado!*

## ÍNDICE

---

---

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>01</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
1.1. Objetivos .....	03
1.2. Localização e Vias de Acessos .....	03
1.3. Métodos .....	07
1.4. Aspectos Fisiográficos Gerais .....	08
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>11</b>
<b>2. CONTEXTO GEOLOGICO REGIONAL.....</b>	<b>11</b>
2.1. Província Borborema .....	11
2.2. Arcabouço Tectônico da Província Borborema.....	17
2.3. Domínio Ceará Central (DCC) .....	19
2.3.1. Embasamento Arqueano .....	19
2.3.2. Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico.....	20
2.3.3. Cobertura Neoproterozóica.....	20
2.3.4. Arco Magmático de Santa Quitéria .....	21
2.4. Domínio Médio Coreaú (DMC) .....	23
2.4.1. Embasamento Gnáissico Migmatítico.....	23
2.4.2. Grupo Martinópolis .....	23
2.4.3. Grupo Ubajara.....	24
2.4.4. Corpos Granitóides .....	24
2.4.5. Grupo Jaibaras .....	25
2.5. Domínio Rio Grande do Norte.....	25
2.6. Contexto Geológico Local .....	26
2.7. Mineralização Fósforo-Uranífera de Itaitaia.....	29
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>31</b>
<b>3. PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS E RADAR .....</b>	<b>31</b>
3.1. Dados Aerogeofísicos .....	31

3.2. Imagens de Radar - SRTM .....	35
3.3. Métodos .....	37
3.4. Pré-Processamento dos Dados Aeromagnéticos.....	39
3.4.1. Análise das Informações. ....	39
3.4.2. Definição da Célula de Interpolação. ....	39
3.4.3. Micronivelamento. ....	41
3.4.4. Espectro da Potência. ....	45
3.5. Filtragens .....	47
3.5.1. Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	47
3.5.2. Filtros Passa-Baixa, Passa-Alta e Passa-Banda.....	48
3.5.3. Filtro Derivada. ....	48
3.5.4. Continuação Ascendente ( <i>Upward Continuation</i> ). ....	49
3.5.5. Amplitude do Gradiente Horizontal Total (AGHT).....	49
3.5.6. Amplitude do Sinal Analítico (ASA).....	51
3.6. Interpretação e Integração Regional .....	57
3.7. Interpretação dos Dados Aeromagnéticos da Área Piloto .....	65
3.7.1. Lineamentos Magnéticos.....	65
3.7.2. Domínios Magnéticos .....	69
3.8. Processamento dos Dados Gamaespectrométricos .....	73
3.9. Interpretação dos Dados Gamaespectrométricos .....	74
3.10. Comentários .....	79
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>81</b>
<b>4. INTEGRAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS.....</b>	<b>81</b>
4.1. Unidades de Mapeamento.....	85
4.1.2. Seqüência Paraderivada - Ccp.....	85
4.1.3. Seqüência Ortoderivada. - Cco.....	93
4.1.4. Arco Magmático de Santa Quitéria - AMSQ.....	113
4.2. Arcabouço Estrutural .....	121
4.2.1. Domínio Noroeste – (D-NW) .....	129
4.2.2. Domínio Central – (D-C) .....	131

4.2.3. Domínio Sudeste – (D-SE) .....	135
4.2.4. Domínio Sudoeste – (D-SW) .....	139
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>143</b>
<b>5. DISCUSSÕES .....</b>	<b>143</b>
5.1. Do tratamento preliminar dos dados aerogeofísicos.....	143
5.2. Das transformações dos dados aeromagnéticos.....	143
5.3. Das interpretações das imagens aerogeofísicas e suas implicações no mapeamento geológico da área piloto .....	144
5.4. Dos aspectos estruturais e da evolução geodinâmica .....	145
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>151</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>151</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>153</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>161</b>
<b>ANEXOS 01 .....</b>	<b>163</b>
MAPA GEOLÓGICO .....	163
<b>ANEXOS 02 .....</b>	<b>165</b>
MAPA DE PONTOS .....	165

## LISTA DE FIGURAS

---

---

<b>Figura 1.1:</b> Localização e principais vias de acesso.....	05
<b>Figura 1.2:</b> Modelo digital de elevação SRTM considerando o Domínio Tectônico Médio Coreaú (NW), Ceará Central e adjacência.....	09
<b>Figura 2.1:</b> Reconstrução de parte do Gondwana Oeste, mostrando as principais massas cratônicas em amarelo e as faixas móveis em laranja. As zonas de sutura brasileiras/pan-africanas são marcadas pelas linhas pretas. LA= lineamento Adamaoua, FB= Faixa Brasília; LPA = Lineamento Patos, LPE = Lineamento Pernambuco, FS = Faixa Sergipana, LS = Lineamento Sanaga, CSL = Cráton São Luiz, LSP = Lineamento Senador Pompeu, TSFB = Cinturão de dobramento Transbrasiliano.....	11
<b>Figura 2.2:</b> Localização geográfica-geológica da área investigada no contexto da Província Borborema, (DMC-Domínio Médio Coreaú – DCC-Domínio Ceará Central e DRGN-Domínio Rio Grande do Norte).....	13
<b>Figura 2.3:</b> Esboço geológico regional da porção setentrional da PB e arredores do lineamento Patos. MSJC-Maciço São José Campestre, MT-Maciço de Tróia.....	17
<b>Figura 2.4:</b> Mapa geológico das regiões de Umirim e Canindé 1:500.000,.....	27
<b>Figura 3.1:</b> Localização do Projeto Rio Acaraú e do Projeto Itatira sub-dividido em três áreas (A,B e C), no detalhe as especificações dos perfis e área de investigação detalhada.....	33
<b>Figura 3.2:</b> Fluxograma das etapas desenvolvidas ao longo do processamento dos dados aerogeofísicos dos Projetos Rio Acaraú e Itatira.....	37
<b>Figura 3.3:</b> Comparação dos perfis gerados para cada método de interpolação (Z5 – vermelho) dado bruto, perfil azul corresponde ao método Bigrid, o rosa à Krigagem e o verde à mínima curvatura. O perfil mais próximo do dado bruto é o bidirecional.....	41
<b>Figura 3.4:</b> Imagem do campo anômalo micronivelado (CMA), no detalhe área piloto onde foram efetuados os trabalhos de campo.....	43
<b>Figura 3.5:</b> Espectro da potência do campo magnético anômalo com as respectivas profundidades estimadas. ....	45
<b>Figura 3.6:</b> Imagem das filtragens derivadas e continuação ascendente; A) Primeira derivada horizontal em x; B) Primeira derivada horizontal em y; C) primeira derivada vertical em z; D) Continuação ascendente para 1000 m; E) Continuação ascendente para 2000 m; F) Continuação ascendente para 10000 m.....	51
<b>Figura 3.7:</b> Imagem da amplitude do sinal analítico de ordem 0 .....	55

<b>Figura 3.8:</b> Mapa integrado da amplitude do sinal analítico e os principais domínios e estruturas magnéticas regionais. AMSQ: Arco magmático de Santa Quitéria altos valores de amplitude; valores intermediários e de baixa amplitude CCI e CC2, respectivamente; Cz1: Complexo Cruzeta. Os granitos Serra da Barriga (Gsb), Mucambo (Gm), Meruoca (Gmr) e Pajé (Gpj), Nova Russas (Gnr) e Varjota (Gv) também são caracterizados por baixas amplitudes.....	59
<b>Figura 3.9:</b> Mapa integrado de composição ternária RGB e contornos dos limites litológicos; AMSQ: Arco magmático de Santa Quitéria; CCI e CC2 Complexo Ceará; Cz1: Complexo Cruzeta; Serra da Barriga (Gsb), Mucambo (Gm), Meruoca (Gmr), Pajé (Gpj), Nova Russas (Gnr) e Varjota (Gv) .....	61
<b>Figura 3.10:</b> Estruturas extraídas do radar SRTM e dos dados aerogeofísicos (ASA e RGB) em parte compiladas do mapa geológico do Estado do Ceará.....	63
<b>Figura 3.11:</b> Lineamentos magnéticos extraídos das derivadas horizontais (x, y) e vertical (z).....	67
<b>Figura 3.12:</b> Principais domínios magnéticos individualizados a partir da amplitude do sinal analítico.....	71
<b>Figura 3.13:</b> Principais Imagens geradas a partir do processamento dos dados gamaespectrométricos (K, Th, U, CT, RGB e CMY).....	77
<b>Figura 4.1:</b> Imagem da composição colorida RGB (K: Th: U) e principais unidades gamaespectrométricas das regiões de Umirim e Canindé.....	83
<b>Figura 4.2:</b> A) Seqüência metassedimentar com paragênese de alta pressão mega cianitas, granada e silimanita; B) Microfotografia (2,5x) mostrando silimanita (sil) no centro, quartzo (qtz), granada (Grt), biotita (Bt), Clinopiroxênio (Cpx), amostra WT-174; C) Afloramento subverticalizado, próximo as Zonas de maior strain com a presença de granadas porfíricas e silimanita fibrolita; D) Microfotografia (2,5x) mostrando granada com bordas de reação em granulitos kinzigíticos (WT-174).....	89
<b>Figura 4.3:</b> A) Pico das antenas no município de Pacoti, serras sustentadas pela seqüência metassedimentar de Guaramiranga SE da área de estudo; B) Detalhe dos quartzitos micáceos ricos em muscovita e filmes de biotita.....	91
<b>Figura 4.4:</b> A) Afloramento intemperizado de granada-biotita-muscovita-gnaiss; B) Detalhe dos quartzitos arcoseanos ricos em microclina e biotitas.....	93
<b>Figura 4.5:</b> A) migmatitos anfibolíticos metatexitos; B) gnaisses de composição granodiorítica exibindo uma proeminente lineação de estiramento; C) enclaves máficos em meio comum nas porções isotrópicas; D) ortoquartzitos localizados em geral, próximos as zonas de cisalhamento transcorrentes.....	95
<b>Figura 4.6:</b> A) Blocos de gnaisses diatexitos; B) microfotografia mostrando texturas de intercrescimento gráficas e presença de microclina em maior proporção amostra WT-122 (aumento 2,5x); C) leucognaisses migmatíticos exibindo estrutura dobrada; D) microfotografia com textura granoblástica típica dos leucognaisses composta por plagioclásio, microclina, pertita, biotita e quartzo (aumento 2,5x).....	99
<b>Figura 4.7:</b> A) Bloco de granulito máfico, com cristais euhedrais de ortopiroxênio; B) microfotografia mostrando texturas simplectíticas de plagioclásio e clinopiroxênio (2,5x) (WT-176); C) Detalhe de	

granulitos máficos com granadas (amostra WT-221); D) microfotografia (2,5x) granada com coroa de plagioclásio e clinopiroxênio evidenciando a atuação de descompressão dos granulitos máficos. O retrometamorfismo é evidenciado pelo aparecimento de anfibólio; E) granulito félsico, no detalhe granadas e piroxênios prismáticos; F) granadas com grande quantidade de quartzo em gotas incluso, formando polimorfos de sílica podendo ser coesita..... 103

**Figura 4.8:** A) Detalhe mostrando a relativa abundância de magnetita na fácies do serrote Serrinha; B) Bloco quartzo diorítico do serrote Tamanduá, fácies fina média, equigranular..... 105

**Figura 4.9:** A) Bloco de leucognaisse exibindo granulação grossa com alguns cristais porfíricos de k-feldspato; B) coloração rosada típica de feldspatos potássicos em rochas com altos teores de k, ressaltados na gamaespectrometria; C) Migmatitos que bordejam os granitóides, predomínio de bandas máficas ricas em biotitas, estrutura estromática..... 107

**Figura 4.10:** A) Lajedo de migmatito leucocrático exibindo estrutura nebulítica; B) Detalhe de pórfiros de granada; C) Hornblenda migmatitos (metatextos) preservando foliação; D) Microfotografia (2,5x) Proporção de microclina em relação ao plagioclásio, muito superior nos leucognaisse..... 111

**Figura 4.11:** Unidades gamaespectrométricas individualizadas no AMSQ, setor NW da área mapeada. A análise quantitativa dos radioelementos foi realizada individualmente nos três canais (K, Th, U)..... 115

**Figura 4.12:** A) Forma de ocorrência dos diques basálticos, no detalhe intemperismo provocando esfoliação esférica; B) Bloco de diabásio disperso no terreno, registro no solo vermelho, típico de alteração de rochas básicas..... 117

**Figura 4.13:** Principais litotipos diferenciados em campo e nas imagens gamaespectrométricas: A) Núcleos granito-anatéticos Np1; B) Migmatitos diatexitos com enclaves máficos Np2; C) Gnaisses porfíricos homogêneos Np3; D) gnaisses porfíricos com uma foliação de baixo ângulo próximos as frentes de empurrão; E) Gnaisses de composição granodiorítica da unidade Caxitoré Np4; F) Gnaisses da mesma unidade com indicadores cinemáticos tipo S/C..... 119

**Figura 4.14:** Utilização do modelo digital do terreno (SRTM) e da imagem da amplitude do gradiente horizontal total (AGHT) como ferramentas na obtenção de estruturas lineares..... 123

**Figura 4.15:** Mapa dos principais domínios estruturais individualizados a partir da correlação dos dados de campo com os produtos aerogeofísicos e de SRTM, processados e interpretados..... 125

**Figura 4.16:** Estereogramas da foliação ( $S_n$ ) e da lineação ( $L_x$ ), correspondentes aos quatro domínios estruturais..... 127

**Figura 4.17:** Perfil esquemático (A-B), mostrando a estruturação da borda NE do Arco Magmático de Santa Quitéria..... 131

**Figura 4.18:** Afloramento de biotita gnaisse milonitizado, próximo a zona de cisalhamento de Paramoti (ZCP), no detalhe, lineação de estiramento mineral oblíqua contida no plano XY da foliação..... 133

**Figura 4.19:** Afloramento de gnaisse milonítico exibindo: A) dobras intrafoliais apertadas com eixo subverticalizado; B) Microfotografia (2,5 x) aspecto deformacional impresso nas rochas milonitizadas..... 133

<b>Figura 4.20:</b> Perfil esquemático (C-D), mostrando a estruturação na região central com o desenvolvimento de transcorrências e cavalgamentos a sudeste.....	135
<b>Figura 4.21:</b> Tectônica de baixo ângulo nas seqüências supracrustais metaluminosas, no detalhe silimanitas em forma de bastões e micas marcando a lineação de estiramento mineral próximo as zonas de cisalhamento.....	137
<b>Figura 4.22:</b> A) Moscovita quartzito cisalhado no limite SE da área de estudo; B) Destaque para a assimetria das dobras intrafoliais em biotita gnaisses migmatizados da unidade (Ccp4), denotando vergência preferencialmente para SW e eixos de direção NW-SE.....	137
<b>Figura 4.23:</b> Perfil esquemático (E-F), mostrando a estruturação na região sudeste da área mapeada.....	139
<b>Figura 4.24:</b> Mapa geológico escala 1:100.000 das regiões de Umirim e Canindé-CE.....	141
<b>Figura 5.1:</b> Bloco diagrama esquemático, mostrando a atuação das fases $F_n$ e $F_{n+1}$ e o desenvolvimento das principais zonas de cisalhamento (ZC) durante o evento compressivo $D_n$ , os estereogramas correspondem à disposição da foliação $S_n$ .....	147

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 2.1:</b> Resumo das principais idades geocronológicas publicadas sobre a região.....	22
<b>Tabela 3.1:</b> Síntese das principais características dos aerolevantamentos.....	35
<b>Tabela 3.2:</b> Principais direções dos lineamentos magnéticos.....	65



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**Integração de Dados Aerogeofísicos e Geológicos e sua Contribuição a Evolução  
Geodinâmica do Domínio Ceará Central, Província Borborema.**

**RESUMO**

**Dissertação de Mestrado**

**Wagner da Silva Amaral**

O avanço das tecnologias de processamento de dados aerogeofísicos e integração com dados geológicos permitem recuperar informações úteis e valiosas contidas em levantamentos geofísicos com uma tecnologia mais antiga. Essas informações representam uma ferramenta essencial ao mapeamento geológico-estrutural de terrenos Pré-Cambrianos, onde as relações estratigráficas e estruturais são difíceis de serem delineadas em trabalhos de campo. Dados aerogeofísicos adquiridos nos Projetos Rio Acaraú (1975) e Itaira (1977), realizados respectivamente nas regiões noroeste e central do Ceará, foram processados e integrados com a finalidade de gerar produtos que possam ser utilizados como ferramenta indireta na identificação de feições geológicas regionais. A verificação e aplicabilidade do método foram postas em prática com a definição de uma área piloto compreendida pelas folhas topográfica 1.100.000 Umirim e Canindé. A integração dos dados aerogeofísicos e geológicos de campo, dando suporte ao mapeamento geológico em escala 1:100.000, permitiu reconhecer duas principais unidades de mapeamento: o Arco Magmático de Santa Quitéria – AMSQ e as seqüências supracrustais para e ortoderivadas que o bordejam. Do arco, foram identificados quatro tipos litológicos representados por **Np<sub>1</sub>**: Núcleos anatóticos; **Np<sub>2</sub>**: Migmatitos ortoderivados; **Np<sub>3</sub>**: Granitos gnáissicos porfiríticos; **Np<sub>4</sub>**: Gnaisses granodioríticos. Da supracrustal têm-se: a seqüência paraderivada (**Ccp**) constituída por seis subunidades de mapeamento, onde se destacam paragnaisses, migmatitos, micaxistos, quartzitos, cálcio silicáticas e metacalcários; e a seqüência ortoderivada (**Cco**) formada por oito subunidades compostas por granodioritos, leucogranitóides, migmatitos (diatexitos e metatexitos), anfíbolitos, dioritos e granulitos máficos. A análise dos lineamentos estruturais da área de estudo, foi realizada com o processamento e interpretação dos produtos aeromagnéticos e do modelo digital do terreno-SRTM para a extração das grandes estruturas regionais. Os maiores lineamentos da região correspondem a zonas de cisalhamentos transcorrentes destrais representadas pelo do sistema de falhas de Paramoti (ZCP) de direção NE-SW, e as zonas de cisalhamento de baixo ângulo com vergência para E-SE no setor noroeste, e para W-NW no setor sudeste. Em termos deformacionais, o principal regime atuante na área é de natureza compressiva, responsável pela geração de foliações, lineações, dobras e zonas de cisalhamento, contendo três fases deformacionais denominadas **F<sub>n</sub>**, **F<sub>n+1</sub>**, **F<sub>n+2</sub>**. A fase **F<sub>n</sub>** é representada por empurrões com vergência aproximada para E-SE no setor NW e para W-NW no setor SE. A fase **F<sub>n+1</sub>**, de natureza transpressional, marca o desenvolvimento de zonas de cisalhamento de direção aproximada NE-SW. E por fim, a fase **F<sub>n+2</sub>** relaciona-se à exumação e conseqüente tectônica frágil das rochas supracrustais. As rochas do arco magmático de Santa Quitéria foram caracterizadas por apresentarem altas contagens no canal de K em quase toda região de abrangência e contagens intermediárias e baixas de Th e U. De modo geral, a seqüência supracrustal foi caracterizada por apresentar alta contribuição dos canais de U e Th e baixa de K. As subunidades *Migmatitos anfíbolíticos e Metaultramáficas (Cco3)* e *Hornblenda gnaisses migmatíticos, granulitos máficos (Cco4)*, compostas por rochas máficas/metaultramáficas e anfíbolíticas, onde se destaca a ocorrência faixas de retro-eclogitos e granulitos máficos encaixados como lentes em gnaisses e migmatitos apresentam fortes anomalias negativas, com baixas contagens nos três canais K-Th-U. A anomalia mais proeminente com esses registros encontra-se na região central da área, a sul do município de Pentecoste. Na magnetometria essas rochas têm anomalias positivas com altos valores de susceptibilidade magnética.



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**Airborne Geophysical and Geologic Data Integration and its Contribution to the  
Geodynamic Evolution of Central Ceará Domain, Borborema Province**

**ABSTRACT**

**Master's Dissertation**

**Wagner da Silva Amaral**

Advances in airborne geophysical data processing techniques and their integration with geologic data allow recovering valuable information from both geophysical surveys and, the older technology. These information represent an essential tool for geologic-structural mapping of Pre-Cambrian terrains, where the stratigraphic and structural relations are difficult to be delineated in field works. The airborne geophysical data from Rio Acaraú (1975) and Itatira (1977) projects were carried out through respectively, in the northwest and central regions of the State of the Ceará. Their processing produced products useful to indirectly identify regional geologic features. The verification and applicability of this approach was tested in an pilot-area whose limits are within the Umirim and Canindé topographic sheets, at 1: 100,000 scale. The integration between the airborne geophysical and the geologic field data supported to the geologic mapping at the same cited scale. Two main units were recognized: the Santa Quitéria Magmatic Arc - AMSQ and the para-and-orthoderivative supracrustal sequences that surround the arc. The AMSQ has four major lithologies: **Np1** with anatectic granites; **Np2**: orthoderivated migmatites; **Np3**: porfiritic gneissic granites; **Np4**: granodioritic gneisses. The paraderivative supracrustal sequence (**Ccp**) consists of six mapped subunits, the paragneisses, marbles migmatites, mica-schists, quartzites and, calc-silicated rocks. The ortoderivative sequence (**Cco**) is formed by eight subunits, the granodiorites, leucogranitoids, mafic migmatites (diatexites and, metatexites), amphibolites, diorites and, granulites. The structural lineaments analysis at regional scale was done after the processing and interpretation of the airborne magnetic products and, the digital elevation model derived from the Shuttle Radar Topographic Mission-SRTM. The major lineaments correspond to the dextral transcurrent Paramoti Shear Zone (ZCP) of NE-SW direction and, to low angle shear zones with E-SE thrust-direction at the Northwestern sector and, another shear zone facing to W-NW direction at the Southeastern sector. About the deformation history, the main operating regime was compressive and, responsible for foliation, lineation, folds and shear zones. This history comprises three deformational phases called  $F_n$ ,  $F_{n+1}$ ,  $F_{n+2}$ . The  $F_n$  phase is represented by thrust toward E-SE in the Northwestern sector and towards W-NW direction at the Southeastern sector. The  $F_{n+1}$  phase, of transpressional nature, marks the development of shear zones with NE-SW direction. Finally, the  $F_{n+2}$  phase is related to the exhumation and consequently ruptile tectonics of the supracrustal rocks. The rocks from Santa Quitéria magmatic arc are characterized by high counting on the K-channel in its almost entire region and intermediate and low counting of Th and U. Generally, the supracrustal sequences are characterized by high values on the U-and-Th-channels and low on K-channel. The subunit Metaultramafics (**Cco3**) and Hornblend-gneisses and, mafics granulites (**Cco4**), are remarkable by the occurrence retro-eclogites bands and mafic granulites as lenses within gneisses and migmatites. These subunits present strong negative anomalies, with low counting on the three K, Th and, U channels. The best example for this negative anomalies are in the central region of the area, at south of Pentecostes city. That area also has positive magnetic anomalies, with high values of magnetic susceptibility.

## 1. INTRODUÇÃO

---

---

O avanço das tecnologias de processamento de dados aerogeofísicos e integração com dados geológicos permitem recuperar informações úteis e valiosas contidas em levantamentos geofísicos realizados com uma tecnologia mais antiga. Essas informações (lito-estruturais, tectônicas) representam uma ferramenta essencial ao mapeamento geológico-estrutural de terrenos pré-cambrianos, onde as relações estratigráficas e estruturais são difíceis de serem delineadas em trabalhos de campo (Blum, 1999; Silva, 1999).

Na última década, com o advento de novos programas computacionais visando o refinamento e a geração de diferentes produtos, uma série de trabalhos envolvendo dados aerogeofísicos antigos, foram dados a conhecimento (Gunn, 1997; Castro *et al.*, 2002; Dantas *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2003). A junção entre dados aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos tem-se constituído numa importante ferramenta para estudos estruturais de grandes áreas (Cordell e Grauch, 1985; Nabighian, 1972, Roest *et al.*, 1992; e Roest e Pilkington, 1993; Castaing e Debeglia, 1992), exploração mineral as mais variadas (Ghazala, 1993; Shives *et al.*, 1997; Tourlière *et al.*, 2003) e no auxílio ao mapeamento geológico básico (Galbraith e Saunders, 1983; Schetselaar *et al.*, 2000; Mantovani *et al.*, 2005).

Na região noroeste e central do Estado do Ceará deu-se a aquisição de dados aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos, englobados nos projetos Rio Acaraú (1975) e Itatira (1977) com linhas de vôo na direção N-S, tendo espaçamento de 1000 e 500 metros, respectivamente, e linhas de controle perpendiculares (E-W), com espaçamentos de 20 km. Essa amostragem pode ser considerada de alta densidade o que permitiu, após o tratamento dos dados, a identificação de uma série de feições gamaespectrométricas e magnéticas, capazes de serem correlacionáveis em diversos graus aos aspectos lito-estruturais regionais e locais.

A porção noroeste da Província Borborema tem sido alvo de diversos trabalhos envolvendo estudos geológicos, geocronológicos e de geotecnologias (Fetter, 1999; Martins, 2000; Cavalcante *et al.*, 2003; Santos *et al.*, 2004; Castro, 2004; Teixeira, 2005). Essa Província é considerada parte integrante do grande sistema orogênico neoproterozóico Brasileiro/Pan-fricano. Nesse contexto a região foi palco do processo de convergência que envolveu os crátons

Oeste-Africano/São Luiz, Amazônico e São Francisco/Congo, representados em geral por um sistema de *nappes* com metamorfismo inverso e seqüências máficas/ultramáficas geradas em zonas de subducção (Caby & Arthaud, 1986).

Do ponto de vista tectônico, o Domínio Ceará Central constitui um dos mais importantes da Província Borborema e, por conseguinte, corresponde ao menos compreendido. Esse desconhecimento se deve principalmente a ausência de mapeamento básico sistemático, embora nos últimos anos várias dissertações de mestrado e teses de doutorado tenham trazido valiosas informações (Fetter, 1999; Martins, 2000; Castro, 2001; Santos, 2003; Castro, 2004; Teixeira, 2005). Dentre os diferentes blocos ou terrenos, destacam-se: um núcleo Arqueano (Maciço de Tróia e Pedra-Branca); um embasamento Paleoproterozóico; supracrustais paleo a neoproterozóicas; o batólito Neoproterozóico de Santa Quitéria; e muitos corpos graníticos pós tectônicos. O batólito de Santa Quitéria é interpretado como um arco magmático continental, cuja subducção teve polaridade para sudeste (Fetter *et al.* 2003). Em contraposição, Castro (2004) coloca uma polaridade para norte-noroeste com base na identificação de retro-eclogitos na porção sudeste do arco.

Assim, as diretrizes que norteiam esta dissertação propõem a integração de dados aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos do Projeto Itatira, aliados aos trabalhos de campo nas folhas 1:100.000 Canindé e Umirim, como avanço ao conhecimento tectônico do Domínio Ceará Central. Essa região tem grande probabilidade de conter rochas básicas e/ou ultrabásicas que possam constituir resquícios de crosta oceânica envolvida em subducção durante o Neoproterozóico e, dessa forma, trazer importantes informações aos modelos de reconstrução do Gondwana ocidental.

### ***1.1. Objetivos***

- i) Auxiliar no mapeamento geológico, identificar estruturas geológicas regionais e locais, utilizando-se do processamento de dados aeromagnéticos e gamaespectrométricos dos projetos Rio Acaraú e Itatira;
- ii) Caracterizar numa área piloto, compreendida pelas folhas 1:100.000 de Umirim e Canindé, as relações entre o processamento aerogeofísico e os dados de campo por meio da integração dos dados, elaborando um mapa geológico-estrutural dessas folhas na escala 1:100.000;
- iii) Situar a área piloto no contexto tectônico da porção noroeste da Província Borborema e caracterizar sua importância na evolução do Gondwana ocidental;
- iv) Integrar e interpretar todas as informações em ambiente de Sistema de Informações Geográficas - SIG.

### ***1.2. Localização e Vias de Acesso***

A área estudada está inserida no Domínio Ceará Central da Província Borborema, correspondente às folhas topográficas 1:100.000 de Umirim e Canindé (DSG/SUDENE, 1972). É limitada pelas coordenadas UTM (Datum Córrego Alegre, Zona 24 S) 9.610.000 m e 9.500.000 m, norte e sul, e 500.000 m e 445.000 m, leste e oeste, respectivamente (Figura 1.1). A partir de Fortaleza, o acesso sul da área é realizado pela rodovia federal BR-020, em direção ao município de Canindé, em um percurso de aproximadamente 100 km. À porção norte da área, o acesso é realizado pela rodovia federal BR-222, em direção ao município de Sobral.

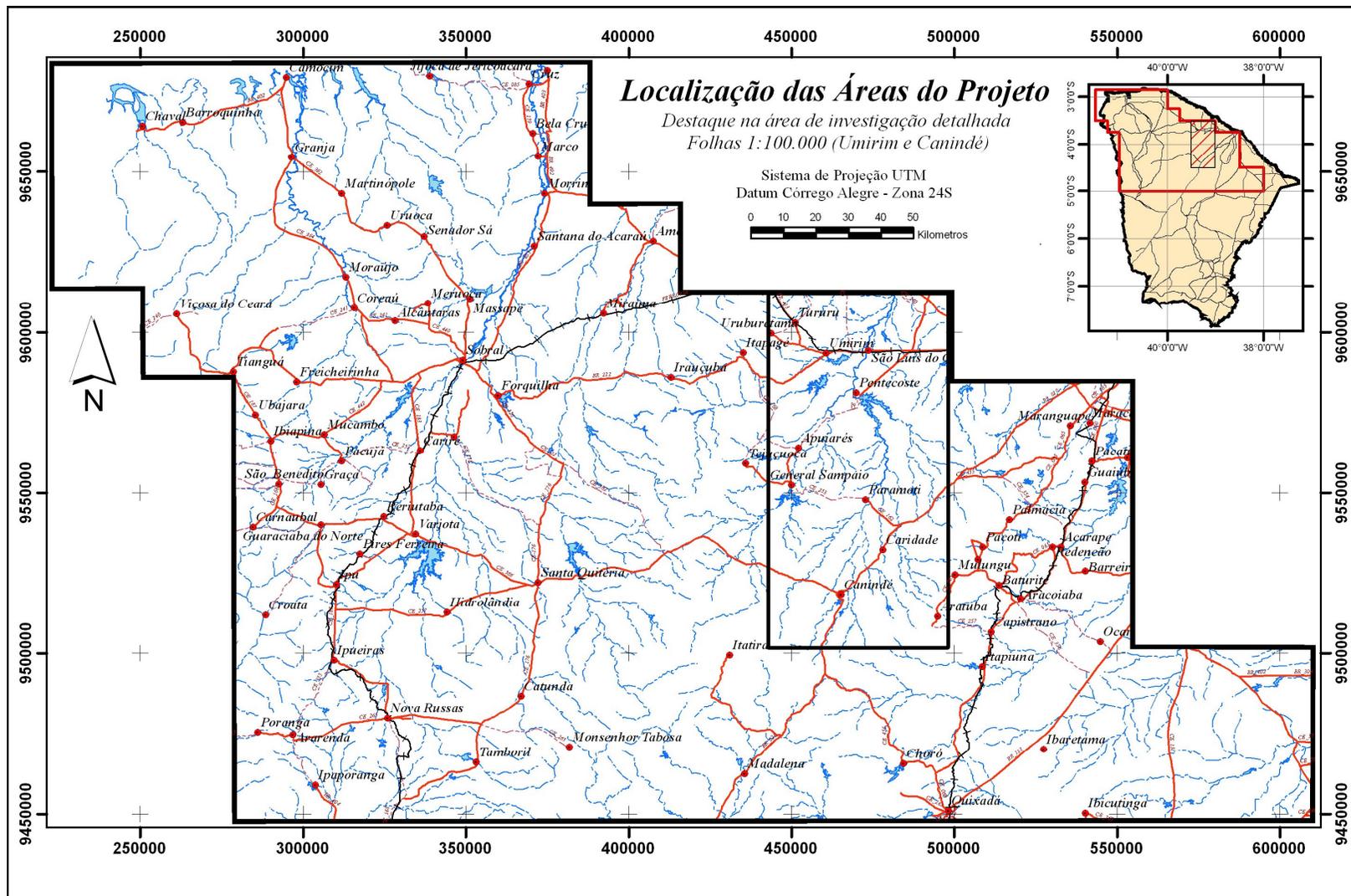


Figura 1.1: Localização e principais vias de acesso

### **1.3. Método**

O método de trabalho contemplou as seguintes etapas:

1. Levantamento inicial de informações relativas à geologia do Estado do Ceará e evolução geológica da Província Borborema. Aquisição digital envolvendo as informações planialtimétricas e geológicas, imagens de sensores remotos (LANDSAT 7 ETM+, radar SRTM), dados aerogeofísicos, fotografias aéreas, etc.;

2. Montagem do acervo de informações georreferenciadas. Inicialmente, cada tipo de informação foi trabalhada em programas destinados à entrada de dados e úteis para a geração de temas específicos a serem utilizados nas interpretações futuras (OASIS MONTAJ, ENVI e ER-MAPPER). Após a geração dos diferentes produtos (GRIDs aerogeofísicos, imagens de radar SRTM e sensores remotos LANDSAT 7 ETM+) esses foram integrados em sistema de informações geográficas (SIG) utilizando a plataforma ArcGis 9.0, onde foram gerados mapas temáticos comportando uma gama variada de informações que puderam ser utilizadas tanto no planejamento quanto na execução das atividades de campo subseqüentes. As etapas de processamento foram realizadas principalmente no Laboratório de Processamento de Informações Georreferenciadas – LAPIG do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP e no Laboratório de Geofísica Aplicada – LGA da Universidade de Brasília-UnB.

3. Trabalhos de campo: foram realizadas duas etapas de campo, com a duração de 26 dias cada uma, destinadas ao levantamento de tipos litológicos, estruturas, foliações, lineações, caracterização de dobramentos, empurrões e a coleta de amostras para análises petrográficas. Procurou-se realizar perfis preferencialmente perpendiculares às estruturas, previamente observados nas imagens aerogeofísicas e de sensores remotos (Apêndice 01);

4. Incorporação das informações de campo ao acervo de informações georreferenciadas feita através da confecção de tabelas de informações realizadas no *software* Excel e a montagem dos vetores na plataforma ArcGis 9.0;

5. Integração entre as informações de campo e mapas temáticos pré-existentes na literatura visando o aprimoramento da cartografia geológica preliminar;

6. Estudo petrográfico de lâminas delgadas para identificação de associações minerais, feições micro-estruturais e texturais que reconstituam as condições deformacionais e metamórficas da área;

7. Por fim, foi realizada a integração de todas as informações em sistema de informações geográficas (SIG) sintetizadas nesta dissertação e em seus apêndices, também apresentadas em meio digital através da mídia interativa que acompanha este volume.

#### ***1.4. Aspectos Fisiográficos Gerais***

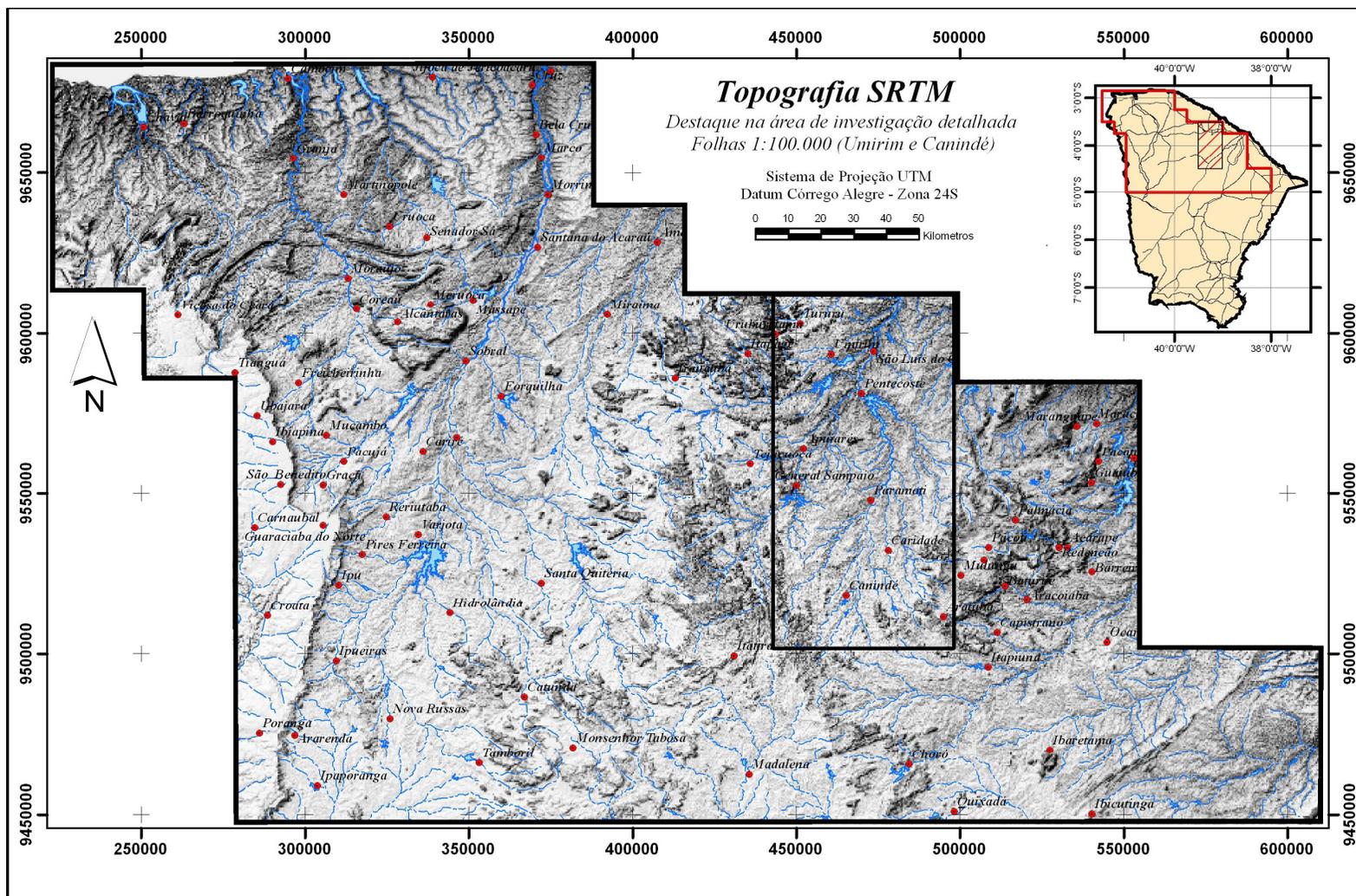
Situada cerca de 100 km a oeste da capital Fortaleza, a região de estudo comporta porções de relevo representativas de elevações residuais e porções já bem arrasadas (Figura 1.2).

A espessura do manto de intemperismo é variável, sendo encontradas regiões onde este é praticamente ausente, locais onde ocorrem extensos afloramentos. Porém, em alguns casos, a espessura dos solos pode atingir até 10 metros. Essa variabilidade ocorre devido a predominância de períodos de seca, alternados com escassos e curtos períodos chuvosos.

Os rios e riachos são intermitentes, fluindo somente durante a época das chuvas, época em que se eleva o nível freático e as lagoas, de pequeno porte, passam a acumular água. A erosão das porções mais elevadas se dá principalmente pelas redes de drenagem integrantes das bacias dos rios Curú (NE), Acaraú (NW) e Quixeramobim (SE) e encontram-se fortemente controlados por lineamentos e fraturamentos preferencialmente NE-SW e menos frequentes N-S.

As áreas aplainadas correspondem às regiões de ocorrências de rochas gnáissicas do embasamento cujas altitudes variam de 70 a 200 metros. São ocupadas principalmente por caatingas condicionadas pela semi-aridez que impera na região.

As maiores elevações da área mapeada associam-se às ocorrências de quartzitos situados na região sudeste (serra de Guaramiranga, proximidades do município de Aratuba) e a sudoeste (serra de Bonito), e também as importantes elevações associadas aos granitóides situados no domínio do arco de Santa Quitéria, a noroeste da área.

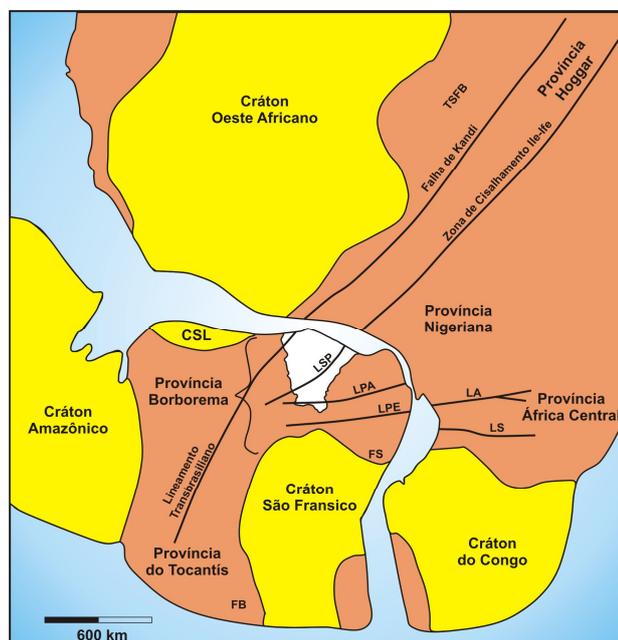


**Figura 1.2:** Modelo digital de elevação SRTM considerando o Domínio Tectônico Médio Coreaú (NW), Ceará Central e adjacência

## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

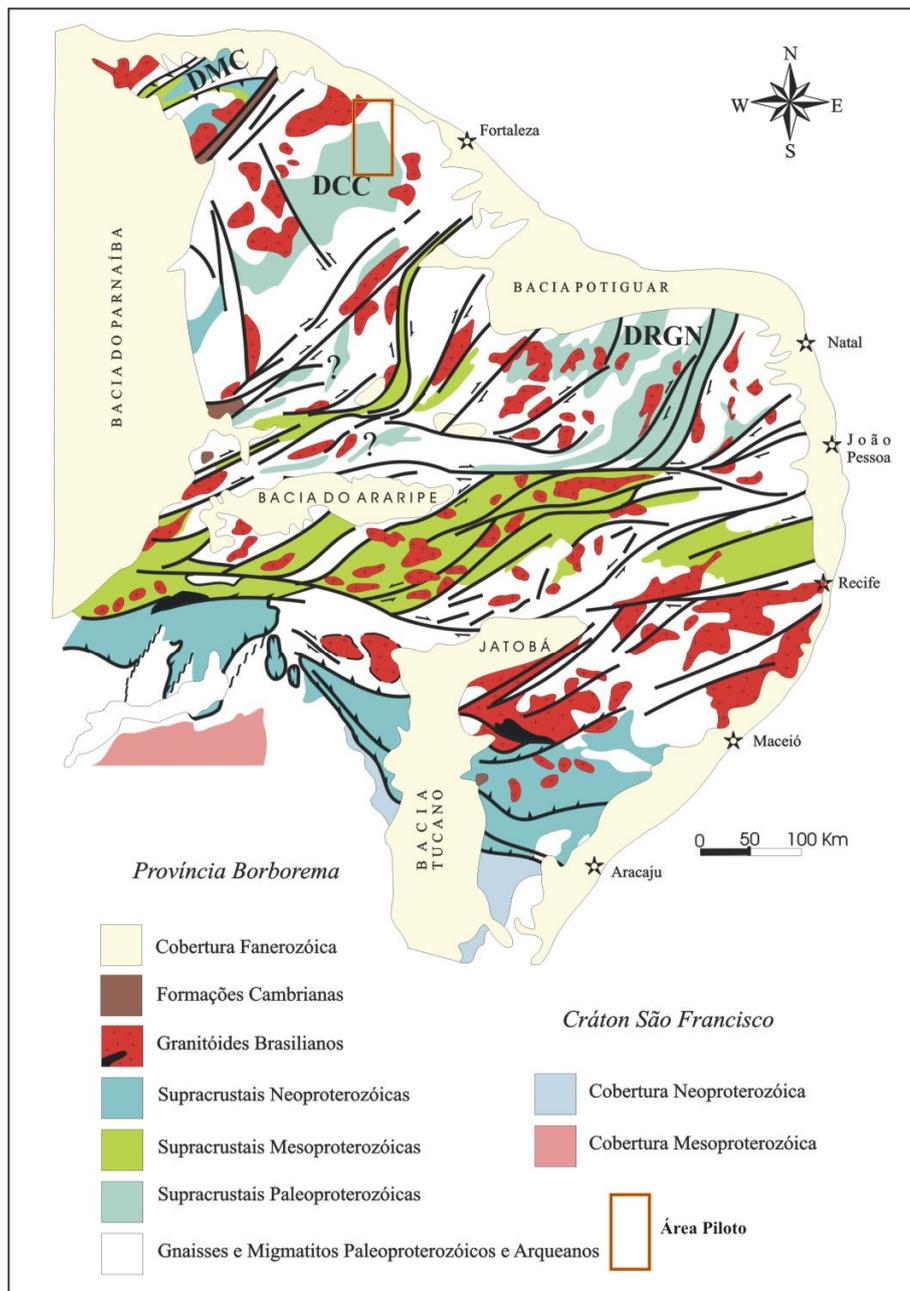
### 2.1. Província Borborema

A Província Borborema, localizada no Nordeste Oriental do Brasil, compreende uma vasta região geológica de idade pré-cambriana. Abrange aproximadamente 450.000 km<sup>2</sup>, cobrindo parte do norte da Bahia e sudoeste do Piauí, até o noroeste do Ceará (Almeida *et al.*, 1977). Sua evolução está relacionada à convergência e aglutinação dos crátons Oeste-Africano, Amazônico e São Francisco-Congo, durante a formação da porção ocidental de Gondwana (Castaing *et al.* 1994; Trompette, 1994, Figura 2.1). Estudos isotópicos mais recentes, U-Pb e Sm-Nd, realizados por toda Província Borborema, têm auxiliado a configurar um quadro de evolução crustal mais realista, envolvendo a colagem de diferentes terrenos tectono-estratigráficos, devido à atuação de distintos ciclos tectônicos (Van Schumus *et al.*, 1995; Santos *et al.* 1997; Brito-Neves *et al.*, 2000, 2001; Fetter *et al.*, 2000, 2003; Castro, 2004; Teixeira, 2005; entre outros).



**Figura 2.1:** Reconstrução de parte do Gondwana Oeste, mostrando as principais massas cratônicas em amarelo e as faixas móveis em laranja. As zonas de sutura brasileiras/pan-africanas são marcadas pelas linhas pretas. LA= lineamento Adamaoua, FB= Faixa Brasília; LPA = Lineamento Patos, LPE = Lineamento Pernambuco, FS = Faixa Sergipana, LS = Lineamento Sanaga, CSL = Cráton São Luiz, LSP = Lineamento Senador Pompeu, TSFB = Cinturão de dobramento Transbrasiliano, (Modificado de Fetter, 1999).

Nesta Província, a atuação da Orogênese Brasileira/Pan-Africana (Neoproterozóico) é caracterizada pelo desenvolvimento de extensas zonas de cisalhamento transcorrente e pelo intenso magmatismo granítico que perfaz, em termos gerais, cerca de 30% de todo o território em apreço (Almeida *et al.*, 1981), (Figura 2.2).



**Figura 2.2:** Localização geográfica-geológica da área investigada no contexto da Província Borborema, estruturada por extensas zonas de cisalhamento transcorrentes e de empurrão (DMC-Domínio Médio Coreaú – DCC-Domínio Ceará Central e DRGN-Domínio Rio Grande do Norte). Arcabouço geológico compilado de Santos (2000).

Algumas interpretações conflitantes vêm surgindo ao longo dos anos sobre os segmentos da Província Borborema, alimentando debates sobre sua evolução. Dentre as várias vertentes desse debate destacam-se as seguintes correntes de interpretações e/ou modelos:

Com base em dados de K-Ar e Rb-Sr, Brito-Neves & Cordani (1991), reconheceram um padrão tectônico similar a um mosaico na PB. Esse mosaico é formado por vários núcleos gnáissico-migmatíticos de idade pré-cambriana, circundados por faixas metassedimentares dobradas de idade pós-proterozóica.

Caby (1989) estendeu suas interpretações geotectônicas da faixa Trans-Saara à Província Borborema: Essas interpretações propõem uma evolução crustal monocíclica para as faixas supracrustais em várias fases no intervalo de 900-530 Ma. As feições relacionadas às deformações tangenciais e transcorrentes são aparentemente sincrônicas e geradas num único evento de deformação (Caby & Arthaud, 1986; Caby *et al.*, 1995).

Dados geocronológicos U-Pb e Sm-Nd (Dantas, 1992, 1997; Fetter, 1999; Santos, 1993, 1999; entre outros), vêm demonstrando a presença de diversos eventos tectônicos (2,7 Ga. 2,1 Ga. 1,0 Ga. e 0,6 Ga.) nesta província, determinando, segundo Brito-Neves *et al.*, (1995) e Van Schmus *et al.* (1997), uma evolução policíclica para a Província Borborema.

O quadro pré-cambriano dessa Província caracteriza-se, ainda, pela existência de significativos sistemas de zonas de cisalhamento de caráter dúctil, e com orientações NE-SW, NNE-SSW e E-W, marcadas por alinhamentos de grande expressão geográfica, caracterizados por Vauchez *et al.* (1995) como uma rede de falhas transcorrentes desenvolvidas durante a atuação da orogênese brasileira. Ainda segundo esse mesmo autor, o sistema de zonas de cisalhamento da Província Borborema pode ser dividido em dois domínios: oeste e leste. O Estado do Ceará estaria então enquadrado no domínio oeste, que é caracterizado por zonas de cisalhamento de direção NE-SW que pós-datam as *nappes* das porções central e norte do Estado (Caby & Arthaud, 1986). Esse Domínio comporta as mega-zonas de cisalhamento de Granja, Sobral, Senador Pompeu, Tatajuba e Potengi.

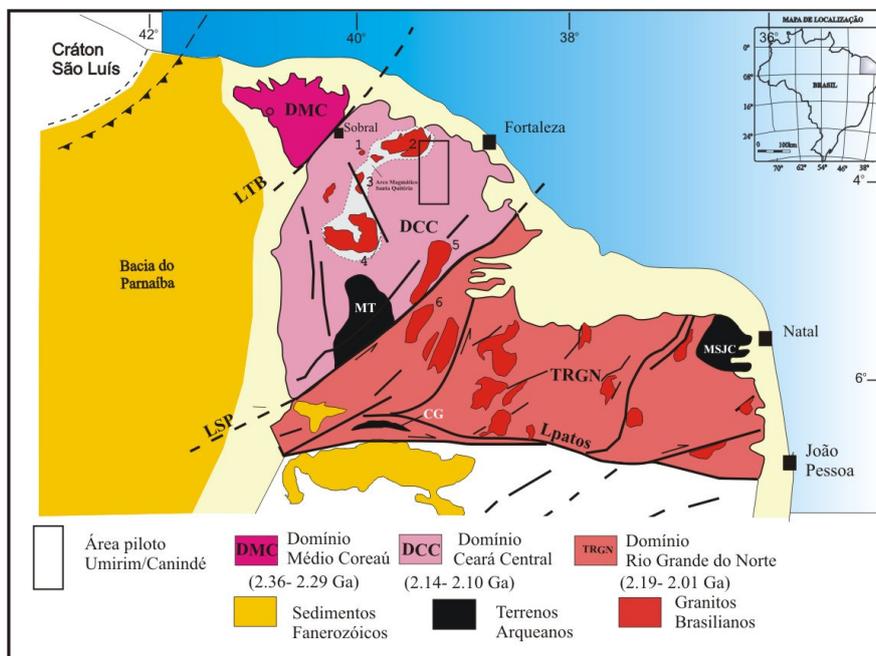
Uma das principais características dessas mega-zonas de cisalhamento, também sintetizadas por Vauchez *et al.* (1995), é que são marcadas em campo por cinturões miloníticos bem desenvolvidos nos quais protomilonitos e milonitos de alta a baixa temperatura coexistem. O protólito dessas rochas são gnaiesses e granitóides com idades do Arqueano ao Paleoproterozóico

e metassedimentos e metavulcânicas das seqüências Proterozóicas, além de granitóides Neoproterozóicos.

## 2.2. Arcabouço Tectônico da Província Borborema

A separação e caracterização de conjuntos, por vezes limitados por zonas de cisalhamento, têm levado à divisão da Província Borborema em domínios que refletem, de forma global, diferentes histórias evolutivas. O lineamento Patos divide dois grandes blocos tectônicos, o Domínio Norte e o Domínio Sul (Van Schmus *et al.*, 1997). Baseado em assinaturas crustais de Nd e diferenças de idades U-Pb, esses domínios foram ainda subdivididos em domínios crustais menores.

No Domínio Tectônico Norte, o Lineamento Transbrasiliano e o Lineamento Senador Pompeu subdividem esta porção em três outras unidades crustais conhecidas por Domínio Noroeste do Ceará, Domínio Ceará Central e o Terreno Rio Grande do Norte. Inserido no Domínio Norte têm-se três blocos de idade arqueana: o maciço São José do Campestre e o Complexo Granjeiro (Gomes *et al.*, 1998) no Terreno Rio Grande do Norte, e o maciço de Tróia no Domínio Ceará Central. (Figura 2.3).



**Figura 2.3:** Esboço geológico regional da porção setentrional da PB e arredores do lineamento Patos. MSJC-Macijo São José Campestre, MT-Macijo de Tróia, LTB: Lineamento Transbrasiliano, LSP: Lineamento Senador Pompeu . (Fonte: Santos *et al.*, 2004 - modificado).

### **2.3. Domínio Ceará Central (DCC)**

O Domínio Ceará Central (DCC), onde está incluída a área mapeada, é a mais extensa unidade geotectônica da porção norte da Província Borborema e alcança quase a totalidade do Estado do Ceará. É delimitado a NW pela zona de cisalhamento Sobral-Pedro II (Lineamento Transbrasiliano) e a SE pela zona de cisalhamento Senador Pompeu (ZCSP), sendo encoberto a SW-W pelos sedimentos da Bacia do Parnaíba.

Neste trabalho, o Domínio Ceará Central está apresentado dividido em quatro unidades geotectônicas que serão descritas separadamente, de acordo com Fetter *et al.* (2000), a saber: i) embasamento Arqueano, que é representado por ortognaisses, gnaisses, granodioritos e tonalitos em geral limitados por zonas de cisalhamento (Caby & Arthaud, 1989). Pertencem a essa unidade o maciço de Tróia, com os blocos Tróia-Pedra Branca e Mombaça, separados pela zona de cisalhamento Sabonete-Inharé; ii) terrenos acrescionários do Paleoproterozóico, constituídos em grande parte por rochas metassedimentares, com quartzitos basais seguidos de xistos, orto e paragnaisses e carbonatos; iii) coberturas neoproterozóicas, que segundo Mendonça *et al.* (1984) são um pacote de rochas psamítico-pelítico-carbonáticas organizadas em diferentes arranjos lito-estratigráficos, interpretadas e descritas como coberturas do tipo plataforma continental e; iv) complexo Tamboril-Santa Quitéria, incluindo neste o recém definido Arco Magmático de Santa Quitéria (Fetter *et al.*, 2003), que é constituído por rochas graníticas migmatizadas, com composição tonalítica a granodiorítica migmatizadas, situado a leste da zona de cisalhamento Sobral - Pedro II e recobrimdo quase 20% da área do Domínio Ceará Central.

#### **2.3.1. Embasamento Arqueano**

Os terrenos dessa unidade estão distribuídos ao longo da borda ocidental da zona de cisalhamento Senador Pompeu, somando cerca de 6.000 km<sup>2</sup>, representando pequenos núcleos envoltos por complexos gnáissicos do embasamento paleoproterozóico.

Pessoa *et al.* (1986) obtiveram uma idade Rb-Sr de  $2,6 \pm 0,1$  Ga. em leucognaisse peraluminoso e Fetter *et al.* (1999) definiu a idade U-Pb em zircão de  $2,776 \pm 65$  Ma e uma idade modelo ( $T_{DM}$ ) de 2,81 Ga. com  $\epsilon_{ND}(+2,1)$ , este implicando crosta juvenil.

Terrenos gnáissico-granulíticos localizados entre as zonas de cisalhamento Senador Pompeu e Sabonete-Inharé (Complexo Mombaça de Medeiros *et al.*, 1996), são compostos principalmente por rochas gnáissicas e granulíticas de composição tonalítica e granodiorítica. Esta unidade apresenta idades modelo ( $T_{DM}$ ) entre 2,8 e 3,04 Ga. e idades U-Pb em zircão de  $2,857 \pm 42$  Ma. e  $2,794 \pm 77$  Ma. (Fetter, 1999).

### **2.3.2. Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico**

Durante o Paleoproterozóico, o Domínio Ceará Central foi marcado por grandes extensões intracratônicas que precederam um evento orogenético. Tais extensões estão registradas pela formação de uma seqüência de rochas supracrustais metaígneas a oeste da cidade de Quixeramobim, formando o cinturão homônimo (Arthaud, 1998). No terreno Rio Grande do Norte esse evento extensional é marcado pelas rochas que formam o cinturão Orós-Jaguaribe.

Entre o Terreno Santa Quitéria e a zona de cisalhamento Senador Pompeu ocorrem rochas que correspondem à série Ceará, ainda indivisa, constituída em grande parte por rochas metassedimentares, com quartzitos basais seguidos de xistos, orto-paragnaisses e carbonatos.

Na borda oriental do Lineamento Transbrasiliano ocorrem ortognaisses dos quais Fetter (1999) reporta dezoito idades modelos de Nd ( $T_{DM}$ ) com valores entre 2,22 Ga. e 2,44 Ga. quatro idades U-Pb em cristais de zircão no intervalo de 2,10 Ga. a 2,14 Ga. e valores de  $\epsilon$  Nd de +1,9 a +0,6.

### **2.3.3. Cobertura Neoproterozóica**

O DCC é caracterizado pela ampla ocorrência de seqüências supracrustais, praticamente, bordejando todo o arco magmático de Santa Quitéria. No Projeto Fortaleza (1979), RADAMBRASIL (1987) e no mapa geológico do Ceará (Cavalcante *et al.*, 2003), essas unidades foram incluídas no Grupo Ceará ou Complexo Ceará, individualizado nas unidades Independência e Canindé.

Essas unidades são caracterizadas pela ocorrência de rochas essencialmente pelíticas, representadas por cianita-muscovita-biotita, gnaiss granadífero, gnaisses quartzo-feldspáticos, muscovita-biotita gnaiss e biotita gnaiss, podendo ou não ocorrer granada, com contribuições

de mármores e cálcio silicáticas. *Sills* de granitos alcalinos, derrames de riolitos alcalinos e de metabasaltos também foram descritos nessa unidade (Caby & Arthaud, 1986). Nesses trabalhos, as coberturas são geralmente associadas a uma plataforma continental (Jardim de Sá & Fowler, 1981).

As seqüências de cobertura apresentam idades muito variadas indicando que existiu mais de um tipo de área-fonte para a sedimentação. Porém acredita-se que a época de deposição ocorreu no Neoproterozóico, (Santos, 2003). As idades U-Pb, de  $772 \pm 31$  Ma. em zircão de metariolitos e idade modelo ( $T_{DM}$ ) de 1,09 Ga. (Fetter, 1999 e Van Schmus, 1998) convergem para a deposição dessas rochas em um ambiente de *rift* (Grupo Independência) e proveniência dos sedimentos de uma fonte mais jovem que os litotipos do embasamento paleoproterozóico.

Castro (2004) engloba essas rochas na Seqüência Supracrustal Rio Curu-Itataia-Independência. A mesma seria composta por gnaisses migmatíticos aluminosos formados a partir de rochas pelito-psamíticas carbonáticas e vulcânicas, com idades modelo  $T_{DM}$  em torno de 2,4 Ga., sugerindo que fontes mais antigas devem ter contribuído para a deposição dessas rochas.

Idades modelo  $T_{DM}$  antigas, como as reportadas por Castro (2004), também foram obtidas por Santos *et al.* (2003), em torno de 2,25 Ga., indicando que a contribuição do embasamento paleoproterozóico, como área fonte para a geração das rochas metassedimentares, é dominante nesta seqüência.

A estruturação dessas coberturas é complexa, pois foi amplamente afetada por uma tectônica de baixo ângulo. Na região de Independência (CE), Hartmann *et al.* (1984) e Caby & Arthaud (1986) reconheceram uma zonação metamórfica do tipo barrovia invertida em grandes *nappes* no estilo Himalaiano. Ainda segundo esses autores, nessa região o sentido de transporte das estruturas relacionadas à tectônica de baixo ângulo é para Sul. *Klippes* de unidades ortognáissicas de composição tonalítica e granodiorítica sobre a cobertura plataformal também são descritos entre as cidades de Fortaleza e Sobral (CE).

#### **2.3.4. Arco Magmático de Santa Quitéria - AMSQ**

Denominação atribuída pelo Projeto Fortaleza, CPRM, (1977); Fetter *et al.* (1997), inicialmente como Complexo ou Maciço de Santa Quitéria (Brito-Neves, 1975; Santos & Brito-Neves, 1984; Cavalcante *et al.*, 1983), localiza-se a leste da zona de cisalhamento Sobral-Pedro

II. Sua delimitação, ainda pouco precisa, encontra-se parcialmente estabelecida na porção centro-norte do batólito (Santos *et al.*, 2003).

Fetter (1999) e Fetter *et al.* (2003) obtiveram, em tonalitos e granodioritos migmatizados, idades U-Pb em zircões de 622 Ma e idades modelo ( $T_{DM}$ ) variando entre 0,9 a 1,16 Ga. Fetter *et al.* (2003) interpretam esses dados como uma mistura entre materiais provenientes de um embasamento Paleoproterozóico e materiais juvenis formados em ambiente de arco magmático continental Neoproterozóico.

Mais recentemente, Teixeira (2005) obteve em metagabros da região de Varjota, a idade de cristalização pelo mesmo método (U-Pb) de  $628 \pm 1$  Ma., em cristais de zircão limpos, amorfos típicos de rochas máficas.

Tabela 2.1: Resumo das principais idades geocronológicas publicadas sobre a região, *fonte:* (Teixeira, 2005).

#### **Embasamento Arqueano**

<b>Método</b>	<b>Idade</b>	<b>Autor</b>
Rb-Sr	2.540 ± 60 Ma	Pessoa <i>et al.</i> , 1986
U-Pb	2,7 Ga	Fetter 1999
Sm-Nd	2,9 a 3,0 Ga	Fetter 1999

#### **Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico**

<b>Método</b>	<b>Idade</b>	<b>Autor</b>
U-Pb	2,1 Ga	Fetter 1999, Martins 2000, Castro 2004
Sm-Nd	2,2 Ga	Martins 2000
	2,3 a 2,1 Ga	Castro 2004

#### **Seqüência Supracrustal Neoproterozóica**

<b>Método</b>	<b>Idade</b>	<b>Autor</b>
U-Pb	772 Ma	Fetter 1999
	770 Ma	Castro 2004
Sm-Nd	2,2 Ga	Santos <i>et al.</i> , 2003
	2,4 Ga	Castro 2004

#### **Complexo Granítico-Migmatítico Neoproterozóico**

<b>Método</b>	<b>Idade</b>	<b>Autor</b>
U-Pb	637 a 623 Ma	Fetter 1999, Fetter <i>et al.</i> , 2003
	620 a 611 Ma	Castro 2004
Sm-Nd	1,92 a 0,86 Ma	Fetter 1999, Fetter <i>et al.</i> , 2003

## **2.4. Domínio Médio Coreaú (DMC)**

O Domínio Médio Coreaú situa-se a norte do Lineamento Sobral-Pedro II e a sul da margem retrabalhada do Cráton do São Luis.

Neste Domínio, tem-se um embasamento gnáissico paleoproterozóico juvenil formado próximo a 2,35 Ga. (Fetter, 1999). Ocorrem ainda rochas supracrustais (Grupo Ubajara e Martinópolis) de idade predominantemente Neoproterozóica (Fetter, 1999; Santos, 1999). Granitóides de idade Neoproterozóica situam-se próximo ao Lineamento Sobral-Pedro II (Meruoca e Mucambo) e no extremo NW (Granito Chaval).

Uma ampla revisão histórica da geologia da região NW do Ceará foi apresentada por Torquato (1995), creditando os primeiros trabalhos na região a Crandall & Williams (1910), Small (1914), seguido por Kegel *et al.* (1958).

### **2.4.1. Embasamento Gnáissico Migmatítico**

O embasamento cristalino tem recebido várias denominações, porém sempre para caracterizar uma associação para e ortoderivada constituída por gnaisses diversos, migmatitos e granulitos (Santos, 1999).

Ortognaisses e granulitos representam o embasamento pré-Brasiliano retrabalhado. Idades Pb/Pb por evaporação de zircões registram valores de 2,02 Ga. a 2,25 Ga. para gnaisses na imediações da cidade de Granja (Gaudette *et al.*, 1993). Dados U/Pb em zircões de gnaisses da mesma região forneceram idades entre 2,28 e 2,35 Ga. (Fetter, 1999; Fetter *et al.*, 2000).

### **2.4.2. Grupo Martinópolis**

O grupo de Martinópolis é subdividido, da base para o topo, em quatro formações: Goiabeira, São Joaquim, Covão e Santa Terezinha. Essas formações são compreendidas principalmente por rochas sedimentares de granulometria fina: pelíticas, metagrauvas e quartzitos com intercalações menores de cálcio silicáticas, carbonatos e rochas vulcânicas félsicas, que são sugestivas de um ambiente de sedimentação de baixa energia (Santos *et al.*, 2004).

Fetter *et al.*, (2003) sugere que o grupo de Martinópolis pode representar uma bacia de *forearc* que evoluiu durante o desenvolvimento do arco magmático de Santa Quitéria situado no Domínio Ceará Central.

#### **2.4.3. Grupo Ubajara**

Trata-se de uma seqüência vulcano-sedimentar plataformar, compreendida por três formações, da base para o topo: Formação Caiçara (pelitos-psamitos, arenitos finos), Formação Trapiá-Frecheirinha (arenitos e calcários) e Formação Coreau (arenitos e grauvacas), além de metariolitos, dacitos e brechas vulcânicas da seqüência vulcânica Saquinho (Santos, 1999).

Fetter (1999) obteve idades U-Pb em zircão de metariolitos da seqüência Saquinho uma idade de  $1785 \pm 2$  Ma, interpretando que esta poderia ser a idade de cristalização das rochas vulcânicas. Essa idade corresponde a um evento extensional de 1.8-1.7 Ga. reconhecido em toda América do Sul (Brito Neves *et al.*, 1995) registrado também nas seqüências vulcano-sedimentar de Orós e de Jaguaribe na parte oriental do estado de Ceará (Sá *et al.*, 1995). Conseqüentemente, o corpo vulcânico de Saquinho pode refletir uma manifestação deste evento extensional de 1.8-1.7 Ga. no DMC (Santos *et al.*, 2004).

#### **2.4.4. Corpos Granitóides**

Diversos corpos granitóides como Chaval (U-Pb  $591 \pm 10$  Ma., Fetter, 1999), Tucunduba (U-Pb SHRIMP 560 Ma., Fetter, 1999) entre outros, ocorrem na região NW do Ceará, intrudindo as seqüências supracrustais e o embasamento. Esses granitos estão associados a estágios deformacionais atuantes durante a orogênese brasileira. O granito Chaval localizado na porção noroeste do DMC está associado a uma tectônica de baixo ângulo na sua porção central e a uma transcorrência NE-SW nas bordas, enquanto o granito Tucunduba é associado a um regime transpressivo dominado exclusivamente pelo desenvolvimento de transcorrências (Santos *et al.*, 2004).

Os granitos Meruoca e Mucambo representam os estágios finais de magmatismo no DMC. Esses granitos são intimamente ligados ao desenvolvimento do *graben* Jaibaras

principalmente por conterem ou não, xenólitos de rochas desse grupo. Os dados de U-Pb em zircões do granito Mucambo mostram idade de cristalização de  $532 \pm 6$  Ma. (Fetter, 1999).

#### **2.4.5. Grupo Jaibaras**

A ocorrência mais importante dessas rochas situa-se no *graben* Jaibaras, ampla fossa tectônica que se estende desde a escarpa as serra da Ibiapaba, ao longo do lineamento Sobral-Pedro II, até próximo a cidade de Morrinhos.

Segundo Costa *et al.* (1973), esse grupo é composto por uma seqüência de conglomerados brechóides na base (formação Massapé) seguido por arenito e metasiltito (formação Pacujá); na seqüência ocorre uma série de derrames e diques (vulcanismo Parapuí) e, no topo, conglomerado brechóides com seixos de vulcânicas da formação Parapuí.

De acordo com Jardim de Sá (1984), este grupo compreende uma seqüência molássica brasileira, onde o lineamento Sobral - Pedro II foi reativado por falha normal.

#### **2.5. Domínio Rio Grande do Norte (DRGN)**

O Domínio Rio Grande do Norte é formado por rochas arqueanas presentes nos maciços São José do Campestre (Dantas *et al.*, 1998) e Complexo Granjeiro (Gomes *et al.*, 1998), e por rochas paleoproterozóicas pertencentes ao Grupo Caicó (Meunier. *in* Ferreira, 1967) além das faixas de dobramento paleo-mesoproterozóica Orós-Jaguaribe, Peixe Gordo, São José, e ainda a faixa neoproterozóica que compõe o Grupo Seridó.

O Bloco São José do Campestre (embasamento) é formado por gnaisses e migmatitos de composição tonalítica, constituindo-se no mais antigo fragmento de crosta continental reconhecido na América do Sul, com idades U-Pb de 3.5 Ga. e idades modelo Sm-Nd ( $T_{DM}$ ) de 3.7 Ga., indicando que as rochas representam uma crosta retrabalhada (Dantas *et al.*, 2004). O maciço ocorre sob a forma de um enclave arqueano envolto por rochas paleoproterozóicas, amalgamadas durante a orogênese transamazônica (Dantas *et al.*, 2004).

O complexo Granjeiro é formado por rochas gnáissicas que se encontram em contato tectônico com o cinturão de dobramento Orós-Jaguaribe ao norte e o lineamento Patos ao sul. São gnaisses com idades U-Pb em zircão de  $2,541 \pm 11$  Ma. (Silva *et al.*, 1995), idades modelo de Nd

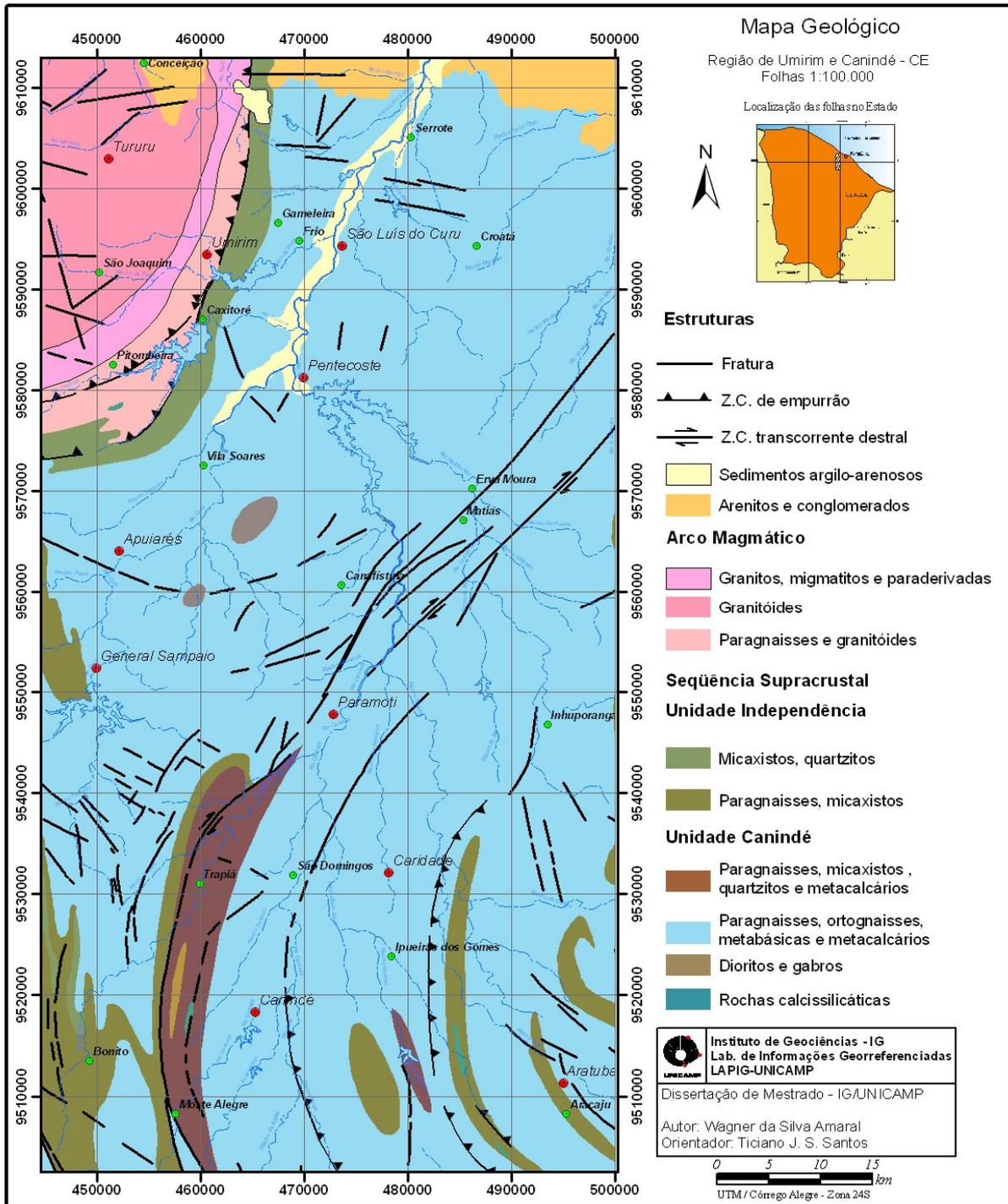
( $T_{DM}$ ) com 2,55 Ga. e 2,65 Ga., e valores de  $\epsilon Nd$  positivos, indicando que este é um terreno derivado de crosta juvenil.

O Grupo Caicó foi descrito pela primeira vez por (Meunier *in* Ferreira, 1967) tratando-se de uma seqüência de rochas metamórficas pré-cambrianas (paleo-mesoproterozóicas), constituídas por gnaisses variados, lentes de meta-arcóseos, anfíbolitos, quartzitos, e calcários cristalinos subordinados, além de migmatitos com estrutura gnáissica preservada e anatexitos. Ebert (1970) propôs uma divisão para o Grupo em três formações: Formação Parelhas/Equador, basal, composta por muscovita quartzitos, metarcóseos, metaconglomerados, gnaisses e xistos; Formação Quixadá, composta por calcários, metarcóseos e gnaisses; Formação Florânia, composta por gnaisses, metarcóseos, grauvacas e epidoto quartzitos.

## ***2.6. Contexto Geológico Local***

A Figura 2.4 mostra, em uma escala menor (1:500.000), o contexto geológico da área estudada. A seqüência supracrustal neoproterozóica, representada aqui pelo Complexo Ceará (Cavalcante *et al.*, 2003), é caracterizada pela ocorrência de rochas supracrustais aluminosas (mica xistos e paragnaisses) da unidade Independência, e gnaisses em nível distinto de metamorfismo e migmatização, incluído mármore, cálcio silicáticas, metagabros, anfíbolitos e dioritos da unidade Canindé, distribuídos em praticamente toda extensão da área. O arco magmático de Santa Quitéria, localizado no setor NW da área e que representa o complexo granítico-migmatítico Neoproterozóico, é formado essencialmente por migmatitos de composição tonalítica a granítica, envolvendo granitóides neoproterozóicos a ordovicianos intrusivos de composição monzogranítica a sienítica.

A estruturação da área é representada por alinhamentos com *trend* N-NE, interpretados como zonas de cisalhamento de movimentos destrais (zona de cisalhamento Paramoti) e por falhas de empurrão com transporte para E-SE bordejando o arco magmático de Santa Quitéria, e para W-NW nos metassedimentos da unidade Independência no setor SE da área.



**Figura 2.4:** Mapa geológico-estrutural das regiões de Umirim e Canindé 1:500.000, (CPRM, 2003, modificado)

## **2.7. Mineralização Fósforo-Uranífera de Itataia (breve nota)**

A província fósforo-uranífera de Itataia está localizada no município de Santa Quitéria-Ceará, porção central do Estado, englobada no Domínio Ceará Central. Foi estudada primeiramente pela antiga NUCLEBRAS, e as informações levantadas nesta época encontram-se no mapa geológico publicado por esta empresa em 1983 e publicações efetuadas por Mendonça *et al.*, (1984).

Segundo Castro *et al.*, (2005), o depósito fósforo-uranífero é composto por colofanito que ocorre sob diferentes formas e associações, concentrando-se preferencialmente em mármores e rochas cálcio silicáticas da Formação Alcantil. As lentes de gnaisses cálcio-silicáticos representam antigos leitos cálcio-ferromagnesianos, hoje compostos por diopsídio, tremolita, biotita-flogopita, plagioclásio cálcico, granada cálcica, quartzo e titanita.

Compreendem a tipologia do depósito: (a) colofanito maciço situado especialmente no topo da seqüência de mármores; (b) brechas carbonosas e não carbonosas; (c) veios de pequena espessura que cortam mármores e a foliação milonítica ou disseminado em pegmatitos e (d) veios disseminados em gnaisses pelíticos e cálcio-silicáticos deformados, acompanhando a foliação.

A análise das razões isotópicas sugere que os fluidos envolvidos na formação da mineralização fósforo-uranífera de Itataia são oriundos de água de mar, parcialmente modificados por fluidos meteóricos ou de água doce não magmática. A interação entre esses fluidos parece ter ocorrido durante estágio pós-deposicional, fato que indica que a mineralização fósforo-uranífera de Itataia foi predominantemente de origem sedimentar, reconcentrada por processos tectono-metamórficos e, posteriormente, enriquecida por processos supergênicos (Castro *et al.*, 2005).

Em termos aerogeofísicos, a anomalia radiométrica associada à jazida de Itataia é marcante, caracterizada por apresentar valores bastante elevados para os canais da contagem total, urânio e tório, em todo Domínio Ceará Central, principalmente no canal de urânio (Figura 3.9).

### **3. PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS E SRTM**

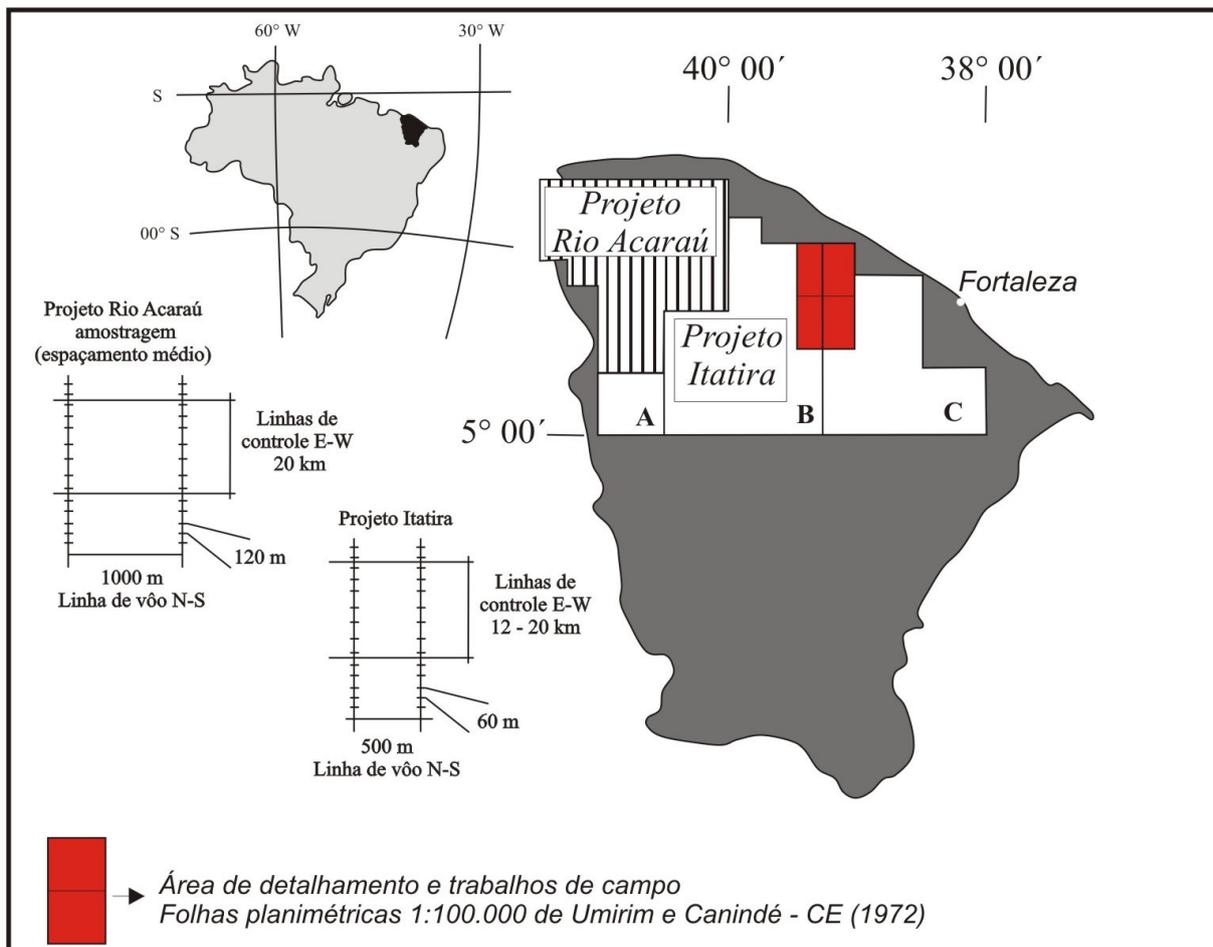
---

---

#### **3.1. Dados Aerogeofísicos**

A base de dados aerogeofísicos foi cedida pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM) para o Laboratório de Processamento de Informações Georreferenciadas (LAPIG) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). As informações foram fornecidas em forma de arquivo digital XYZ, onde X e Y correspondem às coordenadas UTM (*Datum* Córrego Alegre - Zona 24S) e Z às medidas de magnetometria (nT) e gamaespectrometria (cps).

Os dados aerogeofísicos processados neste trabalho foram adquiridos nos Projetos Rio Acaraú (1975) e Itatira (1977), realizados respectivamente, na região NW e Central do Ceará (Figura 3.1). Foram levantados um total de 103,720. 000 km de perfis a uma altura de vôo de 150 m ( $\pm 15$  metros) controlada por radar-altímetro. As linhas de vôo para ambos os projetos têm direção N-S, com espaçamentos entre linhas de 1000 e 500 metros, e linhas de controle perpendiculares (E-W), com espaçamentos de 20 km. A área total dos levantamentos foi de aproximadamente 59.000 km<sup>2</sup> (Tabela 3.1).

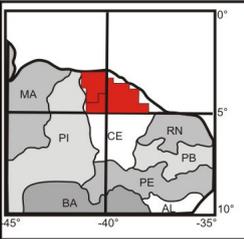


**Figura 3.1:** Localização do Projeto Rio Acaraú e do Projeto Itatira sub-dividido em três áreas (A,B e C), no detalhe as especificações dos perfis e área de investigação detalhada.

Os levantamentos aerogeofísicos foram realizados com aeronaves modelo *Islander* equipadas com magnetômetro de prótons GEOMETRICS, modelo G-803, e gamaespectrômetro EXPLORANIUM, modelo DIGRS-3001. Os dados gamaespectrométricos foram obtidos em contagem por segundo (cps) e os dados magnéticos em nanoteslas (nT), reduzidos do IGRF de 1975. A navegação foi controlada visualmente, utilizando mapas de vôo oriundos de aeromosaicos semicontrolados, em escala 1:50.000, e as verificações após o vôo foram realizadas através da análise dos produtos da câmera de rastreamento (CPRM, 1977).

**Tabela 3.1:** Síntese das principais características dos aerolevantamentos (*modificado de: www.cprm.gov.br*).

PROJETOS:	RIO ACARAÚ	ITATIRA
Métodos:	Magnetometria e Gamaespectrometria	Magnetometria e Gamaespectrometria
Contratante:	CPRM	NUCLEBRÁS
Contratado:	PROSPEC S.A.	LASA
Contrato:	213/DA/74 - 05/08/74	
Período:	08 a 12/1975	10 a 11/1977
Número de Áreas:	01	03
Total de Perfis:	23.720 km	80.000 km
Intervalo (AM):	2 s	1 s
Altura de Vôo:	150 metros	150 metros
Área Total:	21.000 km <sup>2</sup>	38.000 km <sup>2</sup>
Direção (LV):	N-S	N-S
Espaçamento (LV):	1000 metros	500 metros
Direção (LC):	E-W	E-W
Espaçamento (LC):	20 km	20 km
Tempo de Integração Gama (s):	2	1
Produtos:	Registros analógicos; Filmes de rasteiro; Fotomosaicos com posicionamento dos perfis; Fitas magnéticas de campo.	Registros analógicos; Filmes de rasteiro; Fotomosaicos com posicionamento dos perfis; Fitas magnéticas de campo.



Legenda:

 Localização dos Projetos Rio Acaraú e Itatira

(AM) - Amostragem  
(LV) - Linha de Vôo  
(LC) - Linha de Controle

*Fonte: Compilado da base de dados Aerogeofísicos do Brasil, criada pela CPRM, 1995.*

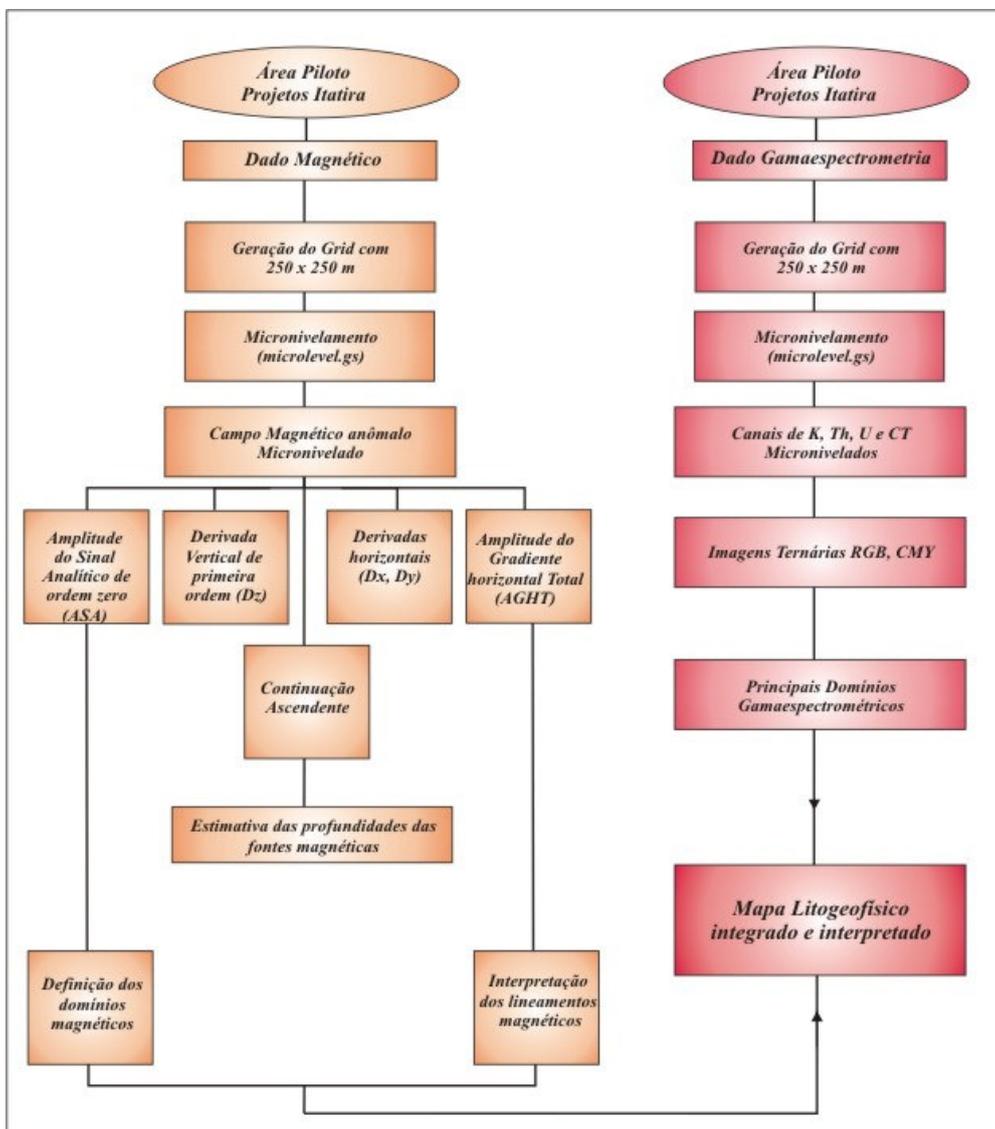
PROJETOS:	RIO ACARAÚ	ITATIRA
Métodos:	Magnetometria e Gamaespectrometria	Magnetometria e Gamaespectrometria
Contratante:	CPRM	NUCLEBRÁS
Contratado:	PROSPEC S.A.	LASA
Contrato:	213/DA/74 - 05/08/74	
Período:	08 a 12/1975	10 a 11/1977
Número de Áreas:	01	03
Total de Perfis:	23.720 km	80.000 km
Intervalo (AM):	2 s	1 s
Altura de Vôo:	150 metros	150 metros
Área Total:	21.000 km <sup>2</sup>	38.000 km <sup>2</sup>
Direção (LV):	N-S	N-S
Espaçamento (LV):	1000 metros	500 metros
Direção (LC):	E-W	E-W
Espaçamento (LC):	20 km	20 km
Tempo de Integração Gama (s):	2	1
Produtos:	Registros analógicos; Filmes de rasteiro; Fotomosaicos com posicionamento dos perfis; Fitas magnéticas de campo.	Registros analógicos; Filmes de rasteiro; Fotomosaicos com posicionamento dos perfis; Fitas magnéticas de campo.

### 3.2. Imagens de Radar - SRTM

Para o recobrimento da área de estudo, foram utilizadas 11 cenas completas do *Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)*. Cada cena cobre aproximadamente 1° x 1° da superfície do terreno com resolução espacial de 90 metros o que permitiu gerar produtos para serem interpretados na escala 1:100.000 (Souza Filho, 2005). Estas imagens foram adquiridas do site JPL/NASA ([www2.jpl.nasa.gov/srtm/](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/)).

### 3.3. Métodos do Processamento

Os métodos deste trabalho foram baseados em Silva *et al.*, (2003) e Blum *et al.*, (2003). Durante o processamento dos dados aerogeofísicos foram realizados diversos testes, visando o estudo dos algoritmos de interpolação em malha regular e o micronivelamento, com o intuito de melhorar a qualidade dos dados. Após essa fase, foram aplicadas diversas transformações lineares principalmente nos dados magnéticos (filtros, derivadas, sinal analítico, entre outros) que possibilitaram o melhor entendimento da distribuição e da natureza das fontes magnéticas (Figura 3.2).



**Figura 3.2:** Fluxograma das etapas desenvolvidas ao longo do processamento dos dados aerogeofísicos dos Projetos Rio Acaraú e Itaitira.

### **3.4. Pré-Processamento dos Dados Aeromagnéticos**

O pré-processamento de dados aeromagnéticos teve como objetivo avaliar a qualidade dos dados e interpolá-los segundo malhas regulares. Visando eliminar os ruídos que se distribuem nas imagens, foram aplicadas rotinas de micronivelamento desenvolvida por Blum (1999) com base nas técnicas propostas de Minty (1991).

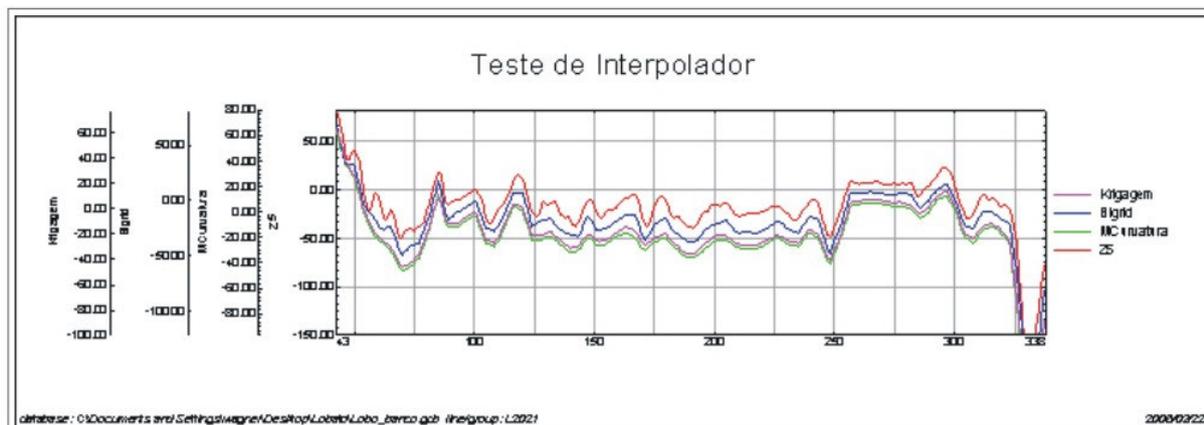
#### **3.4.1. Análises das Informações**

O pré-processamento das informações aeromagnéticas iniciou-se com a avaliação geral dos dados que consistiu de uma inspeção visual da qualidade da imagem do campo magnético anômalo.

Seqüencialmente, os dados foram avaliados quanto à presença de inconsistências das linhas de vôo (distribuição espacial). Foram detectados problemas com relação ao cruzamento de linhas de vôo e sua regularidade no espaçamento, principalmente nos dados do Projeto Rio Acaraú. Os efeitos pepita (ou picos), que geram ruídos nos dados, foram identificados utilizando perfis rebatidos, o método da quarta derivada e o Teste de consistência P (Blum, 1999).

#### **3.4.2. Definição da Célula de Interpolação**

Os dados foram interpolados em uma malha regular (*grid*), com espaçamento de célula de 250 m, utilizando como interpolador os métodos de Mínima Curvatura, Krigagem e Bidirecional. A opção pelo método mais apropriado foi feita a partir de análises visuais e de perfis, sendo definido o método bidirecional como o melhor interpolador (Figura 3.3).



**Figura 3.3:** Comparação dos perfis gerados para cada método de interpolação (Z5 – vermelho) dado bruto, perfil azul corresponde ao método Bigrid, o rosa à Krigagem e o verde à mínima curvatura. O perfil mais próximo do dado bruto é o bidirecional.

### 3.4.3. Micronivelamento

A etapa de pré-processamento foi finalizada com o micronivelamento dos dados utilizando a rotina de Blum (1999) por se mostrar uma forma mais rápida para a obtenção de bons resultados.

No desenvolvimento do processo de micronivelamento foram testados vários valores para o corte dos filtros passa baixa e passa alta, até se obter o melhor resultado. Os valores dos filtros que forneceram melhores resultados para o micronivelamento de ambos os projetos foram os de comprimento de onda de 160 km para o filtro passa baixa e de 64 km para o de passa alta.

Os resultados obtidos permitiram eliminar a maior parte dos alinhamentos coincidentes com as linhas de vôo, como observado durante o controle de qualidade do micronivelamento através da geração de imagens sombreadas.

Não obstante, erros que refletem problemas da aquisição de dados, em alguma de suas fases, não puderam ser retirados, nem na fase prévia do processamento, nem após o micronivelamento. Portanto, sem detrimento do conteúdo das altas frequências dos dados, optou-se por eliminar os valores anômalos previamente identificados. A Figura 3.4 mostra o mapa de campo anômalo, corrigido e micronivelado, com célula de interpolação de 250 m.

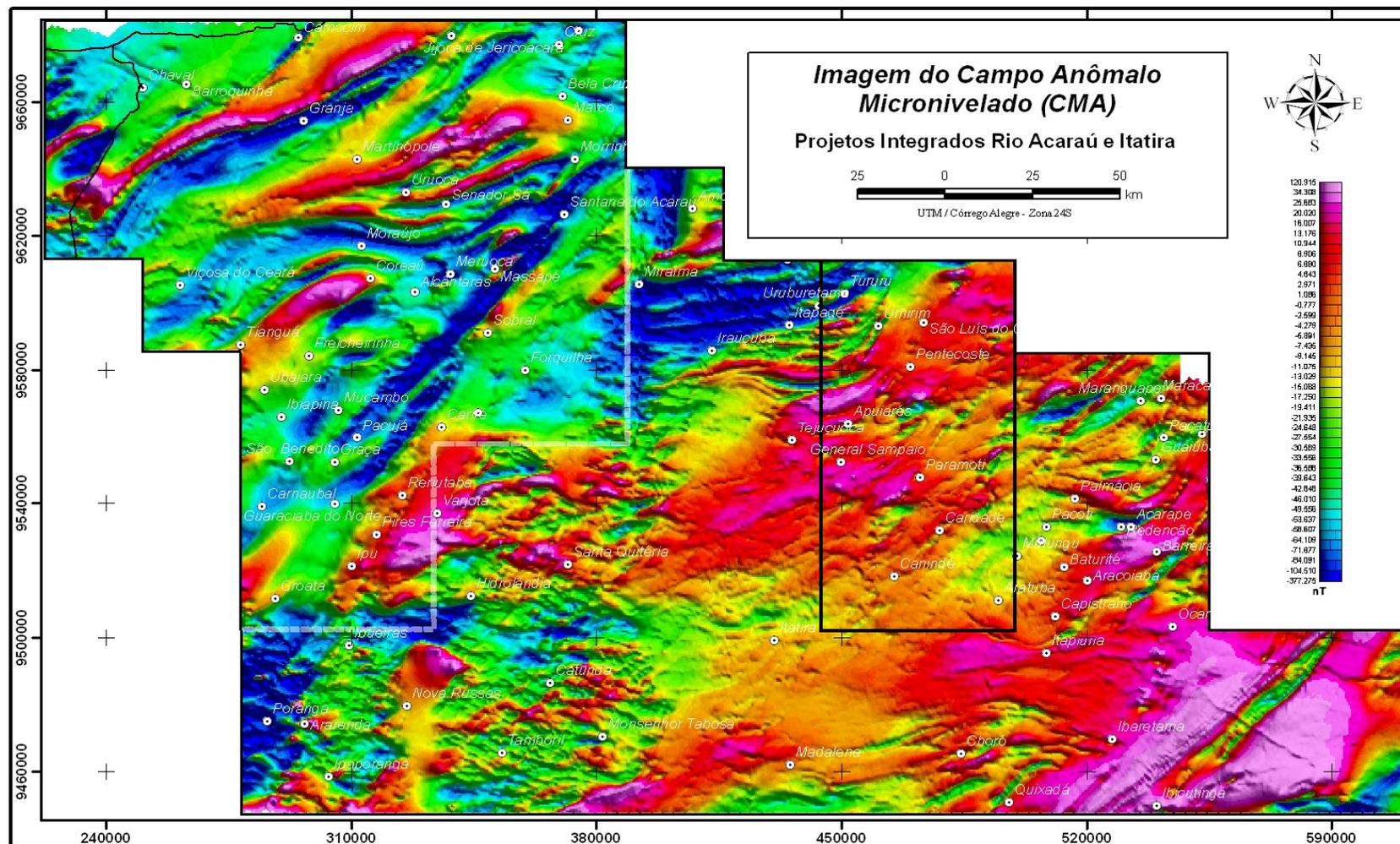
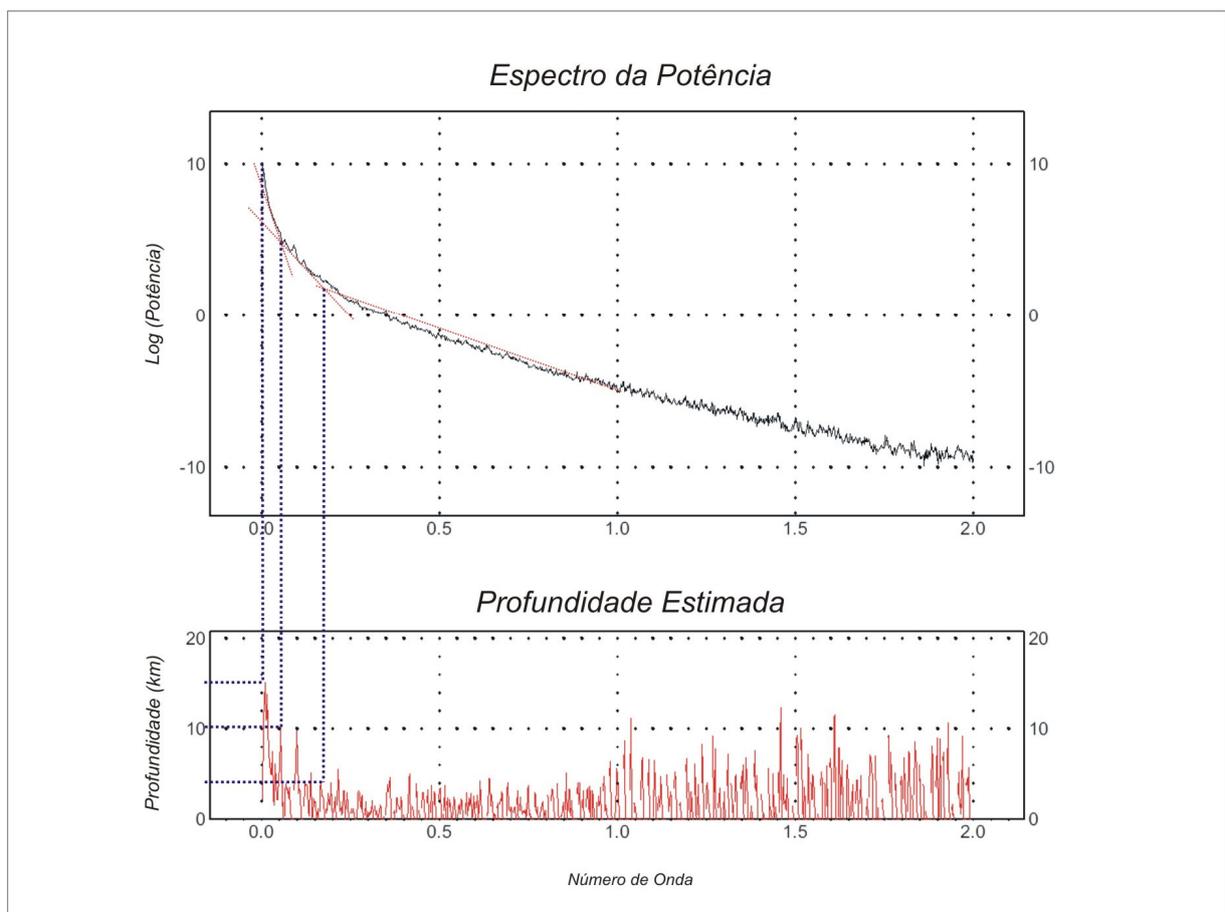


Figura 3.4: Imagem do campo anômalo micronivelado (CMA), no detalhe área piloto onde foram efetuados os trabalhos de campo.

### 3.4.4. Espectro de Potência

A fim de estabelecer a profundidade das fontes magnéticas e o comportamento das rochas em subsuperfície, foi necessário analisar o comportamento entre a frequência e a profundidade das fontes, por meio do espectro de potência. A partir da determinação dos valores das profundidades dessas fontes, foram aplicados diferentes filtros para realçar com maior precisão as fontes das anomalias magnéticas.

Foram individualizados três intervalos distintos da parte superior da fonte das anomalias magnéticas (Figura 3.5). O primeiro intervalo corresponde às fontes infracrustais com profundidades estimadas entre 15 e 10 km; o segundo representa as fontes intracrustais com profundidades entre 10 e 3 km; o terceiro intervalo corresponde às fontes supracrustais com profundidades variando entre 3 e 1 km.



**Figura 3.5:** Espectro da potência do campo magnético anômalo com as respectivas profundidades estimadas.

### 3.5. Filtragens

As medidas de campo são geralmente influenciadas por uma grande quantidade de fenômenos, sejam naturais ou não. Os ruídos (alta frequência) são normalmente corrigidos durante um levantamento geofísico. Porém, nem toda alta frequência indesejável é eliminada. A aplicação de filtros pode reduzir ou até eliminar esse efeito indesejável (Blum, 1999).

Existem filtros no domínio do espaço e filtros no domínio da frequência, usando-se a *FFT* (*Fast Fourier Transform*).

A seguir serão descritos as formas de atuação dos filtros e apresentados os resultados que foram utilizados no processamento dos magnéticos.

#### 3.5.1. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Trata-se de uma análise harmônica desenvolvida pelo físico francês Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). Estudando genericamente as formas de ondas, mostrou que qualquer padrão periódico de onda, por mais complicado que seja, pode ser representado como uma combinação de movimentos harmônicos simples. Essa combinação pode ser expressa pela seguinte função periódica:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n \cdot x + b_n \operatorname{sen} n \cdot x)$$

onde,

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos n \cdot x dx ;$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \operatorname{sen} n \cdot x dx \quad e$$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx ,$$

$$n=1,2,3,\dots$$

Quando os movimentos não são periódicos a soma da série de Fourier é substituída por uma integral, chamada de *integral de Fourier*. Dessa integral decorre que, se:

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-iku} du$$

então,

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(u)e^{-ikx} dx$$

O uso da FFT na estimativa do formato dos corpos reproduz com grande aproximação as formas dos mesmos, desde que as anomalias encontradas em dados magnéticos sejam causadas por corpos de forma arbitrária com magnetização constante ou densidade uniforme, embora esse processo seja instável. Essas anomalias podem ser expressas como uma convolução entre uma função da propriedade física e a função de *Green* (Gunn, 1975).

### **3.5.2. Filtros Passa-baixa, Passa-alta e Passa-banda**

São utilizados para deixar passar baixas frequências, altas frequências, e intervalos de frequências. Normalmente introduzem o fenômeno de *Gibbs* (anomalias anelares), pois esses filtros simplesmente cortam a energia do espectro.

### **3.5.3. Filtro Derivada**

Os filtros derivada permitem analisar a geometria da superfície da malha regular. São baseados no cálculo da declividade (1° derivada) ou na razão de mudança da declividade (2° derivada).

Os operadores derivada tendem a ressaltar as bordas das anomalias e realçar feições superficiais, podendo ser usados como um filtro de suavização, onde cada termo derivado é convolvido com os dados da seqüência original ou utilizado como pesos na média móvel (Davis, 1986). Uma grande derivada (positiva ou negativa) indica mudança abrupta no declive, que pode ser causado por um salto no valor médio ou pela presença de um pico nos dados. Se uma função

tem muitas altas frequências o ideal é usar operadores menores, caso o contrário, os ruídos estarão sendo ressaltados também (Parro, 1998).

**Filtro Derivada Horizontal (X, Y):** é utilizado para a geração de imagens sombreadas e para ressaltar bordas dos corpos das direções X e Y.

**Filtro Derivada Vertical (Z):** realça as bordas na direção Z. Antes de utilizá-lo deve-se aplicar um filtro passa-baixa para remover os altos números de ondas devidos ao ruído.

#### **3.5.4. Continuação Ascendente (Upward Continuation)**

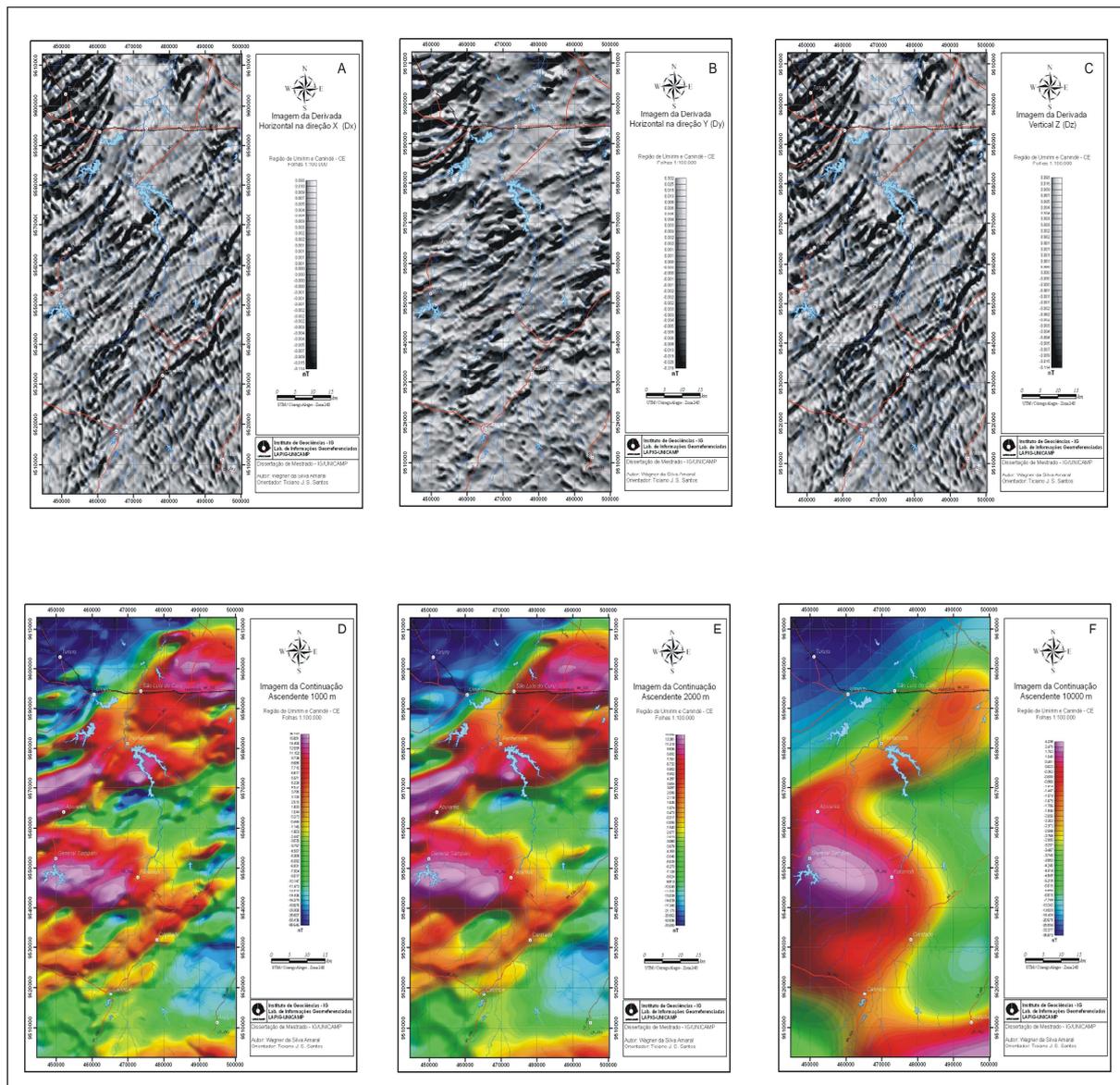
É considerado um filtro de “limpeza” por não produzir quase nenhum efeito de borda. Frequentemente, é utilizado para remover ou minimizar os efeitos das fontes rasas e ruídos. Efetivamente, corresponde a uma suavização e é bastante utilizado na interpretação magnética, a fim de comparar medidas realizadas em diferentes altitudes (Figura 3.6).

#### **3.5.5. Amplitude do Gradiente Horizontal Total (AGHT)**

A amplitude do gradiente horizontal total é o vetor resultante da composição das derivadas horizontais tomadas nas direções x e y. O gradiente horizontal de uma anomalia de campo potencial pode indicar mudanças laterais abruptas do campo magnético.

A magnitude do gradiente é dada pela raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas parciais do campo potencial G (x, y) nas direções x e y (Blackely, 1996), como a seguir:

$$h(x, y) = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial G(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G(x, y)}{\partial y}\right)^2\right]}$$



**Figura 3.6:** Imagem das filtragens derivadas e continuação ascendente; A) Primeira derivada horizontal em x; B) Primeira derivada horizontal em y; C) primeira derivada vertical em z; D) Continuação ascendente para 1000 m; E) Continuação ascendente para 2000 m; F) Continuação ascendente para 10000 m.

### 3.5.6. Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

O sinal analítico baseia-se no uso de gradientes (derivadas) vertical e horizontal de anomalias do campo potencial.

A noção de sinal analítico para tais anomalias foi desenvolvida por Nabighian (1972) para estruturas 2-D. O método assume que os corpos causadores têm magnetização uniforme e que as seções transversais de todos os corpos causadores podem ser representados por polígonos, cuja

extensão em profundidade são finitas ou infinitas. Por meio de uma simples transformação no domínio da frequência, produz-se uma função analítica cuja parte real é a derivada horizontal do campo e a parte imaginária é a derivada vertical.

O sinal analítico 3-D (Nabighian, 1974, *apud* Debeglia & Corpel, 1997, Roest *et al.*, 1992) de uma anomalia de campo potencial M (campo magnético ou gradiente de gravidade), pode ser definido como:

$$|A(x, y)| = \left( \frac{\partial M}{\partial x} x + \frac{\partial M}{\partial y} y + i \frac{\partial M}{\partial z} z \right)$$

Onde x, y, z são os vetores unitários na direção x, y, z.

A função amplitude do sinal analítico ou seu vetor absoluto pode ser expressa por um vetor adição de duas componentes reais nas direções x e y e uma componente imaginária na direção z, conforme a equação:

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial z}\right)^2}$$

Essa função está relacionada à amplitude de magnetização, correspondendo a uma função simétrica com formato de sino (*bell shaped*), a qual se maximiza exatamente sobre os contrastes de magnetização, com a largura da curva de amplitude se relacionando diretamente com a profundidade do contraste magnético.

O sinal analítico é bastante conveniente na interpretação preliminar dos dados (Debeglia & Corpel, 1997). Atualmente, tem se mostrado uma ferramenta eficiente para a determinação de parâmetros geométricos (Nabighian, 1972, Roest *et al.*, 1992, Debeglia & Corpel, 1997), onde os máximos valores de contrastes magnéticos determinam o contorno das fontes magnéticas (Figura 3.7).

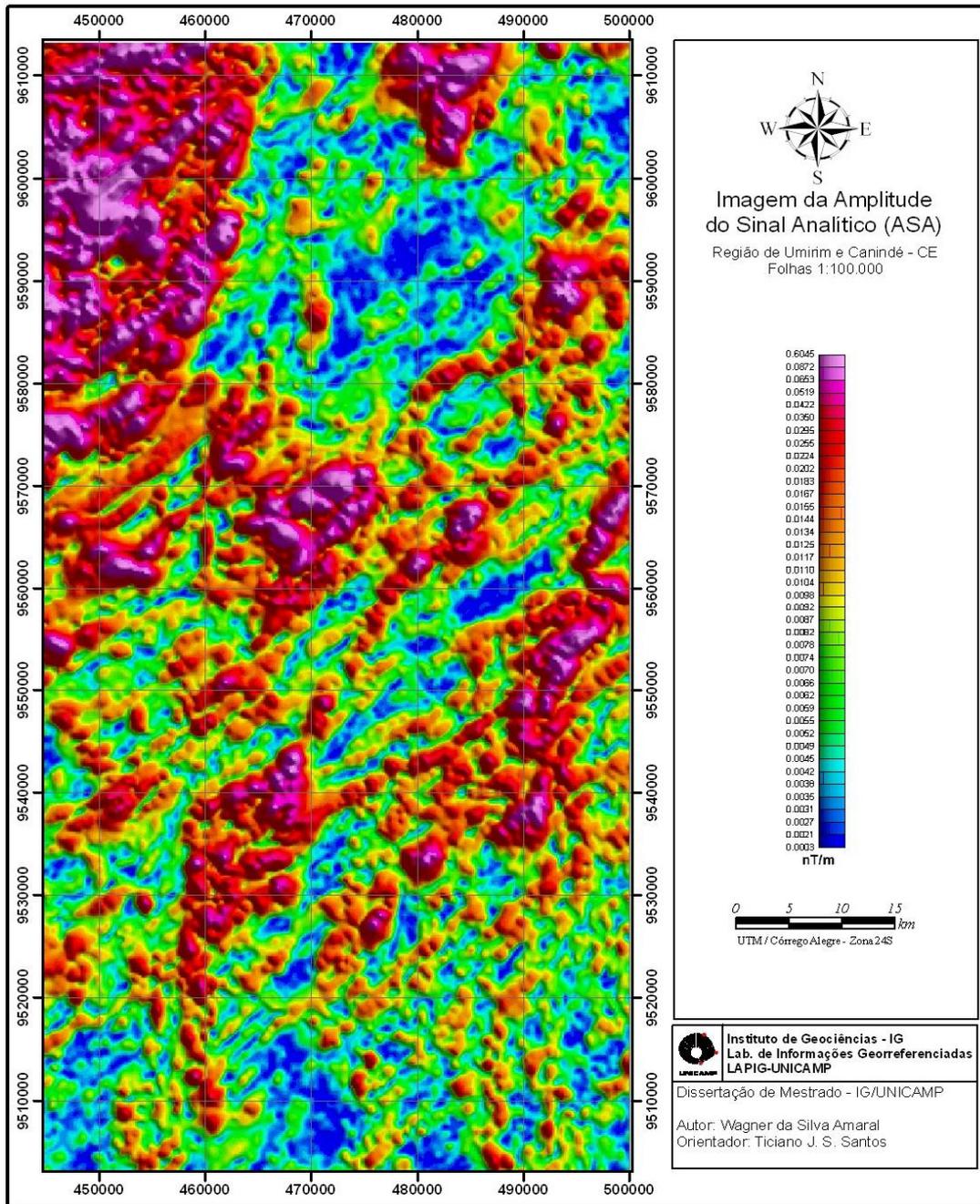


Figura 3.7: Imagem da amplitude do sinal analítico de ordem 0.

### ***3.6. Integração e Interpretação Regional***

Os produtos aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos foram utilizados tanto para a caracterização do arcabouço geológico regional quanto para diferenciar unidades litogeofísicas e, posteriormente, para detalhar a área mapeada. Este procedimento permitiu uma visão mais ampla das unidades de mapeamento, bem como dos grandes traços estruturais da região.

A imagem da amplitude do sinal analítico (ASA) (Figura 3.8) mostra que as grandes zonas de cisalhamentos (ZC) transcorrentes são representadas por altos valores de amplitude. A individualização do arco magmático de Santa Quitéria (AMSQ) é bem evidenciada na imagem de ASA, apresentando altos valores de susceptibilidade magnética (Figura 3.8), assim como na imagem de composição ternária RGB com alta contribuição no canal do K (Figura 3.9). A zona de cisalhamento transcorrente Rio Groaíras (ZCRG) constitui-se, na sua porção sul, em um excelente exemplo de delimitação de blocos crustais, mesmo esta ZC tendo um caráter predominantemente cataclástico. Nessa porção tem-se o nítido contato entre as rochas com alta (ASA) do (AMSQ) com aquelas de baixa (ASA) do Complexo Ceará (CC) (bloco Itaitaia). Ambos compreendem rochas gnaissificadas e migmatizadas, porém a segunda unidade constitui-se de metassedimentos gnaissificados e migmatizados oriundos de uma fonte Paleoproterozóica (Santos *et al.*, 2003).

Valores intermediários e de baixa amplitude (CC1 e CC2, respectivamente) foram verificados principalmente no Domínio Ceará Central (DCC) e correspondem, em grande parte, as seqüências de rochas paraderivadas do CC (unidades Independência e Canindé) (Cavalcante *et al.*, 2003). Os granitos pós-tectônicos, tais como Serra da Barriga (Gsb), Mucambo (Gm), Meruoca (Gmr) e Pajé (Gpj), e os granitos sin- a pré-tectônicos, como Nova Russas (Gnr) e Varjota (Gv), também são caracterizados por baixa ASA (Figura 3.8).

Os lineamentos magnéticos possuem orientação NE-SW, sendo estes os mais expressivos e abundantes além de serem os mais profundos segundo o produto de continuação ascendente no nível de 5000 metros (Anexo, CD-ROM). As estruturas NE-SW e E-W, apresentam muitas vezes, associações com diques básicos preenchendo falhas no DCC e à expressivas zonas de cisalhamento do Domínio Médio Coreaú (DMC) ou Noroeste do Ceará (Figura 3.8). O *trend* NW-SE, apresentou forte correlação com a (ZCRG), bem marcada nos diferentes produtos.

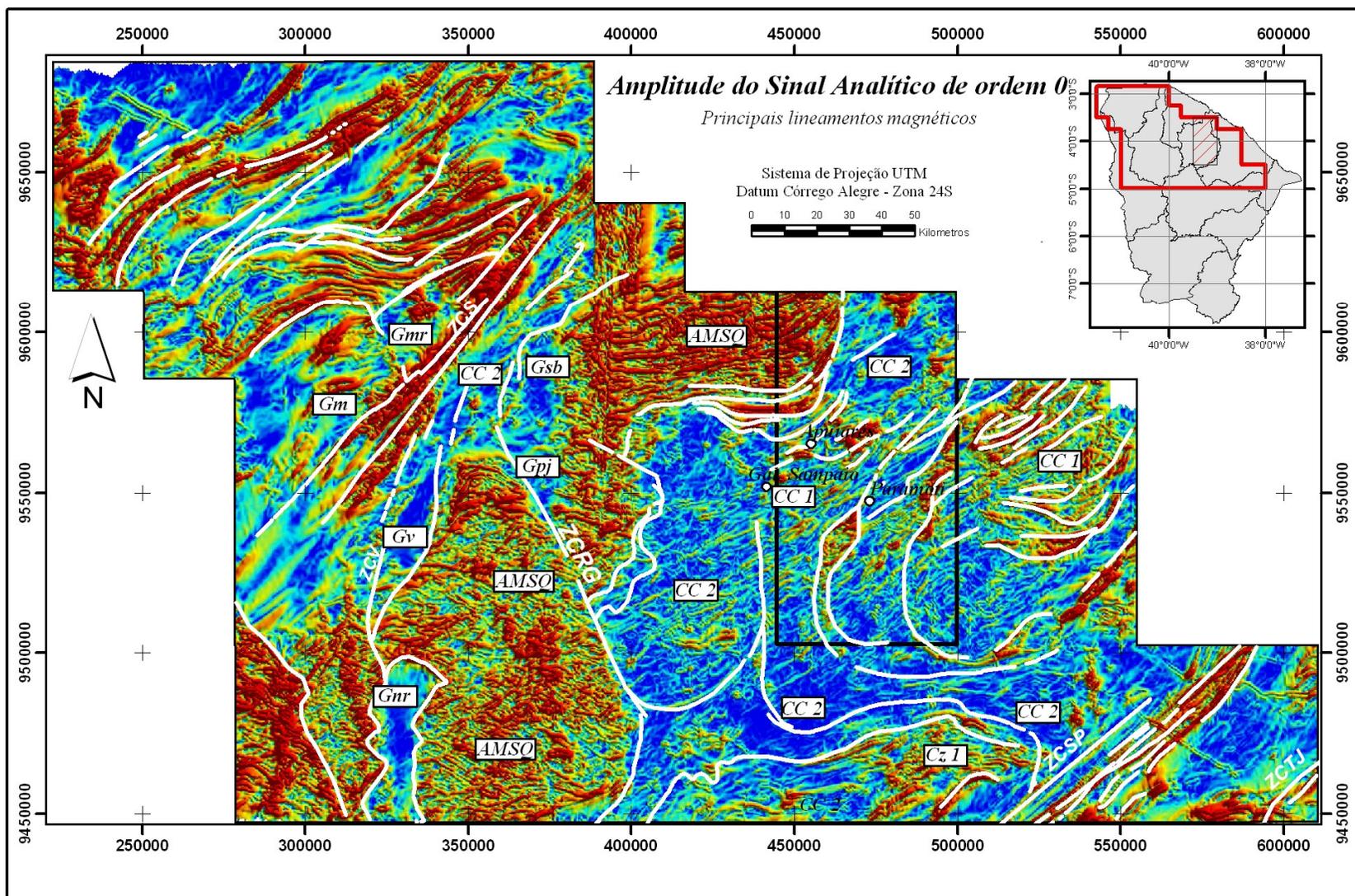
A densidade de alinhamentos magnéticos é menos expressiva com a profundidade acima de 2000 metros, sendo praticamente inexistente acima de 5000 metros (Anexo, CD-ROM).

As imagens radiométricas dos canais individuais de potássio, tório e urânio aliadas à composição colorida RGB e CMY (K:Th:U) realçaram um padrão de distribuição anômalo dos radioelementos, estabelecendo os grandes alinhamentos de direção NE-SW e o expressivo alinhamento da (ZCRG), na direção NW-SE.

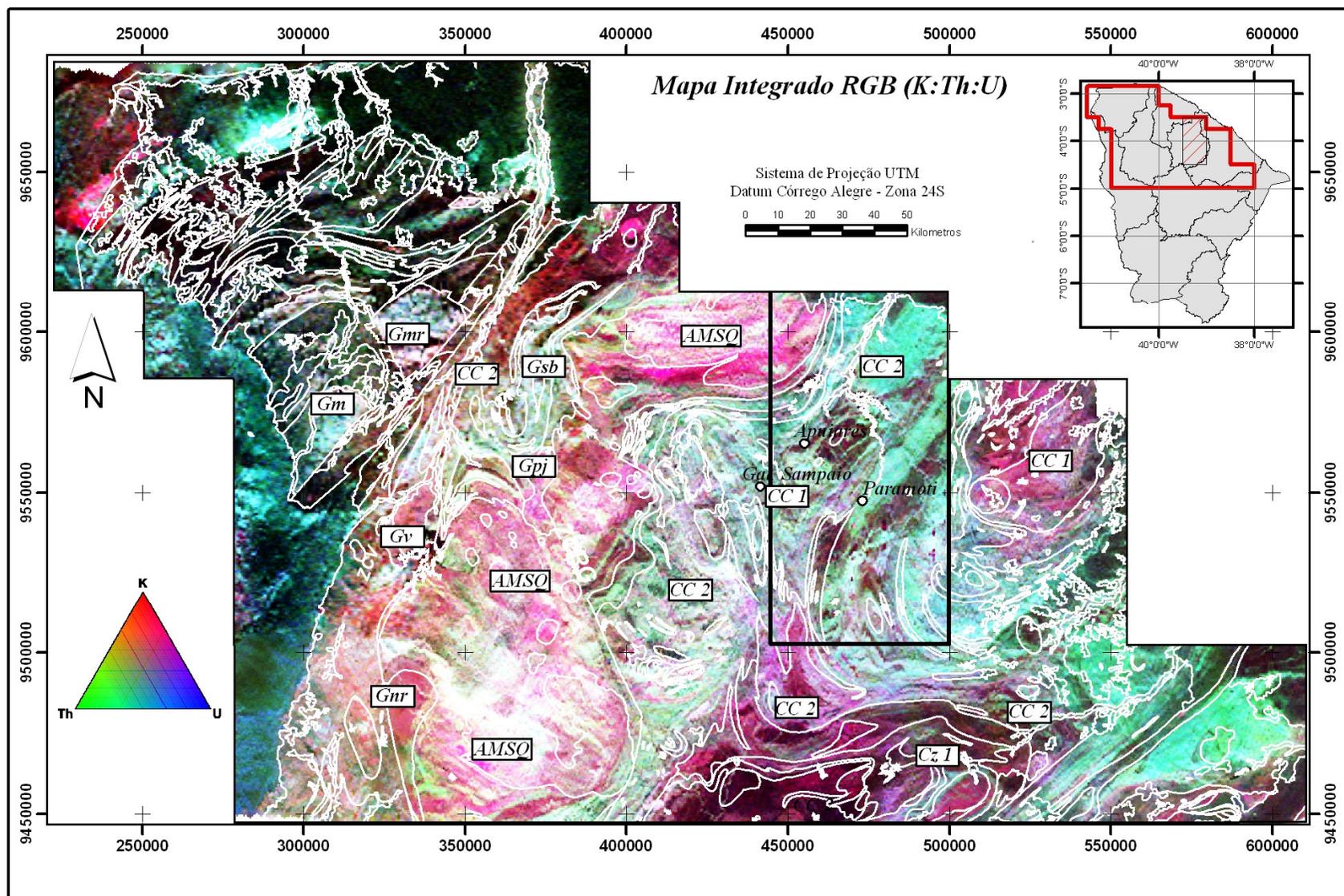
O processamento dos dados permitiu subdividir o Complexo Ceará e adjacências em diferentes domínios, sugerindo a individualização de novos litotipos em escalas de trabalhos até 1:100.000. Faixas granulíticas de direção NE-SW da região de Gal. Sampaio são bem marcadas nas imagens ternárias (RGB e CMY) e nos canais individuais (K, Th, U). Da mesma forma, destacam-se as rochas básicas (anfíbolitos, cálcio silicáticas, metagabros) entre os municípios de Apuiarés, General Sampaio e Paramoti (Figura 3.9), caracterizadas por baixas contagens de radioelementos.

Os principais granitos intrusivos também podem ser discriminados com características magnéticas próprias, a exemplo os granitos da Suíte Pajé (Gpj), que são marcados por alta contagem nos canais de potássio e urânio e intermediárias no canal de tório. Os granitos Meruoca (Gmr) e Mucambo (Gm) apresentam alta contagem dos três radioelementos com pequenas variações faciológicas internas (Figura 3.9).

A anomalia associada à jazida fósforo-uranífera de Itaitaia é marcante, caracterizada por valores bastante elevados para os canais da contagem total, urânio e tório. Valores este situados bem acima dos presentes em todo Domínio Ceará Central, principalmente considerando os dois primeiros canais mencionados (Anexo, CD-ROM).



**Figura 3.8:** Mapa integrado da amplitude do sinal analítico e os principais domínios e estruturas magnéticas regionais. AMSQ: Arco magmático de Santa Quitéria altos valores de amplitude; valores intermediários e de baixa amplitude CC1 e CC2, respectivamente; Cz1: Complexo Cruzeta. Os granitos Serra da Barriga (Gsb), Mucambo (Gm), Meruoca (Gmr) e Pajé (Gp), Nova Russas (Gnr) e Varjota (Gv) também são caracterizados por baixas amplitudes (Amaral *et al.*, 2006).



**Figura 3.9:** Mapa integrado de composição ternária RGB e contornos dos limites litológicos; AMSQ: Arco magmático de Santa Quitéria; CC1 e CC2 Complexo Ceará; Czi1: Complexo Cruzeta; Serra da Barriga (Gsb), Mucambo (Gm), Meruoca (Gmr), Pajé (Gpj), Nova Russas (Gnr) e Varjota (Gv) (Amaral et al., 2006).

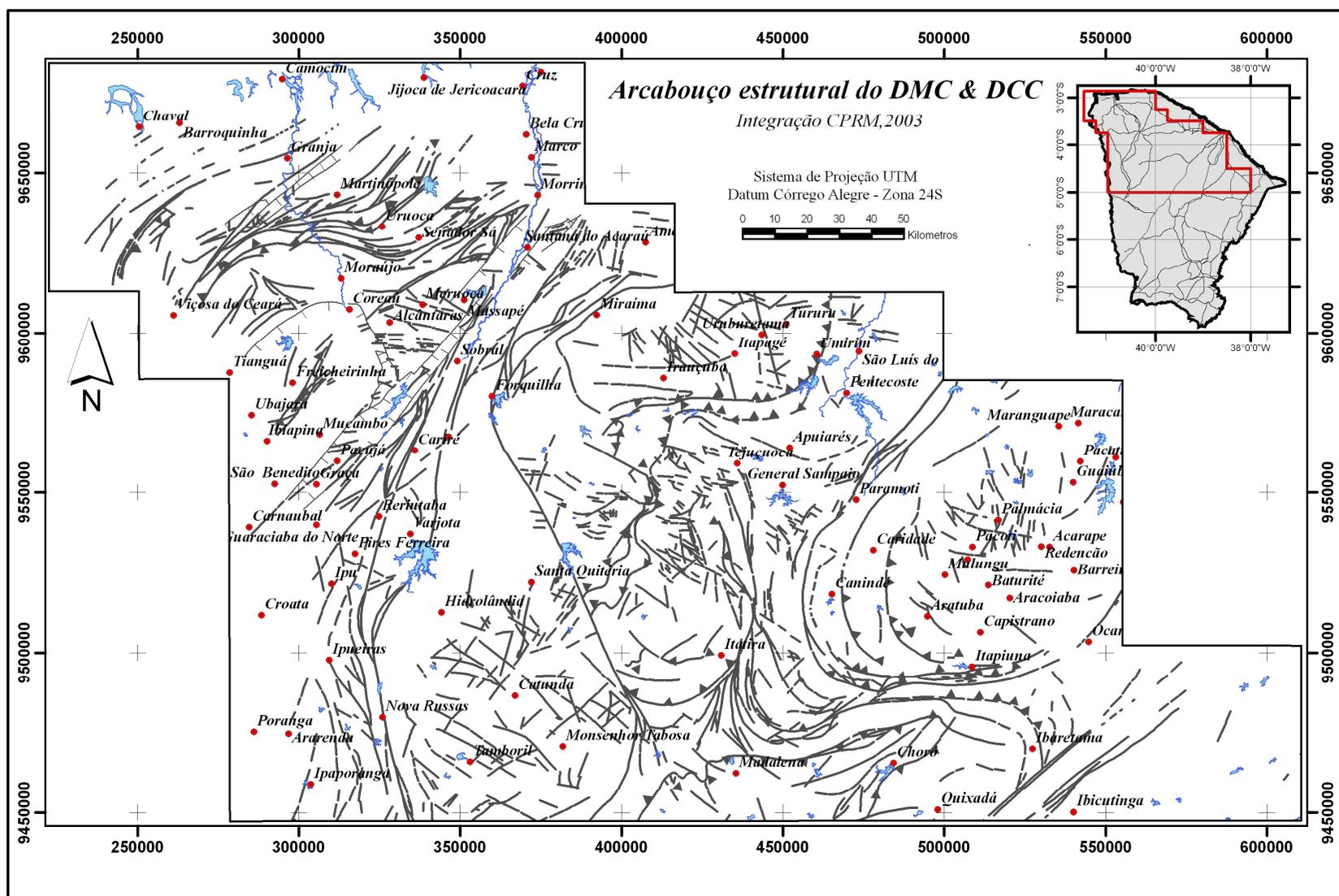


Figura 3.10: Estruturas extraídas do radar SRTM e dos dados aerogeofísicos (ASA e RGB) em parte compiladas do mapa geológico do estado do Ceará (Cavalcante et al., 2003).

### 3.7. Interpretação dos Dados Aeromagnéticos da Área Piloto

Na interpretação dos dados magnéticos foram utilizadas as imagens do campo magnético anômalo (CMA), da amplitude do sinal analítico (ASA), da inclinação do sinal analítico (ISA) e as derivadas Dx, Dy e Dz. Tais imagens interpretadas de forma conjunta possibilitaram a individualização de quatro principais domínios magnéticos e a extração dos principais lineamentos magnéticos estruturais presentes na área de estudo.

#### 3.7.1. Lineamentos Magnéticos

Os lineamentos magnéticos interpretados (Figura 3.11) foram extraídos principalmente das imagens das derivadas horizontais (x, y) e da primeira derivada vertical (z). Essas imagens realçaram lineamentos magnéticos pouco aparentes nas imagens do campo magnético anômalo e da amplitude do sinal analítico.

Observam-se lineamentos cujo *trend* principal NE-SW (Tabela 3.2), é coincidente com o sistema transcorrente da zona de cisalhamento de Paramoti e de diques básicos mesozóicos.

Na porção NW da imagem, onde o principal domínio magnético é representado pelas rochas cristalinas do arco magmático de Santa Quitéria, as estruturas demarcam um forte contato magnético, coincidentes com a falha de empurrão que delimita o contato tectônico.

**Tabela 3.2:** Principais direções dos lineamentos magnéticos.

<b>DIREÇÃO DOS LINEAMENTOS</b>	<b>CONTAGEM DOS LINEAMENTOS</b>
N45E	80
N60E	38
N30E	34
N75E	4
N15E	4
N45W	1
Total:	161

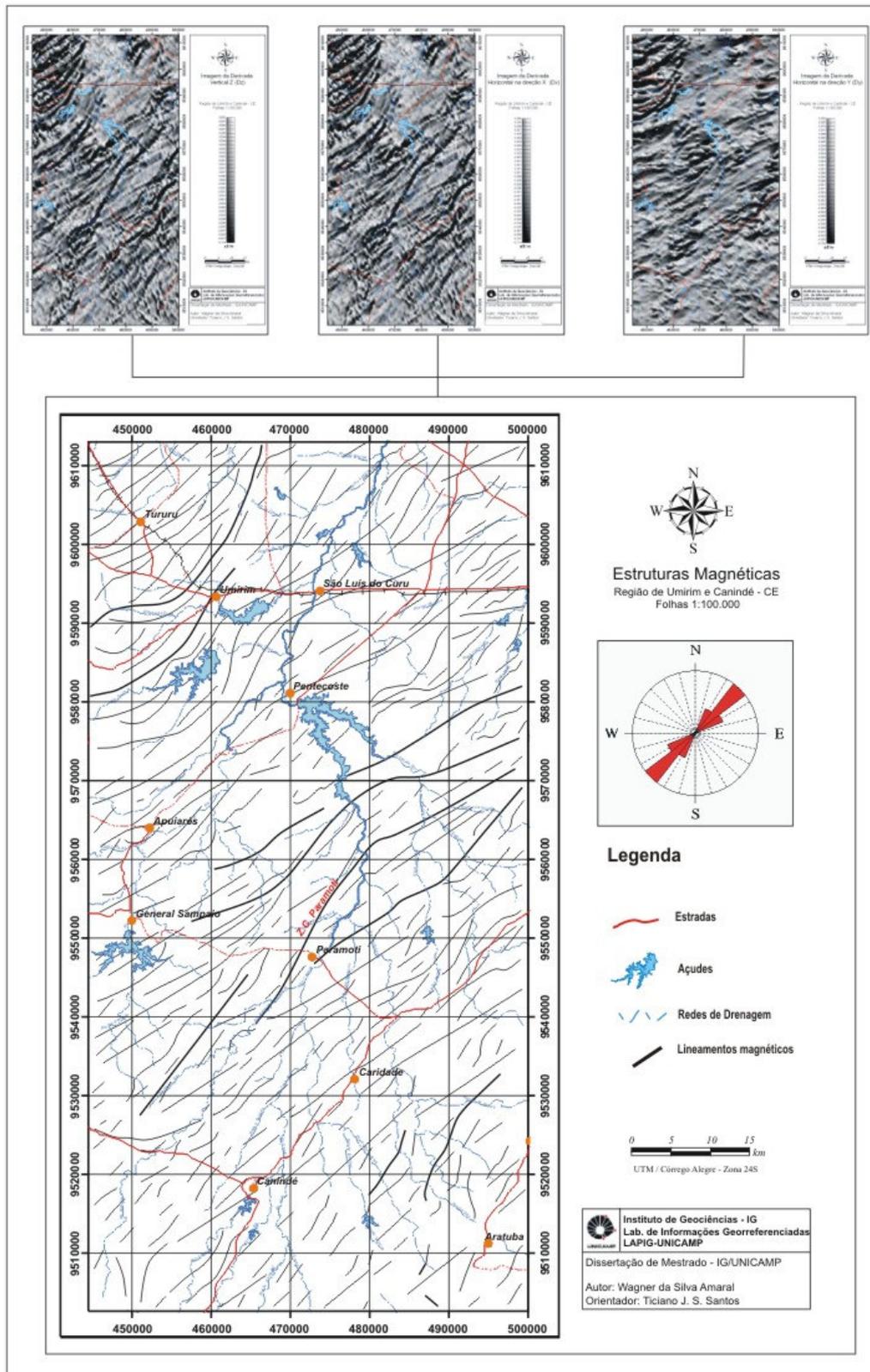


Figura 3.11: Lineamentos magnéticos extraídos das derivadas horizontais (x, y) e vertical (z).

### **3.7.2. Domínios Magnéticos**

Foram individualizados quatro principais domínios magnéticos com base na imagem da amplitude do sinal analítico (Figura 3.12).

As zonas de baixos valores (0,0042-0,0003 nT/m) estão disseminadas no setor norte (arredores do município de São Luiz do Curu) e Sul (Município de Canindé). Correspondem as rochas do Complexo Ceará, unidade Canindé que são representadas por paragnaisses (ricos em silimanita, cianita, granadas), ortognaisses, lentes de quartzitos, metacalcários e cálcio silicáticas.

Os médios valores (0,0092-0,0049 nT/m) também ocorrem em geral em contato com as zonas de baixo gradiente magnético e estão, em grande parte, relacionados aos quartzitos arcoseanos, metacalcários, micaxistos e paragnaisses aluminosos da Unidade Independência (arredores de Aratuba e General Sampaio).

As zonas de médio alto-valores (0.035-0.0098 nT/m) localizam-se principalmente no setor noroeste (Tururu, Umirim) e aparecem ainda em formas circulares e alongadas localizadas no centro da área (Pentecoste, Apuiarés e Paramoti). Essas zonas estão associadas principalmente as rochas de composição cálcio silicáticas, anfíbolíticas, ortognaisses ácidos, metagabros, granodioritos e granulitos máficos.

Restritas ao interior das zonas de médio-altos valores estão as zonas de altos valores (0,6045-0,0422 nT/m), que ocorrem na forma de feições circulares disformes. No setor noroeste da área, essas zonas estão associadas às rochas do arco magmático de Santa Quitéria (granitóides e migmatitos ricos em magnetita, ilmenita, biotitas e hornblenda), enquanto no setor central (Sul de Pentecoste) estão associadas em sua maioria a granodioritos e metatexitos (ricos em magnetita, piroxênios, anfibólios), cálcio silicáticas e aos granulitos (retroeclogitos) máficos (plagioclásio, granadas, anfibólios, piroxênios e quartzo).

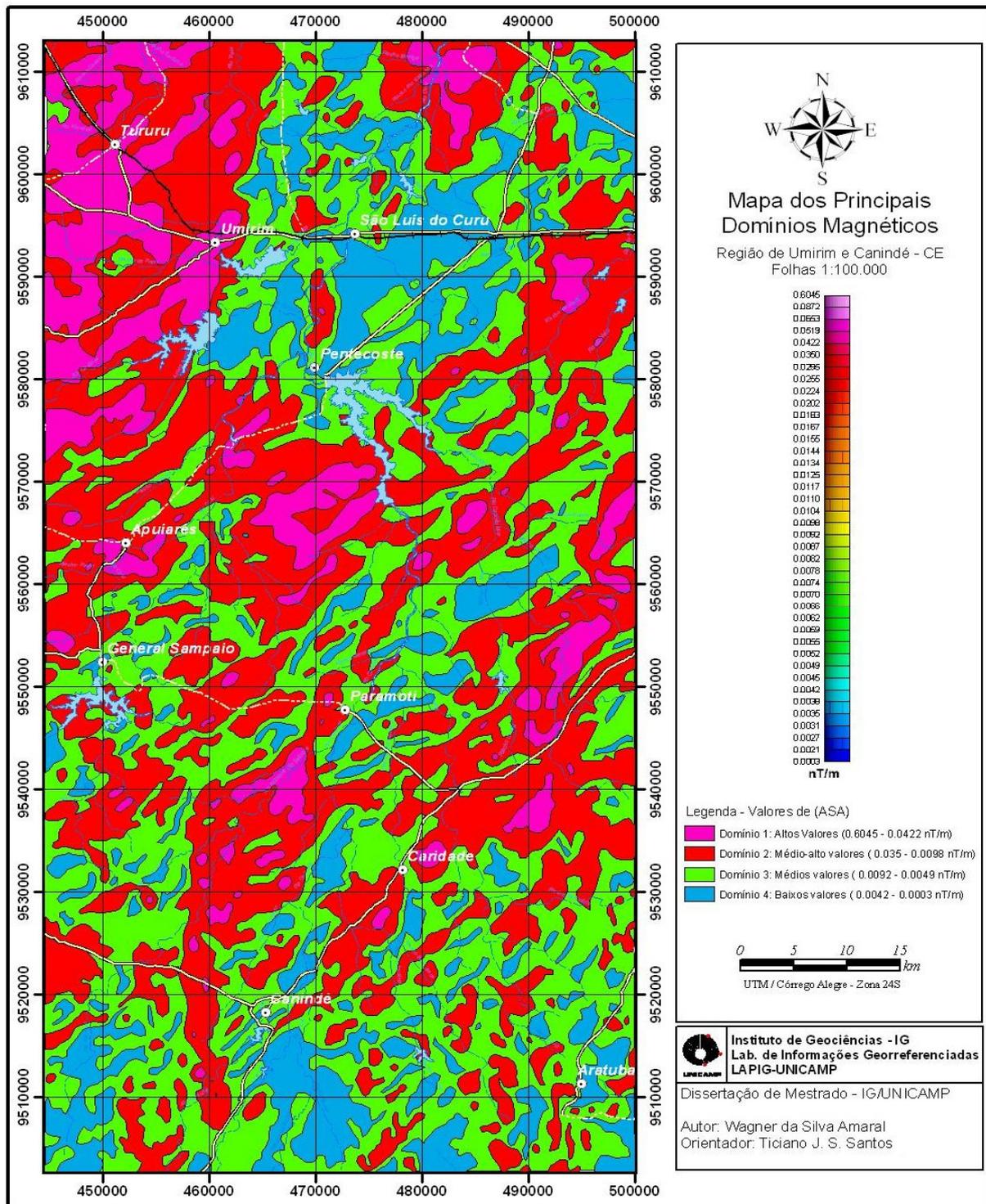


Figura 3.12: Principais domínios magnéticos individualizados a partir da amplitude do sinal analítico (ASA).

### **3.8. Processamento dos Dados Gamaespectrométricos**

Os dados gamaespectrométricos são obtidos a partir da radiação gama emitida naturalmente pelos elementos K, Th e U que compõem os diversos tipos de rocha que, por sua vez, são complementares ao estudo dos produtos derivados do campo magnético anômalo por representarem apenas alguns centímetros da superfície terrestre (~30 cm).

A metodologia do processamento dos dados gamaespectrométricos seguiu a mesma utilizada para os dados magnéticos, só diferenciando-se quanto a interpolação. Apesar do método bidirecional ter representado bem os dados magnéticos, o mesmo não aconteceu com os dados gamaespectrométricos. O método de interpolação que melhor representou os dados gamaespectrométricos foi o da mínima curvatura. Após a interpolação, os dados foram micronivelados com os mesmos parâmetros dos dados magnéticos.

O produto final desse processo foi à geração das seguintes imagens:

**1- Canal de potássio:** esse canal representa o elemento mais abundante entre os elementos medidos em um levantamento gamaespectrométrico. O potássio, comum em diversos tipos de rochas, principalmente aquelas de composições graníticas, é utilizado no mapeamento de unidades, suítes ou corpos graníticos diversos;

**2- Canal do tório:** o tório é o elemento mais inerte dos três radioelementos. Quando sua concentração é maior do que os demais, pode caracterizar regiões de maior intemperismo químico, marcando enriquecimento nesse elemento. Sua concentração é medida a partir do elemento filho (série de decaimento)  $^{208}\text{Th}$ ;

**3- Canal de urânio:** tem como elemento o urânio, com a menor concentração média da crosta terrestre. Em ambiente oxidante é solúvel, formando minerais com óxidos de ferro e carbonatos;

**4- Canal de contagem total:** representa toda radiação gama de um levantamento gamaespectrométrico, definindo os domínios de maior emissão de energia gama;

**5- Composições coloridas RGB e CMY:** são composições em falsa-cor dos canais de potássio, tório e urânio micronivelados, possibilitando a visualização das concentrações dos três elementos K, Th e U, facilitando a distribuição dos domínios gamaespectrométricos. No caso das composições coloridas RGB atribui-se aos radioelementos uma cor, de forma que: o vermelho é relacionado às rochas ricas em potássio; o verde às rochas ricas em tório; o azul para rochas ricas em urânio; o amarelo para rochas ricas em potássio e tório; o ciano rochas ricas em tório e urânio; o magenta rochas ricas em potássio e urânio; o branco às rochas ricas em potássio, tório e urânio; e, por fim, o preto relacionado à ausência dos três radioelementos.

A Figura 3.12 apresenta as principais imagens geradas a partir do processamento dos dados gamaespectrométricos.

### **3.9. Interpretação dos Dados Aerogamaespectrométricos**

A interpretação dos dados gamaespectrométricos possibilitou a delimitação e diferenciação das variações faciológicas das rochas do arco magmático de Santa Quitéria, bem como seu contato com as rochas supracrustais neoproterozóicas que ocorrem em larga escala na área piloto.

Foram utilizadas, nessa interpretação, as imagens sintetizadas na Figura 3.12, correspondentes aos três canais individuais de (K:Th:U), contagem total (CT) e das composições ternárias (RGB, CMY).

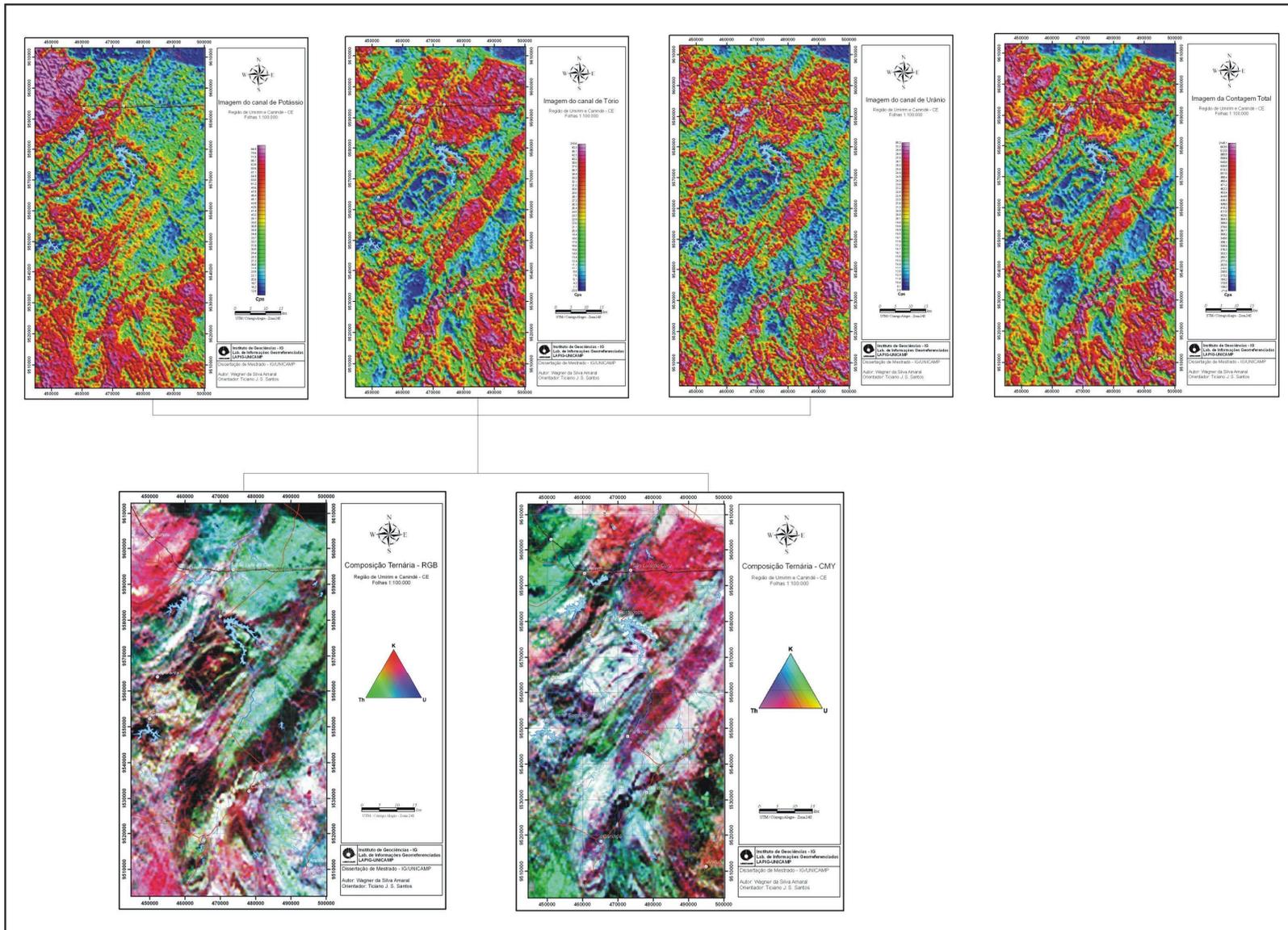
Deste modo, as rochas granitóides e afins do arco magmático de Santa Quitéria, situadas no setor noroeste da área piloto, são caracterizadas por elevados valores gamaespectrométricos quando analisada a imagem RGB, sendo nítida a maior contribuição do K. Isto é corroborado pelos dados geoquímicos nas rochas dessa unidade, onde se verifica uma suíte de rochas cálcio alcalinas com alto a médio K (Santos, inédito). Observa-se também uma baixa contribuição de Th (tonalidades azuis e esverdeadas) devido a presença de rochas menos evoluídas, tais como porções anfibolíticas e granitóides mais máficos (gabros, dioritos e tonalitos). Quimicamente essa relação também se verifica em que as rochas metabásicas correspondem a basaltos toleíticos (N-MORB) de baixo K (Santos *et al.*, em prep.). No setor SW da área de estudo, a forte contribuição do K não representa a presença de rochas graníticas como observados no setor NW, mas sim de quartzitos arcoseanos, xistos aluminosos e migmatitos com biotitas e k-feldspatos.

As rochas supracrustais neoproterozóicas do Complexo Ceará (unidades Canindé e Independência) foram caracterizadas por altos valores de Th e U, e baixos a intermediários valores de K. Na imagem ternária RGB (Figura 3.12), essas rochas são representadas pela cor azulada e esverdeada, estando associadas a rochas gnáissicas paraderivadas aluminosas (ricas em silimanita, cianita, cordierita, plagioclásio, granada e quartzo) e a migmatitos ortoderivados com anfibólios. As anomalias situadas na região central da área, próximo ao município de Pentecoste, apresentam valores baixos dos três radioelementos representados pelas cores escuras (preto e marrom) na imagem RGB. Essas anomalias são caracterizadas pela assinatura de rochas metabásicas com anfibólios (hornblenda) e clinopiroxênios (diopsídio, pseudomorfos onfacita), das quais se destacam anfibolitos, rochas cálcio silicáticas, retro-eclogitos, metagabros e migmatitos melanocráticos.

O setor sudeste da área, apresenta uma forte contribuição de U nos metassedimentos que sustentam a serra de Guaramiranga nos arredores do município de Aratuba. Trata-se de quartzitos micáceos finos esbranquiçados a amarelados, ricos em muscovitas; gnaiss-migmatitos e metapelitos. São representados pela cor azulada na imagem ternária RGB, devido os altos valores de U.

No setor sudoeste, os metassedimentos da seqüência de Bonito são representados por granada-biotita-muscovita-gnaiss, gnaiss quartzo-feldspático (arcoseanos) e subordinadamente migmatitos (metatexitos). As rochas dessa seqüência apresentam altas contagens nos canais de K e U (cor magenta) e médias e baixas contagens para o Th. Algumas regiões a contagem do K é amplamente superior devido à composição arcoseana dos quartzitos.

Os resultados da interpretação de todos os produtos gamaespectrométricos, podem ser conferidos no mapa litogeofísico que será apresentado no próximo capítulo, onde foram diferenciados os principais domínios gamaespectrométricos e sua integração com os dados de campo.



**Figura 3.13:** Principais Imagens geradas a partir do processamento dos dados gamaespectrométricos (K, Th, U, CT, RGB e CMY).

### 3.10. Comentários

A integração de dados geofísicos de naturezas distintas forneceu importantes informações sobre os conjuntos estruturais e litológicos regionais.

Algumas assinaturas mapeadas na fase de interpretação, incluindo os lineamentos estruturais, e unidades litológicas foram analisadas em trabalho de campo. Nesta etapa, procurou-se reconhecer as assinaturas nas áreas mapeadas 1:100.000 (área piloto) e extrapolar as assinaturas geofísicas para a área de estudo, onde o estágio de conhecimento cartográfico geológico ainda é pouco detalhado.

Cabe ressaltar que, devido a amostragem, os levantamentos aerogeofísicos utilizados podem ser considerados como alta resolução (espaçamento linhas de vôo = 500 metros para o Projeto Itatira e de 1000 metros para o Projeto Rio Acaraú), o que permitiu a identificação de uma série de feições gamaespectrométricas e magnéticas, capazes de serem correlacionáveis em diversos graus aos aspectos lito-estruturais regionais e locais. No entanto, dois pontos negativos podem prejudicar sobremaneira tal correlação:

1) **posicionamento espacial**: com base principalmente em padrões de drenagem muito bem marcados na gamaespectrometria e em menor grau, feições lito-estruturais conhecidas, estima-se o erro de posicionamento espacial das anomalias entre 0 e 2 km (Castro, 2004; Teixeira, 2005). Tais erros não possuem um padrão regular e a análise local das anomalias procurou, sempre que possível, levar em consideração tais deslocamentos;

2) **ruídos**: é necessário salientar que devido aos processos de filtragem destinados à supressão do ruído paralelo às linhas de vôo (N-S), as anomalias orientadas próximas a esta direção foram atenuadas. Isto ocorreu com maior intensidade para a magnetometria, sendo esta a informação que apresentou o maior conteúdo de ruídos.

#### **4. INTEGRAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS**

---

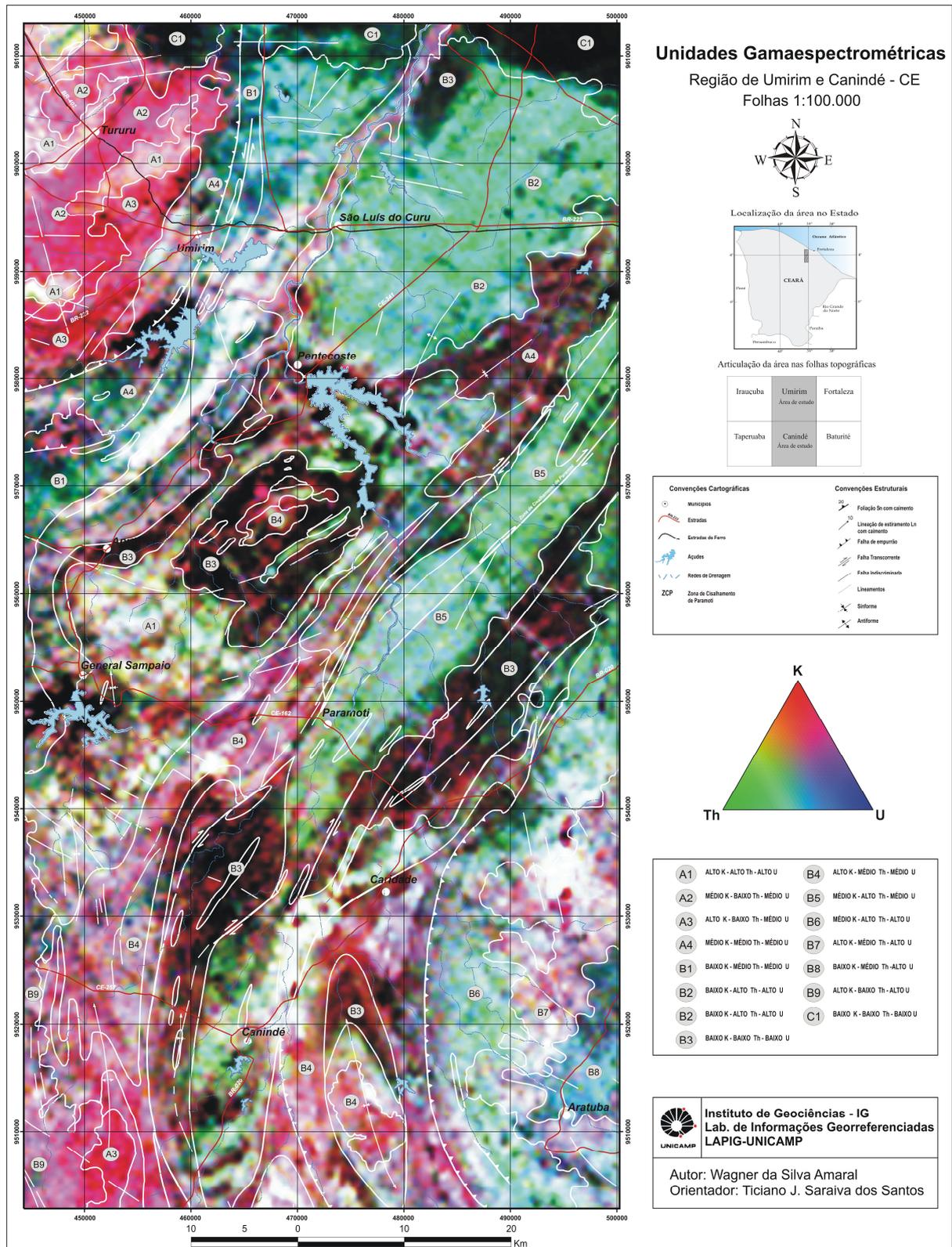
---

O presente capítulo apresenta os resultados da integração das informações obtidas em campo com os produtos aerogeofísicos e de SRTM. Esta junção possibilitou elaborar uma nova configuração geológica para área piloto, onde se caracterizou um arranjo litoestrutural com a individualização de dezoito unidades informais de mapeamento dispostas numa orientação preferencial NE-SW.

O produto final da integração resultou no mapa geológico das folhas de Umirim e Canindé, em escala 1:100.000 (Anexo 01). Nesse mapa foram individualizados dois grandes domínios tectônicos: o Arco Magmático de Santa Quitéria – AMSQ e as seqüências supracrustais para e ortoderivadas que o bordeja. Do arco, foram identificados quatro tipos litológicos representados por **Np<sub>1</sub>**: Núcleos anatóticos; **Np<sub>2</sub>**: Migmatitos ortoderivados; **Np<sub>3</sub>**: Granitos gnáissicos porfiríticos; **Np<sub>4</sub>**: Gnaisses granodioríticos da Unidade Caxitoré (Souza, 2004). Da seqüência supracrustal optou-se em organizar as unidades mapeadas em seqüências paraderivadas (**Ccp**) com a individualização de seis subunidades de mapeamento e seqüências ortoderivadas (**Cco**) agrupadas em oito subunidades. Coberturas elúvio-colúvionar (**Co**), aluviões (**Al**) e diques de composição básica (**Db**) também foram discriminados nos produtos aerogeofísicos.

A carência de dados geocronológicos, principalmente U-Pb em zircão, aliado à complexidade estrutural, dificultam o posicionamento estratigráfico das rochas da área de estudo. Deste modo, o empilhamento estratigráfico aqui proposto foi feito de acordo com algumas relações de contato observadas em campo, podendo não refletir a posição estratigráfica real destas rochas.

A Figura 4.1 apresenta as principais unidades gamaespectrométricas com base na imagem de composição ternária RGB (K: Th: U).



**Figura 4.1:** Imagem da composição colorida RGB (K: Th: U) e principais unidades gamaespectrométricas das regiões de Umirim e Canindé.

#### **4.1. Unidades de Mapeamento**

##### **4.1.2. Seqüência Paraderivada - Ccp**

###### **Unidade Caieiras – Ccp1**

Essa seqüência foi descrita no setor noroeste da área de estudo, bordejando as rochas magmáticas do AMSQ, próximo ao município de Umirim. É formada por micaxistos aluminosos e biotita gnaisses de coloração cinza claro a cinza escuro, com granulação fina a média, de textura homogênea, compostos por quartzo (30%), plagioclásio (40%), feldspato potássico (10-15%), biotita (10-15%) e muscovita (10%) e silimanita (5%). Essas rochas apresentam intercalações de cálcio silicáticas e mármore puros de coloração azulada a branca, além de lentes de quartzitos sedimentares e/ou tectônicos formando uma faixa milonitizada na zona de cisalhamento Caieiras, na parte central desta unidade.

Ocorre sotoposta à unidade Caxitoré (AMSQ), em contato tectônico que consiste na zona de cisalhamento de baixo ângulo de Umirim. A foliação dos gnaisses é proeminente, geralmente com direção NE-SW e mergulhos médios para noroeste, verticalizada em sua porção central, onde ocorre a zona de cisalhamento Caieiras.

Os mármore ocorrem intercalados na seqüência, encaixados pelos micaxistos e biotita gnaisses, estão dobrados e possuem eixos NNE-SSW, levemente inclinados ora para sul ora para norte e flancos assimétricos com vergência para SE.

Essa unidade é correlata à descrita por Souza Filho (1999) como sendo uma seqüência essencialmente paraderivada do tipo QPC aluminosa, composta por níveis pelítico-carbonáticos de biotita gnaisses diversos, com horizontes descontínuos de hornblenda biotita gnaisses, além de intercalações de metacalcários, rochas cálcio silicáticas e quartzitos, podendo ainda ocorrer migmatitos com paleossoma gnáissico paraderivado. Pode também ser correlata às rochas da unidade Independência do Complexo Ceará (Cavalcante *et al.*, 2003), sendo composta por paragnaisses e micaxistos aluminosos (em parte migmatizados), quartzitos, metacalcários, cálcio silicáticas e mais raramente, anfibolitos.

Nos produtos de gamaespectrometria, essa unidade é caracterizada por apresentar baixas contagens no canal do K e intermediárias nos canais de U e Th (Figura 4.1-B1). Em algumas

regiões a contagem do K é alta, principalmente onde ocorre predomínio de micaxistos e quartzitos.

### ***Unidade Rio Curú – Ccp2***

Esta unidade proposta por Souza (2004), abrange mais de 30% em área mapeada se estendendo desde o vilarejo Serrote ao norte da área até o sul do município de General Sampaio, disposta numa direção NE-SW.

É formada por migmatitos e gnaisses de coloração cinza claro a escuro, granulação fina a média, textura homogênea ou inequigranular fina até termos porfíricos, com porções bandadas. Os migmatitos apresentam, de maneira geral, fácies distintas exibindo estruturas dobradas, flebítica, estromática e *schollen* (Mehnert, 1971). São formados por quartzo, plagioclásio, feldspato potássico, hornblenda, biotita e muscovita, ocorrendo tectonicamente abaixo da Unidade Caieiras. A foliação tem direção geral N-S a NE-SW, seguindo a mesma disposição das unidades descritas anteriormente, muitas vezes definindo dobras mesoscópicas isoclinais a apertadas assimétricas com vergência para leste e eixos com caimentos suaves para sul.

A unidade Rio Curú é correlacionada em partes a unidade Canindé, proposta por Cavalcante *et al.* (2003). Na área de estudo é composta por paragnaisses em níveis distintos de metamorfismo e migmatização, incluindo ortognaisses ácidos, rochas metabásicas, lentes de quartzito, metacalcários, cálcio silicáticas e anfibolitos.

Nos produtos de gamaespectrometria, esta unidade é caracterizada por apresentar baixas contagens no canal do K e altas contagens nos canais de U e Th (Figura 4.1). Verificaram-se regiões onde a contagem dos três elementos é alta, principalmente nos arredores do município de General Sampaio, em contraste com as demais litologias descritas.

### ***Seqüência Paraderivada de Paramoti – Ccp3***

Essa seqüência comporta as principais zonas de cisalhamento transcorrentes - ZCT descritas na área, ocorrendo numa longa faixa de direção NE-SW que abrange os municípios de Paramoti e Canindé. É composta principalmente por uma associação de rochas metassedimentares aluminosas com uma mineralogia de alta pressão (silimanita, cianita,

cordierita e granada) (Figura 4.2 A-C), apresentando porções migmatíticas e miloníticas. Em termos petrográficos são compostas por quantidades variáveis de microclina, oligoclásio-andesina, biotita (5-30%), muscovita (5-20%) granada (5-10%). Silimanita fibrosa e cianita também são comuns podendo atingir até 5 % em volume (Figura 4.2 B).

Faixas de **granulitos kinzigíticos (Gk)** e **ortoquartzitos (Oq)** via de regra, protomilonitizados ou milonitizados, ocorrem sob a forma de lentes decimétricas restritos nas proximidades das ZCT. Tais faixas acompanham a estruturação regional, dispendo-se na direção NE-SW. Esses granulitos apresentam uma composição aluminosa, evidenciado pela presença de silimanita, cordierita, granada e piroxênio (Figura 4.2 D). A dimensão decimétrica desses corpos não permitiu a individualização nos produtos gamaespectrométricos, porém os dados obtidos em campo foram essenciais para a delimitação espacial dessas rochas.

**Lentes de anfibolito e cálcio silicáticas (Ca)** afloram ao longo de toda unidade geralmente por dezenas de metros, podendo chegar até centenas de metros. Estão intercaladas aos metassedimentos e rochas carbonatadas, assumem contato brusco e uma foliação concordante com as encaixantes.

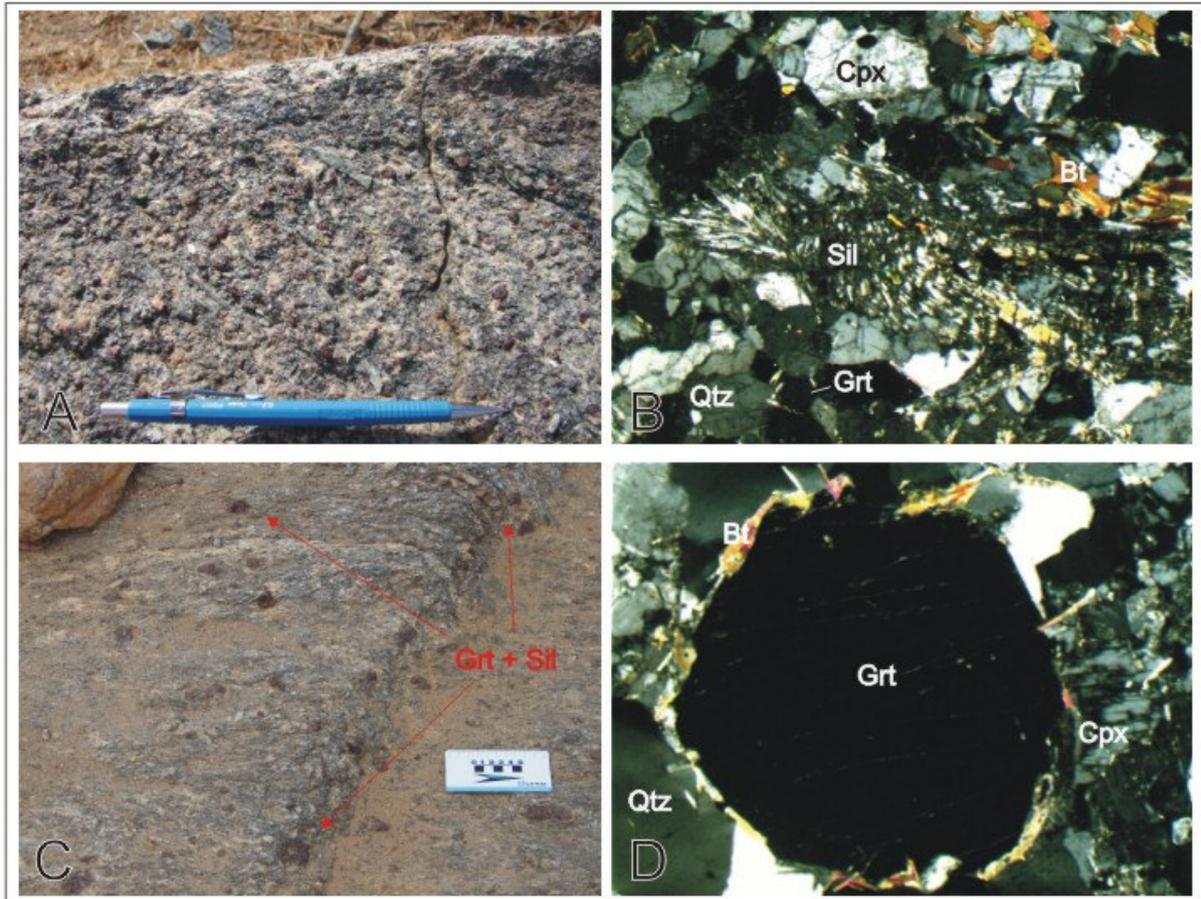
Nos produtos aerogeofísicos os metassedimentos aluminosos são caracterizados por contagens intermediárias a baixas do canal de K e altas contagens de Th, nos produtos magnéticos apresentam susceptibilidade intermediária e baixa (Anexo CD-ROM).

#### ***Biotita Gnaisses – Ccp4***

Essa unidade ocorre no setor sudeste da área mapeada, em contato tectônico, pela zona de cisalhamento de Ipueras (de baixo ângulo) - ZCI a oeste, com as rochas ortoderivadas da unidade **Cco7** e em contato transicional a leste com a seqüência Guaramiranga. É composta principalmente de biotita gnaisses com porções migmatizadas e corpos intrusivos de composição granodiorítica. Localmente encontram-se metassedimentos com silimanita, cianita, granada e biotita.

Essas rochas contêm biotita (15-20%), quartzo (35%), plagioclásio (10-15%), microclina (10-15 %), muscovita (10 %) hornblenda (5%), acessórios e outros (~5%).

**Lentes de mármore** ocorrem intercaladas nessa seqüência e apresentam coloração esbranquiçada, granulação fina a média e textura equigranular. A foliação é de alto ângulo e acompanha o *trend* estrutural desse setor com vergência para W.



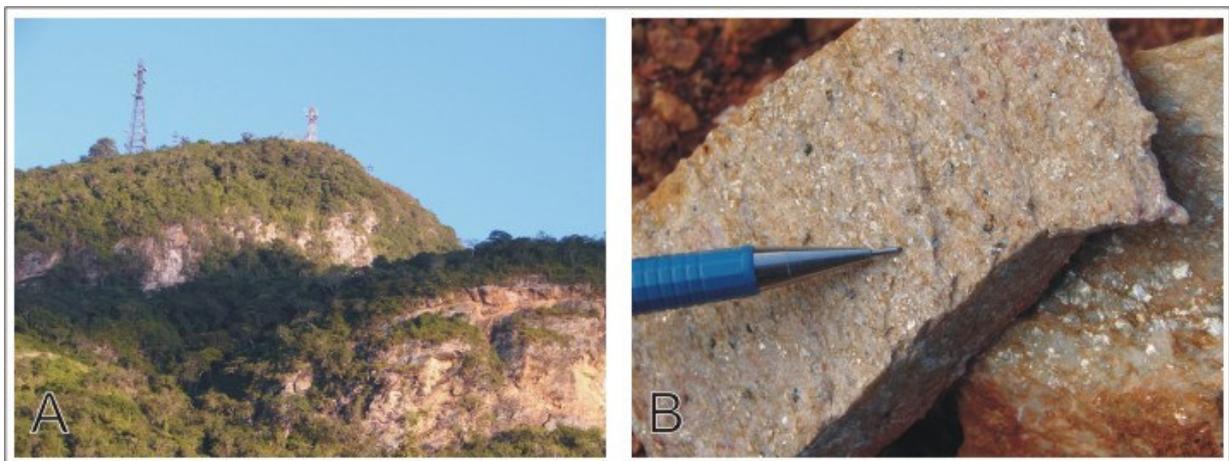
**Figura 4.2:** A) Seqüência metassedimentar com paragênese de alta pressão mega cianitas, granada e silimanita; B) Microfotografia (2,5x) mostrando silimanita (sil) no centro, quartzo (qtz), granada (Grt), biotita (Bt), Clinopiroxênio (Cpx), amostra WT-174; C) Afloramento subverticalizado, próximo as zonas de maior *strain* com a presença de granadas porfiríticas e silimanita fibrolita; D) Microfotografia (2,5x) mostrando granada com bordas de reação em granulitos kinzigíticos (WT-174).

### ***Seqüência Guaramiranga – Ccp5***

Localizada no extremo sudeste da área, nos arredores do município de Aratuba, as litologias representativas dessa unidade de acordo com Arthaud *et al.* (1998), são compostas, da base para o topo, de gnaisses migmatíticos, quartzitos micáceos e metapelitos com porções miloníticas. Sustentam as serras mais elevadas do Estado, na região de Guaramiranga e Pacoti com altitudes médias de 1000 metros (Figura 4.3 A).

Os quartzitos micáceos são os litotipos predominantes dessa seqüência. Apresentam coloração branca amarelada, por vezes avermelhada devido à presença de alguns óxidos e granulação média com aspecto laminado. São compostos por grãos de quartzo recristalizados e estirados, muscovita, biotita e opacos (Figura 4.3 B).

Nas imagens gamaespectrométricas essas rochas apresentam regiões onde a contagem de K, Th e U são altas com pequenas variações, predomínio dos gnaisses migmatíticos (Figura 4.1-B7), e locais onde a contagem de K é baixa e Th e U são altas, locais que afloram os pelitos e em parte os quartzitos micáceos (Figura 4.1-B8).



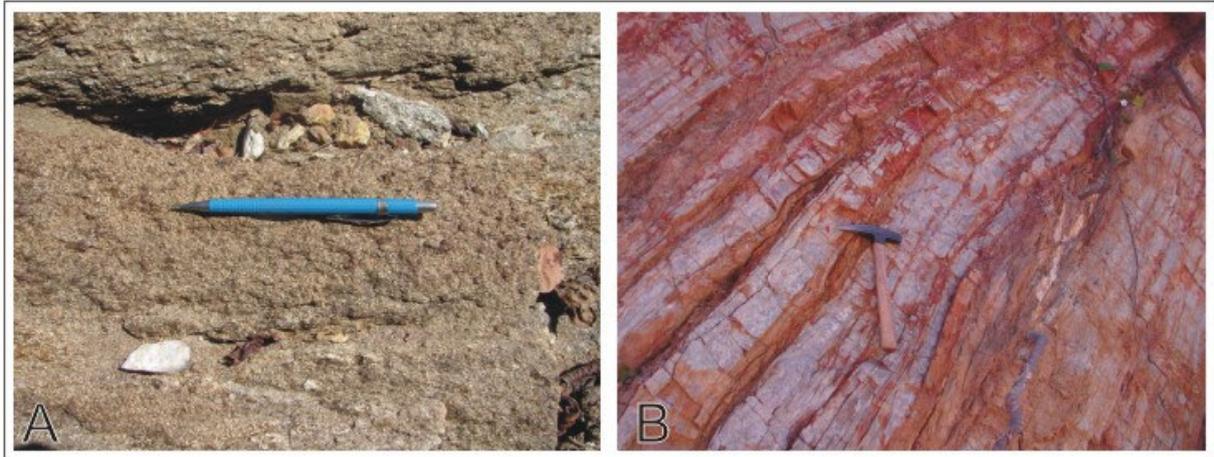
**Figura 4.3:** A) Pico das antenas no município de Pacoti, serras sustentadas pela seqüência metassedimentar de Guarimiranga SE da área de estudo; B) Detalhe dos quartzitos micáceos ricos em muscovita e filmes de biotita.

### ***Seqüência metassedimentar de Bonito – Ccp6***

Localizada no extremo sudoeste da área mapeada, nas proximidades da localidade de Bonito, essa seqüência é composta por granada-biotita-muscovita-gnaiss, gnaiss quartzo-feldspático (arcoseanos) e subordinadamente migmatitos (metatexitos). Morfologicamente representam grandes elevações no relevo sustentando serras e serrotes da região.

Os granada-biotita-muscovita-gnaiss tem cor cinza clara a preta, textura granular-gnaissica e granulação média a grossa. Os gnaisses quartzo-feldspático são de cor clara, constituídos de lentes quartzo-feldspáticas e finos leitos de biotitas (Figura 4.4 A-B). Em termos petrográficos revelam como mineralogia essencial o quartzo, plagioclásio, microclina, biotita, muscovita e óxidos.

Em relação a resposta gamaespectrométrica, as rochas dessa seqüência apresentam altas contagens nos canais de K e U e médias e baixas contagens para o Th. Em algumas regiões a contagem do K é amplamente superior devido à composição arcoseana dos quartzitos.



**Figura 4.4:** A) Afloramento intemperizado de granada-biotita-muscovita-gnaisse; B) Detalhe dos quartzitos arcoseanos ricos em microclina e biotitas.

#### **4.1.3. Seqüência Ortoderivada – Cco**

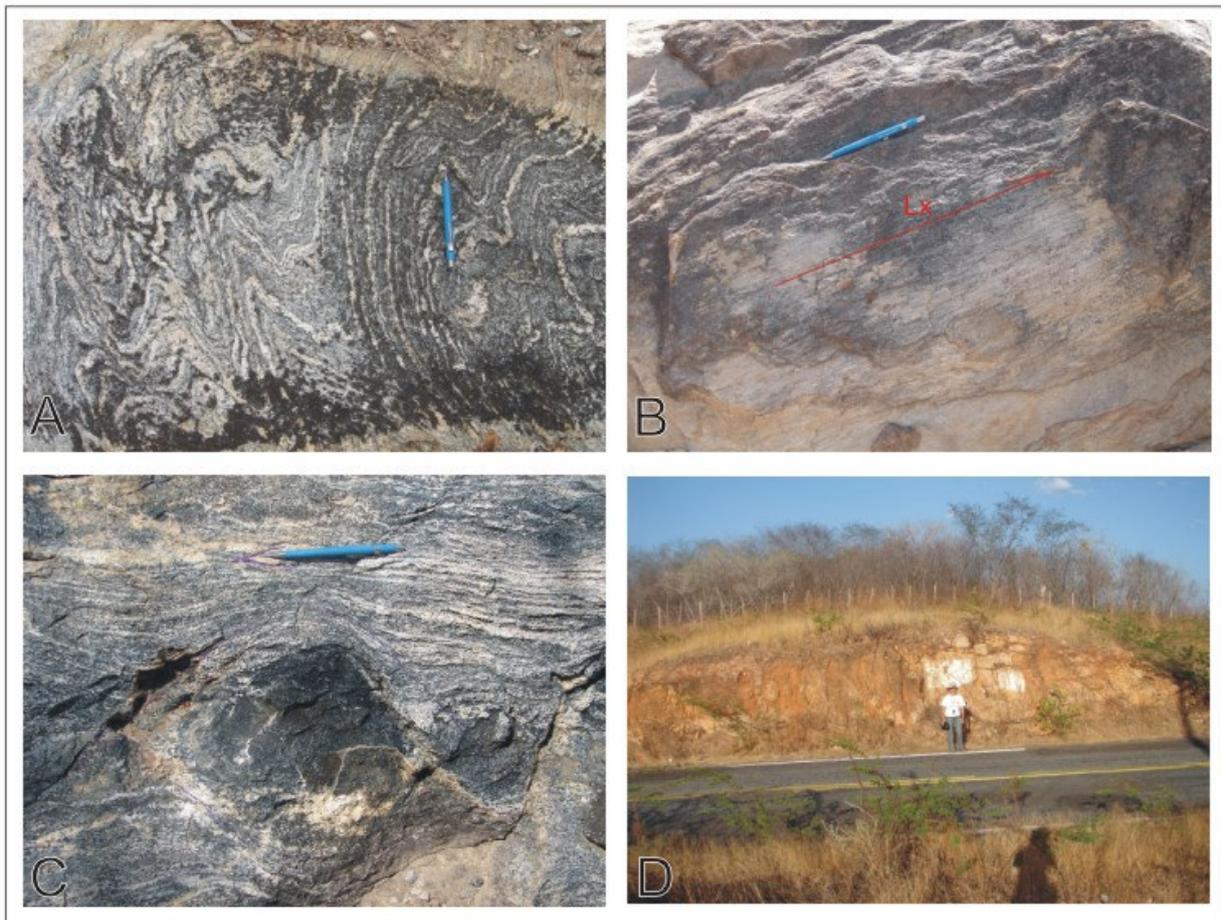
##### ***Unidade Granodiorítica migmatítica – Cco1***

Esta unidade se estende na direção NE-SW e está em contato com as unidades Rio Curú (**Ccp2**) a oeste e encaixados com os metassedimentos da seqüência Paramoti (**Ccp3**) a leste. Os principais litotipos que compõem essa seqüência são gnaisses granodioritos, migmatitos anfibolíticos (metatexitos) e biotita-hornblenda-gnaisses.

Os migmatitos anfibolíticos (metatexitos) são rochas de granulação média, exibindo estruturas nebulíticas e bandadas. O paleossoma é composto por anfibólio (35%), biotita (25%), piroxênio (5%) e opacos (1%) enquanto o leucossoma é composto basicamente por quartzo (20%) e plagioclásio (15%) (Figura 4.5A). Os gnaisses granodioritos em geral afloram como matacões ou em lajedos de cor cinza clara e textura média a grossa. Algumas porções isotrópicas apresentando textura ígnea ainda estão localmente preservadas e hospedam enclaves das seqüências paraderivadas. (Figura 4.5 B, C).

Nas proximidades das zonas de maior *strain* as rochas dessa unidade exibem uma foliação milonítica, com desenvolvimento de corpos sigmoidais e lentes estiradas decimétricas de ortoquartzitos (Figura 4.5 D).

Nos produtos aerogeofísicos, essas rochas apresentam uma forte estruturação, verificada principalmente nos produtos aeromagnéticos (Derivadas e ASA). A gamaespectrometria revelou baixas contagens nos três canais individuais (K: Th: U), refletindo cores escuras na composição RGB permitindo estabelecer o contato com as demais litologias devido o alto contraste (Figura 4.1).



**Figura 4.5:** A) migmatitos anfibolíticos metatexitos; B) gnaisses de composição granodiorítica exibindo uma proeminente lineação de estiramento; C) enclaves máficos em meio comum nas porções isotrópicas; D) ortoquartzitos localizados em geral, próximos às zonas de cisalhamento transcorrentes.

### ***Diatexitos e Leucognaisses – Cco2***

Nessa unidade predominam leucognaisses migmatíticos e faixas alongadas de diatexitos acompanhando o *trend* estrutural NE-SW. Os diatexitos afloram, via de regra, sob a forma de lajedos e mega blocos pouco intemperizados (Figura 4.6 A-B). Geralmente apresentam coloração cinza esbranquiçada a rósea, com uma tênue e descontínua foliação dada por biotitas. Contêm uma quantidade relativamente maior de microclina e quartzo em relação aos leucognaisses. Apatita, zircão e opacos completam a constituição mineralógica dessas rochas.

Os leucognaisses são facilmente reconhecidos em campo devido a cor esbranquiçada desses litotipos e granulação média grossa. Apresentam feições tipo *schlieren* e nebulíticas (Mehnert, 1971). Essas rochas são compostas por quartzo-plagioclásio e microlina (~70%), muscovita (~10%), carbonatos (15%), apatita, zircão opacos (3%) (Figura 4.6 C-D).

Lentes de dolomitos (**mar**) são comuns, principalmente na região do vilarejo de Bonito a SW da área. Estão intercaladas com os gnaisses e apresentam coloração esbranquiçada, granulação fina a média e textura equigranular.

As imagens individuais dos três canais separados revelam que essa unidade apresenta altas contagens de K e médias de U e Th. Na composição RGB é possível identificar faixas de cor mais avermelhada/magenta, relativas às altas contagens de K, que se associam a ocorrência dos diatexitos.

### ***Migmatitos anfibolíticos e metaultramáficas – Cco3***

Encaixada na seqüência gnáissica migmatítica Rio Curú, essa unidade ocorre numa faixa discretamente orientada NE-SW onde estão incluídos rochas básicas, piroxenitos e migmatitos melanocráticos com granada ou não. A cor predominante dos piroxenitos é verde oliva escura, apresentando textura nematoblástica e granulação média grossa.

Foram descritos apenas dois afloramentos dessa unidade nos arredores de General Sampaio e Apuiarés, ao longo da rodovia estadual (CE-347). O contato com a encaixante foi definido com base nos produtos gamaespectrométricos, sendo bem nítido por apresentar baixas contagens nos três canais individuais. Nos produtos aeromagnéticos, principalmente da amplitude do sinal analítico de ordem 0 – ASA e na amplitude do gradiente horizontal total – AGHT, a anomalia

magnética é extremamente ressaltada por apresentar altos valores de susceptibilidade magnética dada a quantidade de minerais ricos em Fe/Mg (piroxênios, anfibólios, granadas e óxidos).



**Figura 4.6:** A) Blocos de gnaisses diatexitos; B) microfotografia mostrando texturas de intercrescimento gráficas e presença de microclina em maior proporção amostra WT-122 (aumento 2,5x); C) leucognaisses migmatíticos exibindo estrutura dobrada; D) microfotografia com textura granoblástica típica dos leucognaisses composta por plagioclásio, microclina, pertita, biotita e quartzo (aumento 2,5x).

#### ***Hornblenda gnaisses migmatíticos, granulitos máficos – Cco4***

Essa unidade ocorre na região central da área de estudo, a leste do município de Apuiarés e também numa longa faixa estendendo-se até o limite sul contemplando os vilarejos de Trapiá e Monte Alegre. É representada por hornblenda gnaisses, migmatitos, anfibolitos e cálcio silicáticas. Destaca-se também a ocorrência de retro-eclogitos, granulitos máficos e kinzigíticos com granada, anfibólio, clinopiroxênio, plagioclásio e quartzo.

Os contatos dessa unidade foram definidos principalmente com as imagens das composições ternárias RGB e CMY, sendo facilmente delimitados devido o alto contraste com os litotipos das unidades encaixantes, reflexo das baixas contagens nos três canais (K:Th:U) (Figura 4.1-B3). Nos produtos gerados a partir dos dados aeromagnéticos as litologias dessa seqüência também foram bem representadas com altos valores de susceptibilidade magnética, verificados principalmente na imagem da amplitude do sinal analítico (Anexo).

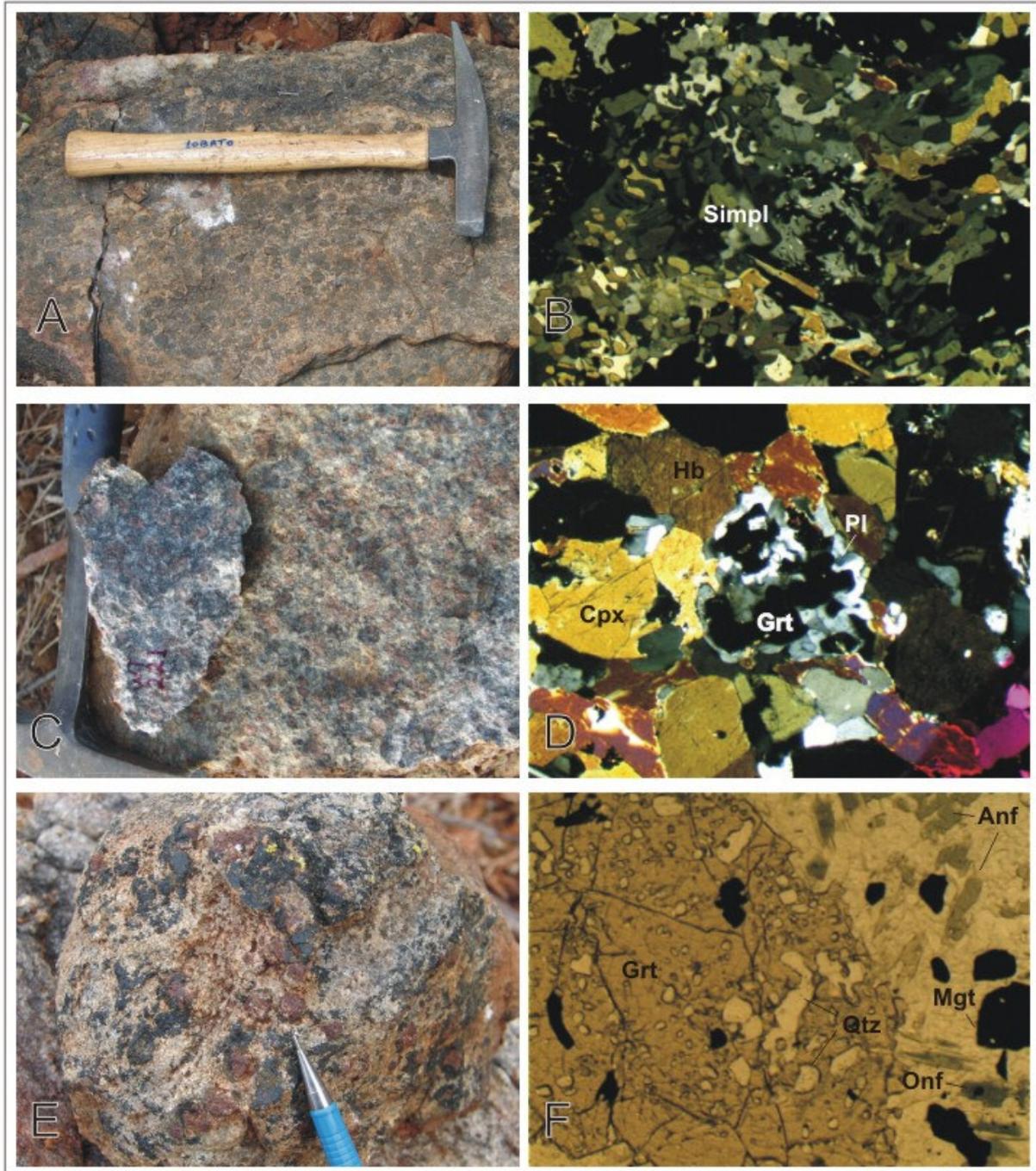
Em termos petrográficos, a porcentagem de minerais ferro-magnéticos nos anfibolitos e granulitos máficos que compõem essa seqüência sempre foi superior a 50 % (Anfibólio, biotita, piroxênio e óxidos) (Figura 4.7).

Em campo, a região de ocorrência dessas rochas metabásicas é caracterizada pela presença de um solo avermelhado, argiloso e predomínio de uma vegetação mais densa. Os afloramentos nem sempre estão preservados, em geral são encontrados blocos e matacões dispersos em áreas bem localizadas ou quando observados *in situ*, ocorrem como lentes intercaladas aos gnaisses.

**Granulitos máficos - Retro-eclogitos (Gm)** ocorrem dispersos principalmente nessa unidade, seja como xenólitos e / ou corpos alongados e *boudinados* de direção NE-SW, nas rochas orto e paraderivadas na região central da área. Essa seqüência é caracterizada petrograficamente por exibir texturas e assembléias minerais que caracterizam retro-eclogitos, granulitos máficos de alta pressão e granada anfibolitos de fácies anfibolito alto. Os retro-eclogitos são representados por anfibólio (~10%), clinopiroxênio-diopsídio (~20%), granada (~20-25 %), plagioclásio (15-20%), quartzo (~5%), rutilo, apatita, ilmenita, titanita, carbonato e opacos são acessórios freqüentes (~5-10%). É comum encontrar a associação diopsídio + plagioclásio + granada formando texturas de intercrescimento simplectítico (Figura 4.7 B). As granadas são poiquiloblástica, xenoblástica e corroídas. Em geral o alívio de pressão (descompressão) é evidenciado pela presença de uma textura coronítica incompleta de quartzo e plagioclásio bordejando essas granadas (Figura 4.7 D). São freqüentes inclusões de quartzo em gota e mais raramente pseudomorfos azul-esverdeado (onfacita) (Figura 4.7 F).

Os hornblenda gnaisses migmatíticos encontram-se estruturados segundo o mesmo *trend* regional NE-SW, e afloram via de regra, como lajedos ou menos freqüentes como blocos. Possuem coloração cinza a cinza escuro, textura granoblástica e granulação média grossa. O paleossoma representa em geral as porções mais abundantes nesses litotipos e são constituídos

por hornblenda, biotita, epidoto, titanita, apatita, zircão, ilmenita e magnetita, enquanto o neossoma é composto basicamente por quartzo, plagioclásio e microclina.

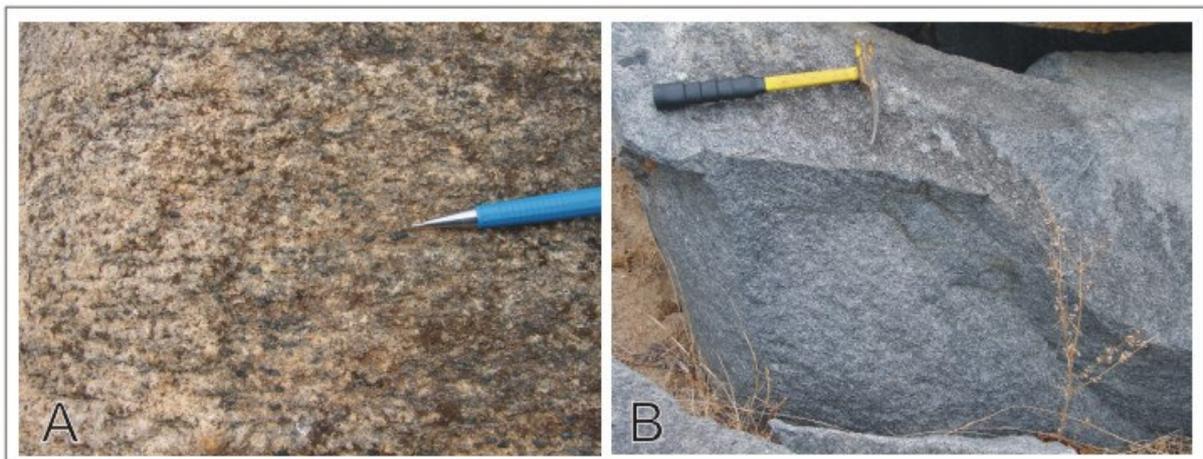


**Figura 4.7:** A) Bloco de granulito máfico, com cristais euhedrais de ortopiroxênio; B) microfotografia mostrando texturas simplectíticas de plagioclásio e clinopiroxênio (2,5x) (WT-176); C) Detalhe de granulitos máficos com granadas (amostra WT-221); D) microfotografia (2,5x) granada com coroa de plagioclásio e clinopiroxênio evidenciando a atuação de descompressão dos granulitos máficos. O retrometamorfismo é evidenciado pelo aparecimento de anfíbólio; E) granulito, no detalhe granadas e piroxênios prismáticos; F) granadas com grande quantidade de quartzo em gotas incluso, formando polimorfos de sílica podendo ser coesita.

### ***Granodiorito com magnetitas – Cco5***

Ao sul do município de Pentecoste foram descritos dois plútons, conhecidos como serrote Tamanduá e Serrinha, delimitados na imagem integrada, do modelo digital do terreno (SRTM) com os dados gamaespectrométricos, por se destacarem na topografia e apresentarem altas contagens no canal do K e intermediárias nos canais de Th e U. Estes corpos também foram bem representados na imagem da amplitude do sinal analítico de ordem zero devido a grande porcentagem de magnetita na composição dessas rochas, apresentando altíssimos valores de susceptibilidade magnética (Figura 4.8 A).

Tectonicamente ambos os corpos estão concordantes com as estruturas regionais, em contato nítido com os gnaisses e anfibolitos da seqüência circunjacente (**Cco4**). Os granodioritos do serrote Serrinha mais a sul possuem tonalidades amarelo claro, textura inequigranular heterogênea e granulação grossa (Figura 4.8 A), enquanto as rochas do serrote Tamanduá a norte apresentam cores mais escuras, cinzentas, textura equigranular e granulação média. Em termos petrográficos, a amostra WT-318 do serrote Serrinha é composta por plagioclásio, granada, anfibólios, biotitas, piroxênios, quartzo (<10%), magnetita (15%) e acessórios (apatita e zircão).

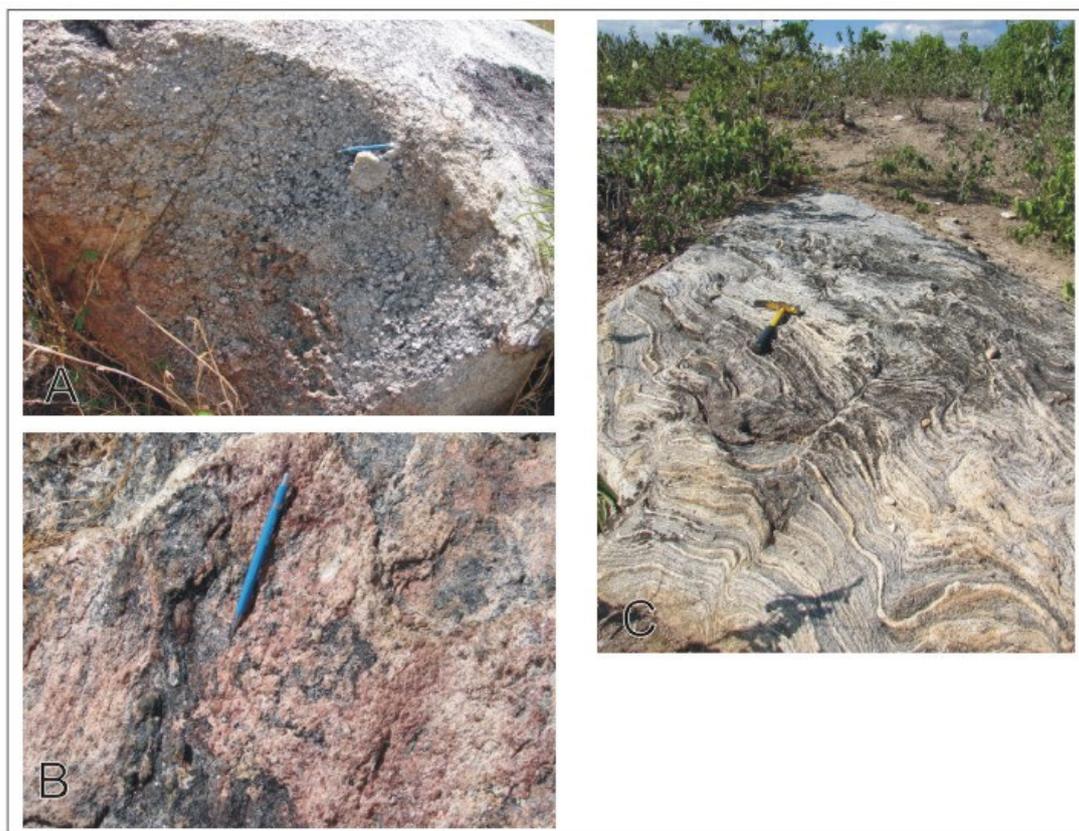


**Figura 4.8:** A) Detalhe mostrando a relativa abundância de magnetita na fácies do serrote Serrinha; B) Bloco granodiorítico do serrote Tamanduá, fácies fina média, equigranular.

### *Leucogranitos de Bonito – Cco6*

Essa unidade localiza-se no setor sudoeste da área de estudo, nos arredores do vilarejo de Bonito. Os leucogranitos são os litotipos dominantes nessa unidade, apresentam uma deformação muito incipiente, coloração branca rosada e granulação fanerítica grossa, via de regra inequigranular, podendo chegar a níveis porfiróides (Figura 4.9 A-B). Encontram-se parcialmente fundidos nos contatos com as seqüências encaixantes formando migmatitos com estruturas dobradas e estromáticas (Figura 4.9 C). São compostos por proporções superiores de k-feldspato, plagioclásio, quartzo, biotita, granada e acessórios (zircão, apatita).

A delimitação dessa unidade teve como base os valores de altas contagens de K, intermediárias de U e baixas no canal do Th, podendo ser comparado em termos de assinatura gamaespectrométrica, aos granitos porfiríticos do AMSQ (Figura 4.1).



**Figura 4.9:** A) Bloco de leucognaisse exibindo granulação grossa com alguns cristais porfiríticos de k-feldspato; B) coloração rosada típica de feldspatos potássicos em rochas com altos teores de k, ressaltados na gamaespectrometria; C) Migmatitos que bordejam os granitóides, predomínio de bandas máficas ricas em biotitas, estrutura estromática.

### *Leucognaisses de Ipueiras – Cco7*

Essa unidade situa-se no setor sul da área estudo nos arredores do município de Caridade e do vilarejo de Ipueiras dos Gomes. A leste encontra-se em contato tectônico por falha de empurrão com a unidade paraderivada **Ccp4**, e a oeste em contato não definido (possivelmente de empurrão) com a unidade **Ccp3**.

É composta por leucognaisses migmatizados, que ocorrem como corpos alongados e afloram como lajedos e mega blocos no terreno, o solo produto do intemperismo é característico por ser arenoso e claro composto por quartzo e feldspatos (Figura 4.10 A). São rochas de granulação média, textura equigranular, geralmente apresentando porfiroblastos de granada e localmente silimanita e muscovita (Figura 4.10 B). Estruturalmente apresentam uma foliação gnáissica e comumente migmatítica, podendo ainda exibir porções mais isotrópicas. Foram descritos também nessa unidade hornblenda migmatitos (Figura 4.10 C), biotita gnaisses, corpos intrusivos menores de composição tonalítica e lentes de milonitos próximos as rampas de empurrão a leste e a oeste.

Petrograficamente, os leucognaisses apresentam textura inequigranular, com a microclina predominando sobre as albitas em uma razão aproximada 3:1 (Figura 4.10 D). A granada apresenta forma hipidiomórfica, com algumas faces bem cristalizadas a cristais sub-arredondados. O quartzo apresenta contatos suturados irregulares e sinas de recristalização, tais como lamelas de deformação.

Essa unidade de maneira geral possui assinaturas radiométricas semelhantes à unidade **Cco2**, representada por altas contagens de K e intermediárias de Th e U (Figura 4.1-B4). As composições ternárias RGB e CMY utilizadas para facilitar a identificação de contrastes, revelaram que essa unidade apresenta pequenas variações nas contagens dos três radioelementos (K: Th: U), refletindo as variações litológicas que foram descritas em campo.

### *Granodioritos migmatitos – Cco8*

Essa unidade é representada por um corpo de composição granodiorítica (predominante) a tonalítica, intrusivo na unidade **Cco7** e bordejado por migmatitos metatexitos. O corpo está deformado e apresenta uma foliação gnáissica penetrativa mergulhando tanto para oeste como para leste, definindo um mega sinforme com eixo caindo para norte e para sul. Algumas porções são isotrópicas e preservam textura ígnea com xenólitos máficos. É constituído essencialmente por quartzo, plagioclásio, K-feldspato, hornblenda, biotita.

A estrutura definida pela deformação dessas rochas é bem ressaltada tanto no modelo digital do terreno (SRTM) como nos produtos gamaespectrométricos e magnéticos (Anexos 03).



**Figura 4.10:** A) Lajedo de migmatito leucocrático exibindo estrutura nebulítica (Mehnert, 1971); B) Detalhe de pórfiros de granada; C) Hornblenda migmatitos (metatexitos) preservando foliação; D) Microfotografia (2,5x) Proporção de microclina em relação ao plagioclásio, muito superior nos leucogneisses.

#### 4.1.4. Arco Magmático de Santa Quitéria – AMSQ

Presente na extremidade noroeste da área mapeada, as litologias que compõem este setor são representadas pela unidade conhecida na literatura como Maciço Santa Quitéria (Santos & Brito-Neves, 1984), ou Complexo Tamboril Santa Quitéria.

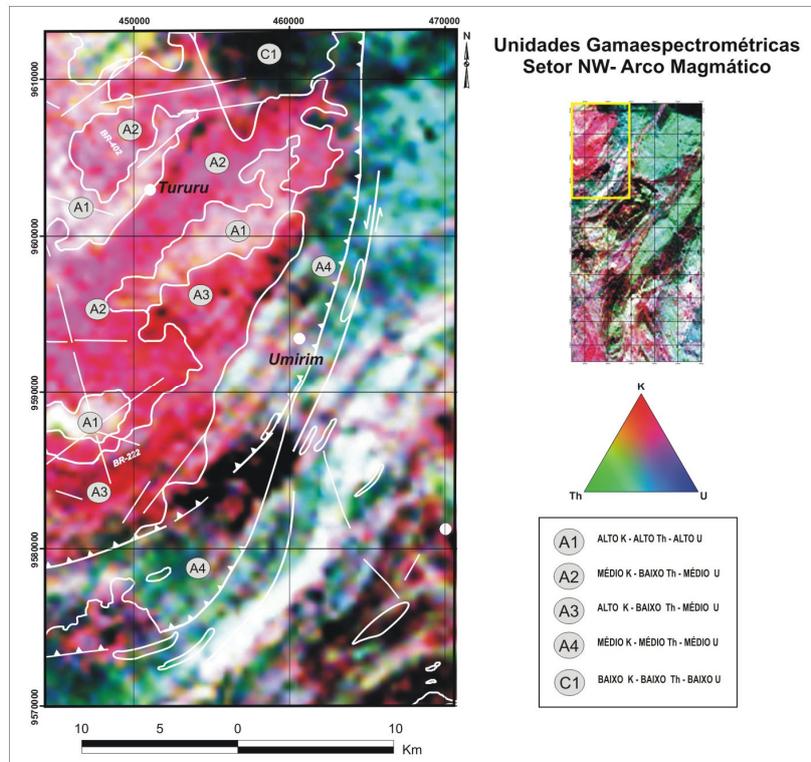
Trabalhos recentes procuraram detalhar por meio de estudos isotópicos e mapeamento básico, a estruturação deste complexo que é interpretado como um arco magmático continental (Fetter *et al.*, 2003; Castro, 2004; e Teixeira, 2005).

Fetter *et al.* (2003) têm tratado o Complexo Tamboril Santa Quitéria como um complexo granito-migmatítico de idade neoproterozóica, com dimensões batolíticas e com sucessivas fases de magmatismo, a saber: **1) Fase pré-colisional:** abrange granitóides em geral porfiríticos, de composição diorítica a granodiorítica, ricos em Ca e pobres em K, com fácies exibindo foliações marcantes, gnaissificação e até migmatização; **2) Fase colisional:** composta de migmatitos cinzentos e rosados de composição granodiorítica a granítica, ricos em quartzo, com estruturas nebulíticas e *schlieren*, geralmente com enclaves de gnaisses dioríticos; **3) Fase tardi-colisional:** granitóides pouco deformados, representa a fase menos abundante de granodioritos a monzogranitos, podendo ocorrer enclaves dioríticos; **4) Fase final pós-colisional:** compostos por granitóides porfiríticos com alto K.

Para este setor, foram individualizadas quatro subunidades litológicas informais bem distintas nas imagens gamaespectrométricas dos três canais individuais (K, Th e U) e nas composições ternárias RGB e CMY (Figura 4.11). Esta individualização também se mostra evidente na análise de campo.

Os núcleos anatóxicos (**Np<sub>1</sub>**) foram individualizados por apresentarem as maiores contagens radiométricas nos três canais (cores brancas na imagem RGB – A1); Os migmatitos que circundam esses núcleos (**Np<sub>2</sub>**) apresentam as maiores contribuições dos canais de K e U e baixas contagens de Th (A2); Os gnaisses porfiríticos (**Np<sub>3</sub>**) devido a porcentagem elevada de K-Feldspato nessas rochas apresentam altas contagens de K, média de U e baixa de Th (A3), finalmente os gnaisses de composição granodiorítica da unidade Caxitoré (**Np<sub>4</sub>**) possuem contagens médias nos três canais, com regiões apresentando altas contagens de Th e altas contagens nos três canais, refletindo variações litológicas composicionais observadas em campo (A4, Figuras 4.11).

A Figura 4.13, mostra os principais litotipos diferenciados em campo e nas imagens gamaespectrométricas no setor noroeste.



**Figura 4.11:** Unidades gamaespectrométricas individualizadas no AMSQ, setor NW da área mapeada. A análise quantitativa dos radioelementos foi realizada individualmente nos três canais (K,Th, U).

### ***Diques básicos (Db)***

Ocorrem como corpos alongados ou como blocos e matacões contínuos ou não e, via de regra, intemperizados com esfoliação esferoidal. Possuem comprimentos métricos a quilométricos com direções preferenciais NE. Seccionam grande parte das unidades de mapeamento, e são facilmente reconhecidos nos produtos magnéticos regionais, com ocorrência expressiva no setor sul da área, nas proximidades do município de Caridade (Figuras 4.12 A-B).

### ***Coberturas colúvio-eluvionar (Co)***

Esses sedimentos ocupam praticamente toda porção norte da área de estudo, constituindo uma morfologia de tabuleiros aplainados com suaves ondulações de natureza colúvio-eluvionar. Litologicamente tais sedimentos são caracterizados por um material areno-argiloso alaranjado de

granulação fina a média, inconsolidados. São constituídos por grãos de quartzo imaturos, pouco desgastados, opacos, palhetas finas de micas e grãos de feldspatos alterados.

Na gamaespectrometria são representados por apresentarem baixíssimas contagens nos três canais individuais dos radioelementos. Na região do vilarejo Serrote, limite norte da área, uma forte anomalia magnética foi verificada nos produtos aeromagnéticos (ASA, AGHT), em campo constatou-se em um único afloramento próximo ao leito do rio Curú, que se tratava de rochas com paragênese de alto grau: silimanita, granada, biotita, quartzo e plagioclásio. Essas rochas encontram-se encobertas pelos sedimentos, sendo necessários trabalhos mais detalhados na região para a delimitação precisa desses litotipos.

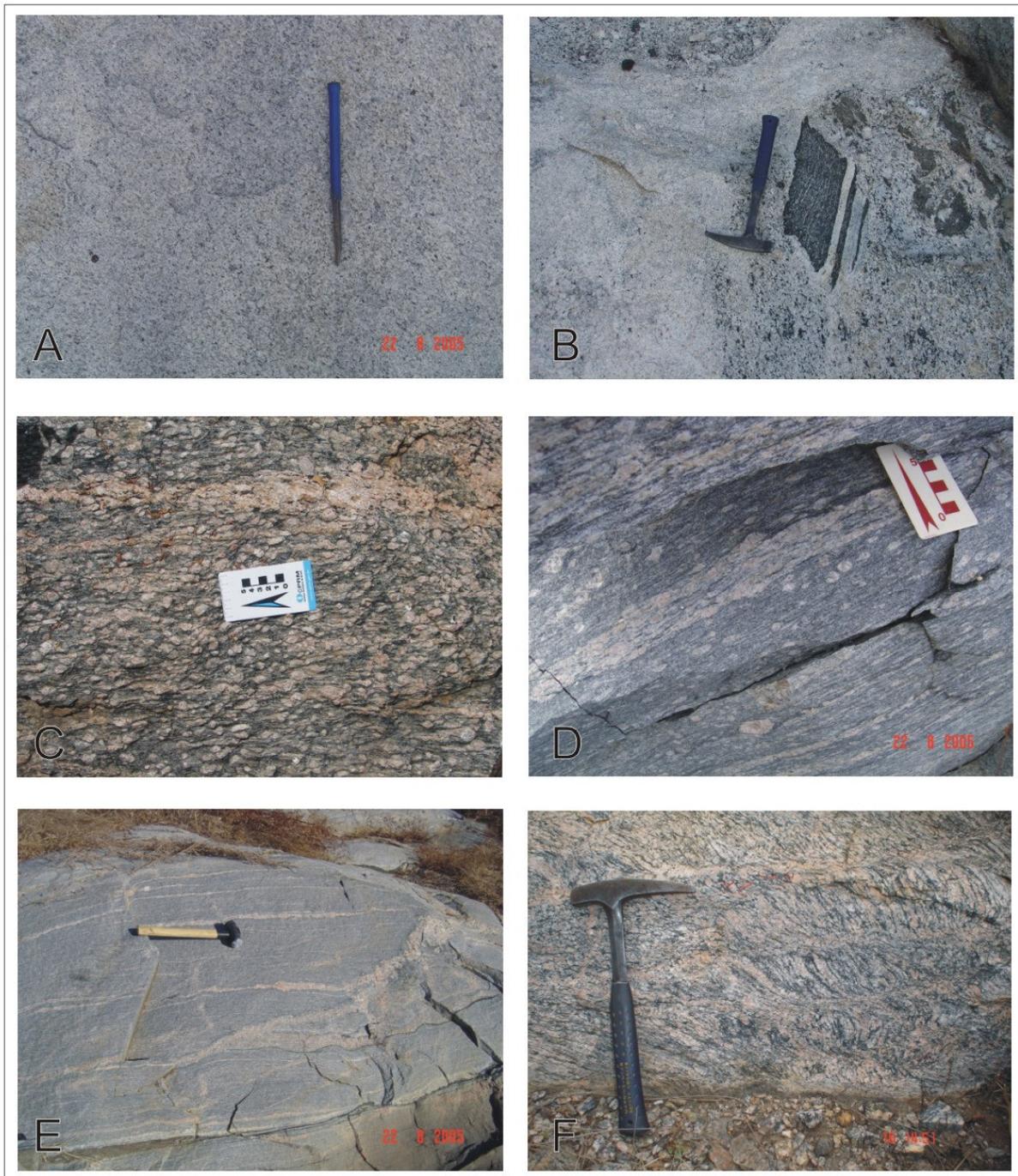
### *Aluviões (al)*

Predominam em áreas planas, dispendo-se nos leitos dos principais rios e riachos da área mapeada. São constituídos por sedimentos arenosos de granulação média a grossa. O maior acúmulo desses sedimentos ocorre nos leitos dos rios Curú e Canindé.

Apresentam altas contagens nos três canais individuais (K: Th: U) devido a mobilidade e acúmulo de concentrações desses radioelementos nos leitos das drenagens.



**Figura 4.12:** A) Forma de ocorrência dos diques basálticos, no detalhe intemperismo provocando esfoliação esferoidal; B) Bloco de diabásio disperso no terreno, registro no solo vermelho, típico de alteração de rochas básicas.



**Figura 4.13:** Principais litotipos diferenciados em campo e nas imagens gamaespectrométricas: A) Núcleos anatéticos **Np1**; B) Migmatitos diatexito com enclaves máficos **Np2**; C) Gnaisses porfiríticos homogêneos **Np3**; D) gnaisses porfiríticos com uma foliação de baixo ângulo próximos as frentes de empurrão; E) Gnaisses de composição granodiorítica da unidade Caxitoré **Np4**; F) Gnaisses da mesma unidade com indicadores cinemáticos tipo S/C.

## 4.2. Arcabouço Estrutural

O Domínio Ceará Central – DCC é caracterizado por uma história tectônica de natureza policíclica, desenvolvida no Paleo e Neoproterozóico. Sua estruturação atual deve-se ao intenso tectonismo desencadeado durante a orogênese brasiliana, que está materializado num arranjo de *nappes* que evoluem para mega zonas de cisalhamento transcorrentes de direção NE-SW (Caby & Arthaud, 1986). O conhecimento da evolução dessas faixas é ponto chave no entendimento da colisão brasiliana/panafricana, ao final do Neoproterozóico, que resultou na amalgamação do paleocontinente Gondwana Ocidental.

Nesse contexto, a análise dos lineamentos estruturais da área de estudo, foi realizada com o processamento e interpretação dos produtos aerogeofísicos e do modelo digital do terreno (*Shuttle Radar Topography Mission – SRTM*) para a extração das grandes estruturas regionais. Na análise e interpretação estrutural, foram ferramentas importantes na obtenção de informações mais precisas e na melhoria da confecção dos mapas geológicos e estruturais (Figura 4.14).

Os maiores lineamentos estruturais da região correspondem a zonas de cisalhamentos transcorrentes destrais representadas pelo do sistema de falhas de Paramoti – ZCP de direção NE-SW, e as zonas de cisalhamento de baixo ângulo com vergência para E-SE que limitam o contato entre as rochas do AMSQ e as seqüências supracrustais.

Em termos deformacionais, o principal regime atuante na área é de natureza compressiva, responsável pela geração de foliações, lineações, dobras e zonas de cisalhamento. Verificou-se também, a atuação de um regime extensional subordinado, posterior a compressão, porém em condições de alta temperatura, ao norte do município de Canindé.

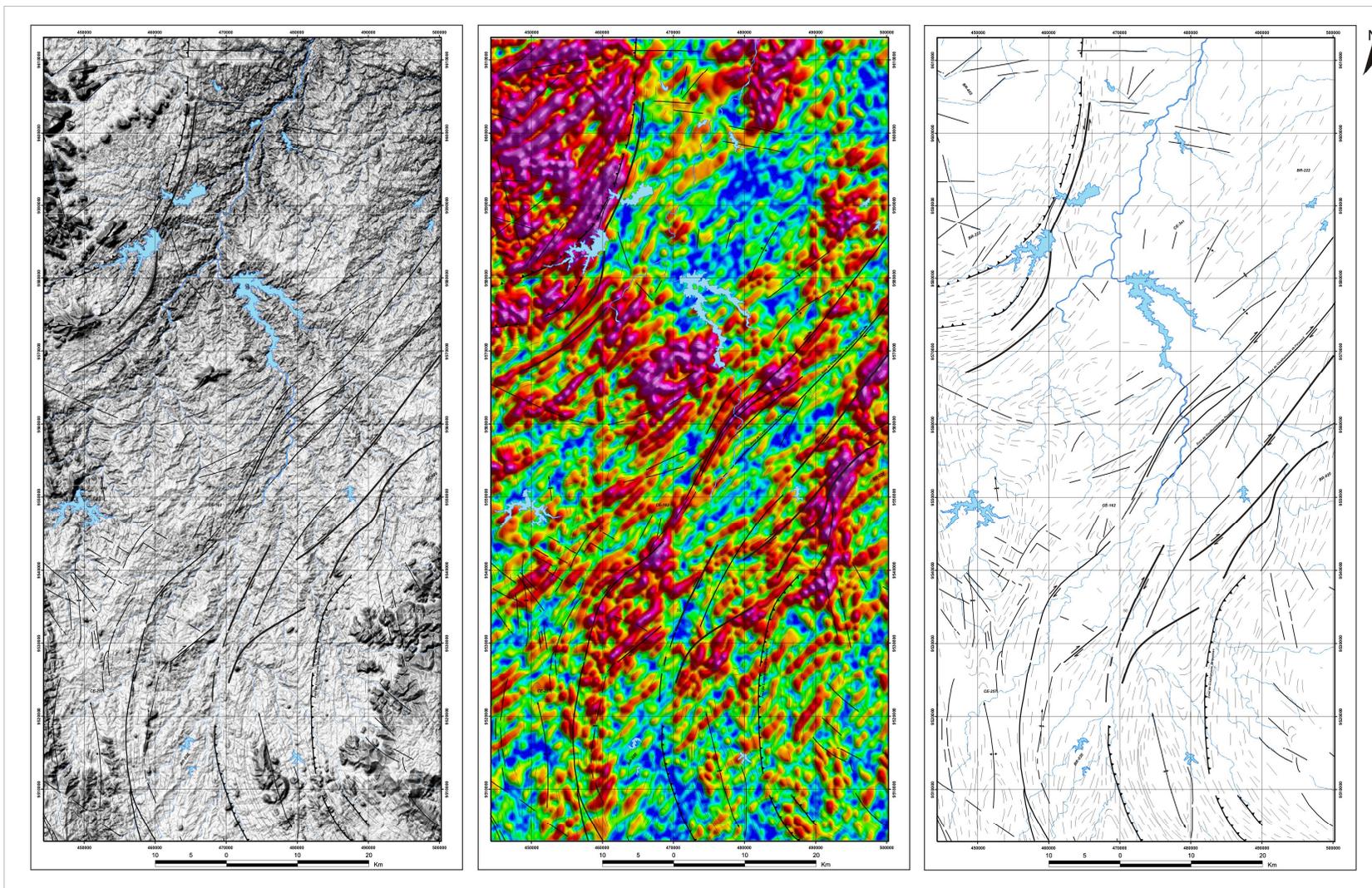
A integração entre a orientação das foliações e das lineações de estiramento, o comportamento reológico das rochas, bem como a análise dos indicadores cinemáticos da deformação, foram fundamentais para a caracterização das principais zonas de cisalhamento – ZCs mapeadas. As condições de pressão e temperatura que estas ZCs se desenvolveram foram obtidas, com certa aproximação, a partir da análise micro estrutural em que se determinou para alguns minerais, o mecanismo deformacional de alta e baixa temperatura.

Os estágios deformacionais finais na área são caracterizados pela ocorrência de estruturas frágeis indicando um domínio dúctil-rúptil. As principais feições estruturais foram inicialmente constatadas nas imagens aeromagnéticas das derivadas horizontais (x,y) e vertical (z), juntamente

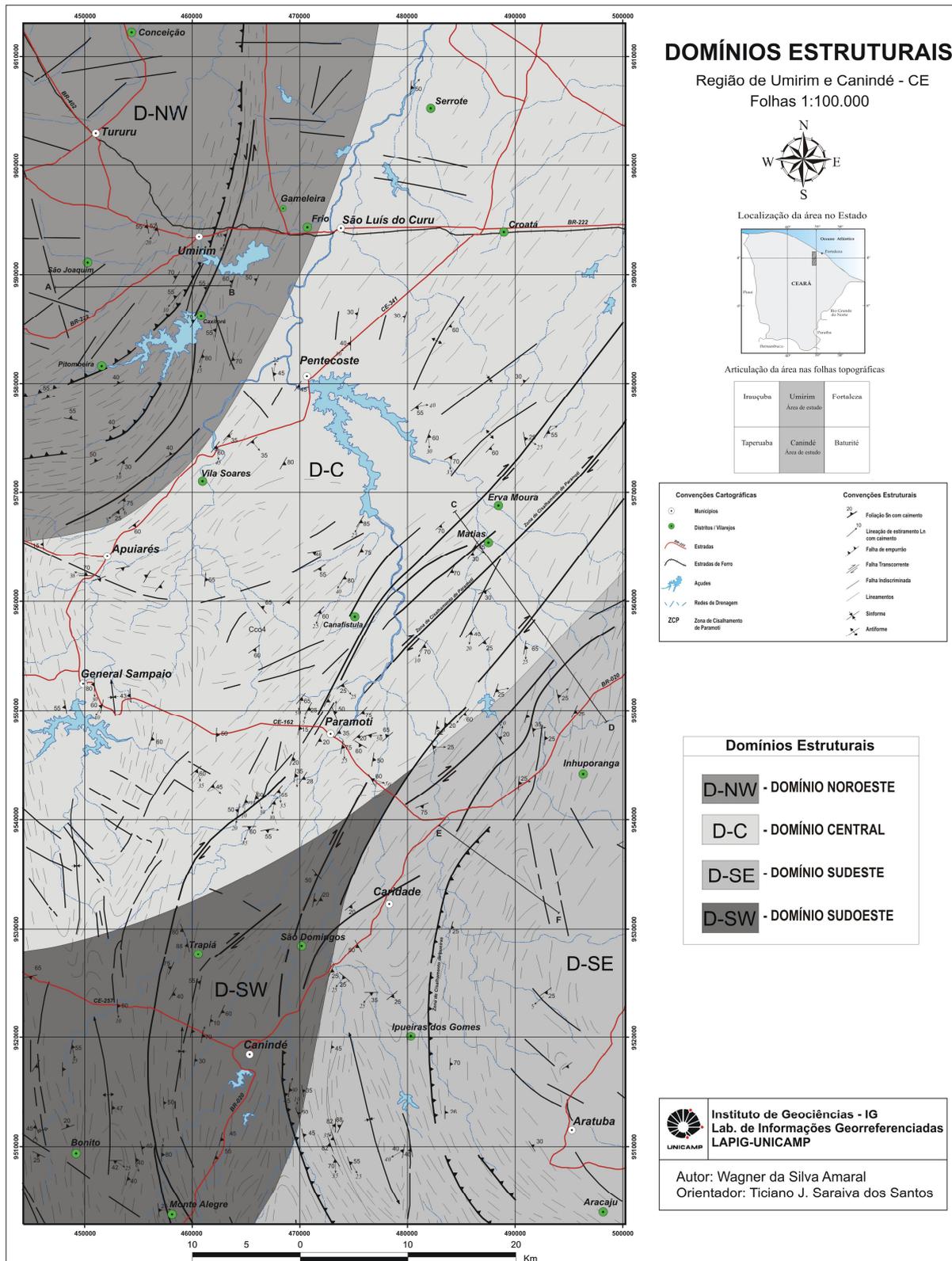
com a amplitude do sinal analítico – ASA e SRTM. Esse produtos foram de grande potencial para evidenciar os *trends* estruturais, falhas, fraturas e diques de composição básica de direção NE-SW preferencialmente.

A orientação dos elementos estruturais (foliações, lineações, dobras) permitiu a individualização de quatro domínios estruturais: central (**DC**), noroeste (**DNW**), sudeste (**DSE**), e sudoeste (**DSW**) (Figura 4.15).

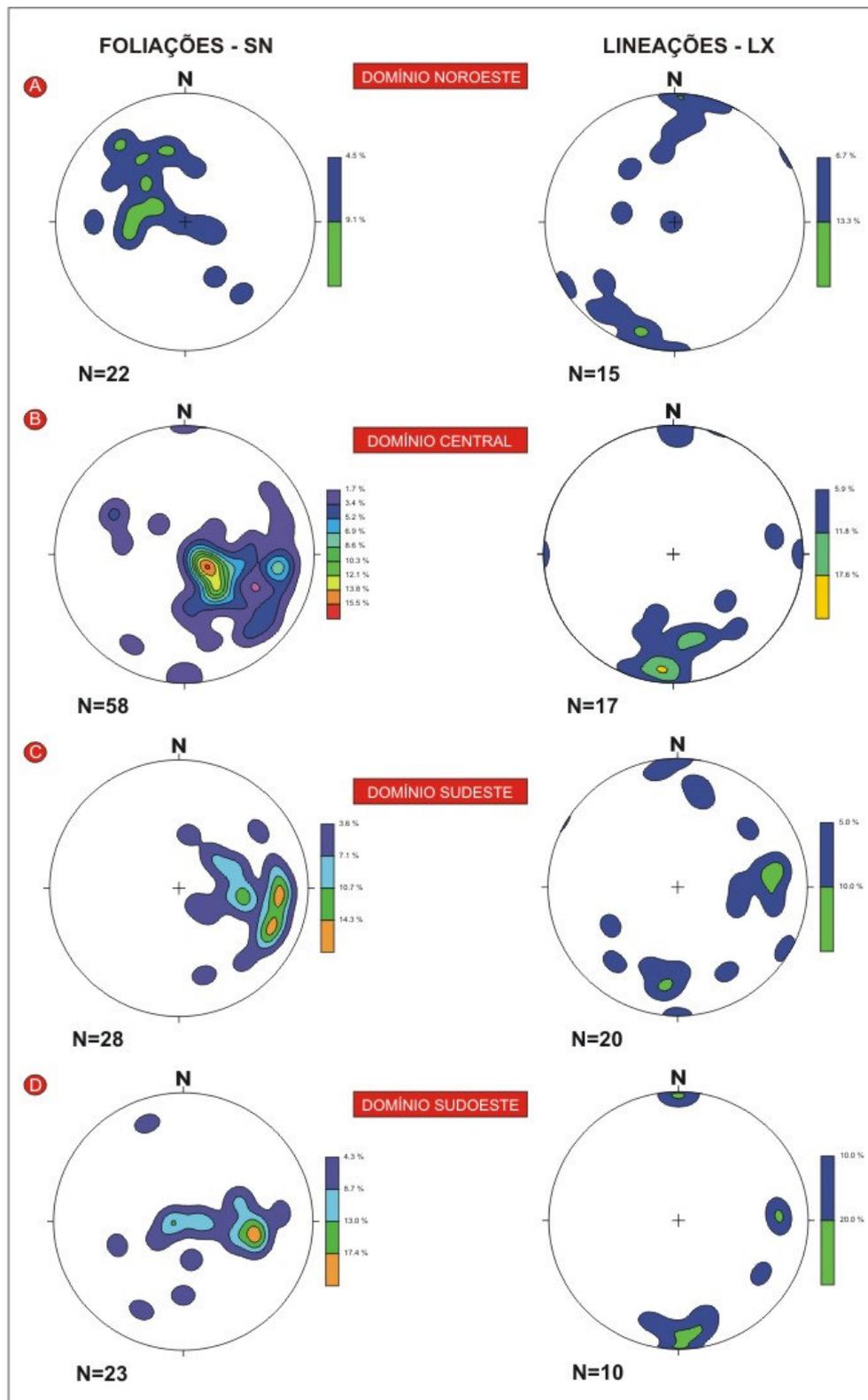
Foram considerados como ( $S_n$ ), as superfícies planares mais penetrativas (bandamento e xistosidade) e como lineação principal ( $L_x$ ), estruturas lineares, que podem representar estiramento ou orientação dos minerais contidos nos planos da foliação. Os limites entre os domínios estruturais, via de regra, são representados por zonas de cisalhamento transcorrentes e de empurrão, sendo esta correlação dos elementos estruturais obtidas tanto em campo como a partir dos dados aerogeofísicos, de grande utilidade no realce das feições estruturais.



**Figura 4.14:** Utilização do modelo digital do terreno (SRTM) e da imagem da amplitude do gradiente horizontal total (AGHT) como ferramentas na obtenção de estruturas lineares.



**Figura 4.15:** Mapa dos principais domínios estruturais individualizados a partir da correlação dos dados de campo com os produtos aerogeofísicos e de SRTM, processados e interpretados.



**Figura 4.16:** Estereogramas dos planos da foliação ( $S_n$ ) e da lineação ( $L_x$ ), correspondentes aos quatro domínios estruturais.

#### 4.2.1. Domínio Noroeste (D-NW)

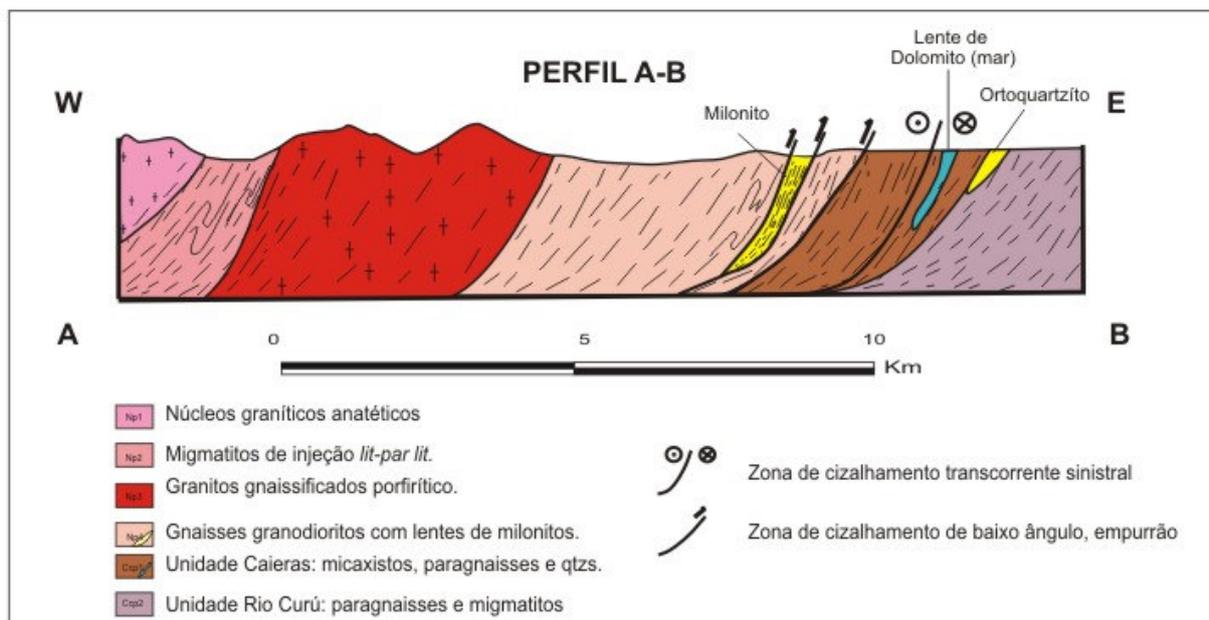
Este domínio está localizado no setor noroeste da área de estudo e comporta a estruturação das rochas do arco magmático de Santa Quitéria – AMSQ e em parte, as seqüências supracrustais que o bordeja. É caracterizado por extensas zonas de cisalhamento cuja foliação ( $S_n$ ), orientada em geral N-NE é de baixo a médio ângulo ( $05^\circ$  a  $55^\circ$ ), bem marcada pela concentração de minerais placídeos como biotitas, muscovitas e silimanitas.

A foliação ( $S_n$ ), em geral contém uma lineação de estiramento mineral ( $L_x$ ), evidenciada por biotitas, feldspatos alongados, quartzo estirado e silimanita. Essa lineação apresenta uma orientação predominantemente com sentido de caimento para N-NE e S-SW e com ângulos que variam de  $03^\circ$  a  $55^\circ$  (Figura 4.16-A).

Em campo, os indicadores cinemáticos do tipo estruturas S/C, sigmóides de quartzo, porfiroclastos de feldspatos e dobras intrafoliares assimétricas, todos observados no plano XZ do elipsóide de deformação, denotam uma vergência para E-SE, num sistema de falhas de cavalgamento.

Observou-se que o incremento da deformação aumenta à medida que se aproxima das rampas de empurrão, com o desenvolvimento de protomilonitos a ultramilonitos. Estas texturas marcam as zonas de cisalhamento de baixo ângulo, num sistema de leques imbricados com movimentação geral para leste (Figura 4.17).

A análise das imagens de aerogeofísicas e SRTM, em conjunto com os dados obtidos em campo, permitiu definir a estruturação desse domínio como um sistema de leques *imbricados* com vergência para E-SE. No produto da amplitude do gradiente horizontal total – AGHT, os altos valores de susceptibilidade magnética acompanham o encurvamento do *trend* estrutural dos limites do AMSQ. Esse encurvamento pode ser atribuído à presença das rochas mais competentes do arco, durante o regime compressivo, o que levaria à inflexão das estruturas buscando caminhos e materiais menos competentes e conseqüentemente mais facilmente deformáveis.



**Figura 4.17:** Perfil esquemático (A-B), mostrando a estruturação da borda NE do Arco Magmático de Santa Quitéria

#### 4.2.2. Domínio Central (D-C)

A região dos arredores do município de Paramoti é caracterizada pela presença de um sistema de cisalhamento transcorrente dextral, abrangendo uma área de influência de mais de 10 km de largura, sendo considerada como um domínio estrutural homogêneo, cujos elementos planares e lineares, mostram *trend* NE-SW. O elemento estrutural mais proeminente neste domínio é a foliação, em geral com alto ângulo, associada à milonitização, e a lineação de estiramento associada é horizontalizada ou mostra um *rake* forte (Figura 4.16-B).

A foliação ( $S_n$ ), próxima à zona de cisalhamento Paramoti – ZCP é marcada em escala de afloramento, pela redução de fenocristais e estiramento dos minerais da matriz, em geral quartzo e micas, conferindo a rocha texturas miloníticas. A orientação de  $S_n$  mostra-se com direção constante NE-SW, com variações NNE-SSW e mergulhos entre 25 e 80 graus.

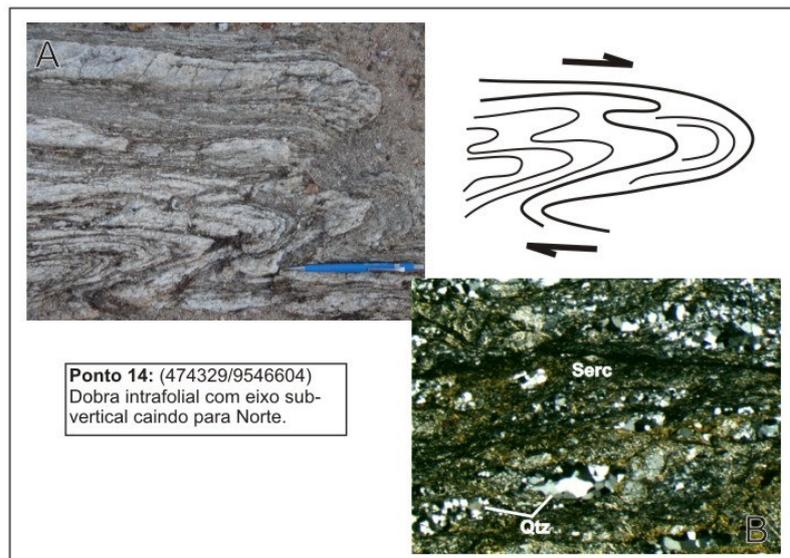
A lineação de estiramento principal ( $L_x$ ) desenvolvida durante o evento responsável pela geração das transcorrências é oblíqua e sub-horizontalizada. No plano XZ da foliação, os indicadores cinemáticos observados do tipo pórfiros rotacionados, simetria de dobras intrafoliais, estruturas SC, segundo critérios de Passchier *et al.* (1993), denotam cisalhamento dextral nas transcorrências influenciadas pela ZCP (Figura 4.18). Dobras intrafoliais quando presentes, são centimétricas do tipo fechadas com eixos localmente sub-verticalizados nas zonas transcorrentes

(Figura 4.19). Mega dobramentos entre o vilarejo de Erva Moura e o município de Pentecoste foram identificados e estão estruturadas definindo antiformes e sinformes.

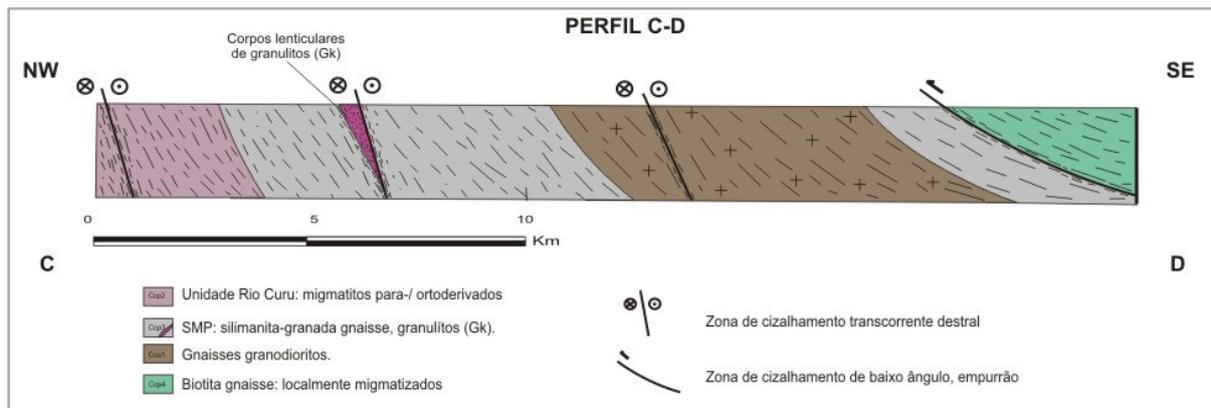
Nos produtos aeromagnéticas, a zona de cisalhamento transcorrente dúctil de Paramoti – ZCP, é bem evidente, apresentando altos valores de susceptibilidade magnética, nas imagens da amplitude do sinal analítico – ASA e da amplitude do gradiente horizontal total – AGHT.



**Figura 4.18:** Afloramento de biotita gnaíse milonitizado, próximo a zona de cisalhamento de Paramoti (ZCP), no detalhe, lineação de estiramento mineral oblíqua contida no plano XY da foliação.



**Figura 4.19:** Afloramento de gnaíse milonítico exibindo: A) dobras intrafoliais apertadas com eixo subverticalizado; B) Microfotografia (2,5 x) aspecto deformacional impresso nas rochas milonitizadas (ZCP).



**Figura 4.20:** Perfil esquemático (C-D), mostrando a estruturação na região central com o desenvolvimento de transcorrências e cavalamentos a sudeste.

#### 4.2.3. Domínio Sudeste (D-SE)

Localizado nos setores sul / sudeste da área, nos arredores do município de Caridade e Aratuba, esse domínio apresenta uma tectônica caracterizada por elementos estruturais planares e lineares com baixo ângulo.

O comportamento da foliação  $S_n$  varia nas direções NE-SW e NW-SE, apresentando mergulhos preferencialmente para E-SE com ângulos entre 20-55° graus (Figura 4.16-C). O plano da foliação, em geral possui uma textura fina milonítica, com o desenvolvimento de minerais placóides como sericita, biotita e ainda quartzo recristalizados orientados na direção de maior estiramento.

A lineação ( $L_x$ ) contida no plano da foliação ( $S_n$ ) possui caimentos orientados para E-SE com ângulos entre 20-50° (Figura 4.16-C). Os indicadores cinemáticos, observados no plano XZ do elipsóide de deformação, foram estruturas S/C, sigmóides de quartzo e porfiroclastos de feldspatos, todos denotando uma vergência que evidencia cinemática de rampas de empurrão com transporte de massa para W-SW (Figura 4.21). As dobras desenvolvidas neste domínio são de arrasto, apertadas e assimétricas com vergência quase sempre para W-SW, de acordo com os demais indicadores cinemáticos supracitados (Figura 4.22).

O traço em mapa desses cisalhamentos foi pré-interpretado na imagem de SRTM, onde as cristas do relevo acompanham o *trend* estrutural da foliação. Os produtos gamaespectrométricos dos canais individuais de Th e K, bem como a imagem da composição ternária RGB e os dados

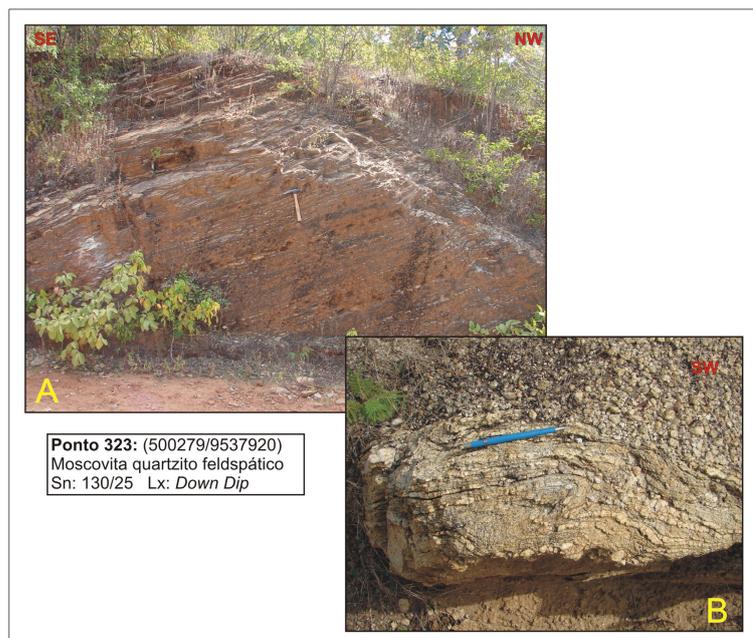
de campo, permitiram enquadrar este domínio no contexto tectônico de *nappes* regionais com eixos NW-SE e transporte tectônico para W-SW.

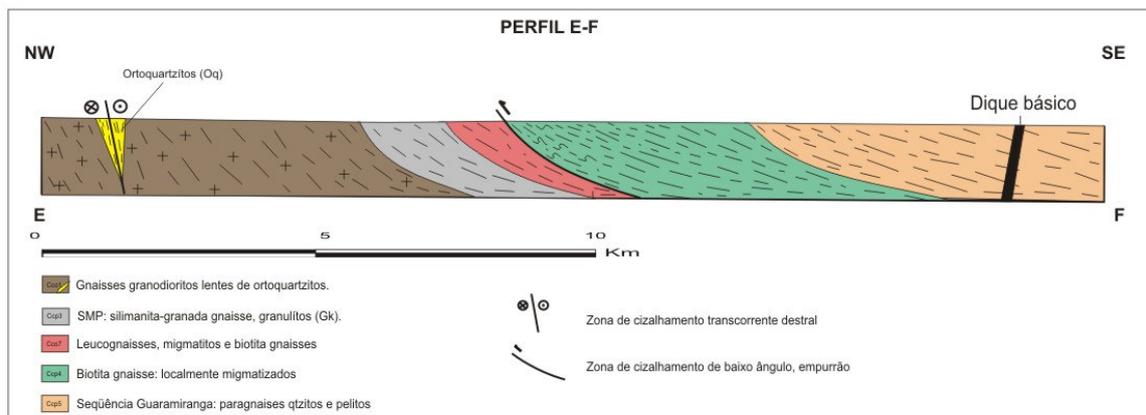
No domínio sudeste, a disposição da lineação em relação ao plano de foliação evidencia um sistema de cavalgamento numa rampa frontal a levemente oblíqua com movimentação preferencial para oeste / noroeste (Figura 4.23).



**Figura 4.21:** Tectônica de baixo ângulo nas seqüências supracrustais metaluminosas, no detalhe silimanitas em forma de bastões e micas marcando a lineação de estiramento mineral próximo as zonas de cisalhamento.

**Figura 4.22:** A) Moscovita quartzito cisalhado no limite SE da área de estudo; B) Destaque para a assimetria das dobras intrafoliais em biotita gnaisses migmatizados da unidade (Ccp4), denotando vergência preferencialmente para SW e eixos de direção NW-SE.





**Figura 4.23:** Perfil esquemático (E-F), mostrando a estruturação na região sudeste da área mapeada.

#### 4.2.4. Domínio Sudoeste (D-SW)

Este domínio individualizado a SW do município de Canindé poderia ser enquadrado como um subdomínio dos demais descritos anteriormente. Entretanto, a distribuição irregular dos elementos estruturais (foliações e lineações) impossibilita esse enquadramento dentro do conceito de domínio estrutural homogêneo (Jardim de Sá & Hackspacher, 1982).

As direções da foliação  $S_n$  são concordantes com a orientação geral das principais estruturas da área, ex. ZCP e antifórme de Bonito (Figura 4.24). O mergulho de  $S_n$  é predominantemente para E com ângulos médios, como para W, com valores mais acentuados (Figura 4.16-D). Dobras mesoscópicas com caimento de eixo para NNW foram observadas nas seqüências metasedimentares da unidade (**Ccp6**) ao longo da CE-257 no limite oeste da área.

As lineações de estiramento ( $L_x$ ) impressas nas rochas deste domínio são representadas por anfibólios, feldspatos, silimanita e quartzo. Próximo à ZCP, as direções de  $L_x$  acompanham o encurvamento da zona de cisalhamento transcorrente tornando-se subparalela ao *trend* N-S com caimentos de baixo ângulo para sul (Figura 4.16-D). Por outro lado, uma orientação preferencial também é caracterizada com mergulho suave para leste. Esta última possui caráter *down-dip* estando relacionada às falhas de empurrão da região de Monte Alegre (Figura 4.24).

O domínio sudoeste constitui uma área de influência das zonas de cisalhamento transcorrentes e de cavalgamentos. Fica evidente a evolução dessas zonas de cisalhamento de baixo ângulo para sistemas de cisalhamentos transcorrentes, em função do empilhamento das

litologias. No mesmo sentido, verifica-se em comparação com os demais domínios, uma maior quantidade de megadobramentos.

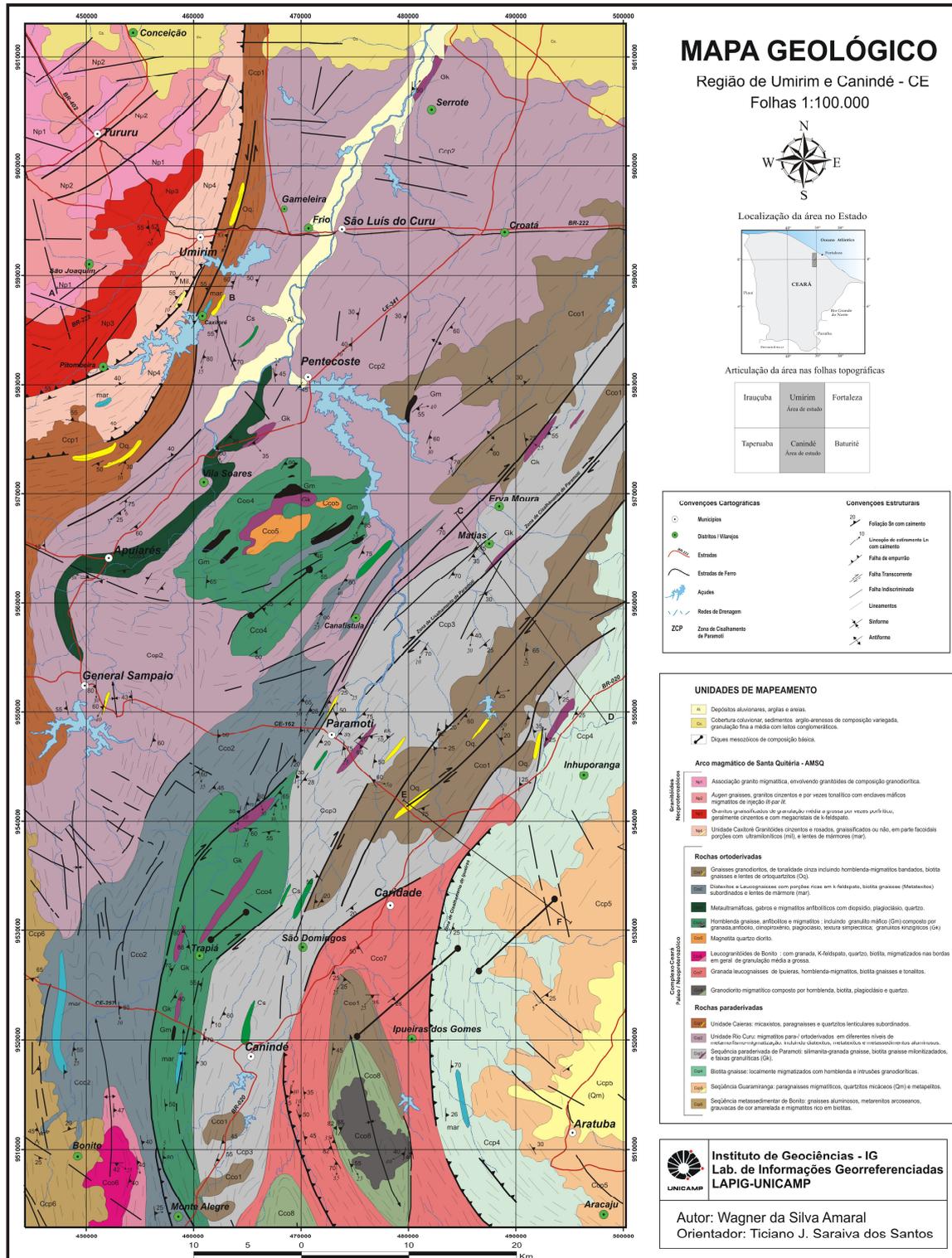


Figura 4.24: Mapa geológico escala 1:100.000 das regiões de Umirim e Canindé-CE.

## 5. DISCUSSÕES

---

---

### 5.1. Do tratamento preliminar dos dados aerogeofísicos:

Na avaliação preliminar dos dados dos projetos aerogeofísicos Rio Acaraú (1975) e Itatira (1977), a técnica adotada para a determinação de incoerências (*spikes*) na gravação original dos dados magnéticos, revelou-se muito eficiente.

Os dados foram interpolados em malha regular, com espaçamento de célula de 250 metros, utilizando os métodos da Mínima Curvatura, Krigagem e Bidirecional. Este último constituiu o melhor interpolador para os dados magnéticos, enquanto para a gamaespectrometria o melhor interpolador foi a Mínima Curvatura.

O algoritmo *microlevel. gs* de micronivelamento desenvolvido por Blum (1999), com base nas técnicas de Minty (1991) mostrou eficiência e rapidez na retirada dos desníveis entre as linhas de vôo decorrentes do nivelamento insuficiente nos dados magnéticos e gamaespectrométricos de ambos os projetos.

### 5.2. Das transformações dos dados magnéticos aéreos:

Grande parte das filtragens aplicadas aos dados aeromagnéticos foi feita no domínio da frequência. O filtro *Butterworth* revelou-se eficiente na substituição dos filtros passa-baixa, passa-banda e passa-alta.

A aplicação de técnicas de realce de fonte magnética (gradiente horizontal total, amplitude do sinal analítico), mostrou bons resultados na determinação de discontinuidades físicas que puderam ser traduzidas em unidades geológicas por meio dos trabalhos de campo.

A amplitude do sinal analítico (ASA) mostrou excelentes resultados na delimitação das unidades de rochas máficas e ultramáficas, ricos em minerais ferromagnesianos (unidades **Cco3**, **Cco4**).

As derivadas horizontais (x,y) e vertical (z), bem como a amplitude do gradiente horizontal total (AGHT), exibiram um emaranhado de estruturas lineares de direção NE-SW preferencialmente, que auxiliaram na interpretação e correlação aos dados geológicos.

### **5.3. Das interpretações das imagens magnéticas e gamaespectrométricas e suas implicações no mapeamento geológico da área piloto:**

O processamento dos dados aerogeofísicos em conjunto com o modelo digital do terreno, apresentou excelentes resultados com importante contribuição na integração com os dados geológicos obtidos em campo. Por meio da análise das imagens magnéticas do campo anômalo e de suas transformadas, foi possível individualizar quatro principais domínios magnéticos:

i) **As zonas de baixos valores**, representadas por paragneisses ricos em silimanita, cianita, granada, ortogneisses, lentes de quartzitos, metacalcários;

ii) **Os médios valores**, relacionados aos quartzitos arcoseanos (serra de Bonito) e aos gnaisses e quartzitos micáceos (arredores de Aratuba e General Sampaio);

iii) **As zonas de médio-alto valores**, localizam-se principalmente no setor noroeste (Tururu, Umirim), ocorrendo também no centro da área (Pentecoste, Apuiarés e Paramoti) com formas circulares e alongadas. Essas zonas estão associadas principalmente as rochas cálcio silicáticas, anfibolíticas, dioríticas e granodioríticas;

iv) **Zonas de altos valores**, no setor noroeste da área, associadas às rochas do arco magmático de Santa Quitéria (granitóides e migmatitos ricos em magnetita, ilmenita, biotitas e hornblenda); no setor central (Sul de Pentecoste) estão associadas em sua maioria a granodioritos e metatexitos (ricos em magnetita, piroxênios, anfibólios), cálcio silicáticas e aos granulitos máficos (retro-eclogitos com plagioclásio, granada, anfibólio, piroxênios e quartzo).

A análise das estruturas magnéticas extraídas principalmente das imagens das derivadas horizontais (x, y), e da primeira derivada vertical (z), mostrou lineamentos cujo *trend* principal NE-SW, é coincidente com o sistema transcorrente da zona de cisalhamento de Paramoti e com os diques básicos mesozóicos. Nos produtos gamaespectrométricos estas zonas de cisalhamento são marcadas por elevadas contagens no canal do Th, a exemplo da zona de cisalhamento de Umirim e a zona de cisalhamento de Ipueiras, na região sudeste da área.

Na porção NW, onde o principal domínio magnético é representado pelas rochas cristalinas do arco magmático de Santa Quitéria, as estruturas demarcam um forte contato magnético, coincidente com a zona de cisalhamento de baixo ângulo de Umirim. Esta zona também apresenta uma mudança brusca nos valores de contagens dos três canais individuais definindo o limite entre as rochas do arco e aquelas da seqüência supracrustal.

A análise dos dados gamaespectrométricos, utilizando as composições ternárias RGB e CMY em conjunto com os dados de campo, surtiu bons resultados, permitindo a individualização de dezoito subunidades informais agrupadas em dois grandes domínios tectônicos: o arco magmático de Santa Quitéria – AMSQ e as seqüências supracrustais para e ortoderivadas.

As rochas do AMSQ foram caracterizadas por apresentarem altas contagens no canal de K em quase toda região de abrangência e contagens intermediárias e baixas de Th e U. Neste arco, foram individualizadas quatro subunidades de mapeamento (**Np1, Np2, Np3, Np4**). Da seqüência supracrustal optou-se em organizar as unidades mapeadas em seqüências paraderivadas (**Ccp**) com a individualização de seis subunidades de mapeamento e seqüências ortoderivadas (**Cco**) agrupadas em oito subunidades. Coberturas elúvio-colúvionar (**Co**), aluviões (**Al**) e diques de composição básica (**Db**) também foram discriminados nos produtos aerogeofísicos .

De modo geral, a seqüência supracrustal é caracterizada por alta contribuição dos canais de U e Th e baixa de K. Anomalias radiométricas negativas, com baixas contagens nos três canais são feições marcantes e estão associadas a rochas máficas ricas em anfibólio e piroxênio. A anomalia de maior destaque com esses registros encontra-se na região central da área, a sul do município de Pentecoste. Trata-se das subunidades *Migmatitos anfibolíticos e Metaultramáficas (Cco3)* e *Hornblenda gnaisses migmatíticos, granulitos máficos (Cco4)*, orientadas segundo o *trend* regional, compostas por rochas máficas / metaultramáficas e anfibolíticas onde se destacam a ocorrência faixas de retro-eclogitos e granulitos máficos encaixados como lentes em gnaisses e migmatitos. Para a magnetometria essas rochas são representadas por anomalias positivas com altos valores de susceptibilidade magnética.

#### **5.4. Dos aspectos estruturais e da evolução geodinâmica:**

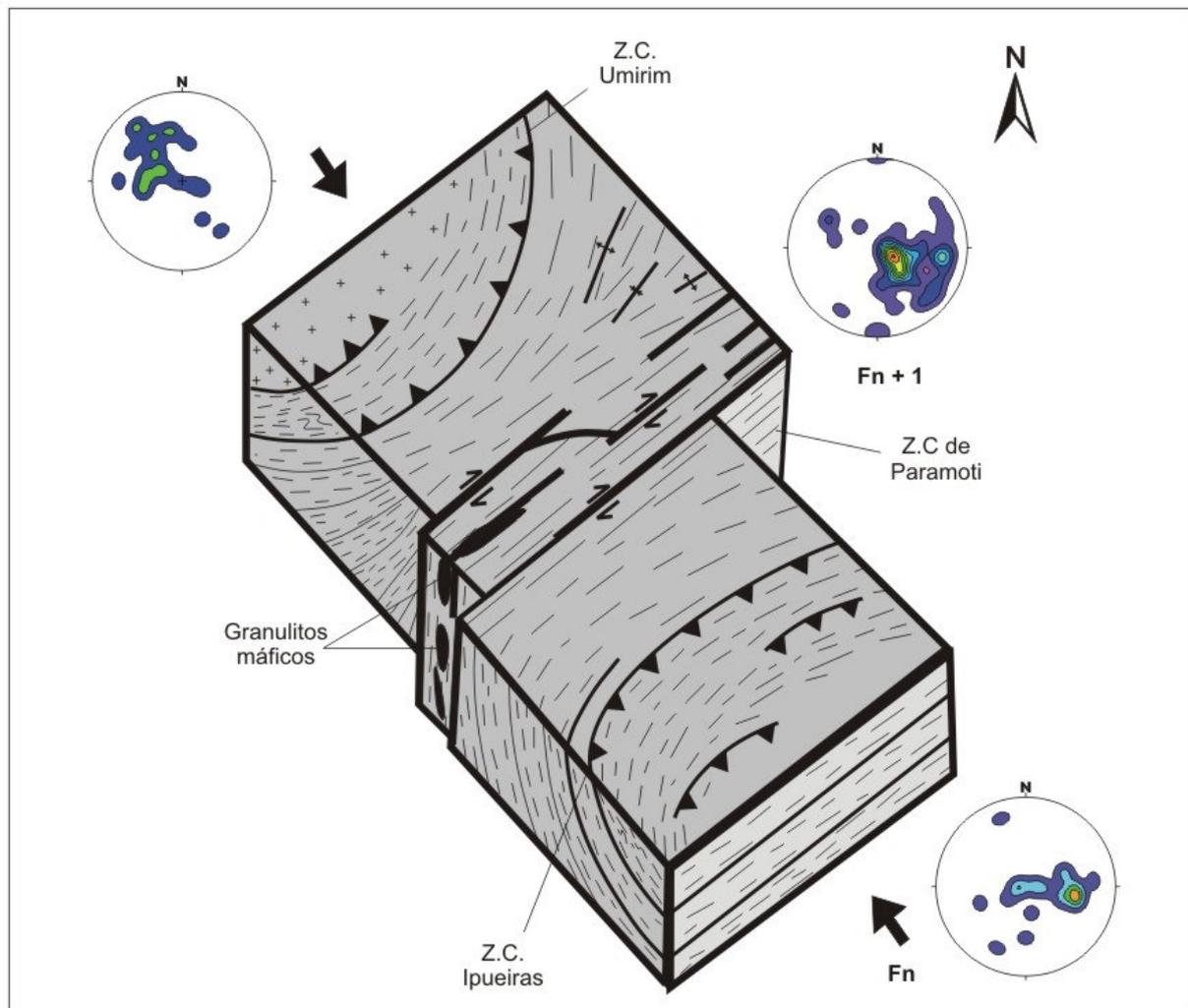
O registro da evolução estrutural e metamórfica, interpretado em conjunto com os recentes dados geocronológicos disponíveis na literatura (Fetter *et al.*, 2003; Castro, 2004; e Teixeira, 2005), resultam na proposta de que a área apresenta evidências deformacionais relacionadas a orogênese brasileira, com desenvolvimento de um evento deformacional progressivo **D<sub>n</sub>**, contendo três fases deformacionais **F<sub>n</sub>**, **F<sub>n+1</sub>** e **F<sub>n+2</sub>**.

A primeira fase de deformação (**F<sub>n</sub>**) é caracterizada pela geração de uma foliação de baixo ângulo com direção NE-SW, lineações de estiramento *down dip* e oblíquas, dobras isoclinais

recumbentes e fechadas com eixos N-S e NE-SW. Estes elementos estruturais foram originados por um regime compressional, formando os cavalgamentos para leste e sudeste, no setor NW e para oeste e noroeste no setor SE da área. Ainda em caráter progressivo tem-se a geração das grandes zonas de cisalhamento transcorrentes de direção NE-SW, que deslocam as frentes de empurrão associadas à fase anterior ( $F_n$ ). Este evento, embora dentro de um mesmo incremento deformacional relacionado ao regime compressivo, foi denominado de  $F_{n+1}$ , pois marca a transição do domínio de baixo para alto ângulo. A foliação gerada neste evento ( $F_{n+1}$ ) é de alto ângulo ( $\sim 65^\circ$ ) e as lineações de estiramento são sub-horizontais direcionais a oblíquas com caimentos para E-SE. As dobras desenvolvidas são assimétricas, com estilo variando de apertadas a abertas e dimensões centimétricas. Os eixos dessas dobras tendem a ser verticais.

Fica evidente que o pico da deformação ocorreu em condições de fácies anfibolito alto a granulito, com estiramento e rotação de granada, cianita, silimanita e zonas localizadas onde atuaram processos de eclogitização durante o incremento deformacional (Garcia & Arthaud, 2004). Em geral, essas zonas de cisalhamento apresentam caráter dextral, dominante no sistema transcorrente de Paramoti.

O último evento individualizado ( $F_{n+2}$ ) associa-se estritamente a fase de exumação de grande parte das rochas da seqüência supracrustal paraderivada (**Ccp**). Representa os estágios evolutivos finais na área investigada, sendo caracterizado pela ocorrência de uma assembléia mineral em condições de baixa  $P-T$  e de estruturas frágeis indicando um domínio dúctil-rúptil, rúptil já em um nível crustal raso. Uma estruturação simplificada da área é apresentada na Figura 5.1.



**Figura 5.1:** Bloco diagrama esquemático, apresentando a atuação das fases  $F_n$  e  $F_{n+1}$  e o desenvolvimento das principais zonas de cisalhamento (ZC) durante o evento compressivo  $D_n$ . Os estereogramas correspondem à disposição da foliação  $S_n$ .

Diversos trabalhos consideram a Província Borborema-PB como parte integrante do grande sistema orogênico neoproterozóico Brasileiro/Pan-Africano (Almeida *et al.* 1981; Caby, 1989. Caby *et al.* 1991. Trompete, 1994, Van Schmus *et al.* 1998; Brito-Neves *et al.*, 2000 e 2001).

Com respeito a esta deformação, em estudos no Pré-Cambriano cearense Caby & Arthaud (1986) determinaram na porção central do Domínio Ceará Central o registro de uma tectônica tipo Himalaiana, caracterizada principalmente pela presença de *nappes* e regiões com metamorfismo inverso.

Considerando a PB e sua continuidade do lado africano, o conhecimento atual mostra que as principais zonas de sutura associadas a processos de subducção são registradas pelas ocorrências de lascas ofiolíticas situados nas bordas das grandes massas cratônicas neoproterozóica (Deynoux *et al.* 2006). A continuidade das feições geológicas regionais da PB pode ser seguida no lado africano na Província policíclica Camarões-Nigéria e de certo modo nas faixas Dahomeyides e Pharusian, indicando que estas duas regiões correspondem em uma situação anterior à instalação do oceano Atlântico, a uma vasta região intensamente afetada pela tectônica resultante da aproximação das referidas massas cratônicas durante o Neoproterozóico.

Com relação à evolução geodinâmica do Domínio Ceará Central, a literatura geológica recente aborda a existência do Arco Magmático de Santa Quitéria (Fetter *et al.* 2003). Neste modelo, é proposta uma subducção para SE, a partir da existência de uma anomalia gravimétrica no extremo noroeste da Província Borborema abaixo da bacia do Parnaíba. Resquícios de uma possível crosta oceânica e da zona de sutura provavelmente estariam encobertos pelos sedimentos desta bacia (Fetter *et al.*, 2003).

Castro *et al.* (2004), apontam uma nova interpretação para a evolução tectono-metamórfica regional, com base na identificação de rochas de alta pressão, retro-eclogitos cuja idade U-Th-Pb estaria em torno de 600 Ma. Estas rochas estariam situadas na base das *nappes* de vergência para SE da área investigada, sugerindo que a zona de sutura correspondente ao fechamento do oceano existente entre os dois blocos estaria situada a sudeste do arco magmático de Santa Quitéria. Assim, a subducção seria de SE para N-NW, onde as rochas granulíticas máficas e ultramáficas estariam associadas. Para esse autor, a caracterização de rochas de alta pressão (retro-eclogitos, granulitos máficos e kinzigíticos), pode configurar um *trend* regional onde ocorre a continuidade desses litotipos, marcando assim uma possível zona de sutura na porção leste do arco.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

---

Considerando o cenário geotectônico apresentado no capítulo anterior, a caracterização de anomalias radiométricas negativas (baixas contagens de K, Th e U) e uma forte anomalia magnetométrica com altos valores de susceptibilidade magnética, individualizadas na área de estudo constituíram-se num importante guia na delimitação das rochas máficas ricas em anfibólio e piroxênio. A anomalia mais marcante com esses registros encontra-se na região central da área, a sul do município de Pentecoste, constituindo as subunidades *Migmatitos anfibolíticos e Metaultramáficas (Cco3)* e *Hornblenda gnaisses migmatíticos, granulitos máficos (Cco4)*. Feições microtexturais como simplectitos de clinopiroxênio e plagioclásio, bem como granadas bordejadas por plagioclásio e clinopiroxênio, além de pseudomorfos de onfacita, atestam as condições de alta pressão a que estas rochas foram submetidas. É possível que elas sejam resquícios de uma crosta oceânica envolvida num processo de subducção com polaridade para oeste-noroeste, entretanto os dados aqui apresentados ainda são insuficientes para caracterização mais detalhada destas rochas, o que torna prematura tal suposição.

Por outro lado, carece reforçar a excelente contribuição da aerogeofísica em conjunto com os dados de campo na delimitação das assinaturas gamaespectrométricas desses litotipos máficos e na individualização de dezoito subunidades informais de mapeamento. Os produtos derivados da magnetometria aliados à imagem do modelo digital do terreno (*SRTM*) foram excelentes ferramentas que auxiliaram na caracterização das estruturas, tais como: as zonas de cisalhamento de Paramoti, Umirim e Ipueiras, falhas, diques e dobras.

Análises geotermobarométricas nos granulitos máficos (retro-eclogitos) certamente ajudarão a estabelecer uma melhor configuração da formação do Gondwana ocidental. Da mesma forma, estudos posteriores voltados para análise geoquímica e geocronologia Sm-Nd, podem estabelecer com maior precisão uma relação de afinidade entre as rochas máficas / ultramáficas (granada-anfibolitos, granada piroxenitos, retro-eclogitos) da área e aquelas presentes no restante do Domínio Ceará Central, e também na parte africana das faixas Dahomey e Hoggar.

Determinar a continuidade do arco magmático e das grandes estruturas, com registros de alta pressão, da porção setentrional da Província Borborema com aqueles homólogos do noroeste africano, é um grande desafio cuja superação se espera com o avanço natural do conhecimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

---

- Almeida, F.F.M. 1977 *O Cráton do São Francisco*. *Rev. Bras. Geoc.* 7 : 349-364p.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito-Neves B.B., AND Fuck, R.A. 1981. *Brazilian structural provinces: an introduction*. *Earth Science Reviews*, v. 17, 1-29p.
- Amaral, W.S., Silva, A.M., Santos, T.J.S. 2006. *Processamento e Interpretação dos Dados Aerogeofísicos dos Domínios Médio Coreaú e Ceará Central, Província Borborema e sua Contribuição ao Mapeamento Geológico e Evolução Crustal*. In: Resumos expandidos do XLIII-Congresso Brasileiro de Geologia, Set.Aracajú-SE.
- Arthaud, M.H., Vasconcelos, A.M. & Oliveira, F.V.C. 1998. *As seqüências metasedimentares do Ceará Central*. *XL Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte-MG, Anais, pág. 16*
- Arthaud M.H., Vasconcelos A.M., Nogueira Neto J.A., Oliveira F.V.C., Parente C.V., Monié P., Liégeois J.P., Caby R., Fetter A.H. 1998. *Main Structural Features of Precambrian Domains From Ceará (NE Brazil)*. In: Intern. Conf. Basement Tectonics, 14, Abstracts, 84-85p.
- Blakely, R. J. 1996. *Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications*. Cambridge, Cambridge University Press, 441 p.
- Blum, M. L. B. 1999. *Processamento e Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e sua Aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado. 229 p.
- Brito-Neves, B. B. 1995. *Crátons e faixas móveis*. *Boletim IG-USP, Série didática, V. 7; 187 p.*
- Brito-Neves, B. B. 1986. *Tectonic regimes in the Proterozoic of Brazil*. *Atas 12º Simpósio de Geologia do Nordeste*, 235-251 p.
- Brito-Neves, B. B., Van Schmus, W. R., Santos, E. J., Campos Neto, M. C., Kozuch, M. 1995. *O Evento Cariris Velhos na Província Borborema: integração de dados, implicações e perspectivas*. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo: v.25, n.04, p.279-296 p.
- Brito-Neves, B.B. 2000. *Tectonic history of the Borborema Provinve, NW Brazil*. In: Cordani U.G. Milani, E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds) *Tectonic Evolution of South American*, Rio de Janeiro, 151-182 p.
- Caby, R. & Arthaud, M. H. 1986. *Major precambrian nappes of the Brazilian Belts, Ceará, Northeast Brazil*. *Geology*, 14: 871-874 p.
- Caby, R. 1989. *Precambrian terranes of Benin-Nigeria and northeast Brazil and the Late Proterozoic south Atlantic fit*. *Geological Society of America Special Paper 230*, 145-158 p.

- Castaing, C. F.; Debeglia, N. 1992. *A new method for combining gravimetric and geological data*, Tectonophysics 204 (1992), pp. 151–162 p.
- Castaing, C. F.; Thiéblemont, T. C. & Chevremont, P. 1994. *Paleogeographical reconstruction of the Pan-African/Brasiliano orogen: closure of an oceanic domain or intracontinental convergence between major blocks*. Precambrian Research 69: 327-344 p.
- Castro, D. L., Castelo Branco, R.M.G., Martins, G. and Castro, N.A. 2002. *Radiometric, magnetic, and gravity study of the Quixadá batholith, central Ceará domain (NE Brazil): evidence for Pan-African/Brasiliano extension-controlled emplacement*. Journal of South American Earth Sciences, Volume 15, 543-551 p.
- Castro, G.L., Parente, C.V., Veríssimo, C. U. V., Sial. A.N., Garcia M.G. M., Santos, R. V., Melo, R.C., Santos, A.A. 2005. *Isótopos de Carbono e Oxigênio dos Mármorees Associados com o Depósito Fósforo Uranífero de Itaitia, Ceará*. Revista Brasileira de Geociências, 35, (2) junho, 2005, 199-208 p.
- Castro, N.A. 2004. *Evolução Geológica Proterozóica da Região entre Madalena e Taparuaba, Domínio Tectônico Ceará Central (Província Borborema)*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 221 p.
- Castro, N. A., Basei, M.A.S., Campos Neto, M.C. 2004. *Geocronologia e evolução tectônica Proterozóica do Domínio Ceará Central (Região entre Madalena e Taparuaba, Província Borborema, NE do Brasil)*. Simp. 40 Anos de Geocron. no Brasil, USP-São Paulo, 74 p,
- Cavalcante, J.; Ferreira, C.A. 1983. *Mapa geológico do estado do Ceará*. Escala 1:500.000, MME. CPRM/DNPM.
- Cavalcante, J.; Ferreira, C.A. 2003. *Mapa Geológico do Estado do Ceará (1:500.000) CD-ROM CPRM/MME*.
- Cordell, L., Grauch, V.J.S. 1982. *Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico*, 52 nd Annual Meeting, Abstracts and Bibliographies, Society of Exploration Geophysicists, 246–247 p.
- Costa, M.J.; França, J.B. de.; Bacciegga, I.F.; Habekost, C.R.; Cruz, W.B. da, 1973. *Geologia da Bacia Jaibaras; Ceará, Piauí e Maranhão*. Projeto Jaibaras. DNPM/CPRM. Recife. Relatório final (5 vol).
- CPRM -1975. *Levantamento Aerogeofísico*. Série 1000 - Projeto Rio Acaraú. CPRM-DNPM
- CPRM -1979. *Projeto Fortaleza*. Relatório Final. Geologia V. 1.
- CPRM -1977. *Levantamento Aerogeofísico*. Série 2000 - Projeto Itaitira. CPRM-NÚCLEOBRAS

- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais 1995. *Base de Dados dos Levantamentos Aerogeofísicos dos Projetos Rio Acaraú e Itatira*, [www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br).
- Crandall, R. e Willians, H.E. 1910. Mapas geológicos dos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba. Rio de Janeiro, Inspetoria de Obras Contra a Seca, escala 1:3.000.000 (Série Ig., publ.7).
- Dantas, E.L. 1992. *Evolução tectono magmática do maciço polidiapírico de São Vicente Florânia*. Instituto de Geociências, UNESP, Rio Claro-SP, Dissertação de Mestrado.
- Dantas, E. L. 1997. *Geocronologia U-Pb e Sm-Nd de terrenos arqueanos e paleoproterozóicos do maciço Caldas Brandão, NE do Brasil*. Instituto de Geociências, Unesp-Rio Claro-SP, Tese de Doutorado.
- Dantas, E. L.; Silva, A. M.; Almeida, T.; Moraes, R. A. V. 2003. *Old geophysical data applied to modern geological mapping problems: a study case in Seridó belt, NE Brazil*. Revista Brasileira de Geociências, 33, número 2 Suplemento junho.
- Dantas, E. L. ; Van Schmus, W. R. ; Hackspacher, P. C. ; Neves, B. B. B. ; Fetter, A. ; Cordani, U. ; Nutman, A. ; Willians, I. S. 2004. *The 3.4-3.5 GA São José do Campestre Massif, NE Brazil : remnants of the oldest crust in South America*. Precambrian Research, Netherlands, v. 130, n. 1, 113-137 p.
- Davis, J.C. 1986. *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, 2. ed., U.S.A., 646 p.
- Debeglia, N. & CorpeL, J. 1997. *Automatic 3-D interpretation of potential field data using analytic signal derivatives*. *Geophysics* 62(1):87-96 p.
- Deynoux, M. Affaton, P., Trompette, R., Villeneuve, M. 2006. *Pan-African Tectonic evolution and Glacial events registered in Neoproterozoic to Cambrian Cratonic and Foreland Basins of West Africa*. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 46 (2006), 397-426 p.
- Ferreira, J.A.M. 1967. Considerações sobre uma nova estratigrafia do Seridó. *Eng. Miner. Metal.*, Rio de Janeiro. 45 (265): 25-28.
- Fetter, A.H., Van Schmus, W.R., Santos, T.J.S., Arthaud, M. and Nogueira Neto, J.A. 2000. *U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the existence of the Paleoproterozoic supercontinent "Atlantica"*. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 102-106 p.
- Fetter, A.H., Van Schmus, W.R., Santos, T.J.S., Arthaud, M. and Nogueira Neto, J.A. 1997. *Geologic history and framework of Ceará State: Northwest Borborema Province, NE Brazil*. *South American Symposium on Isotope Geology, Brazil, Extended Abstracts*, 112-114 p.

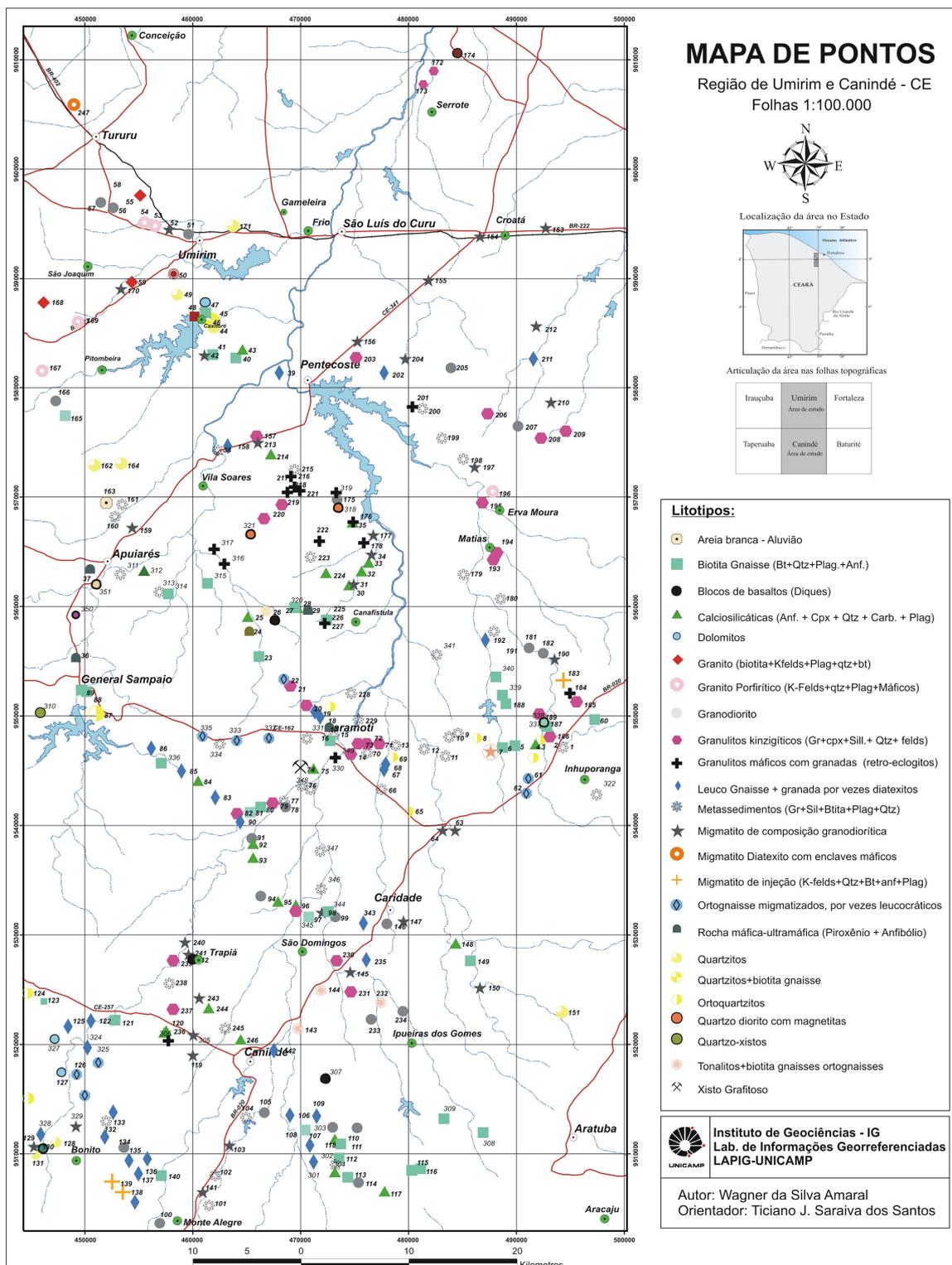
- Fetter, A.H., Santos, T.J.S., Nogueira Neto, J.A., Van Schmus, W.R. 1995. *Geochronology U/Pb in zircon and Sm/Nd in total rock of the State of Ceará - results initials*. In: *16th Symposium of Geology of the Northeast*, Recife. Sociedade Brasileira de Geociências, 14: 418-422 p.
- Fetter, A.H. 1999. *U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal framework and geologic history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the assembly of Gondwana*. [Ph.D thesis], Department of Geology, Kansas University, Lawrence, KS – USA, 164 p.
- Fetter, A.H., Santos, T.J.S.; Van Schmus, W.R.; Hackspacher, P.C.; Brito Neves, B.B.; Arthaud, M.H., Nogueira, J.A.; Wernick, E., 2003. *Evidence for Neoproterozoic Continental Arc Magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the Assembly of West Gondwana*. *Gondwana Research*, V. 6, No. 2, 265-273 p.
- Garcia, M.G.M. & Arthaud, M.H., 2004. *Caracterização de trajetórias P-T em nappes brasileiras: região de Boa Viagem/Madalena – Ceará Central (NE Brasil)*. *Revista de Geologia - UFC*, Vol. 17, nº2, 173-191 p.
- Gaudette, H. E.; Abreu, F. de A. M. de ; Lafon, J. M. ; Gorayeb, P. S. de S. 1993. *Evolução transamazônica do cinturão de cisalhamento noroeste do Ceará: Novas evidências geocronológicas*. In: *Simp. Geol. do Nordeste*. 15. Natal, 1993. *Atas...* Natal, Bol. Núcleo Nordeste da SBG. v. 13. p. 317-319.
- Ghazala, H.H. 1993. *Geological and structural interpretation of airborne surveys and its significance for mineralization, South Eastern Desert, Egypt*. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 16, Issue 3, 273-285 p.
- Gunn, P. J. 1997. *Course of interpretation of Airborne Magnetic and Radiometric Surveys*. *Australian Geological Survey Organization*.
- Gunn, P.J. 1975. *Linear transformations of gravity and magnetic fields*. *Geophysical Prospecting* 23: 300-312 p.
- Jardim de Sá, E. F. 1994. *A faixa Seridó (Província Borborema) E o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-Africana*. Inst. De Geociência, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, 803 p.
- Jardim de Sá, E. F. 1984 - *Geologia da Região do Seridó: Reavaliação de Dados*. *Atas XI Simp. Geol. Nord.*, Natal, 278-296.
- Kegel, W. ; Scorza, E.P.; Coelho, F.C.P. 1958. *Estudos geológicos no Norte do Ceará*. DNPM/DGM. Rio de Janeiro. 46 p. (Boletim 184).

- Jardim de Sá, E. F., Hackspacher, P.C. 1982. *Revisão sobre análise estrutural, parte I- Conceituação básica e conceitos*. SBG, revista ciência da terra, 24-36 p.
- Mantovani, M.S.M., Rugenski, A., Diogo, L.A., Shukowsky, W. 2005. *Integrated geophysical investigation of a possible new alkaline occurrence in SE Brazil*. Journal of South American Earth Sciences, Volume 20, Issue 3, December 2005, 259-266 p.
- Martins, G. 2000. *Litogeoquímica e controles geocronológicos da Suíte Metamórfica Algodões-Choró*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas. 218 p.
- Mehnert, K. R. 1971. *Migmatites and the origin of granitic rocks*. Amsterdam, NY: Elsevier Pub. Co. 405 p.
- Mendonça J.C.G.S., Campos M., Braga A.P.G., Souza E.M., Favali J.C., Leal J.R.L.V. 1984. *Jazida de Urânio de Itataia-CE*. In: Principais Depósitos Mineraiis do Brasil, DNPM, v.1, p. 121-131.
- Minty, B. R. S. 1991. *Simple Micro-Levelling for Aeromagnetic Data*. Expl. Geoph. 22:591-592 p.
- Nabighian, M.N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37:507-517.
- Nabighian, M. N. 1974. *The analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation*. Geophysics, 37: 507-517 p.
- Parro, P. S. 1998. *Magnetometria e Gamaespectrometria aerotransportadas na interpretação geológico - estrutural da região do Rio Juruena e Teles Pires*. Brasília, IG – UnB, 60 p. apêndices I -VII (Dissertação de mestrado).
- Passchier, C.W., Myers, J.S., Kröner, A. 1993. *Geologia de Campo de Terrenos gnáissicos de alto grau*. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.
- Roest, W. R., and Pilkington, M. 1993. *Identifying remanent magnetization effects in magnetic data*: Geophysics, 58, 653–659.
- Roest, W.R., Verhoef J., Pilkington M. 1992. *Magnetic interpretation using the 3-D analytical signal*. Geophysics, 57: 116-125p.
- Santos A.A. 2003. *Caracterização litoestrutural e geocronológica da região fósforo-uranífera de Itataia-CE*. Dissertação de Mestrado, Dep. Geol., UFC, 100 p.
- Santos, T. J. S., Fetter, A., Hackspacher, P., Van Schums, W. and Nogueira Neto, J. 2004. *Structural and geochronological studies of the Médio Coreaú Domain, NE Brazil: Constraints on Brasiliano/Pan-African tectonic evolution in the NW part of the Borborema Province*. In:

- (eds.) Weinberg, R., Trouw, R., Fuck, R. and Hackspacher, P., *The 750-550 Ma Brasileiro Event of South America*, Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition, ISSN 1441-8142, Volume 17, Paper 9.
- Santos, T. J. S. 1993. *Aspectos Geológicos de uma área a sudoeste de Granja, região noroeste do Ceará*. Inst. de Geociência, UNESP, Rio Claro–SP. Dissertação de Mestrado.
- Santos, T.J.S. 1999. *Evolução Tectônica e Geocronológica do Extremo Noroeste da Província Borborema*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas IGCE/UNESP-Rio Claro, 186 p.
- Santos, T.J.S.; Santos, A. A.; Dantas, E.L.; Fuck, R.A.; Parente, C.V. 2003. *Nd Isotopes and the provenance of metasediments of the Itataia Group, northwest Borborema Province, NE Brazil*. Proceedings IV Symposium on South American Isotope Geology, Salvador, Brazil. Agosto.
- Santos, T.J.S.; Santos, A. A.; Dantas, E.L.; Arthaud, M. Fuck, R.; Pimentel, M.M; Fetter, A.H. 2004. *Evidências de crosta juvenil neoproterozóica no Ceará*. In: Cong. Bras. Geol., 42 Araxá, Anais., Araxá, MG- SBG.
- Santos, T.J.S.; Wernick, E. Garcia, M.G.M; Amaral, W.S.; Arthaud, M.H.; Dantas, E.L. (em prep.) *Geochemistry and Metamorphic conditions of the garnet piroxenitos from the NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the Assembly of West Gondwana*.
- Schetselaar, E.M., Chung, C.F., Kim, K.E. 2000. *Integration of Landsat TM, Gamma-Ray, Magnetic, and Field Data to Discriminate Lithological Units in Vegetated Granite-Gneiss Terrain*. Remote Sensing of Environment, Volume 71, Issue 1,89-105 p.
- Silva A.M. 1999. *Geophysical and Geological Data Integration Using a New Statistical Approach for Mineral Target Selection Applied to the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero*. Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado.
- Silva, A.M., Mccafferty, A.E., Pires, A.C.B. 2003. *An Integrated Exploration Approach to Map Bif-Hosted Gold Deposits in the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil*. Revista Brasileira de Geociências, 33, número 2 Suplemento junho.
- Souza, A. 2004. *Mapeamento Geológico da Borda Leste do Batólito de Santa Quitéria – Região de Umirim, CE*. Trabalho de Conclusão de Curso, UNICAMP, Campinas-São Paulo.
- Souza Filho, C.R. 2005. *O Relevo das Américas como nunca antes visto*. Revista INFOGEO, Sensor: Edição 30 p.
- Souza Filho, O.A. 1999. *Geologia e mapa de previsão de ocorrência de água subterrânea folha sa.24-y-d-v - Irauçuba, Ceará*, dissertação de Mestrado – UFOP.

- Teixeira, M.L.A. 2005. Integração de Dados aerogeofísicos, Geológicos e Isotópicos do Limite Norte do Complexo Tamboril-Santa Quitéria-CE, Província Borborema. Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 86 p.
- Torquato, J.R. 1995. *A geologia do noroeste do Ceará. Uma visão histórica*. Rev. Geol.8: 5-170 p.
- Trompette, R. 1994. *Geology of western Gondwana, Pan-African/Brazilian Aggregation of South America and Africa*. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 350 p.
- Van Schmus, W. R., Brito-Neves, B.B., Hackspacher, P. C., Fetter, A. H., Kozuch, M., Dantas, E. L., and Babinski, M. 1997. *The Borborema province: a collage of polycyclic domains in NE Brazil*. 17º Simpósio de Geologia do Nordeste, Soc. Bras. de Geologia.
- Van Schmus, W. R., Brito-Neves, B.B., Hackspacher, P. C., Babinski, M. 1995. *U/Pb and Sm-Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions*. Journal of South American Earth Sciences. vol 8; 3/4; 267-288 p.
- Vauchez, A; Neves, S.; Caby, R; Corsini, M, Egydio-silva, M. Arthaud, M. & Amaro, V.1995. *The Borborema shear zone system, NE Brazil*. Journal of South American Earth Sciences. vol 8; 3/4; 247-266 p.

# APÊNDICE



Apêndice 01: Mapa de pontos da região de estudo, total de 298 pontos descritos em duas etapas de campo.

# **ANEXO 01**

# **MAPA GEOLÓGICO**

**ANEXO 02**  
**MAPA DE PONTOS**