

MFN 020



Universidade Federal do Ceará
Centro de Ciências
Departamento de Geologia
Curso de Mestrado em Geologia

CONTRIBUIÇÕES DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS (MAGNETOMETRIA,
GRAVIMETRIA E ELETORRESISTIVIDADE) À GEOLOGIA
DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOLOGIA APLICADA

JOSÉ FARIAS DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada e defendida publicamente no dia
22 de dezembro de 1998, diante do júri abaixo assinado

Presidente (Orientador) : Prof. Dr. Raimundo Mariano G. Castelo Branco
Prof. Dr. David Lopes de Castro
Prof. Dr. Mauro Andrade de Sousa

Fortaleza - 1998

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos,
a minha perseverança no viver
e na eterna aprendizagem

AGRADECIMENTOS

Ênfase se faz em apresentar aqui, o nome das pessoas que contribuíram e tornaram realidade o desenvolvimento desta pesquisa. Especialmente, cabe agradecer:

Ao Prof. Dr. Raimundo Mariano G. Castelo Branco, pelo acompanhamento e orientação crítica e, sobremaneira amizade e alegria, efetivando este trabalho evoluir;

À Diretoria da CPRM - Serviço Geológico do Brasil, na pessoa do Diretor Presidente Carlos Oití Berbert, pelo incessante apoio e flexibilidade na jornada de trabalho, e colegas, ao todo, pela singular satisfação do trabalho;

Aos professores Dr. David Lopes de Castro e Dr. Mauro Andrade de Sousa, pelo acompanhamento e imprescindível orientação científica na concretização deste trabalho;

À FUNCAP, pela bolsa de estudos, concedida no desenvolvimento do programa, na pessoa do presidente, Professor Dr. João Lucas, e do Diretor Científico, Professor Jäder Onofre;

À Coordenação do curso de Pós-graduação, através do Professor Dr. Clovis Parente Cruz, pelo zelo dos assuntos tratados, experiência e amizade;

Aos colegas da CPRM, Mário José Metelo, Thales de Queiroz Sampaio, Clodionor Carvalho de Araújo, Antônio Maurílio Vasconcelos, Jaime Quintas dos Santos Colares, Sérgio João Frizzo, Francisco Edson Mendonça Gomes, José Carvalho Cavalcante, Ana Carmen Albuquerque Cavalcante, Maria Ednir Vasconcelos e Cícera Carla Holanda, pelo apoio na consecução de atividades;

Aos professores, amigos e funcionários do Curso de Pós-Graduação dos departamentos de Geologia, Física, Matemática e Agronomia da Universidade Federal do Ceará, pela satisfatória experiência na consolidação da minha carreira acadêmica;

Aos professores, Dr. Joaquim Raul Torquato, Dr. José Márcio Lins, pelos importantes conselhos, estímulo, encorajamento e experiência;

Aos amigos e colegas, Roberto Freitas Mota, pelo incessante intercâmbio multidisciplinar, e, Mauro Lisboa Souza, pela imprescindível ajuda nos trabalhos de campo.

À minha família, minha esposa Francisca Peres Martins Farias, aos meus pais (in memoriam) por estarem sempre comigo, pelos constantes e predicados momentos alegres.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| DEDICATÓRIA..... | i |
| AGRADECIMENTOS..... | ii |
| SUMÁRIO..... | iii |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES..... | vi |
| LISTA DE ABREVIATURAS..... | ix |
| RESUMO..... | x |
| ABSTRACT..... | xi |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | |
| 1.1. Considerações Iniciais..... | 1 |
| 1.2. Localização da Área..... | 2 |
| 1.3. Objetivos..... | 5 |
| 1.4. Métodos Aplicados e Resultados Alcançados..... | 5 |
| CAPÍTULO 2 – GEOLOGIA | |
| 2.1. Aspectos da Geologia Regional..... | 8 |
| 2.2. Síntese da Geologia da Área em estudo..... | 16 |
| 2.2.1. Complexo Granitóide-Migmatítico..... | 17 |
| 2.2.2. Complexo Gnáissico-Migmatítico..... | 17 |
| 2.2.3. Rochas Ígneas..... | 19 |
| 2.2.3.1. Ultrabásitos..... | 19 |
| 2.2.3.2. Rochas Plutônicas..... | 19 |
| 2.2.3.3. Vulcânicas Alcalinas..... | 20 |
| 2.2.4. Coberturas Cenozóicas..... | 23 |
| 2.2.4.1. Grupo Barreiras..... | 23 |
| 2.2.4.2. Coberturas Colúvio-Eluviais..... | 23 |
| 2.2.4.3. Depósitos de Paleodunas..... | 23 |
| 2.2.4.4. Depósitos de Dunas Recentes ou Móveis..... | 26 |
| 2.2.4.5. Depósitos Flúvio-Aluvionares e Mangues..... | 26 |
| 2.2.5. Síntese Estrutural..... | 26 |

CAPÍTULO 3 – MÉTODO MAGNÉTICO

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1. | Considerações gerais..... | 28 |
| 3.2. | Levantamentos e Procedimentos Magnéticos..... | 32 |
| 3.3. | Tratamentos dos Dados Aeromagnéticos..... | 34 |
| 3.3.1. | Criação de bancos de dados..... | 36 |
| 3.3.2. | Relação dinâmica de dados, valores estatísticos, perfis e gridagem..... | 36 |
| 3.3.3. | Filtragem e componente ruidosa..... | 36 |
| 3.3.4. | Mapas magnéticos gerados (Campo total, primeira derivada, continuação para cima e susceptibilidade)..... | 38 |
| 3.4. | Interpretação e discussão dos dados aeromagnéticos..... | 43 |
| 3.4.1. | Comentários e representatividade..... | 43 |
| 3.4.2. | Análise das anomalias e caracterização das unidades magnéticas..... | 48 |
| 3.4.3. | Análise dos baixos e altos magnéticos..... | 49 |
| 3.4.4. | Hierarquia dos alinhamentos | 49 |

CAPÍTULO 4 – MÉTODO GRAVIMÉTRICO

| | | |
|--------|--|----|
| 4.1. | Considerações gerais..... | 50 |
| 4.2. | Levantamento e procedimentos gravimétricos..... | 53 |
| 4.3. | Tratamentos de Dados..... | 56 |
| 4.3.1. | Altimetria..... | 58 |
| 4.3.2. | Reduções Gravimétricas..... | 58 |
| 4.3.3. | Cálculo das Anomalias..... | 60 |
| 4.3.4. | Gridagem e mapa de anomalia Bouguer..... | 60 |
| 4.4. | Interpretação Qualitativa do Mapa de Anomalia Bouguer..... | 60 |

CAPÍTULO 5 – MÉTODO DE ELETORRESISTIVIDADE

| | | |
|------|--|----|
| 5.1. | Considerações gerais..... | 64 |
| 5.2. | Levantamento..... | 67 |
| 5.3. | Procedimento e tratamento dos dados..... | 71 |
| 5.4. | Interpretação das SEV's..... | 71 |

| | |
|--|-----|
| CAPÍTULO 6 - INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS | 92 |
| CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES | 99 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 102 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Localização da Área da RMF..... | 3 |
| Figura 1.2 – Divisão Municipal da RMF..... | 4 |
| Figura 2.1 – Províncias Estruturais do Brasil..... | 9 |
| Figura 2.2 – Esboço Geológico da Província Borborema | 11 |
| Figura 2.3 – Mapa Geotectônico Esquemático e Simplificado do Nordeste do Brasil..... | 12 |
| Figura 2.4 – Esboço do Mapa Geológico do Estado do Ceará..... | 13 |
| Figura 2.5 – Detalhe da exposição de Fonolito | 21 |
| Figura 2.6 – Exposição do Grupo Barreiras..... | 24 |
| Figura 2.7 – Detalhe de Nível Conglomerático do Grupo Barreiras..... | 25 |
| Figura 2.8 – Contato do Grupo Barreiras e Paleodunas..... | 25 |
| Figura 3.1 – Problema Direto versus Problema Inverso..... | 31 |
| Quadro 3.1 – Informações Técnicas..... | 33 |
| Mapa Magnético de Campo Total..... | 39 |
| Mapa Magnético de Continuação para Cima ($H = 250$ m)..... | 40 |
| Mapa Magnético de Primeira Derivada Vertical..... | 41 |
| Mapa de Susceptibilidade Magnética Aparente..... | 42 |
| Mapa de Interpretação Magnética de Continuação para Cima..... | 44 |
| Mapa de Interpretação Magnética de Primeira Derivada Vertical..... | 45 |
| Mapa de Interpretação de Susceptibilidade Magnética Aparente..... | 46 |
| Figura 3.2 – Mapa Aeromagnético do Estado do Ceará..... | 47 |
| Quadro 4.1 – Distribuição das Seções Gravimétricas..... | 54 |
| Figura 4.2 – Utilização do Gravímetro..... | 55 |
| Tabela 4.1 - Cálculo de Precisão do Levantamento Gravimétrico..... | 57 |
| Tabela 4.2 - Cálculo de Precisão do Levantamento Altimétrico..... | 57 |
| Mapa Gravimétrico de Anomalia Bouguer..... | 61 |
| Figura 5.1 – Distribuição das Linhas de Corrente e Equipotenciais..... | 66 |
| Figura 5.2 - Distribuição Esquemática do Arranjo Schlumberger..... | 67 |
| Figura 5.3 – Utilização do Eletrorresistímetro no Levantamento Elétrico..... | 68 |
| Figura 5.4 – Disposição do Arranjo Schlumberger na RMF..... | 69 |
| Figura 5.5 – Detalhe do Arranjo Schlumberger no Levantamento Elétrico..... | 69 |
| Quadro 5.1 – Quadro de Distribuição das SEV's..... | 70 |

| | |
|---|-----|
| Quadro 5.2 – Distribuição e Integração das SEV's..... | 72 |
| Figura 5.6 - SEV 16 e suas características Geolétricas..... | 74 |
| Figura 5.7 - SEV 03 e suas características Geolétricas..... | 75 |
| Figura 5.8 - SEV 05 e suas características Geolétricas..... | 76 |
| Figura 5.9 - SEV 06 e suas características Geolétricas..... | 77 |
| Figura 5.10 - SEV 07 e suas características Geolétricas..... | 78 |
| Figura 5.11 - SEV 01 e suas características Geolétricas..... | 79 |
| Figura 5.12 - SEV 02 e suas características Geolétricas..... | 80 |
| Figura 5.13 - SEV 14 e suas características Geolétricas..... | 82 |
| Figura 5.14 - SEV 15 e suas características Geolétricas..... | 83 |
| Figura 5.15 - SEV 17 e suas características Geolétricas..... | 84 |
| Figura 5.16 - SEV 09 e suas características Geolétricas..... | 85 |
| Figura 5.17 - SEV 10 e suas características Geolétricas..... | 86 |
| Figura 5.18 - SEV 04 e suas características Geolétricas..... | 87 |
| Figura 5.19 - SEV 11 e suas características Geolétricas..... | 88 |
| Figura 5.20 - SEV 12 e suas características Geolétricas..... | 88 |
| Figura 5.21 - SEV 13 e suas características Geolétricas..... | 90 |
| Mapa Geológico..... | 93 |
| Mapa de Interpretação Magnética de Campo Total..... | 94 |
| Mapa de Interpretação Gravimétrica de Anomalia Bouguer..... | 95 |
| Mapa de Localização..... | 96 |
| Figura 6.1 - Integração e Distribuição em Profundidade dos Estratos Geolétricos | 97 |
| Mapa Magnético de Continuação para Cima (H = 500 m)..... | 107 |
| Mapa Magnético de Continuação para Cima (H = 1.000 m)..... | 108 |
| Mapa Magnético de Continuação para Cima (H = 2.000 m)..... | 109 |
| Mapa Magnético de Continuação para Cima (H = 5.000 m)..... | 110 |
| Mapa Magnético de Continuação para Cima (H = 10.000 m)..... | 111 |

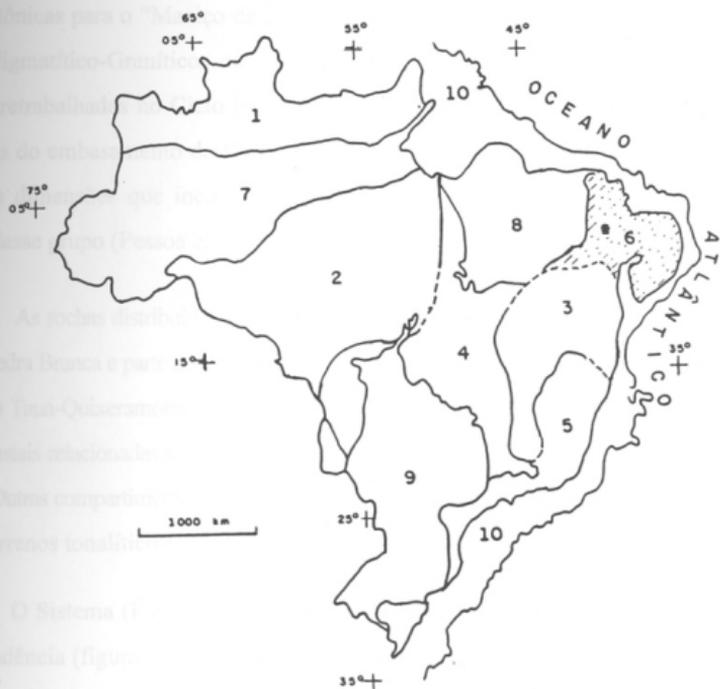


Figura 2.1 - Províncias Estruturais do Brasil: 1 - Rio Branco; 2 - Tapajós; 3 - São Francisco; 4 - Tocantins; 5 - Mantiqueira; 6 - Borborema; 7 - Amazônica; 8 - Parnaíba; 9 - Paraná; 10 - Província Costeira e Margem Continental (segundo Almeida et al, 1977).

RESUMO

Esta dissertação apresenta o trabalho desenvolvido no campo da geofísica para contribuir no esclarecimento do quadro geológico na região Metropolitana de Fortaleza.

A região em estudo, localizada no Estado do Ceará entre as coordenadas $39^{\circ} 00'$ a $38^{\circ} 00'$ W de Gr. e $4^{\circ} 00'$ a $3^{\circ} 30'$ S, apresenta-se com destaques de rochas proterozóicas do embasamento na faixa de serranias, e arrasada, na área litorânea, exibindo delgada cobertura terciária e quaternária.

Na concretização deste estudo foram reunidas três metodologias distintas a saber: i) o método magnetométrico envolvendo especialmente dados aeromagnéticos, processados com o "software" Oasis Montaj versão 4.1C, e sua interpretação qualitativa, além de observações de uma seção terrestre; ii) método gravimétrico e seu tratamento, seguido de interpretação qualitativa; e iii) levantamento de eletrorresistividade e seu tratamento e interpretação das sondagens elétricas verticais.

O tratamento dos dados magnéticos constou da criação de um banco de dados contendo a localização geográfica e o valor do campo magnético total de cada ponto de observação, análise dos perfis, gridagem e filtragem para confecção de imagem no padrão internacional "colour table". A interpretação das imagens, sobretudo nas escalas 1:150.000 e 1:500.000, permitiu identificar duas unidades magnéticas e diversos corpos rochosos, reunidos em subunidades magnéticas distintas, que fornecem subsídios à delimitação das unidades geológicas e granitóides de natureza intrusiva. Foram identificados também dois alinhamentos nas direções NE-SW e NW-SE. Este último possibilitou, nos estudos do quadro geológico, estabelecer um período de reativação recente, pelo menos de idade terciária. Um terceiro "trend" é caracterizado distintamente, na direção E-W, cortando o alinhamento NE-SW.

No levantamento gravimétrico, realizado simultaneamente ao levantamento altimétrico, foram levantadas 481 estações, distribuídas em intervalos regulares de 1km em seções regionais. A interpretação qualitativa permitiu estabelecer duas unidades gravimétricas distintas. A primeira é representada pelo embasamento ígneo-metamórfico, coberto parcialmente por sedimentos do Grupo Barreiras e colúvio-eluviais e a segunda unidade sendo representada por rochas granitóides de natureza intrusiva. Foram estabelecidos quatro sistemas de alinhamentos estruturais, sendo dois principais, nas direções NE-SW e NW-SE, e dois distintamente mais recentes, nas direções E-W e N-S.

O levantamento de eletrorresistividade, consistiu na execução de 17 sondagens elétricas verticais, utilizando-se o arranjo Schlumberger e envolvendo áreas de rochas do embasamento e sedimentos do Grupo Barreiras. Foi possível estabelecer três unidades geoeletricas representativas de rochas do embasamento cristalino, Grupo Barreiras e de cobertura colúvio-aluviais. Os estratos geoeletricos apresentados apontam que a região de Eusébio e Aquiraz reúnem as características geoeletricas de aquíferos promissores.

A integração desses métodos foi de fundamental importância, junto às seções geológicas, para o entendimento do quadro geológico da região. Esses métodos geofísicos possibilitaram a compartimentação dos conjuntos litológicos e configuração dos alinhamentos estruturais e corpos rochosos de natureza intrusiva. Com base na eletrorresistividade foi possível determinar o topo do embasamento em diversos setores da Região Metropolitana de Fortaleza.

ABSTRACT

This dissertation relates the work developed using Geophysical methods as a tool to the better knowledge of the geological and structural framework of the metropolitan area of the city of Fortaleza, north of Ceara State, Brazil.

The study area is located between 38° 00' and 39° 00' W Gr. and 3° 30' and 4° 00' S, and it is composed by Proterozoic metamorphic rocks of basement in the mountains range and thin Tertiary and Quaternary sediments covering in the low-land and coastal areas.

To accomplish the aim of this work three different methodologies were performed: 1) qualitative interpretation of magnetometric method utilizing Oasis Montaj v. 4.1C Software to processing aeromagnetic data, besides one terrestrial section, 2) qualitative interpretation of gravimetric method and 3) electric resistivity survey through the interpretation of vertical electric profiles.

The treatment of magnetic data consisted in mounting a database with geographic coordinates and magnetic total field value of each station, statistical analysis of profiles, data filtering and grid processing to obtain color map images. Interpretation particularly of 1:150.000 and 1:500.000 scale images led to the identification of two main magnetic units and several distinct sub-units related to rocky bodies, assisting the delimitation of geological units and granitic rocks of intrusive nature. There were also identified two alignments of NE-SW and NW-SE directions, the last one being reactivated recently, at least in the Tertiary. There is a third trend E-W, distinctly cutting the NE-SW structural alignment.

The gravimetric survey was realized simultaneously to the altimetric survey, have been established 481 stations regularly distributed over regional sections at 1 km intervals. The qualitative interpretation allowed to establish two gravimetric units, the first one represented by the igneous-metamorphic basement, partially covered by Grupo Barreiras and alluvial-colluvial sediments and the second one related to granitic intrusive rocks. Four structural alignments were established, the main directions being NE-SW and NW-SE, and E-W and N-S distinctly more recent.

To the electric resistivity survey 17 vertical electric profiles, Schlumberger arrange, were executed over basement rocks and sediments of the Barreiras Group. It was possible to establish three geo-electrical units, which are representative of the crystalline basement, Barreiras Group and alluvial-colluvial sedimentar covering. The region of Eusebio and Aquiraz has geo-electrical characteristics of promising aquifers.

The integration of these methods was of fundamental importance to the understanding of the geological picture of the area, as they facilitate the division of lithologic groups and depicted the structural alignments. The electrical resistivity method made possible to determine the top of basement in several sectors of the Fortaleza metropolitan region.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Iniciais

As técnicas geofísicas têm avançado sistematicamente nas últimas décadas e contribuído enormemente nos diversos estudos da litosfera. Nas áreas metropolitanas a aplicação da metodologia geofísica oferece maiores detalhes das estruturas geológicas, comparadas com outras metodologias direcionadas à geologia de superfície. Os métodos potenciais (magnetometria e gravimetria), caracterizados por parâmetros estabelecidos pelas susceptibilidades magnéticas e densidades das rochas, permitem reconhecer um quadro regional das propriedades físicas de um segmento litosférico. Os métodos elétricos e elétrico-magnéticos e o método de GPR (“Ground Penetrating Radar”) têm contribuído satisfatoriamente nos terrenos sedimentares nos problemas voltados para água e aplicações geológicas, muito solicitados nas áreas metropolitanas.

Na área em estudo tem-se um embasamento incluindo litótipos metamórficos, sobrepostos por delgada cobertura de sedimentos terciários e quaternários e apresentação de espessos “necks” terciários de rochas vulcânicas alcalinas (fonolitos, traquitos, tufos e essexitos).

Os métodos geofísicos (magnético, gravimétrico e de eletroresistividade), empregados na Região Metropolitana de Fortaleza, direcionaram-se para o estabelecimento de subsídios à solução de problemas geológicos de superfície e subsuperfície, que envolvem entre eles desmoronamentos, recalques de camadas sedimentares e irregularidades de recargas, que hoje chamam atenção das entidades empresariais privadas e governamentais.

Na obtenção das respostas magnetométricas fez-se um geoprocessamento dos dados aeromagnéticos reunidos pela CPRM do aerolevante do Projeto Itatira (NUCLEBRÁS, 1977), utilizando-se um “software” da firma geosoft, Oasis montaj, versão 4.1 c. Nas imagens obtidas da Região Metropolitana de Fortaleza, com contorno e coloridas no padrão internacional fez-se a interpretação qualitativa. Efetivou-se, também, a interpretação de uma seção terrestre executada na área, para complementação dos estudos magnéticos.

Para a obtenção das respostas gravimétricas, fez-se um levantamento terrestre com 481 estações, com intervalo de 1km e distribuídas em seções, utilizando-se um gravímetro

tipo Worden Scintrex CG-2, com precisão de 0,1 mgal e constante do aparelho de 0,0988. Nos dados tratados foi possível desenvolver a interpretação para os produtos finais.

Na campanha da eletroresistividade, os estudos foram efetuados com base nos dados de 17 sondagens elétricas verticais, com arranjo Schlumberger, desenvolvidas em seção de 50km de extensão e com espaçamento na ordem de 3 km, em terrenos envolvendo diversos litótipos do embasamento ígneo-metamórfico e coberturas sedimentares.

Uma vez concluídos os trabalhos de campo, foram desenvolvidos os trabalhos de escritório, envolvendo a confecção de gráficos, tabelas, correções nos métodos aplicados e emprego de diversos “softwares” (Oasis Montaj, Magpoly, Gravpoly e Resist). Os exames interpretativos permitiram a integração geofísico-geológica e apresentação de uma carta geológica na escala 1:150.000, além das cartas de interpretação magnética de campo total e da carta gravimétrica de anomalia Bouguer na escala 1:150000.

A apresentação desta pesquisa está estruturada da seguinte forma, além do capítulo introdutório: descrição da geologia, capítulos dos métodos geofísicos (magnetometria, gravimetria e eletroresistividade), integração dos resultados, conclusões e referências bibliográficas. São apresentados os arquivos digitais em disquete dos dados e/ou “grids” magnéticos, gravimétricos e eletroresistividade para torná-los acessíveis à comunidade para outras eventuais manipulações.

1.2 - Localização da Área

A Região Metropolitana de Fortaleza está localizada na porção nordeste do estado do Ceará (figura 1.1), apresentando-se limitada, ao norte, pelo oceano Atlântico; ao sul, pelos municípios de Caridade, Palmácia, Redenção, Acarape, Pacajus e Horizonte; a leste, pelo município de Pindoretama e pelo oceano Atlântico; e a oeste, pelos municípios de São Gonçalo do Amarante e Pentecoste.

Essa região envolve uma área de 3.483 km², abrangendo nove municípios (figura 1.2): Aquiraz com 471km²; Caucaia – 1.293km²; Euzébio – 75 km²; Fortaleza – 336 km²; Guaiúba – 259 km²; Itaitinga – 154 km²; Maracanaú – 82km²; Maranguape – 672 km²; e, Pacatuba – 141km².

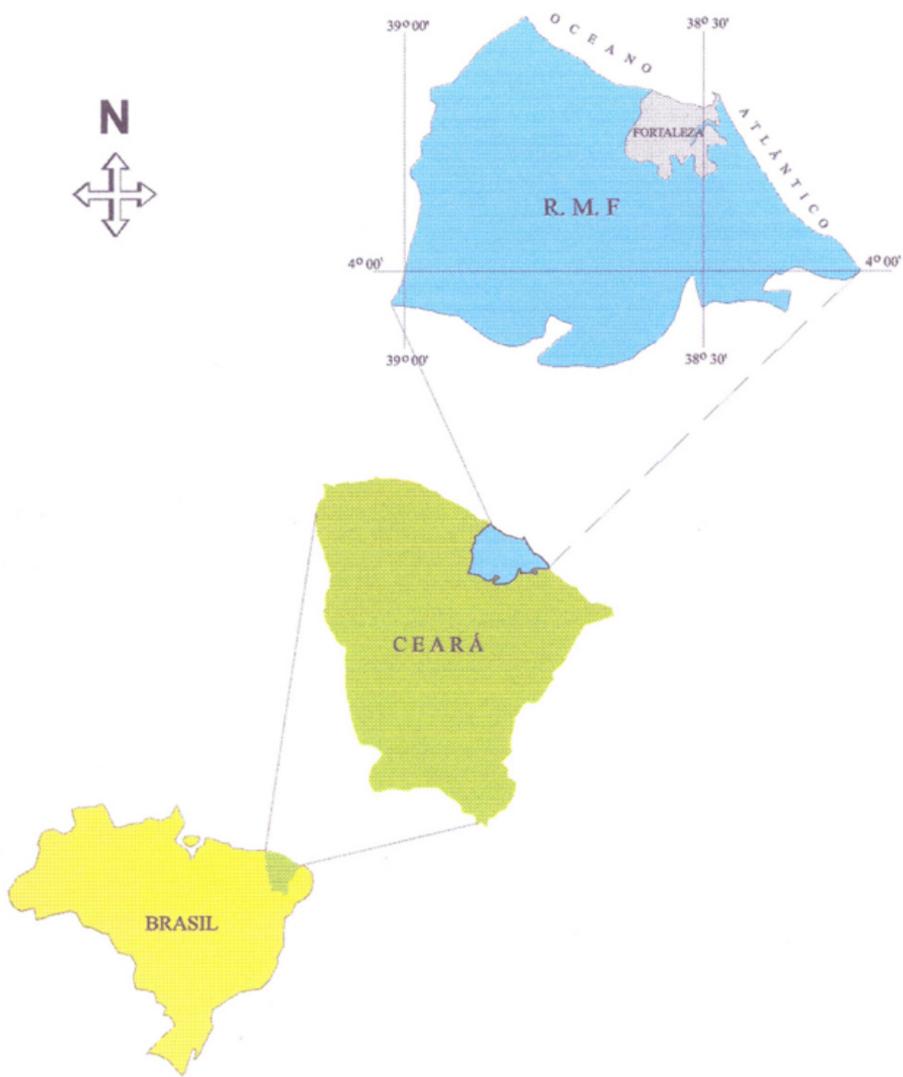


Figura 1.1 - Localização geográfica da R.M.F (segundo Brandão, 1995)

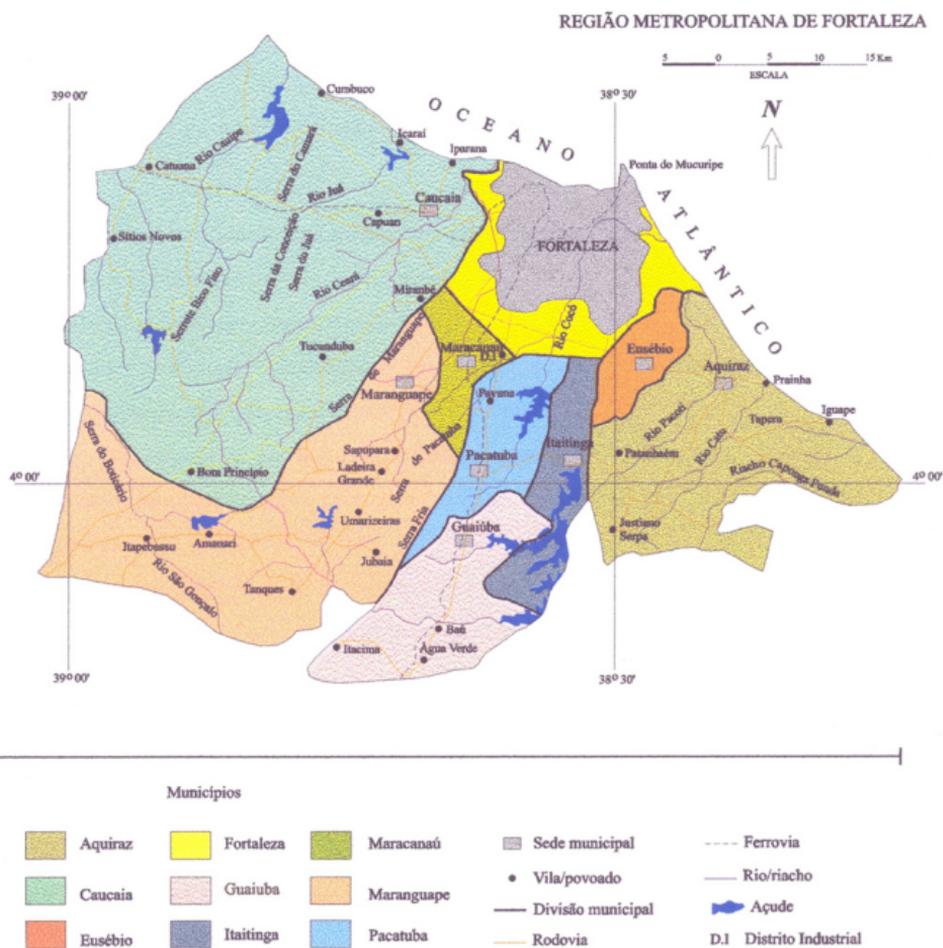


Figura 1.2 - Divisão municipal da RMF (segundo Brandão, 1995)

1.3 - Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral o fornecimento de subsídios geofísicos envolvendo as interpretações magnética, gravimétrica e de eletrorresistividade e sua integração para o estudo geológico da região.

Em termos de objetivos específicos os trabalhos desta dissertação foram assim norteados:

- Contribuições à elucidação dos parâmetros geológicos de superfície e subsuperfície, envolvendo sobretudo às estruturas geológicas;
- Delimitação através da magnetometria de unidades magnéticas que possam vir a caracterizar unidades geológicas, demarcação de litótipos de natureza intrusiva e o estabelecimento da hierarquização dos falhamentos ocorrentes no embasamento;
- Demarcação através da gravimetria de unidades gravimétricas para caracterização da estruturação e compartimentação geológica e, também, o estabelecimento dos alinhamentos estruturais;
- Estabelecimento através da eletrorresistividade de unidades geoelétricas para caracterização de estratos geoelétricos na definição de aquíferos e delimitação de áreas mais promissoras;
- Avaliação de dados existentes em função dos novos parâmetros encontrados e nos diferentes níveis de escala investigado e integração dos métodos geofísicos aplicados; e,
- Recomendação de trabalhos complementares ainda necessários para o melhor e homogêneo conhecimento geofísico-geológico da Região Metropolitana de Fortaleza envolvendo inclusive locais de instabilidade de terrenos.

1.4 – Métodos Aplicados e Resultados Esperados e/ou Alcançados

Os métodos geofísicos empregados neste trabalho envolveram o manuseio distinto para cada um dos três métodos geofísicos (magnetométrico, gravimétrico e eletrorresistividade) utilizados, procurando-se, de início, as informações e um detalhamento específico para esses métodos, buscando um visível progresso das técnicas de prospecção geofísica e sua integração com os parâmetros geológicos. Os resultados obtidos com o uso das técnicas computacionais refletiram eficazmente no me-

lhor entendimento da geologia na Região Metropolitana de Fortaleza, envolvendo o arcabouço proteozóico e os sedimentos terciários e quaternários, além dos “necks” de vulcânicas alcalinas.

Para a execução deste trabalho em níveis de qualidade compatíveis com as expectativas e necessidades da Pós-graduação da Universidade Federal do Ceará e demais segmentos do setor geológico da região, formulou-se o conjunto de procedimentos de técnicas e métodos, tanto em nível técnico-científico, como nos níveis operacionais.

Foi possível após a obtenção e investigação das escassas referências bibliográficas, prover e executar a aplicabilidade do método magnético, a partir dos dados aerogeofísicos do levantamento da NUCLEBRÁS (1977), para visualização e entendimento geofísico-geológico parcial da área em estudo.

Procurou-se, também, desenvolver uma assimilação e intercâmbio de conhecimento, através de publicações e apresentações em eventos de trabalhos técnico-científicos de temas inerentes ao assunto desta dissertação.

Dentro do campo de recursos humanos, para maior aperfeiçoamento de técnicas para o desenvolvimento do geoprocessamento, participou-se de diversos cursos na linguagem de computação, entre eles, cursos no Núcleo de Processamento de Dados (NPD) da Universidade Federal do Ceará, curso de geoestatística no Departamento de Matemática-UFC, Curso de Geoprocessamento na Residência de Fortaleza-CPRM, Curso Oásis Montaj pela Geosoft/CPRM-Rio de Janeiro e curso na USP para dados de aerolevantamentos promovido pelo 5^o CISBgf.

Concernente aos parâmetros de mapeamento geológico foram desenvolvidos em campo e também em “*pari passum*” aos levantamentos geofísicos, através de seções, diversas observações no quadro geológico, necessárias para a confecção da carta geológica da região, com integração da geofísica.

Foram alcançados com a aplicação desses métodos geofísicos, parâmetros magnéticos, gravimétricos e geoeletricos que refletiram na eficácia da demarcação de unidades geológicas, estabelecimento dos alinhamentos estruturais e sua hierarquização e definição dos estratos geoeletricos com a caracterização geoeletrica de aquíferos.

Os procedimentos metodológicos, adotados para a realização dessa dissertação, foram baseado na programação de pesquisa apresentada e discutida nas disciplinas curriculares de “Metodologia da Pesquisa Científica” e “Geocronologia” circunstanciada na apresentação

de seminários, que foram equacionados para atender os objetivos do trabalho, envolvendo cinco atividades principais. Estas atividades podem ser assim resumidas: aquisição e análise da documentação básica, levantamentos de dados geofísicos (magnéticos, gravimétricos e de eletroresistividade), processamento das informações, interpretação e consolidação dos dados e elaboração da redação.

Uma vez realizada a aquisição e a análise das bibliografias que fizessem referências à área em estudo e das cartas topográficas, fotografias aéreas e imagens de radar, sendo consultadas bibliotecas de diversas entidades governamentais, entre elas CPRM, UFC, DNPM, PETROBRÁS e Labomar, foi feita uma carta geológica preliminar na escala de 1:150.000, onde foram delineados os principais compartimentos litológicos e traços estruturais (foliações, zonas de cisalhamentos, etc.) e inseridas as seções dos levantamentos geofísicos para execução.

Após concluídos os trabalhos de campo de cada levantamento geofísico, deu-se prosseguimento ao tratamento de laboratório, informatizado ou não, envolvendo os métodos aplicados.

Por final, as atividades envolvendo a interpretação e consolidação dos dados consistiram nos estudos dos dados, interpretação e correlação dos mapas geofísicos e sua integração com a geologia e definição de uma carta geológica da Região Metropolitana de Fortaleza, além das cartas magnética de campo total e gravimétrica de anomalia Bouguer.

CAPÍTULO 2 - GEOLOGIA

2.1 – Aspectos da Geologia Regional

Dentro do contexto regional, a área em estudo constitui uma pequena região de uma ampla e complexa faixa da Região de dobramentos Nordeste (Brito Neves, 1975; Almeida et al., 1976) ou Província Borborema (Almeida et al, 1977; figura 2.1) que continua na África Ocidental, consolidada ao final do evento Brasileiro/Pan-Africano 600 -550 Ma (Jardim de Sá et al, 1997).

A Província Borborema delimita uma área na ordem de 380000 km² do Nordeste Brasileiro onde afloram conjuntos rochosos de intrincada evolução geológica em tempos arcaico-proterozóicos, tendo limites a norte e leste a Província Costeira; ao sul, a Província (Cráton) São Francisco (limites admitidos de configuração brasileira); e, a oeste a Província (Sinclise) Parnaíba. Alguns desses limites, apontados por dados geológicos e/ou geofísicos, representam descontinuidades litosféricas soldando diferentes terrenos tectono-estratigráficos (Jardim de Sá et al, 1997), configurados à luz de dados gravimétricos recentes envolvendo a parte norte dessa província (Castro & Medeiros, 1997). Nos modelos de subdivisão da Província Borborema são reconhecidas as seguintes faixas (Jardim de Sá et al, 1997): as faixas Sergipana e Riacho do Pontal, ao norte do Cráton São Francisco e a sul do Lineamento Pernambuco, com supracrustais monocíclicas neoproterozóicas; a faixa marginal ao Cráton São Luís, parcialmente exposta no noroeste do Ceará (FNC) e conhecida também como Faixa Médio Coreaú e com melhor expressão no continente Africano (Faixa Atacora), envolvendo supracrustais monocíclicas neo e meso-proterozóicas; a Faixa Seridó e o Domínio Ceará Central (DCC), a norte do lineamento Patos, com envolvimento de supracrustais proterozóicas, mono ou policíclicas; e, o Domínio da Zona Transversal, também complexa, incluindo supracrustais proterozóicas, mono ou policíclicas. Similaridade desse modelo para a Província Borborema, aparece no modelo proposto por Santos (1996), envolvendo um maior número de blocos/domínios, onde a extrema mobilidade da Província é evidenciada pelas extensas e abundantes zonas de cisalhamento que se distribuem ao longo de toda sua extensão.

Dentre as entidades geotectônicas

provincia que dizem respeito à Faixa

que na década de 1980, por São

Figura 2.3), procurando-se evitar

geotectônicas para o "Mantimento

do-Migmatítico-Granítico

mente retrabalhada

queiras do embudo

dele - que incide

como de um tipo (Pessoa e

As rochas distribuídas

plano Pedro Branca e parte

ca (Tipo Taubaté-Quixeramobim)

suplementares relacionadas

1981) Outras compartimen

vaixas tectônicas tonalíticas

O Sistema (f)

Independência (figura

Almeida et al (1977)

parceiras restritas m

area do

se os traços que se

Independência e con

Rio Curu-Independ

Referências

e geocronologia

seguintes caractere

(a) as terr

bramentos - Jaguar

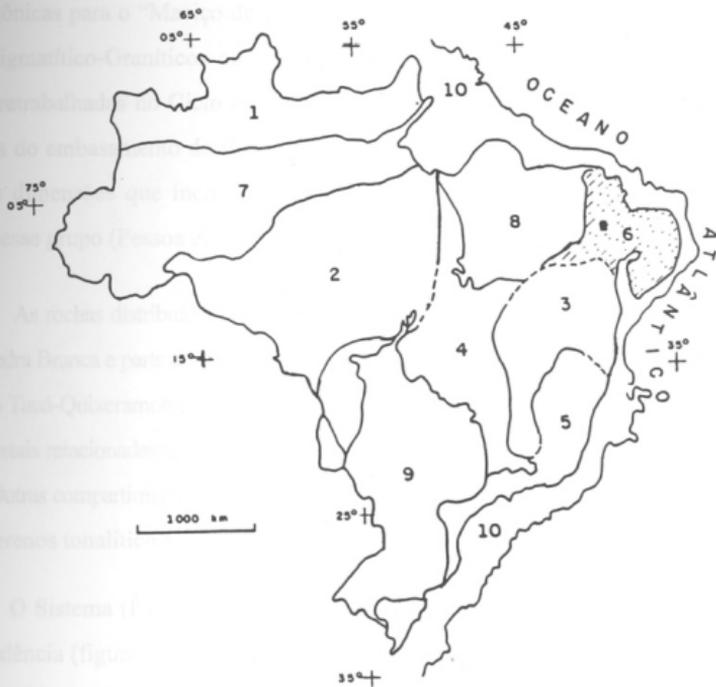


Figura 2.1 - Províncias Estruturais do Brasil: 1 - Rio Branco; 2 - Tapajós; 3 - São Francisco; 4 - Tocantins; 5 - Mantiqueira; 6 - Borborema; 7 - Amazônica; 8 - Parnaíba; 9 - Paraná; 10 - Província Costeira e Margem Continental (segundo Almeida et al, 1977).

Dentre as entidades geotectônicas, enfatizando alguns aspectos importantes dessa província que dizem respeito à Faixa de Dobramentos Jaguaribeano, foram referenciados maciços na década de 1980, por Santos e Brito Neves (1984; figura 2.2), e Brito Neves (1986; figura 2.3), procurando-se evitar uma assinatura com fortes conotações paleogeográfico-geotectônicas para o “Maciço de Tróia Tauá”, colocando-o na legenda dos “Maciços” Gnáissico-Migmatítico-Graníticos ou, simplesmente, de “Maciços” (rochas de alto grau, diversamente retrabalhadas no Ciclo Brasileiro), e chegou a ser diluído no contexto das rochas arqueanas do embasamento do Grupo Ceará (Caby & Arthaud, 1986; figura 2.4), como expandido às dimensões que incorporam segmentos das faixas supracrustais antes cartografadas como desse grupo (Pessoa et al, 1986).

As rochas distribuídas nessa região têm sua estratigrafia denunciada basicamente pelo Complexo Pedra Branca e parte do Complexo Nordestino (Gomes et al, 1981), além de uma Suíte Magnética (Tipo Tauá-Quixeramobim, de provável idade proterozóica inferior; Pessoa et al, 1986), e restos de supracrustais relacionadas ao Grupo Ceará (Campos et al, 1976) ou ao Complexo Itaira (Gomes et al, 1981). Outras compartimentações estratigráficas são extraídas de Oliveira & Cavalcante (1993) que envolve terrenos tonalítico-trondhjemitó-granodioritos (TTG) e também de Barreto (1967).

O Sistema (Faixa) de Dobramentos Jaguaribeano, incluindo a “Subfaixa” Rio Curu-Independência (figura 2.2), na compartimentação tectônica proposta por Brito Neves (1986) e Almeida et al (1976), encontra-se, quase literalmente, inserido no estado do Ceará, ficando parcelas restritas no leste-sudeste piauiense e oeste pernambucano. Apresenta sua principal área de distribuição ladeada pelos “maciços” Rio Piranhas, a leste, e Tróia a oeste; marcando-se os tratos que se desenvolvem entre as regiões de São Luís do Curu e Crateús, passando por Independência e emoldurando o Maciço de Santa Quitéria, como da “Subfaixa” (ou Sistema) Rio Curu-Independência.

Referenciado nos informes bibliográficos (envolvendo ou não geoquímica, geofísica e geocronologia radiométrica), exhibe-se um quadro estratigráfico complexo marcado pelos seguintes caracteres:

(a) os **terrenos gnáissico-migmatíticos** que ocupam amplas áreas do sistema de Dobramentos Jaguaribeano, formados, basicamente, de biotita-gnaisses para e ortoderiva-

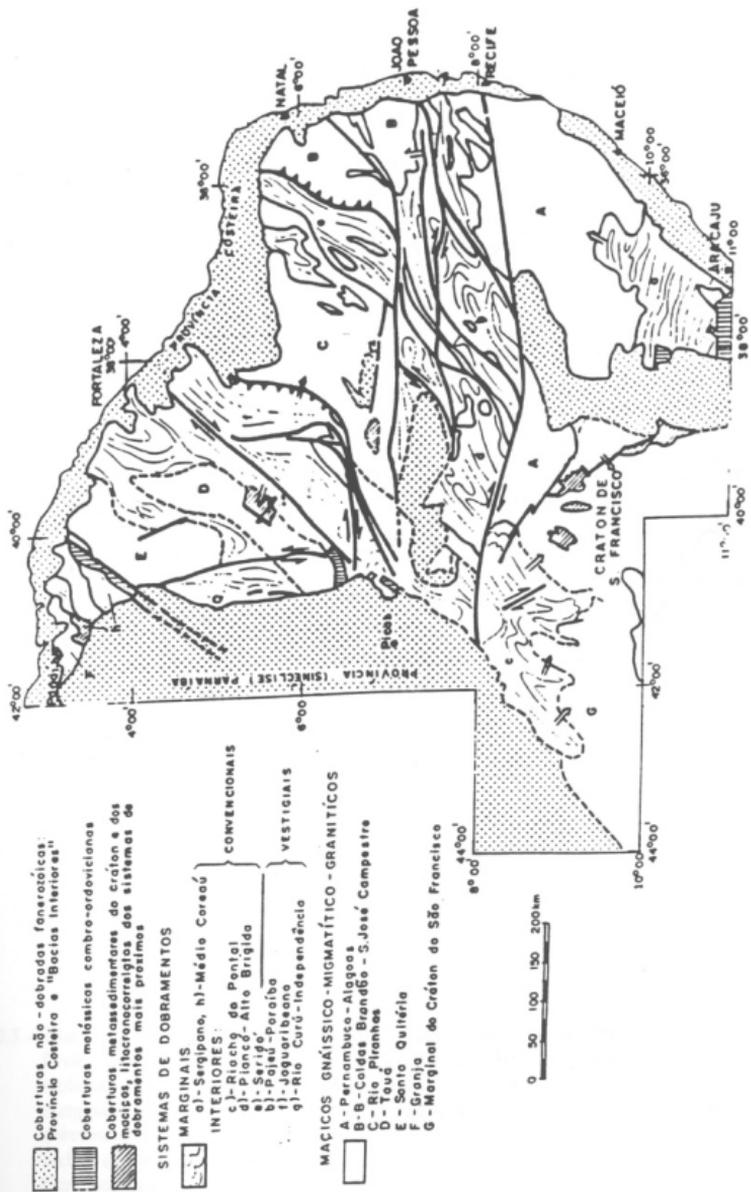


Figura 2.2 - Esboço dos principais elementos geológicos da Província Borborema (segundo Santos & Brito Neves, 1984).

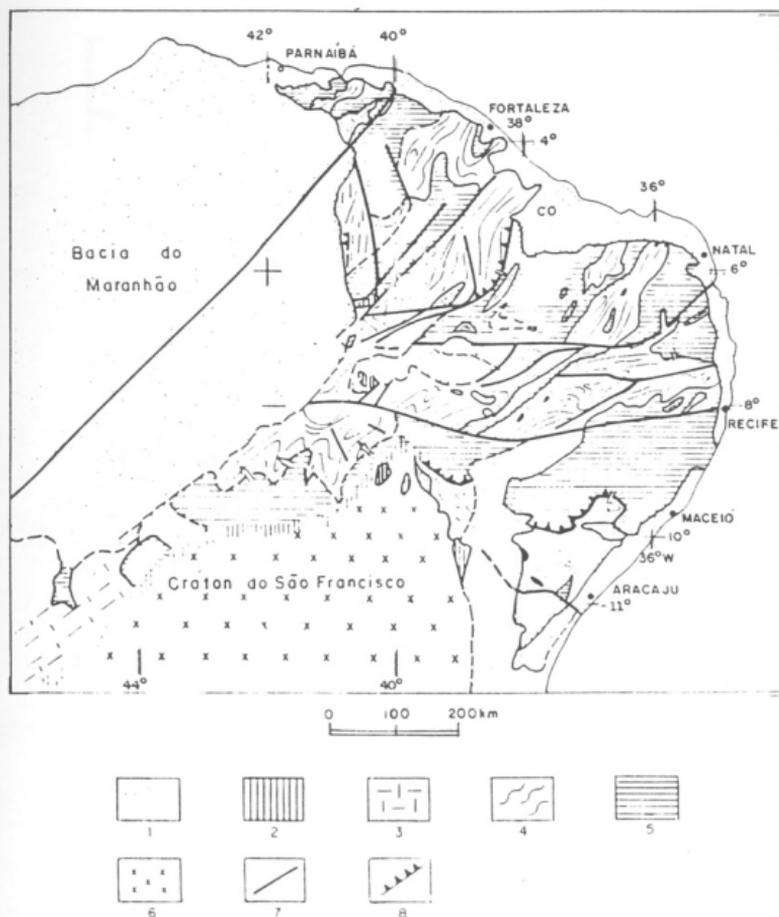


Figura 2.3 - Mapa geotectônico esquemático e simplificado do nordeste do Brasil - Província Borborema; Evolução proterozóica superior (segundo Brito Neves, 1986). 1 - coberturas fanerozoicas; 2 - bacias molássicas e associadas com a evolução das faixas de dobramentos; 3 - faixas de dobramentos marginais (miogeossinclíneos); associações pelitocarbonáticas de rochas de baixo grau; 4 - faixas de dobramentos interiores; associações vulcanossedimentares polideformadas e lineares; 5 - maciços; rochas de alto grau, diversamente retrabalhadas durante o Ciclo Brasileiro; 6 - Craton do São Francisco; núcleo cratônico sinbrasílico; 7 - megafalha, zona de cisalhamento; 8 - Thrusts maiores.

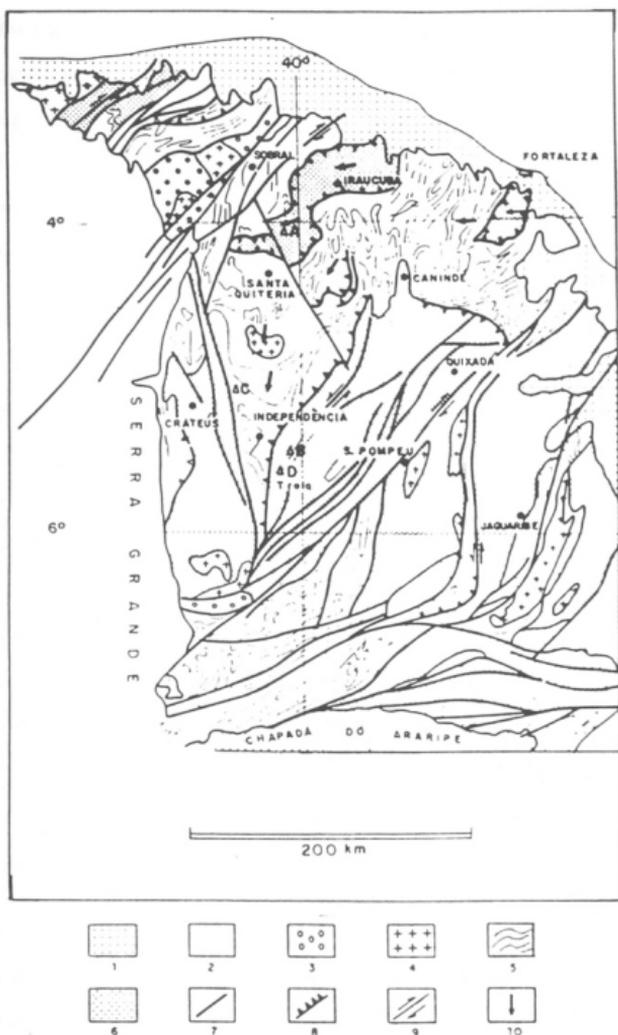


Figura 2.4 - Esboço do mapa geológico do Estado do Ceará e áreas adjacentes (segundo Cavalcante et al, 1983; modificado por Caby & Arthaud, 1986). 1 - Mesozóico e Terciário; 2 - Paleozóico da bacia do Maranhão; 3 - Molassa tardibrasileira; 4 - principais granitos brasileiros; 5 - grupo Ceará (Proterozóico); 6 - rochas do embasamento arqueano; 7 - zona de cisalhamento; 8 - falha transcorrente; 10 - direção de movimentos de *nappes*.

dos, com ou sem anfibólio, granada e silimanita, migmatitos de estruturas diversas e jazimentos de dimensões variadas de quartzitos, metacarbonatos, orto-anfibolitos metaultramafitos e rochas calcissilicáticas e grafitosas, que têm sido correlacionadas ou colocadas no “Complexo Rio Fundamental” (Crandall, 1910) ou Complexo Nordestino (Gomes et al, 1981), quando das porções meridionais do sistema. São denominados também como Complexo Gnáissico-Migmatítico e Pré-Cambriano Indiferenciado (Leal, 1970; Santos, 1972; Souza et al, 1986), e apresentam idades radiométricas (isócronas de referências) relacionadas ao Proterozóico Inferior (1.900m.a, com $RI=0,705$) e Médio (1.150m.a., com $RI=0,705$), envolvendo gnaisses migmatitos, anfibolitos e escarnitos (Gomes et al, 1981), além de outras arqueanas (Benevides et al, 1983);

(b) **os terrenos supracrustais de baixo e alto grau** são incluídos, parcial ou totalmente, no Grupo Ceará e, ordinariamente, são representados por uma seqüência de parametamorfitos que chegam a atingir a zona de anatexia, observando-se, também, à proposta inicial de Crandall (1910), de que deveria pertencer “à Série Ceará grande parte das rochas. incluídas nos xistos cristalinos”. Na “Subfaixa” Rio Curu- Independência, em área ao sul do “Maciço” de Santa Quitéria (Barreto, 1967) reconheceu para essa “Série” uma seqüência parametamórfica de gnaisses migmatíticos com variadas intercalações, sendo constituída pelos grupos Cruzetas (gnaisse leptiniticos, biotita-xisto, e gnaisse granítico); Independência (biotita-gnaisses, biotita xistos granadíferos e lentes de calcários) e Ematuba (quartzito e migmatitos), em ordem ascendente. No trabalho de Santos (1972) as supracrustais xistosas (micaxistos, paragnaisses, quartzitos e rochas carbonáticas) do Sistema de Dobramentos Jaguaribeano são incluídas no Grupo Ceará e, apontados similarmente à partir das colunas stratigráficas exibidas por Campos et al (1976) e Braga et al. (1977).

São apresentadas outras propostas, entre elas, as de Gomes et al (1981), com a divisão dos terrenos em questão entre o Complexo Itatira e o Grupo Ceará e Mendonça et al (1982), o Grupo Itataia, para a região homônima, além daquela de Schobbenhaus (1982) e Santos et Brito Neves (1984), onde as rochas antes relacionadas ao Grupo Ceará são divididas entre o Complexo Lavras da Mangabeira e correlatos (Complexo Novo Oriente e Araicoba, Complexo Orós e Grupo Ceará), situando-se os micaxistos e filitos, do extremo sudeste do sistema, no Grupo Cachoeirinha.

Destacando-se entre as áreas com litótipos das fácies xisto-verde e anfíbolito baixo (grau fraco a médio de Winkler, 1977), situa-se a de Orós (Complexo ou Grupo Orós), que se encontra sublinhada por uma bem conservada seqüência vulcanossedimentar, contendo um expressivo elenco de domínios litológicos, com características máfico-ultramáficas vulcanofélsica, sedimentar-psamítica, sedimentar-pelítica e vulcanoclástica, vulcanoquímica e plutonofélsica (Mendonça & Braga, 1987).

As idades de alguns autores (Jardim de Sá & Fowler, 1981; Jardim de Sá, 1984; Cavalcante et al, 1983; Oliveira & Cavalcante, 1993, entre outros) apontadas para essas rochas são reportadas ao Proterozóico Inferior e médio, além de valores na ordem de 1700m.a apresentados por Macedo et al (1988).

No quadro estrutural, a "Subfaixa" Rio Curu-Independência, na região de Itataia, exibe cinco fases deformacionais que, com exceção da primeira, interessam à seqüência de paramorfitos do Grupo Ceará-Itataia (Mendonça et al, 1982). Na Folha Independência (SB.24-V-D-I) são registradas três fases principais de dobramentos, onde a foliação regional relaciona-se ao Ciclo Brasileiro (Arthaud & Hartmann, 1986), sendo marcada por uma lineação de sillimanita 20Az, e uma outra de estiramento 110Az, além da existência de uma estruturação em nappes em tempos brasileiros (Caby & Arthaud, 1986); e,

(c) **os terrenos molássicos, batólitos e stocks granitóides** encontrados no âmbito do Sistema de Dobramentos Jaguaribeano, tanto marginal como internamente, alguns depósitos sedimentares e vulcanossedimentares que têm sido considerados como molassas do Ciclo Brasileiro (figura 2.2), especialmente, estabelecidas no Eopaleozóico, destacando-se em termos de área os situados no Graben de Cococi. Essa unidade, juntamente com os arenitos e siltitos arcoseanos, sobrepostos, foram nomeados de Formação Catolé (Parente & Fuck, 1987).

Concernente à idade cambro-ordoviciana dessas seqüências molássicas (Grupo Rio Juca; Grupo Jaibaras), a cronologia é sempre efetuada com base nas idades radiométricas Rb/ Sr e K/Ar das vulcânicas e plutônicas inseridas no ambiente sedimentar, que mostram valores entre 570 e 450m.a. Ademais, é interessante ressaltar que uma idade proterozóica superior pode ser admitida para o início da vulcanossedimentação, já que determinações cronoradiométricas em rochas magmáticas (riolito, dacito, quartzo-andesito, espilito, dacito alcalino) de jazimentos diqueformes, que

ocorrem nos terrenos gnáissico-migmatíticos, marginais aos “grabens”, têm exibido figura isocrônica de 697±55m.a (Torquato et al, 1986).

2.2 – Síntese Geológica da Área em Estudo

A região em estudo está inserida, em quase toda sua extensão, no quadro geológico-geotectônico do sistema (Faixa) de Dobramentos Jaguaribeano de Brito Neves (1975). No estabelecimento de uma litoestratigrafia inquestionável de suas unidades proterozóicas, os estudos regionais apontam uma ambigüidade de evolução para esse sistema, uma de idade proterozóica inferior e, outra, a partir de desenvolvimento no Ciclo Brasileiro.

Os terrenos gnáissico-migmatíticos, na região em foco, distribuem-se em toda a área, envolvendo tanto segmentos de rochas ortoderivadas como supracrustais, tendo na literatura, no contexto geológico, denominações litoestratigráficas diversas.

Entre os representantes mais antigos destaca-se o domínio de massa granitóide-migmatíticas, consideradas por alguns autores como representantes do Maciço Santa Quitéria (Brito Neves, 1986). São materializadas na região, manifestações magmáticas atribuídas ao Evento Brasileiro, sobretudo, através de corpos plutônicos de natureza granítica, encaixados nos litótipos precedentes e, também, corpos tabulares que se encerram indistintamente nessas unidades. Acrescenta-se, ainda, a ocorrência de um corpo ultrabásico situado na porção centro-oeste da área de posicionamento estratigráfico duvidoso.

Notoriamente, são presentes, rochas vulcânicas de natureza alcalina, em jazimentos sob as formas de “necks” e diques, constituindo uma província petrográfica geneticamente relacionada com os vulcanitos do arquipélago de Fernando de Noronha, de idades atribuídas ao Terciário, na ordem de 30m.a. Como componentes mais recentes no quadro geológico, situam-se as coberturas sedimentares cenozóicas, constituídas pelo Grupo Barreiras, Coberturas Colúvio-Eluviais, Paleodunas, Dunas Móveis e Depósitos Flúvio-Aluvionares e de Mangues. São descritas à seguir os itens envolvendo a compartimentação estratigráfica e síntese estrutural da área em estudo.

2.2.1 – Complexo Granitóide-Migmatítico (∈gr-mg)

São referidos ao Complexo Granitóide-Migmatítico, no trabalho em questão, a designação de Brandão (1995), para o conjunto ortoderivado que ocorre predominantemente na porção central da região, com a ressalva de que poderia ser redefinido como uma unidade granitóide-migmatítica ortoderivada com segmentos litótipos proterozóicos mais recentes (Brasilianos) com marcantes assinaturas magnéticas (baixos magnéticos), características de corpos de natureza intrusiva menos deformados no Estado do Ceará. Na redefinição dos termos litológicos do Complexo Nordeste (Nascimento et al, 1981), através da exclusão das rochas paraderivadas inseridas nessa unidade, Brandão (1995) procurou evitar também adotar a proposta de Braga et al (1977), no sentido de empregar a terminologia Complexo Tamboril-Santa Quitéria, visto que não foram levantados elementos suficientes com o maciço mediano de Santa Quitéria (Brito Neves, 1986), que na definição original, além das rochas migmatíticas/granitóides, incluem importantes associações de máficas/ultramáficas, estas não verificadas (Brandão, 1995) na área em questão.

Na designação de Complexo Tamboril-Santa Quitéria, Braga et al (1977) reuniram os granitóides diversos, migmatitos (diatexitos dominantes) e gnaisses migmatíticos ocorrentes à sudoeste de Fortaleza, envolvendo as regiões de Maranguape, Pacatuba e porção norte do maciço de Baturité, em forma ovalada na direção NE-SW. Nascimento et al (1981) considera o Complexo Tamboril Santa Quitéria de Braga et al (1977) como uma individualização litológica, constituída predominantemente de granitos e migmatitos dentro do Complexo Nordeste.

Os limites dos litótipos desta unidade com os da unidade Complexo Gnáissico-Migmatítico não estão bem definidos face ao intenso relacionamento tectônico, estando as melhores exposições, aventadas por Brandão (1995), situadas nos setores morfológicamente mais elevados, que formam as serras de Maranguape e Pacatuba, de constituição litotípica dominante granitóide.

2.2.2 – Complexo Gnáissico-Migmatítico (∈gn-mg)

Este complexo, representado por uma associação petrotectônica de provável posicionamento estratigráfico no Proterozóico Inferior, tem recebido denominações diversas na literatura como Complexo Fundamental (Crandall, 1910), Complexo Caicó (Meunier, 1964) Pré-Cambriano Indiferenciado (Leal, 1970), Complexo Gnáissico-Migmatítico (Lima et al, 1980) e

Complexo Nordestino (Nascimento et al, 1981).

Ademais, Braga et al (1977), na área do Projeto Fortaleza, definem o Complexo Cai-có, como uma associação litológica constituída de gnaisses variados, com lentes de metar-cóseos, anfíbolitos, quartzitos e calcários cristalinos subordinados, além de migmatitos com estruturas diversas; e, caracterizam na mesma região (ao sul da área em estudo), uma seqüên-cia parametamórfica com quartzitos na base seguidos por xistos, filitos e gnaisses, com níveis carbonáticos preferencialmente no topo da seqüência e/ou nos metapelitos próximos ao quart-zito basal.

Brandão (1995) assinala que a distribuição das rochas consideradas o Grupo Ceará não se dá somente a sul da área (correspondente à R.M.F.), como foi delimitado por Braga et al (1977) e optou-se pela adoção da denominação de Complexo Gnáissico-Migmatítico de conotação mais abrangente, envolvendo tanto segmentos de infra-estrutura como de supra-crustais. Neste trabalho, preferiu-se conservar a designação de Brandão (1995) para definir essas rochas preferencialmente paraderivadas com presença de alguns segmentos de infra-estrutura.

Suas melhores exposições foram registradas no trabalho de Brandão (1995) na por-ção ocidental, onde descreve uma seqüência predominantemente paraderivada, constituída de gnaisses aluminosos, em parte migmatizados e com freqüentes intercalações de níveis quart-zíticos e carbonáticos. Mostram biotita-gnaisses com ou sem muscovita, anfíbólio, granada e sillimanita, muitas vezes com "sheets" de leuco-ortognaisses, pegmatóides e ortognaisses por-firíticos; e por vezes encerram restritos corpos lenticulares anfibolíticos e calcossilicáticas, de pequenas dimensões. Os termos migmatíticos mais comuns são de estrutura bandada/dobrada, havendo também, localmente, tipos mais evoluídos com tendência à homogeneização; são cartografáveis em duas áreas, predominantemente migmatítica: serras do Juá-Conceição-Camará e serrote Bico Fino.

Em termos tectônicos, são comuns as evidências de atuação de processos metamórfi-cos e deformacionais, em escala regional, compatíveis com a fácies anfíbolito e uma anisotro-pia estrutural, representada por uma foliação que resulta de deformação dúctil ou plástica, em regime de cisalhamento.

2.2.3 – Rochas Ígneas

2.2.3.1 - Ultrabásitos

Refere-se a esta unidade, um corpo ultrabásico (piroxenito de coloração preto-esverdeada, maciço e de granulação média) do serrote Manoel Gonçalves, na porção centro-oeste da região, próximo à borda oeste da serra de Maranguape, de forma elipsoidal, e alinhado grosseiramente na direção N-S, cartografado por Braga et al (1977) e depois por Brandão (1995).

O seu posicionamento cronoestratigráfico é atribuído ao Proterozóico Inferior por Braga et al (1977) pela sua datação em K/Ar próxima a 1800 m.a., admitindo validade geológica, embora a análise possui teor crítico de potássio para o método radiométrico.

2.2.3.2 - Rochas Plutônicas (Єy)

São referidos a esta unidade, inúmeros corpos graníticos, sob a forma de “stocks” e batólitos (Ciclo Brasileiro), relacionados ao Proterozóico Superior pela sua correlação estratigráfica, tendo Brito Neves (1975), através de determinações radiométricas identificado a importância desse evento na formação dos corpos graníticos nordestinos, à partir de isócronas que definam claramente essa faixa de idade (450-700 m.a.).

Foram agrupados por Campos et al (1976) e Braga et al (1997) todos os granitos e rochas afins, que ocorrem na área do Projeto Fortaleza, sob a designação genérica de Rochas Plutônicas Granulares, sem conotação cronológica distinta aos outros representantes pré-cambrianos referidos, também, por Gomes et al (1981) na “Suíte Magmática” do Pré-Cambriano Superior.

Na área em questão, a organização “estratigráfica” desses granitóides foi estabelecida, de ordem Preliminar, tendo como referencial as fases deformacionais relacionadas ao Proterozóico Superior Ciclo Brasileiro, registradas por Oliveira & Cavalcante (1993) na Folha Mombaça. Todavia, essa “compartimentação estratigráfica” é preliminar, já que alguns corpos podem ser relacionados a algum outro evento e/ou até mesmo, a um outro posicionamento estratigráfico, a luz de novos parâmetros, e observados os dados geofísicos, sobretudo, magnéticos, que apresentam susceptibilidade magnética característica de corpos enriquecidos de minerais ferro-magnéticos, muito expressivo nesses granitóides da área em estudo.

Os granitos admitidos como cedo-à-sintranscorrência, acham-se, assim expressados: um tipo mais antigo, que se distribui por toda a área, representados por ortognaisses com ou sem facóides feldspáticos, nos registros de Brandão (1995), constituindo corpos não cartografados em escala regional, estratóides, dispostos conforme a filiação regional, encaixados nas unidades proteorozóicas mais antigas; e um tipo mais recente, mais caracterizado para o seu posicionamento sin-Brasiliiano, respaldado não só pelos dados litológicos, petroquímicos e radiométricos existentes, mas também, pelos dados magnéticos (elevados baixos magnéticos que alcançam até 74 nT) e dados gravimétricos (baixos gravimétricos com valores entre 19 e 12 mgal) que mostram assinaturas magnéticas e gravimétricas e intensidade de alinhamentos nas direções NE-SW e NW-SE.

Esses granitos, considerados por Brandão (1995) como tardi a pós-tectônicos, estão apresentados em mapa, através de cinco ocorrências (Itaitinga, serrotes do Jatobá, Cachoeira, Baú e o corpo próximo a localidade de Água Verde), e distribuídos na porção sul-sudeste da área, encaixados nos terrenos gnáissico-migmatíticos. São corpos assinaláveis pelo estudo de fotointerpretação e/ou referências bibliográficas, sendo apenas o corpo de Itaitinga verificado em campo, neste trabalho, o qual apresenta-se de forma ovalada numa direção NNE-SSW, com assinatura magnética onde um baixo magnético alcança $-75,4$ nT, encaixado em terrenos do Complexo Ganáissico-Migmatítico, e contactado na borda oeste através de uma zona de transcorrência na colocação de Brandão (op. cit.). O granito mostra-se mesocrático de granulação média, de estrutura isotrópica a incipientemente foliada com freqüentes enclaves gnáissificados de composição diorítica.

Os corpos plutônicos tardi- a pós-deformação transcorrente (ϵ_3) estão representados por corpos graníticos constituídos, na ocorrência visitada no Sul da área (Brandão, 1995), por um leucogranito de coloração rósea, rico em muscovita de granulação grossa a média, freqüentemente pegmatóides e estruturalmente isotrópico, encaixado em biotita gnaisses com lentes de anfíbolito.

2.2.3.3 – Vulcânicas Alcalinas (T)

Este conjunto de rochas vulcânicas alcalinas está representado por corpos de fonolitos sob a forma de “necks” ou “plugs” vulcânicos (figura 2.5), de idade oligocênica na ordem de 30m.a. (datados em $28,6 \pm 9$ m.a. – Vандoros & Oliveira, 1968; e, em torno de 34m.a. obti-

das pelas
mente em
Fortaleza de
parcos digi



Figura 2.5 - Exposição de pedreira do corpo vulcânico Caruru (fonolito), mostrando representatividade de fraturas. Local: Região da foz do rio Pacoti.

defini
Japapo
miciç
a-pro
valeres

das pelos métodos de Rb/Sr K/Ar – Nascimento et al, 1981), que se sobressaem topograficamente em elevações circulares e elipsoidais. São cartografados na Região Metropolitana de Fortaleza onze corpos vulcânicos, também incluídos nesse conjunto de rochas vulcânicas, esparsos diques de natureza alcalina normalmente sem representatividade regional.

Cabe a Almeida (1958), o primeiro trabalho que se refere a rochas alcalinas no estado do Ceará, que associou a ocorrência do morrote Caruru, situado à foz do rio Pacoti, a grandes lineamentos estruturais, relacionados ao vulcanismo do arquipélago de Fernando Noronha, com extensão até os limites interiores do estado. Deve-se a Braga et al (1977), o estudo integrado envolvendo os corpos alcalinos que ocorrem na folha Fortaleza (escala, 1/250.000), onde identificaram quatro variedades petrográficas: fonolitos, traquitos, tufos e essexitos.

Deve-se a Nascimento et al (1981) os estudos geocronológicos das ocorrências dos serrotes Caruru, Ancuri, Salgado, Japapara e Pão de Açúcar para a obtenção das idades em torno de 34m.a. (métodos Rb/Sr e K/Ar), considerando que as alcalinas estudadas representam uma importante fase de reativação da Plataforma Sul-Americana, que estaria associada a zonas de fraqueza com extensão até o Arquipélago de Fernando de Noronha e o Atol das Rocas. Passos & Gomes (1979) verificaram relações de contato bruscas do corpo Salgadinho com os hornblenda-gnásisses circundantes, além dos litótipos fonolitos traquitóides (este em dominância), fonolitos tefríticos e termos mais básicos, limburgitos e ankaramitos, permitindo a definição de uma associação alcalino-sódica. No reconhecimento de campo nos serrotes de Japapara e Salgadinho, Brandão (1995) descreveu um material de coloração cinza-esverdeada, maciço, mostrando pórfiros milimétricos de plagioclásio envoltos por uma matriz afanítica, e a presença de vesículas preenchidas por quartzo. No serrote Pão de Açúcar são assinalados valores de dados gravimétricos e magnéticos por Marinho et. al. (1990).

2.2.4 – Coberturas Cenozóicas

2.2.4.1 – Grupo Barreiras

Esta unidade mostra-se representada por uma seqüência sedimentar terciária, pela literatura de idade miocênica a pleistocênica, de caráter ambiental predominantemente continental, onde os sedimentos foram depositados sob condições de um clima semi-árido sujeito a chuvas esporádicas e violentas, com formação de amplas faixas de leques aluviais em sopés de encostas mais ou menos íngremes.

Este Grupo, na área em estudo, mostra-se representado por sedimentos areno-argilosos não ou pouco litificados, de coloração avermelhada creme ou amarela com freqüentes aspecto mosqueado, mal selecionados, de granulação fina a média exibindo localmente níveis lateríticos e horizontes conglomeráticos (figuras 2.6, 2.7 e 2.8), estes podendo estarem associados a uma porção mais basal da seqüência. Distribui-se em faixa de largura variável acompanhando a linha de costa, contíguo aos sedimentos eólicos antigos e atuais, com afloramentos muito próximos ao litoral e, por vezes, na linha de praia, em falésias a exemplo das “falésias vivas” expostas na praia de Iparama (Caucaia) .

2.2.4.2 – Coberturas Colúvio-Eluviais (TQc)

Estas coberturas são representadas por “manchas” ou “ilhas” de sedimentos areno-argilosos, distribuídos de forma irregular, que se assentam diretamente sobre os litótipos proterozóicos, em espessuras, normalmente inferiores a três metros. A sua morfologia está caracterizada por Brandão (1995) como tabuleiros aplainados, muitas vezes rebaixados ao nível da superfície cristalina. Esses sedimentos que muitas vezes confundem-se com os sedimentos do Grupo Barreiras pela sua semelhança, foram caracterizados por Braga et al (1997), como um material areno-argiloso, alaranjado e/ou avermelhado, de granulação fina a média, ocasionalmente mais grosseiro e inconsolidado, com matriz areno-argilosa caulínica.

2.2.4.3 – Depósitos de Paleodunas (Qpd)

São representados por sedimentos inconsolidados freqüentemente e, por vezes, em parte, compactados, de areias bem selecionadas, de granulação fina a média, às vezes xistosa

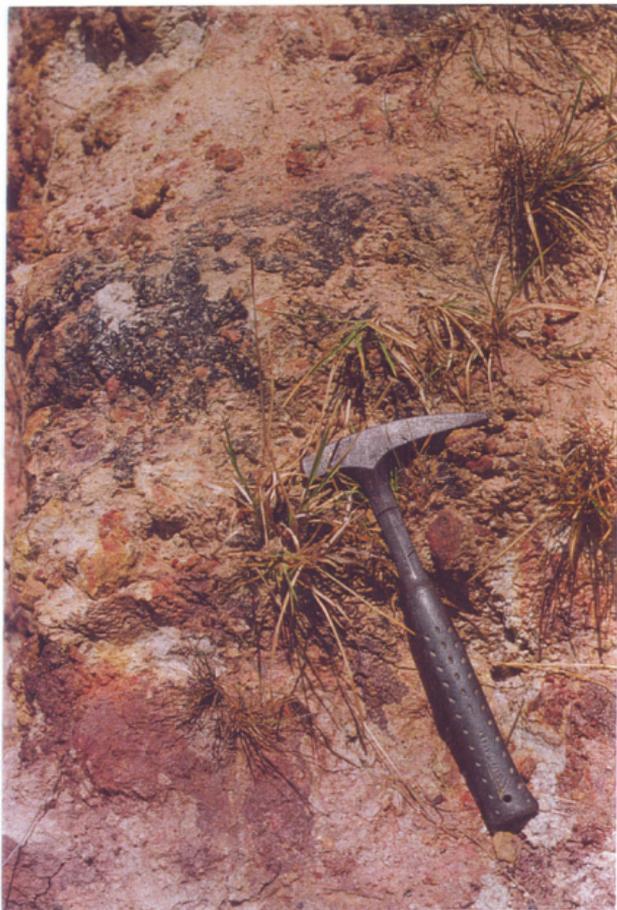


Figura 2.6 - Exposição do Grupo Barreiras, mostrando nível conglomerático laterizado, intercalado em seqüência mal selecionada areno-argilosa. Local: entrada da localidade de Prainha-CE.



Figura 2.7 – Exposição de sedimentos do Grupo Barreiras com nível conglomerático marcante na seqüência. Local: Prainha-CE.



Figura 2.8 – Visão no canto superior esquerdo, de contato de sedimentos do Grupo Barreiras com depósitos de paleodunas, parcialmente cobertos de vegetação. Local: Área da bifurcação da estrada das praias Abreulândia/Beach Park.

com tons amarelados, alaranjados e acinzentados, de composição quartzosa e/ou quartzo-feldspática, distribuídos em uma faixa de largura em média de 2 a 4km ao longo da linha de costa, contíguos às dunas recentes. Na porção leste da região (Aquiraz), esses sedimentos podem chegar, pelos dados de Brandão (1995), rumo ao interior até cerca de 20km.

A sua estratigrafia mostra que estão assentados discordantemente sobre os sedimentos do Grupo Barreiras e, são em parte cobertos pelas dunas móveis ou recentes. Correspondem a geração mais antiga de dunas e mostram fixação de revestimento vegetal de fácil identificação em campo e fotointerpretação. Sua espessura pode variar próximo a linha de praia na ordem de 15 metros, atingindo proporções mais elevadas, e adelgaçam-se para o interior.

2.2.4.4 – Depósitos de Dunas Recentes ou Móveis (Qd)

Correspondem a sedimentos formados a partir da acumulação de sedimentos removidos da face de praia pela deflação eólica, com distribuição em forma de cordão paralelo à linha de costa, esboçado da linha de praia alta (“backshore”), com largura na ordem de 2 a 3km e espessuras que podem atingir 30 metros. Sua composição envolvem areias esbranquiçadas, bem selecionadas, granulação fina a média, quartzosas, com grãos de quartzo foscos e arredondados, encerrando por vezes níveis de minerais pesados, sobretudo ilmenita. Apresentam estratificações cruzadas e caracterizam-se pela ausência de vegetação e são de fácil reconhecimento em fotointerpretação.

2.2.4.5 – Depósitos Flúvio-Aluvionares e Mangues (Qa)

São constituídos por depósitos, principalmente, mal selecionados, de areias, cascalhos, siltes e argilas, com ou sem matéria orgânica, abrangendo os sedimentos fluviais, lacustres ou estuarinos recentes. Mostram-se ao longo das principais drenagens, provenientes do retrabalhamento das unidades litológicas existentes e, em alguns locais são de fácil reconhecimento em fotointerpretação.

2.2.5 – Síntese Estrutural

O quadro estrutural da região mostra-se caracterizado pelas feições estruturais sublinhadas no contexto geológico-geotectônico da faixa de Dobramentos Jaguaribeano, marcadas nas unidades, em sobremaneira, do Proterozóico Inferior. O arranjo geométrico, faz-se visua-

lizar no mapa, onde os principais traços estruturais estão dispostos, preferencialmente nos “trends” NE-SW (mais predominante) e, NW-SE e WSW-NNE. Os dados magnéticos apontam uma hierarquia onde o sistema NW-SE é o mais recente, com movimento de deslocamento no sentido dextrógiro. São apontados, também, pelos dados magnéticos, alinhamentos na direção leste-oeste que são sublinhados pelos dados gravimétricos que apontam também alinhamentos na direção norte-sul.

A natureza dúctil é imposta com mais evidência nos litótipos do Complexo Gnássico-Migmatítico e, também, Complexo Granitóide-Migmatítico, onde os processos metamórficos e deformacionais, em escala regional, desenvolveram-se compatíveis com o fácies anfíbolito e uma anisotropia estrutural representada por uma foliação resultante de deformação dúctil ou plástica. Faz-se presente, nesses terrenos, uma deformação progressiva heterogênea, materializada, através, de uma atuante foliação protomilonítica relativamente freqüente, evoluindo à produção localizada de faixas de alta concentração de “strain” junto às zonas de cisalhamento. A sua petrografia mostra fenoblastos de plagioclásio e K-feldspato, com foliação fortemente anastomótica, e regular em outros termos petrográficos.

No Fanerozóico, são assinaladas, por alguns autores (entre eles, Asmus - 1984), reativações, desenvolvidas nas idades mesozóica e cenozóica, com zonas de fraturas de grande extensão, envolvendo fraturas que se estendem desde Fernando de Noronha e outras estruturas oceânicas. Na área em estudo, faz-se assinalar um alinhamento na direção noroeste-sudeste, pelos dados magnéticos, e registro provável no corpo vulcânico de Caruru, na ordem de 30 m.a.

CAPÍTULO 3 – MÉTODO MAGNÉTICO

3.1 – Considerações Gerais

O método magnético, semelhantemente ao método gravimétrico, tem seus fundamentos na teoria do potencial. Os dois são muito semelhantes do ponto de vista da teoria. A principal diferença (que torna o método magnético mais complexo) é o caráter dipolar do campo magnético, em contraste com o caráter monopolar do campo gravitacional.

As concentrações de minerais magnéticos nas rochas da crosta produzem distorções locais nos elementos (intensidade, declinação e inclinação) do campo magnético da Terra. Essas concentrações podem ser prospectadas pelas observações das medidas magnéticas.

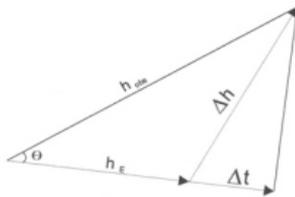
O método magnético foi um dos primeiros métodos geofísicos a ser empregado em prospecção e foi utilizado na Suécia em 1640, com o fim de detecção de depósitos de ferro. As medidas consistiam na observação da variação da declinação magnética com bússolas náuticas. Mais de dois séculos depois, o método de observação foi aperfeiçoado com a construção de instrumentos capazes de medir variações das componentes horizontal e vertical do campo magnético e da sua inclinação. Nos tempos modernos, medidas muito precisas da intensidade do campo e das suas componentes são realizadas com instrumentos conhecidos como magnetômetros, podendo ser realizadas na superfície do terreno ou em aeronaves (aviões e helicópteros). As medidas podem ser feitas, ainda, em áreas cobertas por água, com o auxílio de embarcações, ou ainda em poços perfurados. Ressalta-se, ainda, que os minerais magnéticos responsáveis pelas distorções do campo magnético terrestre, observada nos trabalhos de prospecção, são a magnetita, a pirrotita e a ilmenita, que por sua vez podem fornecer informações sobre a distribuição de minerais não magnéticos que são economicamente importantes, a exemplos da galena, asbesto e calcopirita. As medidas magnéticas, podem, ainda, além de permitir a localização de minerais economicamente importantes, ser usadas na identificação de contatos geológicos e de estruturas geológicas (falhas, dobras), que podem, inclusive, ter servido para o acúmulo de petróleo e gás. O método magnético, pelo baixo custo a rapidez dos levantamentos, é um dos métodos mais utilizados na prospecção. Para o entendimento de conceituação de anomalias magnéticas, similarmente à gravimetria, a anomalia magnética é a diferença entre o campo observado e o valor esperado no ponto de observação, a seguir:

$$\Delta \vec{h}(\vec{r}) = \vec{h}_{obs}(\vec{r}) - h_E(\vec{r}) \quad (\text{equação 3.1})$$

onde, h_{obs} é o campo magnético observado

h_E é o campo magnético esperado

Estando-se interessado nas variações do campo magnético devidas a variações de susceptibilidade dos materiais terrestres causadas por processos geológicos, o campo esperado h_E deverá explicar todas as outras contribuições que não geológicas (variação normal devida a latitude e longitude, variação diurna e topográfica). Diferentemente da gravimetria, na magnetometria, não há vários tipos de anomalia como ar livre, Bouguer, etc. No entanto, quando se mede o campo total em módulo, não se sabe a sua direção direta ou indiretamente, uma vez



que não se sabe nem o módulo e nem a direção do campo total anômalo $\Delta \vec{h}$.

Na ilustração acima, h_{obs} é o campo observado e h_E é o campo geomagnético corrigido para as variações diurna e topográficas (matematicamente é indiferente se subtraem essas correções de h_{obs} ou se soma a h_E). Conforme assinalado anteriormente, no caso de $|\Delta \vec{h}| \ll |h_E|$ (o que é em geral satisfeito), o ângulo θ (teta) é pequeno e a direção de medida h_E , de modo que a equação (3.2) assume a forma escalar:

$$\Delta t(\vec{r}) = |\vec{h}_{obs}(\vec{r})| - |\vec{h}_E(\vec{r})| \quad (\text{equação 3.2})$$

onde, $\Delta t(\vec{r})$ é a anomalia de campo total e é positiva se o vetor Δt (resultante da projeção do campo total anômalo Δh na direção de h_E) tiver o mesmo sentido de h_E . Se Δt e h_E tiverem sentidos opostos, $\Delta t(\vec{r})$ é negativo.

Vale assinalar, que a análise dos resultados da prospecção geofísica demanda de um exame dos problemas abordados e dos meios de sua solução. Para essa análise consideram-se, ainda, as características da região onde a prospecção foi realizada. Nessa análise, muito importante para que se conheça as limitações da geofísica, podem ser envolvidos o problema di-

reto e o problema inverso. No primeiro (problema direto), o efeito do modelo (seja um modelo representado pela equação “ $y = ax + b$ ”, sendo a e b parâmetros constantes), é , calculado a partir dos valores dos seus parâmetros, enquanto no segundo (problema inverso ou *inversão*), os valores do parâmetros do modelo, causa de um determinado efeito, são procurados, usando-se medidas desse mesmo efeito (figura 3.1).

Para o entendimento do problema direto referente ao cálculo do campo magnético, o problema direto magnético, na sua forma mais geral, pode ser expresso pela equação (3.3), abaixo, para o potencial:

$$w(\vec{r}) = - \int_v \vec{m}(\vec{r}') \nabla \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dv \quad (\text{equação 3.3})$$

e, pela equação (3.4) para o campo magnético na direção α :

$$h_2 = \left| \vec{h}_2 \right| = \hat{\alpha} \nabla \int_v \vec{m}(\vec{r}') \nabla \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dv \quad (\text{equação 3.4})$$

sendo ∇ (naba) o operador diferencial que produz o gradiente e r e r' , as distâncias do potencial magnético em um ponto na origem e fora da origem que dista de um dipolo; dv é o elemento de volume e \vec{m} é o vetor magnetização; $\hat{\alpha} \cdot \nabla$ é a derivada direcional na direção $\hat{\alpha}$.

Assim, como na gravimetria, a finalidade do problema direto é a obtenção do campo produzido por uma dada distribuição de propriedade física (susceptibilidade magnética no caso). Esse campo será subtraído da anomalia magnética (após as correções normal, diurna e topográfica bem como após o processamento) de modo que o resíduo deixado após a subtração seja o menor possível.

As integrais 3.3 e 3.4 só têm solução em forma fechada para alguns casos particulares como por exemplo formas geométricas simples e magnetização constante (Luiz & Silva, 1995).

Os problemas inversos mais simples e bem compreendidos envolvem modelos que podem ser representados por uma função linear (expressão apresentada acima) que, conseqüentemente forma a base da teoria de inversão formal (Luiz & Silva, 1995). A solução dos problemas lineares ou linearizados pode ser desenvolvida através dos métodos dos mínimos quadrados, mínimos absolutos, máxima verossimilhança, máxima a “posteriori” e ajuste m; enquanto os problemas não lineares podem ser linearizáveis através de sua expansão em série

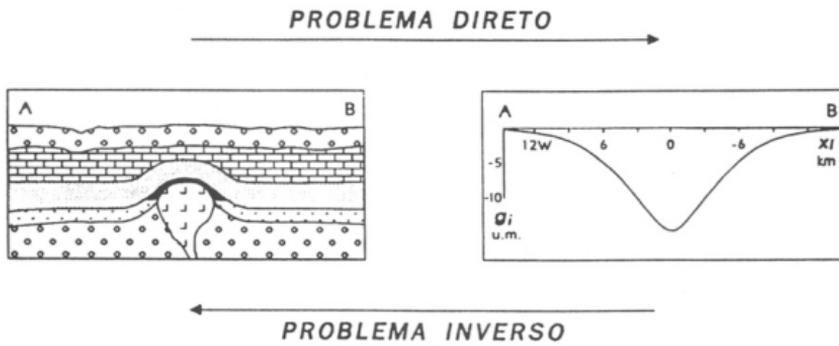


Figura 3.1 - Problema direto *versus* problema inverso (segundo Luiz & Silva, 1995)

de Taylor e sua solução buscada pelos métodos Gauss-Newton, Gradiente, Marquardt e Monte Carlo (Luiz & Silva, 1995).

Na resolução dos problemas inversos são inerentes certas dificuldades, entre elas a mais séria para os trabalhos geofísicos é a ambigüidade, que é a possibilidade de se poder construir mais de um modelo, cujo efeito magnético se ajuste aos dados observados.

Os fundamentos sobre a teoria dos potenciais podem ser observados em detalhe em Luiz & Silva (1995), Dobrin (1976) e Grant & West (1965), que envolvem os seguintes itens, abaixo:

Momento e Força Magnética

Campo Magnético

Potencial Magnético

Relações de Laplace e Poisson.

A utilização dos dados magnéticos em uma área, é feita a partir da interpretação das anomalias magnéticas que podem se visualizadas nos mapas de campo total e mapas tratados com filtros, entre eles, a primeira derivada vertical, continuação para cima e susceptibilidade magnética aparente.

3.2 – Levantamentos e procedimentos

Foi feita inicialmente uma interpretação qualitativa dos mapas originais da magnetometria de campo magnético total confeccionados pela CPRM a partir de dados do Projeto Aerogeofísico Itatira (NUCLEBRÁS, 1977), apresentando as informações técnicas ilustradas no Quadro 3.1. Em seguida foram geradas informações para os levantamentos terrestres de geofísica, envolvendo principalmente individualizações de corpos e alinhamentos estruturais.

No levantamento terrestre foi realizada uma seção regional com cerca de 40 km de extensão no sentido leste-oeste e norte-sul, com espaçamento entre estações de 1km. Para este levantamento foi utilizado um magnetômetro Geometrics G-816. As estações foram executadas tomando como base um RN número existente na ombreira oeste na ponte da UFC no Campus do Pici, obedecendo um intervalo de tempo de 2 em 2 horas para leitura, para correção do "drift". Nesse levantamento, seção Mucuripe - Caucaia (início da BR-020) - Pão de

QUADRO 3.1

INFORMAÇÕES TÉCNICAS

| CARACTERÍSTICAS | ESPECIFICAÇÕES |
|--|------------------------|
| Aeronave usada | Prefixo PP-CCM DC-3 |
| Escala vertical do perfil analógico | 100 γ / pol |
| Radar altimétrico | TRT - AHV 8 |
| Intensidade média do campo magnético terrestre | 26 900 γ |
| Câmara fotográfica | 35 mm |
| Sistema digital de aquisição de dados | Geometrics G-70 |
| Gravador de fita 1300 | Digi data 1137-8 IRKWE |
| Sistema de navegação DOPPLER | Bússola SPERRY C-112 E |
| Direção das linhas de vôo | N-S |
| Espaçamento das linhas de medida | 500 m |
| Espaçamento das linhas de controle | 16 km |
| Altura média de vôo | 150 m |
| Espaçamento médio entre medidas - Escala aproximada do filme | 1:12.000 |
| Escala vertical do perfil altimétrico | 60 m/cm |
| Tempo de integração digital | 1 seg. |
| Escala horizontal do perfil altimétrico | 1:7.600 |
| Magnetômetro de prótons | G-803 |
| Precisão do magnetômetro | 0.5 gamas |
| Gamaespectômetro | Exploranium DIRGS-3001 |
| Sistemas de cristais detetores (3 conjuntos) | 1.017,87 pol. |
| Sistemas automático de estabilização do espectro | Exploranium MSS 3002 |
| Época do levantamento | 77 |

Açúcar Pacanduba (BR-020), foram realizadas 28 estações magnéticas (conforme podem ser visualizadas no mapa de localização (intercalado no texto na página seguinte).

Esse levantamento terrestre, restrito em relação ao levantamento aeromagnético, teve seus dados tratados, procedendo as correções necessárias, para eliminar as variações devidas a causas como a variação diurna e o desnível dos pontos de amostragem, e, filtragem para eliminar efeitos geológicos indesejáveis, como os produzidos de heterogeneidades próximas da superfície ou a interferência entre fontes rasas e profundas, permitindo um melhor reconhe-

cimento das anomalias. Para os levantamentos terrestres dois procedimentos podem ser empregados na correção de variação diurna, um procedimento, com utilização de dois magnetômetros sendo um fixo, em estação de base, para registros do campo magnético continuamente e/ou em intervalos de 5 a 15 minutos, e, outro magnetômetro, utilizado para medir o campo nas diversas estações; e, o outro procedimento, quando só há disponibilidade de apenas um magnetômetro, é utilizada uma estação do levantamento que é reocupada periodicamente em intervalos de 2 a 3 horas, sendo a variação nas medidas obtidas nessa estação distribuída linearmente com o tempo, para correção do "drift", à similaridade do instrumento de gravimetria.

Para as correções neste tratamento de dados magnéticos terrestres foi apenas executada a correção diurna, não sendo necessárias as correções: a) correção topográfica, pois a área do levantamento terrestre é restrita, relativamente plana e o conhecimento pelo intérprete da topografia para separação qualitativa dos efeitos causados pela topografia daqueles produzidos por feições geológicas; e, b) correção de latitude, não recomendável no levantamento (pouco extenso), podendo ser realizada subtraindo-se, das medidas, o valor do campo normal da Terra, representado pelo IGRF ("International Geomagnetic Reference Field").

No tratamento da correção diurna "drift", a variação nas medidas obtidas na estação de base, foi distribuída linearmente com o tempo, tomando-se, na curva criada com os valores da base, uma linha da média desses valores, onde acima da linha subtraia-se e abaixo somava-se ao valor de cada estação de campo.

Nos estudos da seção magnética terrestre estão caracterizados suaves relevos magnéticos, característicos do embasamento metamórfico, ocorrendo a poucos quilômetros a oeste do Mucuripe, na área da localidade de Meireles, um baixo magnético resultado de efeito de influência de lixo férreo metropolitano e destacando-se uma anomalia bipolar na parte sul da seção.

3.3 - Tratamento dos Dados

Neste método, o tratamento envolveu os dados do levantamento terrestre e os dados do levantamento aeromagnético do Projeto Itatira da NUCLEBRÁS, cujo processamento digital foi executado pela LASA em 1977. O tratamento do levantamento terrestre consistiu na confecção da curva do "drift" para cálculo da correção instrumental e variação diurna e obtenção dos valores em nT (ou gama). A partir daí, foi possível preparar uma planilha com os

valores, para preparação de perfil magnético e sua interpretação. Esse tratamento foi referenciado no item acima pela restrição do levantamento magnético terrestre abrangeu apenas uma seção.

Para o tratamento dos dados aeromagnéticos, desenvolvidos no âmbito da CPRM/Fortaleza, foi executado um conjunto de procedimentos relativo ao geoprocessamento desses dados, utilizando-se o “software” Oásis Montaj, versão 4.1c da Geosoft. Para execução desses procedimentos para o tratamento dos dados aeromagnéticos foi obedecida a seguinte ordem de raciocínio:

- Criação de arquivo XYZ (este arquivo apresenta todos os dados aeromagnéticos);
- Criação de uma área de trabalho do “software” Oásis Montaj (“*Workspace*”);
- Importação dos dados (arquivo XYZ) para o banco de dados criado (“*Database*”);
- Apresentação e exibindo os dados na janela da planilha;
- Processamento dos dados na planilha (verificação de ruídos);
- Exibição de Perfis (para análise);
- Criação e cópia de um novo canal do banco de dados;
- Editando um canal do banco de dados (mag);
- Seleção dos dados a serem processados (criando um novo mapa, especificando um Gabarito de aparência de mapa, em opcional, e criação de um mapa base);
- Plotação das linhas do levantamento e dos perfis;
- Criação de mapa de projeção (para utilização nas gridagens);
- Gridagem dos dados;
- Exibição do “grid”;
- Plotação de contornos;
- Criação do menu MAGMAP, através da rotina executável GX (procedimento utilizado para correção da componente ruidosa, através do filtro direcional cosseno “dcos” e aplicação dos demais filtros de primeira derivada, continuação para cima e susceptibilidade magnética para criação de novos grids); e,
- Criação de mapas e plotação dos grids gerados e contornos.

Nesse processamento procurou-se analisar cada perfil magnético, valores estatísticos, estudo da gridagem, filtragem, confecção da imagem e linhas de contorno. Nas imagens obtidas foi executado o trabalho de interpretação qualitativa para elucidação das principais feições

estruturais e relacionadas aos processos tectônicos reconhecidos na região, e também, determinação dos corpos de natureza intrusiva, e caracterização magnética dos litótipos.

No tratamento dos dados aeromagnéticos utilizando-se o “software” Oásis Montaj, versão 4.1c, cujos procedimentos acham-se relacionados acima, foram observados os parâmetros dos valores magnéticos, perfis, valores estatísticos e, também, direção de linhas de vôo, espaçamento da linha de vôo e comportamento das fiduciais.

3.3.1 – Criação de banco de dados

Para criação do banco de dados em arquivo XYZ, através do “software” Oásis Montaj, foram utilizados os arquivos do aerolevanteamento geofísico, abrangendo e observando-se as linhas de vôo e fiduciais. Esses arquivos xyz foram oriundos do acervo geofísico da CPRM/Digeof/Rio de Janeiro, cujo tratamento de dados na parte de correções do levantamento aerogeofísico já fora executado em época passada (1977).

3.3.2 – Relação dinâmica de dados, valores estatísticos, perfis magnéticos e gridagem

Após a criação do banco de dados, foi executado o procedimento “relação dinâmica dos dados” para verificação da correspondência e interação dos perfis e fiduciais, linhas de vôo, valores estatísticos, e também, a relação com os diversos litótipos ocorrentes na região.

O exame de todos os perfis permitiu relacionar o comportamento das anomalias com os conjuntos litológicos e, permitiu, também, selecionar e excluir segmentos restritos que apresentavam ruídos de linhas de vôo e verificar os valores estatísticos dessas linhas.

A análise desses perfis permitiu, além de assinalar sua correspondência junto aos domínios litológicos, registrar os corpos anômalos e, também, as assinaturas magnéticas de prováveis alinhamentos de falhas e/ou fraturas.

3.3.3 – Filtragem e componente ruidosa

No tratamento dos dados magnéticos foram utilizados diversos filtros específicos para a eliminação de ruídos e geração de mapas.

Entre os filtros utilizados apenas o filtro de susceptibilidade magnética aparente que corresponde a um filtro composto faz a redução ao polo. Ademais, a redução ao polo auxilia na interpretação dos dados magnéticos, permitindo que se localize mais facilmente a posição das fontes das anomalias e evidenciando a existência de magnetização remanescente. A variação na forma das anomalias magnéticas torna complexa a análise dos dados, podendo ser contornada transformando-se os dados originalmente coletados em qualquer latitude, para a latitude onde a inclinação do campo é 90° (polo magnético). Com a transformação os dados podem ser analisados como se tivessem sido coletados no polo, onde a magnetização induzida pelo campo (é necessário que se conheça a direção de magnetização da fonte da anomalia) tem a direção vertical, à semelhança do campo gravitacional. Esses filtros são apresentados à seguir:

- Filtro Coseno Direcional (DCOS)

Este filtro é aplicado para neutralização da componente ruidosa. Com o seu emprego, cria-se um grid de erros, que é empregado na expressão:

$$\text{grid final} = \text{grid inicial} - \text{grid de erros}$$

Vale ressaltar, que os dados magnéticos desnivelados conduzem a uma distorção causada por ruídos no tratamento de dados, que precisam ser corrigidos segundo a direção evidenciada, chamada de componente ruidosa. Para a correção dessa componente foi aplicado o filtro coseno direcional - *Dcos*.

Este filtro (*DCOS*) é muito utilizado na remoção dos aspectos direcionais da grade estabelecida, onde a função coseno faz com que o filtro seja suave de modo que não ocasione problemas de vibrações direcionais.

Na aplicação desse filtro, os seguintes parâmetros se fazem necessários: a) determinação da direção do filtro em graus (0-360, relativo ao norte), escolhida na direção perpendicular às linhas de vôo. No caso, da área em questão foi utilizada a direção no ângulo de 90 graus; b) grau da função coseno. No caso em questão foi utilizada a potência 1. Vale acrescentar que se for omitido, é utilizado grau 2 para um rolamento proporcional ao quadrado do coseno; c) aplicação do filtro para passar a direção especificada. Utiliza-se um filtro tipo "band-pass";

- Filtro de Primeira Derivada (Derivada Vertical-*DRVZ*)

Este filtro é utilizado para gerar Mapa Magnético de primeira Derivada, para realce das assinaturas de corpos mais superficiais. A derivada vertical é normalmente aplicada aos dados de campo magnético total para realce das fontes geológicas mais rasas dos dados. Na aplicação desse filtro, que destaca os componentes do aspecto com número de onda alto, frequentemente é utilizado, também, filtros passa baixa para remover o ruído de alto número de onda. O parâmetro utilizado foi 1, ordem da derivada;

- Filtro Continuação para Cima (*CNUP*)

É utilizado para gerar o Mapa Magnético de Continuação para Cima, relacionado ao tratamento de dados da área em apreço para remover ou minimizar os efeitos de fontes rasas e ruídos em grades.

Este filtro é considerado um filtro limpo porque ele não produz praticamente nenhum efeito colateral que necessite de outros processos para corrigi-lo, podendo os dados resultantes (continuados para cima) serem interpretados numericamente e utilizados em programas de modelagem, o que não ocorre com a maioria dos dados filtrados com outros processos.

Utilizou-se o parâmetro h , distância entre o plano de observação e a altura da continuação, nos valores de 1 metro, 150 m, 250 m, 500 m, 1000 m 2000 m, 5000 m e 10000 metros para poder fazer-se uma análise do comportamento do campo e das fontes mais profundas com a continuação.

- Filtro de Susceptibilidade Magnética Aparente

Este filtro empregado para gerar o Mapa de Susceptibilidade Magnética Aparente, correspondendo a um filtro composto que faz a redução ao polo e continuação para baixo na profundidade da fonte, correção para o efeito geométrico de um prisma vertical com base quadrada e divisão pelo campo magnético total para fornecer a susceptibilidade.

3.3.4 – Mapas magnéticos gerados

Nesse tratamento de dados, foram gerados os mapas magnéticos de campo total, primeira derivada, continuação para cima, e susceptibilidade magnética aparente (intercalados no texto nas páginas seguintes).

3.4 - Interpretação e discussão dos dados aeromagnéticos

3.4.1 - Comentários e representatividade

Nos estudos de interpretação qualitativa magnética, foram analisados os mapas magnéticos, campo total, primeira derivada, continuação para cima e susceptibilidade magnética aparente e preparados os mapas de interpretação magnética de campo total, primeira derivada, continuação para cima e susceptibilidade magnética aparente (intercalados no texto nas páginas seguintes, sendo o de campo total intercalado no capítulo “integração dos dados”). Nesses estudos foram estabelecidas a caracterização dos domínios magnéticos regionais e alinhamentos e observado o comportamento regional magnético de Monteiro & Sinclair (1996; figura 3.2).

Nos estudos do mapa do campo magnético total interpretado estão caracterizados duas unidades magnéticas M1 e M2 com suas respectivas subunidades magnéticas M1a e M2a. Essas unidades estão assim distribuídas: M1 envolvendo a faixa central na direção NE-SW da região metropolitana de Fortaleza e M2 abrangendo as áreas dos cantos NW e SE dessa região metropolitana. Os limites entre essas duas unidades magnéticas estão estabelecidas por alinhamentos magnéticos na direção NE-SW, muito marcante em alguns setores da região, a exemplo dos limites ao sudeste de Itaitinga e região de Guaiúba, situados no canto sudeste da região e, também, a exemplo do alinhamento que se estende no limite das áreas das praias de Icarai e Tabuba, situado no canto noroeste da região metropolitana de Fortaleza.

Distintos no mapa magnético de campo total, são os baixos magnéticos caracterizados na subunidade magnética M1a, expostos nas serras do Maranguape da Aratanha, Itaitinga, do Juá e morro da Manguba, entre outras, representadas por rochas granitóides, em correspondência aos conjuntos litológicos que se mostram de forma alongada na direção NE-SW.

Estão caracterizados nos mapas magnéticos de campo total e continuação para cima isogamas com baixos magnéticos posicionados freqüentemente ao sul das anomalias bipolares o que estabelece corpos de mergulho, nesse caso da estruturação regional, para o sudeste.

Vale ressaltar, que a faixa central de M1, intensamente mobilizada, mostra marcante anomalias de M1a com marcantes baixos magnéticos na serra do Maranguape que se diluiu para o nordeste, com anomalias mais esparsas até a área do porto do Mucuripe, onde constitui um corpo anômalo.

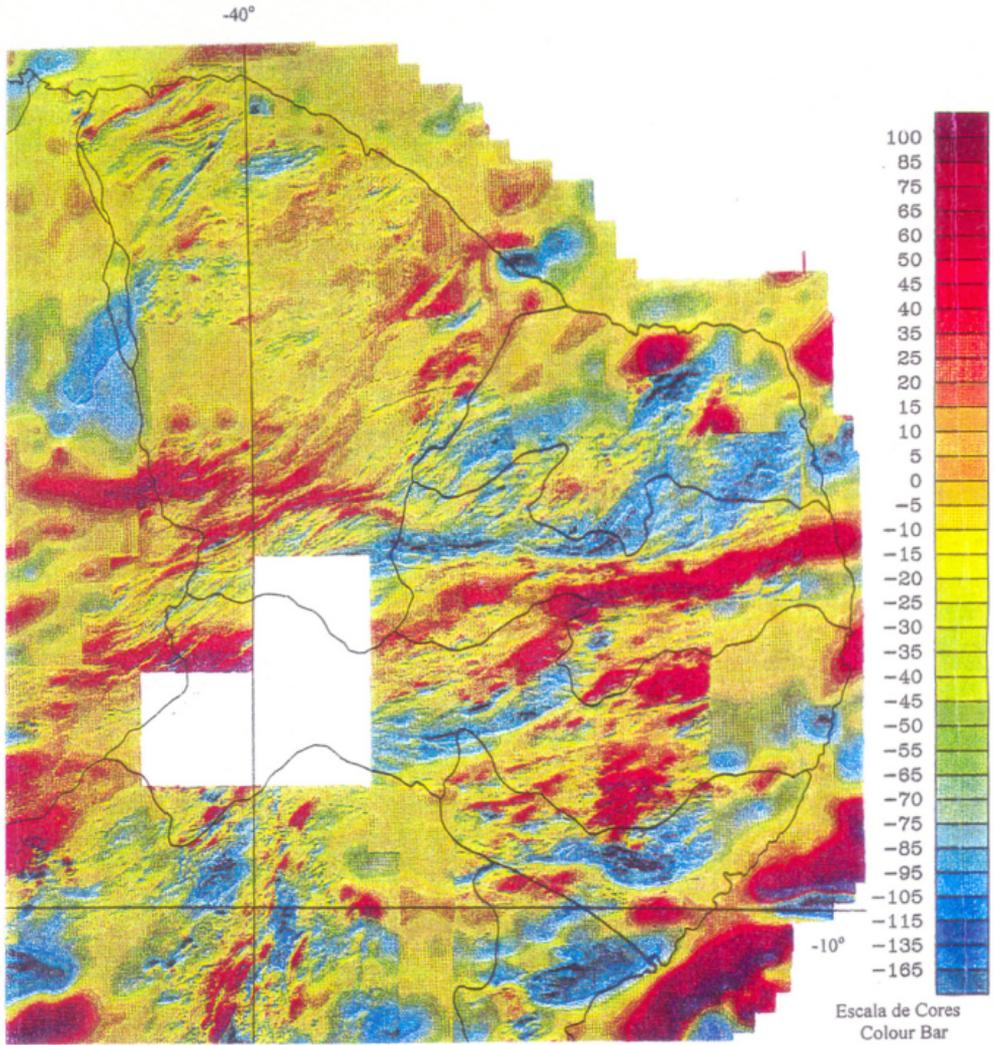


Figura 3.2 - Apresentação de mapa aeromagnético de campo total, relevo sombreado (segundo Monteiro & Sinclair, 1996), parte nordeste onde se destacam os principais alinhamentos estruturais regionais.

$$g = G \int \frac{dM}{r^2} \quad (\text{equação 4.6}),$$

sendo dM e, $r = |r_1| - |r_2|$, (Luiz & Silva, 1995).

No entanto, devido ao seu movimento de rotação e ao referencial de observação a Terra está sujeita a uma força centrífuga, que depende do raio de rotação (ℓ) e da velocidade angular (ω). A equação abaixo (Luiz & Silva, 1995), define a aceleração centrífuga associada a essa força

$$a_c = \omega^2 \ell \quad (\text{equação 4.7}).$$

O resultado dos efeitos gravitacionais e centrífugos transformam a Terra em um elipsóide. Devido à intensidade da aceleração de atração ser muito maior do que a centrífuga, o corpo é atraído para o centro da Terra, com uma aceleração resultante, denominada de gravidade, cuja intensidade é calculada por (Luiz & Silva, 1995).

$$g = G \int \frac{dM}{r^2} - \omega^2 \ell \cos \theta \quad (\text{equação 4.8}),$$

sendo θ a latitude em que se encontra o corpo e g o vetor gravidade que define o campo gravitacional terrestre.

Para prever-se as variações na atração gravitacional causada pela rotação e pelo formato esférico da Terra, foi estabelecida uma expressão teórica para a atração gravitacional na superfície de um modelo de referência da Terra, calculada pela Fórmula Internacional da Gravidade, em 1930. A União Internacional de Geodésia e Gravimetria adotou uma nova fórmula, denominada de GRS-67 (Geodetic Reference System-1967, in Luiz & Silva, 1995):

$$g = 978,031846 (1 + 0,005278895 \text{ sen}^2 \theta + 0,000023462 \text{ sen}^4 \theta) \quad (\text{equação 4.9}),$$

onde θ é a latitude e g representa a aceleração normal da gravidade em gal na superfície do elipsóide de referência.

Mais recentemente o IAG tem adotado o "Geodetic Reference System" (1980), e o "World Geodetic System" (1984), que é dado pela seguinte equação (Blakely, 1995).

$$g_o = 9,7803267714 \frac{1 + 0,00193185138639 \operatorname{sen}^2 \lambda}{\sqrt{1 - 0,00669437999013 \operatorname{sen}^2 \lambda}} \quad (\text{equação 4.10})$$

onde g_o é a gravidade teórica ou gravidade normal. e λ é a latitude geodésica sobre o elipsóide.

A unidade de aceleração no sistema cgs, cm/s^2 , é denominada de **Gal** em homenagem a Galileu. Na prospecção de materiais geológicos são usados nas medidas geofísicas os submúltiplos miliGal (abreviado para mGal) cujo valor é 10^{-3} Gal, e unidade de gravidade (**gravity unity**) – abreviado para gu, igual a 10^{-4} Gal. A necessidade de utilização desses dois submúltiplos do Gal é conseqüência dos valores de gravidade relacionados aos corpos mineralizados e às estruturas acumuladoras de petróleo, são muito pequenos.

As pesquisas gravimétricas, normalmente, são reduzidas usando-se como referência a superfície média das marés (denominada de geóide), e não a superfície do elipsóide de referência. A fórmula, acima, dá o valor teórico de g para um ponto situado sobre o geóide de referência, devido as variações de topografia e de massa no interior da Terra. Em conseqüência, para se ter o valor de g medido comparado com o valor de g teórico, são necessárias algumas correções (que serão tratadas neste capítulo).

4.2 – Levantamento e procedimentos gravimétricos

O levantamento gravimétrico terrestre, foi executado em seções selecionadas a partir das cartas geológicas e planimétricas, procurando-se o fornecimento de subsídios à solução de problemas relativos à compartimentação tectono-estrutural entre segmentos crustais de rochas de distintos graus metamórficos e a definição de contatos/diferenciações litológicas e tectônicas.

As seções foram feitas com estações espaçadas de 1km, constituindo malha na área central da região em estudo com esse mesmo espaçamento. Nesse levantamento, quando o acesso não permitia à execução de estações em malha com espaço de um 1km, as seções eram de caráter regional com estações com espaçamento superior a 1 km e por vezes tal espaçamento foi diminuído em áreas de maior interesse. No total foram feitas 24 seções em 481 estações de medidas, com uma extensão linear de 495 km (Quadro 4.1).

DISTRIBUIÇÕES DAS SEÇÕES GRAVIMÉTRICAS

Quadro 4.1

| SEÇÃO | NÚMERO "LINE" | BASE | Nº ESTAÇÕES | EXTENSÃO (km) | DIREÇÃO |
|-----------------------------------|------------------|---------|-------------|------------------|-----------|
| Mucuripe –Tucundaba | 90 | C. Pici | 40 | 56,00 | E-W e N-S |
| D. Manuel – Pacajus | 50 | DNER | 29 | 56,00 | N-S |
| Caucaia-Pecém | 101 | C. Pici | 34 | 3,00 | E-W |
| Des. Moreira-Raul Barbosa | 30 | DNER | 20 | 18,60 | N-S |
| Mucuripe-Caça e Pesca | 10 | DNER | 08 | 7,60 | N-S |
| Marinha-Barra do Ceará | 160 | C. Pici | 06 | 5,45 | E-W |
| Av. Rui Barbosa | 40 | DNER | 05 | 4,35 | N-S |
| Av. Oliveira Paiva/Parangaba | 130 | DNER | 15 | 14,00 | E-W |
| Abolição- BR 101 | 20 | DNER | 22 | 21,00 | N-S |
| Barra do Ceará -31 de março | 150 | C. Pici | 19 | 16,15 | E-W |
| Lagoa Parangaba –Barra do Ceará | 131 | C. Pici | 11 | 9,60 | N-S |
| Euzébio-Aquiraz | 21 | | 14 | 13,00 | N-S |
| Anel Rodoviário-CE 04/BR 222 | 100 | DNER | 37 | 35,70 | E-W |
| P. Vieira - Jovita Feitosa | 140 | DNER | 19 | 17,80 | E-W |
| Centro - José Walter - Parajuçara | 60 | DNER | 18 | 16,25 | N-S |
| Parangaba-Centro | 70 | DNER | 32 | 30,60 | N-S |
| Centro-Maranguape | 80 | DNER | 32 | 31,00 | N-S |
| Cambeba-Cofeco-Prainha | 12 | DNER | 29 | 25,80 | N-S |
| BR222- Tabapuá | 110 | C. Pici | 15 | 14,00 | N-S |
| Iparana-Cumbuco | 120 | C. Pici | 27 | 25,65 | N-S |
| Cofeco-Sabiaguaba | 11 | DNER | 9 | 7,95 | N-S |
| Caucaia-Garrote - Tab. Grande | 103 | C. Pici | 24 | 23,00 | E-W |
| Garrote/BR 222 | 102 | C. Pici | 8 | 7,00 | E-W |
| Prainha-Aquiraz | 22 | DNER | 8 | 5,60 | E-W |
| Total | | 24 | 481 | | |

Para execução deste levantamento foi utilizado o gravímetro tipo Worden modelo Scintrex CG-2, com precisão de 0,1 mgal e constante do aparelho de 0,09888 mgal (figura 4.1). No levantamento foram consideradas duas bases secundárias (Campus do Pici e DNER) e uma principal (Aeroporto Pinto Martins) onde há uma base gravimétrica absoluta do Observatório Nacional com valor Bouguer (AB) de 19,1 mgal e valor Ar Livre (AL) de 21,9 mgal, discriminadas a seguir:

Base do Aeroporto - RN 465N com altitude 20,66 m;

No contexto da neotectônica, são caracterizados marcantes alinhamentos de falha na região nordeste de Fortaleza, que tenham sido reativados, pelo menos a 30 m.a. (Oliveira & Castelo Branco, 1997), e, influenciados na estruturação do embasamento e conseqüente efeito no arcabouço atual.

São caracterizados, ainda, marcantes alinhamentos na direção NW-SE com sentido de movimento dextrógiro, a exemplos dos que ocorrem nas áreas ao norte de Amanari e Guaiúba, favoráveis à prospecção de água subterrânea.

3.4.2 - Análise das anomalias e caracterização das unidades magnéticas

Na Região Metropolitana de Fortaleza, o estudo magnético permitiu caracterizar e identificar uma faixa central na direção NE-SW, intensamente mobilizada, circunvizinhada e contínua a setores menos movimentados, constituída, principalmente pela unidade magnética M1 e limitada por amplos alinhamentos de zona de cisalhamento, somando-se corpos individualizados com intensos eixos magnéticos, que caracterizam a subunidade magnética M1a. Nos limites que caracteriza a unidade magnética M1, são distintos uma mudança de relevo magnético, onde em M2 distribui-se um padrão magnético suave, característica de representantes litológicos do embasamento.

Essas anomalias com formas alongadas na direção NE-SW, apresentam isogamas de valores que alcançam até -74 nT, estabelecendo a subunidade magnética (M1a) que corresponde litologicamente às áreas de granitóides de natureza intrusiva, que são destaques na porção central da região.

Em alguns setores da região as anomalias mostram feições semi-sigmodais, conseqüência de alinhamentos na direção NE-SW e NW-SE, este último com deslocamento no sentido dextrógiro a exemplo da serra do Juá e sudoeste do serrote Japarana. Sua correspondência litológica, comparadas com outros padrões litológicos no Estado do Ceará (Oliveira, 1993), mostra-se marcada por litótipos granitóides (ácidos) de natureza intrusiva.

Dentro dessa área representada pela unidade magnética M1 destacam-se isoladamente algumas anomalias (M1a) com evidência de corpos rochosos individualizados a exemplos das ocorrências na localidade de Mucuripe e entre Messejana-Euzébio.

3.4.3 – Análise dos baixos e altos magnéticos

As anomalias magnéticas mostram valores que podem ser representados por altos e baixos magnéticos, no caso das anomalias dipolares e, isoladamente, por alto ou baixo magnético, no contexto da susceptibilidade magnética da unidade litológica em realce.

São marcantes na região a distribuição alongada de altos e baixos magnéticos na mesma direção da estruturação regional NE-SW e frequentemente ao longo dos alinhamentos de zona de cisalhamento ou falha.

3.4.4 – Hierarquia dos alinhamentos magnéticos

No contexto de hierarquia dos alinhamentos magnéticos que estabelecem alinhamentos de zona de cisalhamento ou falha, são presentes dois importantes “trends”, um na direção nordeste-sudoeste e outro, nordeste-sudeste, este último com sentido de movimento dextrógiro e mais recente, de regime, no contexto da geotectônica, frágil. Um terceiro alinhamento magnético caracteriza-se no setor centro-leste da região, onde se mostra restrito e interrompido pelo alinhamento NE-SW, evidenciando ser mais antigo nessa área.

CAPÍTULO 4 - MÉTODO GRAVIMÉTRICO

4.1 - Considerações Gerais

O método Gravimétrico, assim como o Método Magnético, com explicação ligada à teoria dos potenciais, teve seu uso na prospecção geológica iniciado em 1902 na Hungria com Eötvös através de um instrumento, de sua autoria, para medir as componentes horizontais do gradiente da aceleração da gravidade (balança de torção). Nos anos 30, com o aparecimento na prospecção geológica de um instrumento mais portátil, deu-se novo impulso à gravimetria.

A sua aplicação ao estudo da subsuperfície terrestre tem como base o princípio onde as diferentes distribuições de densidades abaixo da superfície provocam distorções no campo gravitacional que envolve a Terra.

Os domínios geológicos ou depósitos de minerais, em geral, deixam registros (chamados anomalias gravimétricas) no campo gravitacional da Terra, que podem ser obtidos por dados, através de uma prospecção gravimétrica, a qual envolve a medida de variações na magnitude do campo gravitacional na superfície da Terra. Essa magnitude depende dos fatores latitude, altitude, topografia do terreno, níveis de marés e variação lateral na densidade.

Os levantamentos gravimétricos para prospecção geológica podem ser executados na superfície dos terrenos, em poços, ou túneis de minas, nas áreas cobertas por água e restritamente com instrumentos em aeronaves.

Será dado, a seguir, restrita explanação sobre os fundamentos que regem a gravimetria.

Concernente aos fundamentos do Método Gravimétrico, a sua aplicação envolve diretamente a atração de massas, visto que nos levantamentos com esse método, mede-se a atração que as massas da subsuperfície exercem sobre uma massa localizada no instrumento medidor. A atração entre massas é estabelecida pela Lei de Newton,

$$F = G m_1 m_2 / r^2 \quad (\text{equação 4.1}),$$

onde F é a Força de Atração;

m_1 e m_2 são duas partículas de massas m_1 e m_2 ;

G é a constante de atração, com valor de $6,67 \times 10^{-8}$ dina.cm²/g² no sistema cgs.

E, também, a aceleração (g) com que m_1 é atraída por m_2 é calculada pela Segunda Lei de Newton,

$$g = F/m_2 = G m_1 / r^2 \quad (\text{equação 4.2}).$$

Para massas distribuídas continuamente sobre volumes de grandes dimensões deve-se dividi-las em pequenos elementos de dimensões infinitesimais e somar os efeitos de cada um desses elementos. Um corpo de massa m , seria dividido em diminutos elementos dm , cada um, envolvido por um diminuto elemento de volume dv , com distribuição de densidade ρ (Luiz & Silva, 1995), onde

$$dm = \rho dv. \quad (\text{equação 4.3}).$$

Pela equação acima (aceleração a), a atração exercida pelo corpo seria então obtida, somando-se (ou seja, integrando-se) o efeito de cada elemento por todo volume V , tendo-se então,

$$g = G \int_V dm/r^2 = G \int_V \rho dv/r^2 \quad (\text{equação 4.4}).$$

Relativo ao campo gravitacional terrestre, os corpos colocados na proximidade da superfície terrestre são atraídos com uma aceleração

$$g = GM/R^2 \quad (\text{equação 4.5}),$$

sendo, M , a massa da Terra ($5,983 \times 10^{27}$ g; e, R , a distância entre o centro de massa do corpo que está sendo atraído e o centro da Terra. Se o corpo está na superfície, R é o raio da Terra. Tratando-se que a Terra não é perfeitamente de forma esférica (o raio polar é menor que o raio equatorial), as grandezas (elementos) força e aceleração exercidas sobre o corpo variam ao longo da superfície, e crescem a partir do Equador, em direção aos polos; tendo essa variação da aceleração causada pela variação do raio, cerca de $1,6 \text{ cm/s}^2$. A força de atração e aceleração são quantidades vetoriais que definem campos.

A distribuição de densidade no interior da Terra não é perfeitamente homogênea (Luiz & Silva, 1995, Grant & West, 1965, Dobrin, 1976), logo, torna-se mais apropriado pelos conceitos desses autores, substituir a equação 4.5 pela equação:



Figura 4.1 – Utilização do gravímetro *Worden* modelo CG-2, na obtenção de leituras, na Região Metropolitana de Fortaleza. Local: Topo do morrote Caruru, área da foz rio Pacoti.

Campus do Pici - RN 516R com altitude 11,54 m; e

DNER - RN 962P com altitude 18,17 m.

Vale ressaltar que, para efeito de correções, foi executado concomitantemente a este levantamento, um levantamento barométrico para determinação das altitudes absolutas das estações utilizando-se um altímetro Paulin, com precisão de 2m. A partir de uma base estabelecida em uma RN (516R, Campus do Pici ou 962P, DNER) conhecida de número (IBGE), foram tomadas leituras nas diversas estações com retorno à base em intervalos repetidos de 2 horas concomitantes ao levantamento gravimétrico. As formulações e correções desses levantamentos estão discernidas em itens abaixo. São apresentados abaixo os cálculos de erro e precisão dos levantamentos gravimétricos e altimétricos (tabelas 4.1 e 4.2). A precisão do levantamento gravimétrico de $\pm 0,6181$ mgal com constante do aparelho de 0,0988 permite justificar intervalo das curvas isogálicas de 1 mgal. Ademais, a precisão do levantamento altimétrico de $\pm 2,8$ m pode ser justificado pela constante de intervalo de divisão do altímetro de 2 metros.

4.3 - Tratamento dos Dados

O tratamento dos dados do levantamento gravimétrico na Região Metropolitana de Fortaleza, consistiu em parte operacional não informatizada e parte informatizada envolvendo a montagem de um banco de dados e o geoprocessamento para geração de imagens.

A parte operacional não informatizada envolveu a construção de curvas para correção do “drift” (deriva) utilizadas nas reduções dos mapas gravimétricos, necessário na geração do mapa Bouguer final da região. Essa parte envolveu, também, a construção de curvas de variação diurna altimétrica para correções dos valores de altimetria obtidos no campo, para determinação do valor absoluto de altitude para cada estação.

O tratamento informatizado dos dados gravimétricos, após os cálculos das correções de Ar-Livre e Bouguer necessários à determinação do valor Bouguer de cada estação, foram executados utilizando-se os dados via planilha Excel para preparação de banco de dados, por perfis e estações e transportado em colunas X Y Z para o “software” Oásis Montaj versão 4.1c

Tabela 4.1 - Cálculo de precisão do levantamento gravimétrico

| Somatório (δ^2) DE | Número de Leituras | Número de Estações | Erro do Levantamento (DE) | Precisão do Levantamento (mgal) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 234,46 | 12 | 6 | $\pm 2,55$ | $\pm 0,6181$ |

Erro

$$E = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n-m}} = \sqrt{\frac{234,46}{6}} = \pm 6,2511 \text{ (DE)}$$

sendo,

E – erro

 δ - desvio do valor médio ($\delta = X_i - \bar{X}$)

n – número de leituras repetidas

m – número de estações envolvidas no cálculo

Precisão do Levantamento Gravimétrico

$$* 6,2511 \times 0,09888 = \pm 0,61810 \text{ mgal}$$

Tabela 4.2 - Cálculo de precisão do levantamento altimétrico

| Somatório (δ^2) DE | Número de Leituras | Número de Estações | Precisão do Levantamento (metros) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|
| 47,64 | 12 | 6 | $\pm 2,8$ |

Erro e precisão

$$E = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n-m}} = \pm \sqrt{\frac{47,64}{6}} = \pm 2,8m$$

sendo,

E – erro

 δ - desvio do valor médio ($\delta = X_i - \bar{X}$)

n – número de leituras repetidas

m – número de estações envolvidas no cálculo

da Geosoft, em procedimentos similares aos utilizados nos dados magnéticos. Nesse “software” foram analisados os valores estatísticos e preparados os “grids” para geração do mapa de anomalia Bouguer com linhas de contorno de 1 mgal. No mapa Bouguer obtido foi feita a interpretação qualitativa gravimétrica para os estudos de estruturação e compartimentação geológica da RMF.

4.3.1 - Altimetria

A marcante importância do levantamento altimétrico em trabalhos de gravimetria, conduziu a especial atenção dispensada tanto nos trabalhos de campo quanto no tratamento dos dados.

Obtidos os valores de leitura barométrica (altimetria) das bases ao longo de um dia, sabe-se a diferença de leitura. Essa diferença de leitura denomina-se fator de correção barométrica (FCB) e a partir desses valores constrói-se uma curva de variação diurna do fator de correção barométrico em função do tempo, a qual está definida entre a primeira e última leituras realizadas no dia, tendo uma base de referência para cálculos da altitude absoluta dos estações. A partir dessa base de referência somam-se os valores às leituras das estações estabelecidas e, acima, subtrai-se, numa equação que é função da temperatura e da referida diferença (vide item anterior, achando-se um valor de correção “parcial”).

Para a determinação da altitude absoluta, lê-se sobre a curva de variação diurna (diária) o valor de FCB no horário em que foi realizada a leitura para em seguida somar-se ou subtrair-se, dependendo do sinal do FCB.

4.3.2 - Reduções gravimétricas

Conforme já aventado anteriormente, os dados gravimétricos como obtidos no campo devem sofrer correções, denominadas redução dos dados gravimétricos, constituindo uma rotina bem estabelecida em qualquer pesquisa gravimétrica.

As correções necessárias aplicadas neste trabalho, estão descritas a seguir:

- Correção de Latitude

A correção de latitude é feita para remover o efeito do aumento da gravidade do equador para os pólos. A base para esta correção é a equação determinada pela Associação Internacional de geodésia.

- Correção de Ar-livre

Sabendo-se que a gravidade varia inversamente com o quadrado da distância, é necessário se fazer correção para mudanças nas elevações entre as estações, de modo que todas as leituras de campo sejam reduzidas a uma superfície de referência. Esta correção é conhecida com Ar-Livre, já que a mesma não considera o material existente entre a estação e a superfície de referência de Ar-Livre é estabelecida pela equação.

$$C_{AL} = 0,3086.h \text{ (mGal/m)}^2 \quad \text{(equação 4.11)}$$

onde h é a altura da estação à superfície de referência

- Correção Bouguer

A Correção Bouguer considera a atração provocada pelo material existente entre a estação e a superfície de referência. A Correção Bouguer é estabelecida pela equação

$$C_B = - 0, 0419. \rho.h. \text{ (mGal/m)}^2 \quad \text{(equação 4.12)}$$

onde ρ é a densidade do material, em g/cm^3 , e h a distância da estação à superfície de referência.

- A Correção topográfica ou de terreno

A correção de terreno elimina as variações no campo gravimétrico causadas pelas irregularidades topográficas ao redor da estação considerada. Esta correção não foi realizada no presente trabalho, devido à suavidade do terreno na parte mais costeira na área estudada e os valores corrigidos nas imediações de serra a exemplo do valor estabelecido de 0,147 mgal em uma estação não constituem distorções nesse levantamento.

De posse das correções acima estabelecidas pode-se calcular as anomalias gravimétricas apresentadas:

- Anomalia Ar-Livre (AG_{AL}), estabelecida pela equação

$$AG_{al} = g_{obs} + C_{al} - g \quad \text{(equação 4.13)}$$

onde g_{obs} é o valor medido, C_{AL} é a correção de ar-livre e g o valor teórico da aceleração da gravidade.

- Anomalia Bouguer (AG_b)

Para o cálculo desta anomalia, além da correção ar-livre, também considera-se a correção Bouguer. Assim tem-se:

$$AG_B = g_{obs} + C_{AL} + C_B - g \quad (\text{equação 4.14})$$

onde C_B é a correção Bouguer.

4.3.3 - Cálculo das anomalias

As equações apresentadas acima (4.13 e 4.14) foram utilizadas para calcular as anomalias Ar-livre e Bouguer, respectivamente, o valor de densidade das massas topográficas usado foi de $2,67 \text{ g/cm}^3$ para o embasamento cristalino e $2,5 \text{ g/cm}^3$ para os sedimentos do grupo Barreiras.

4.3.4 - Gridagem e mapa de anomalia Bouguer

Uma vez concluídos todos os cálculos de correções, foram reunidos os dados em um banco de dados para processamento em um "software" que atendesse as necessidades em arquivo xyz. Na preparação desse banco de dados foram criadas uma coluna para seções (tipo "line to line"), uma coluna para estações (tipo fiduciais), as colunas x e y para coordenadas, e as colunas de z (para altitude, valor Bouguer relativo, anomalia Bouguer, anomalia de Ar Livre e gravidade teórica ou gravidade normal).

Com esse banco de dados, foi possível estabelecer um "grid" através do "software" Oásis Montaj versão 4,1c, com procedimento análogo ao tratado nos dados magnéticos. Preparado o "grid", foi gerado um mapa de anomalia Bouguer, com um padrão de cores do próprio "software" (mapa intercalado na página seguinte).

4.4 - Interpretação Qualitativa do Mapa de Anomalia Bouguer

Foi realizada uma interpretação qualitativa sobre o mapa de anomalia Bouguer, com intervalo de 1 mgal , onde foi possível estabelecer duas áreas gravimétricas distintas, unidades gravimétricas $U1$ e $U2$, além de quatro trends estruturais, sendo os principais na direção NE-SW e NW-SE.

Essas unidades gravimétricas, distribuem-se distintamente na região, estando a unidade $U1$, ocupando os setores leste e nordeste da região metropolitana de Fortaleza e a unidade

U2, o setor sudoeste e parte do setor norte (Caucaia-Pecém) da região, tendo como limites os principais alinhamentos gravimétricos. A unidade gravimétrica U1 envolve áreas do embasamento metamórfico com delgada cobertura de sedimentos do grupo Barreiras e sedimentos colúvio-eluviais e a unidade U2 envolve terrenos de rochas granitóides.

A unidade gravimétrica U1, exibe, em destaque, no setor nordeste de sua área de abrangência, um domínio de isogálicas que sugere uma área intensamente remobilizada, com alto gradiente gravimétrico, alcançando até 32 mgal e, achando-se presente o sistema estrutural E-W cortando o "trend" NE-SW e localmente o "trend" NW-SE. Essa unidade U1 exibe ainda em destaque no setor norte-noroeste da RMF um marcante "trend" N-S caracterizado por alto e baixo gravimétrico que serve de limite com a unidade U2.

Por outro lado, a análise qualitativa do mapa de anomalia Bouguer mostra uma suavização das curvas isogálicas do sudeste para o sudoeste da região metropolitana de Fortaleza, onde os valores Bouguer declinam suavemente de alto para baixo gradiente gravimétrico, caracterizando as unidades gravimétricas U1 e U2 limitadas pelo alinhamento gravimétrico na direção N-S preferencialmente. Nesse segmento, as rochas granitóides representativas de U2 constituem os conjuntos de rochas menos densa da Região Metropolitana de Fortaleza, onde os baixos gravimétricos atingem, valores na ordem de 7,8 mgal, apresentando-se no mapa gravimétrico de anomalia Bouguer encerrando uma ampla área dessas rochas.

Os sistemas de alinhamentos gravimétricos mostram-se caracterizados por quatro "trends", sendo dois principais na direção NE-SW e NW-SE, e dois restritamente distribuídos, representados na direção E-W e N-S. Os dois primeiros "trends" estabelecem uma geometria estrutural à região, mais regular, com distinção de alto e baixo gradiente gravimétrico.

Os sistemas NE-SW e NW-SE, mostram tênue deflexão, o primeiro para NNE e o segundo para NNW. Os sistemas E-W e N-S são restritos, marcadamente presentes nas áreas da unidade gravimétrica U1.

A integração desses dados com a magnetometria mostram uma comprovação muito evidente dos alinhamentos NE-SW, NW-SE e E-W. Junto aos dados de eletroresistividade, faz-se evidente uma profundidade do topo de embasamento cristalino na ordem de 54 metros na região de

Euzébio, ficando estabelecido com base nos valores gravimétricos um conjunto de rochas mais densas.

CAPÍTULO 5 - ELETRORRESISTIVIDADE

5.1 - Considerações gerais

A eletrorresistividade é um dos mais importantes métodos geofísicos que podem ser utilizados no estudo de águas subterrâneas. Desses métodos geofísicos, alguns deles fornecem dados sobre as condições dos materiais do sub-solo, como espessura das camadas, grau de compactação, profundidade do topo rochoso e, também, no caso de se possuir dados geológicos confiáveis para controle, subsidiar informações sobre tipos de rochas existentes em profundidade, possibilitando o mapeamento de feições hidrogeológicas naturais relacionadas aos estratos geoeletricos caracterizantes de sedimentos porosos.

Outros métodos geofísicos utilizados para prospecção hidrogeológica, fornecem informações diretas sobre as propriedades físicas e ou químicas da água, que podem estar associadas à presença ou não de substâncias poluentes. As águas subterrâneas contaminadas de origens diversas, pela água salgada de origem marinha, substâncias químicas provenientes de resíduos industriais, rejeitos orgânicos ou líquidos percolados de aterros sanitários, caracterizam-se por apresentar uma maior mineralização e/ou temperatura mais elevada, o que faz aumentar sensivelmente sua condutividade. Todavia, os métodos que medem esta propriedade física da água apresentam-se como os mais adequados para o estudo de sua qualidade, prestam-se também, ao estudo das feições hidrogeológicas e das condições dos materiais do sub-solo.

Na última década, o avanço industrial favoreceu a idealização de equipamentos geofísicos, técnicas de campo, técnicas analíticas e de processamento de dados que contribuíram satisfatoriamente para melhorar as condições de acesso e conhecimento de áreas com problemas de poluição. Em particular, no Ceará, a necessidade da prospecção de água subterrânea favoreceu a idealização de um instrumento de maior manuseio e precisão, resultando na fabricação de um eletrorresistivímetro PER-80 da DPM-Engenharia.

Vale revisar, que a resistividade dos materiais do sub-solo é um parâmetro que depende quase que exclusivamente da quantidade e qualidade da água que ocupa seus espaços vazios. Tratando-se de rochas cristalinas, geralmente compactas, elas tendem a apresentar uma resistividade bem mais elevada do que as rochas sedimentares, estas normalmente apresentam alguma porosidade, e podem armazenar maior ou menor quantidade de água de saturação.

Concernente, ainda, às rochas sedimentares um solo arenoso seco apresenta uma resistividade muito alta. O mesmo solo, saturado d'água, pode apresentar uma resistividade dezenas de vezes menor; e, no caso, desta água de saturação estiver salgada, e não doce, esta resistividade será menor ainda.

Não obstante, a água subterrânea contaminada por substâncias químicas, sejam elas de origem orgânica ou inorgânica, mostra uma tendência de uma resistividade menor que a da água não contaminada e, esta diferença será, conseqüentemente, tanto maior quanto maior for a quantidade de sais e outras substâncias químicas nela dissolvidas.

Os procedimentos mais utilizados na medida da resistividade dos materiais do subsolo são os da sondagem elétrica, caminhamento e perfilagem geofísica de poços.

Neste trabalho foi empregado o método da eletrorresistividade, por sondagem elétrica vertical, arranjo Schlumberger, muito utilizado na medida da resistividade dos materiais de subsolo.

O método da eletrorresistividade baseia-se na medida da resistividade elétrica da seção geométrica, que inclui o solo, a rocha e a água subterrânea.

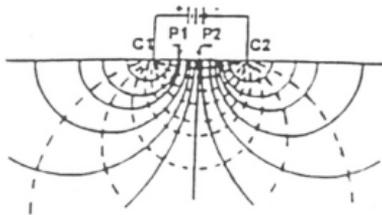
A sondagem elétrica vertical (SEV), consiste na aplicação de uma corrente elétrica à superfície do solo, através de dois eletrodos A e B, chamados eletrodos de corrente, onde existirá um fluxo de corrente entre esses eletrodos (figura 5.1), e na medição da diferença de potencial entre dois diferentes pontos da superfície do solo, chamados eletrodos de potenciais, onde é possível determinar-se o comportamento das linhas de corrente em sub-superfície, face às linhas equipotenciais (que unem pontos de mesmo potencial e são perpendiculares às linhas de corrente).

Para o entendimento do arranjo Schlumberger, são apresentadas as ilustrações (figura 5.2) e equações, abaixo referenciadas, onde,

ΔV representa a diferença de potenciais ($V_M - V_M$),

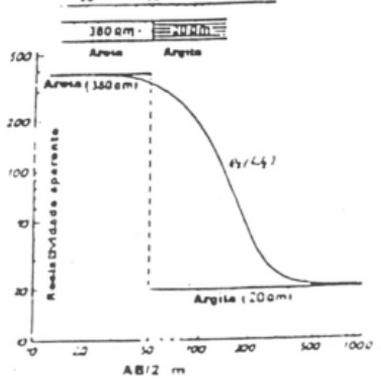
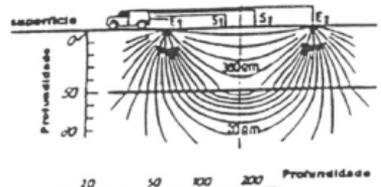
ρ representa a resistividade, e,

k representa o fator geométrico.



--- Linha de fluxo (corrente e campo elétrico)
 — Linha equipotencial

(a)



(D)

Figura 5.1 - Distribuição esquemática das linhas de corrente e equipotenciais em meio homogêneo (a) e no caso de duas camadas (b) (segundo Ellert, 1997).

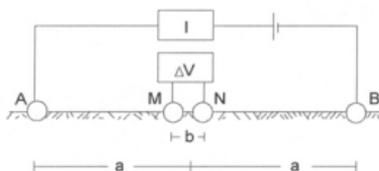


Figura 5.2 - Distribuição esquemática do arranjo Schlumberger (segundo Keller & Frischknecht, 1966) sendo os eletrodos de corrente A e B ($a = AB/2$) e eletrodos de tensão M e N (b)

$$\rho = \left(\frac{V_M - V_N}{I} \right) \frac{2r}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} = k \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{equação 5.1})$$

$$k = \frac{2r}{\frac{1}{a - \frac{b}{2}} - \frac{1}{a - \frac{b}{2}} - \frac{1}{a - \frac{b}{2}} + \frac{1}{a - \frac{b}{2}}} = r \left(\frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right) \quad (\text{equação 5.2})$$

5.2 - Levantamento

O método de eletroresistividade (ER), representado como um dos métodos elétricos, empregado neste trabalho, foi executado em terrenos envolvendo rochas cristalinas intemperizadas, sedimentos do Grupo Barreiras e sedimentos colúvio-eluviais para investigação em profundidade de estratos geoeletricos, dispostos horizontal ou subhorizontalmente.

Neste levantamento de campo foi empregado o procedimento da sondagem elétrica vertical (SEV), conforme arranjo Schlumberger, utilizando um eletroresistivímetro PER-80 (figura 5.3), de fabricação da DPM-Engenharia. De início, foram executadas diversas SEV's nos terrenos cristalinos e sedimentares para aferição do instrumento e aplicabilidade de eletrodos apropriados aos terrenos.

As SEV's foram executadas numa extensão de cerca de 50km, entre as localidades de Prainha e São Gonçalo do Amarante, envolvendo toda extensão do Anel Rodoviário, totalizando 17 sondagens elétricas verticais (figuras 5.4 e 5.5 e Quadro 5.1). Os espaçamentos foram assim distribuídos: AB máximo, correspondendo a 300 metros, verifica-

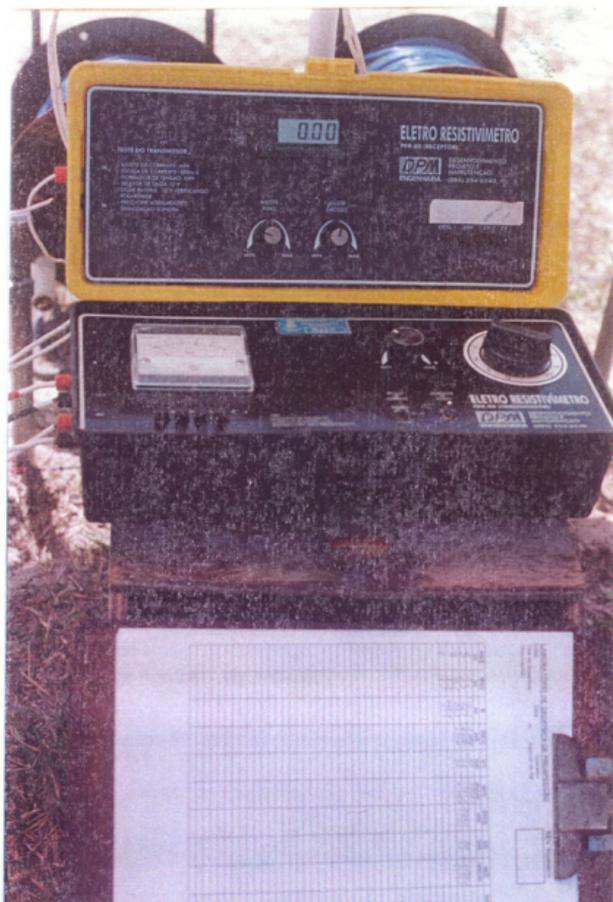


Figura 5.3 – Eletroresistivímetro utilizado no levantamento do método elétrico de eletrorresistividade na Região Metropolitana de Fortaleza.



Figura 5.4 – Disposição, em campo, na aplicação do método elétrico de eletrorresistividade, através do arranjo Schlumberger na Região Metropolitana de Fortaleza. Local: Região de Prainha – Aquiraz-CE.

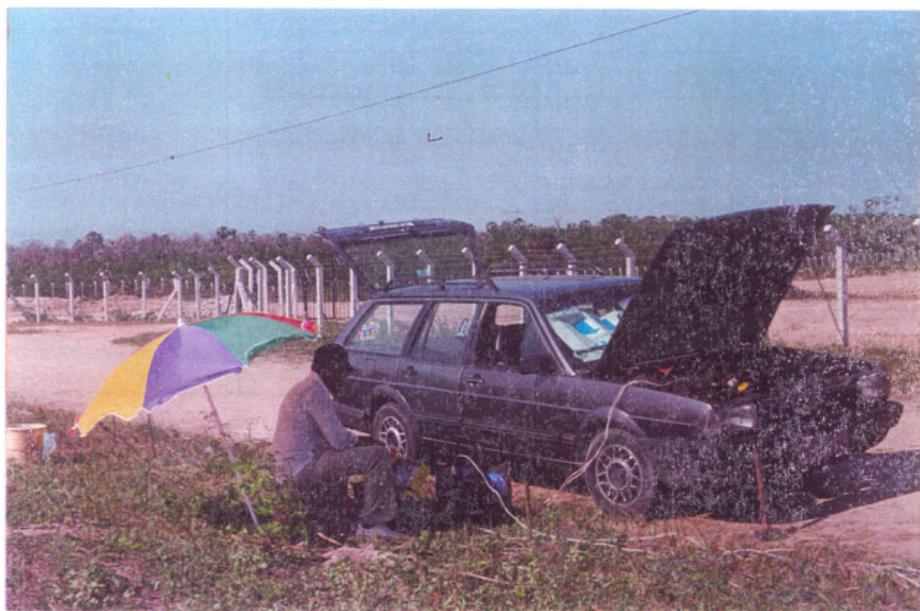


Figura 5.5 – Detalhe da figura 2.3 em terrenos envolvendo sedimentos do Grupo Barreiras. Local: Região do Eusébio – Messejana-CE.

U2, o setor sudoeste e parte do setor norte (Caucaia-Pecém) da região, tendo como limites os principais alinhamentos gravimétricos. A unidade gravimétrica U1 envolve áreas do embasamento metamórfico com delgada cobertura de sedimentos do grupo Barreiras e sedimentos colúvio-eluviais e a unidade U2 envolve terrenos de rochas granitóides.

A unidade gravimétrica U1, exhibe, em destaque, no setor nordeste de sua área de abrangência, um domínio de isogálicas que sugere uma área intensamente remobilizada, com alto gradiente gravimétrico, alcançando até 32 mgal e, achando-se presente o sistema estrutural E-W contendo o "trend" NE-SW e localmente o "trend" NW-SE. Essa unidade U1 exhibe ainda em destaque no setor norte-noroeste da RMF um marcante "trend" N-S caracterizado por alto e baixo gravimétrico que serve de limite com a unidade U2.

Por outro lado, a análise qualitativa do mapa de anomalia Bouguer mostra uma suavização das curvas isogálicas do sudeste para o sudoeste da região metropolitana de Fortaleza, onde os valores Bouguer declinam suavemente de alto para baixo gradiente gravimétrico, caracterizando as unidades gravimétricas U1 e U2 limitadas pelo alinhamento gravimétrico na direção N-S preferencialmente. Nesse segmento, as rochas granitóides representativas de U2 constituem os conjuntos de rochas menos densa da Região Metropolitana de Fortaleza, onde os baixos gravimétricos atingem, valores na ordem de 7,8 mgal, apresentando-se no mapa gravimétrico de anomalia Bouguer encerrando uma ampla área dessas rochas.

Os sistemas de alinhamentos gravimétricos mostram-se caracterizados por quatro "trends", sendo dois principais na direção NE-SW e NW-SE, e dois restritamente distribuídos, representados na direção E-W e N-S. Os dois primeiros "trends" estabelecem uma geometria estrutural à região, mais regular, com distinção de alto e baixo gradiente gravimétrico.

Os sistemas NE-SW e NW-SE, mostram tênue deflexão, o primeiro para NNE e o segundo para NNW. Os sistemas E-W e N-S são restritos, marcadamente presentes nas áreas da unidade gravimétrica U1.

A integração desses dados com a magnetometria mostram uma comprovação muito evidente dos alinhamentos NE-SW, NW-SE e E-W. Junto aos dados de eletroresistividade, faz-se evidente uma profundidade do topo de embasamento cristalino na ordem de 54 metros na região de

do nas SEV's 02, 07, 12, 13 e 16; AB mínimo de 3,0 m ; e, AB de 4m, 6m, 8m, 10m, 14m, 20m, 30m, 40m, 60m, 80m, 100m, 140m, 200m e 300m; MN com os valores de 0,6m, 2,0m 6,0m, 20m e 40m.

QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO DAS SEV's

Quadro 5.1

| SEV | AB/2 (m) | MN (m) |
|-----|----------|--------|
| 01 | 100 | 10 |
| 02 | 150 | 20 |
| 03 | 100 | 10 |
| 04 | 40 | 03 |
| 05 | 100 | 10 |
| 06 | 70 | 10 |
| 07 | 150 | 20 |
| 08 | 100 | 10 |
| 09 | 100 | 20 |
| 10 | 100 | 10 |
| 11 | 100 | 20 |
| 12 | 150 | 20 |
| 13 | 150 | 20 |
| 14 | 70 | 10 |
| 15 | 30 | 03 |
| 16 | 150 | 20 |
| 17 | 20 | 01 |

Para precisão do levantamento no arranjo Schlunberger, foram tomadas leituras de MN e AB/2 repetidas em espaçamentos, conforme o arranjo para auxílio da precisão da modelagem das SEV's, cujo erro acha-se discriminada em cada SEV apresentada, variando de 1,7 a 5,4.

5.3 - Procedimento e tratamento dos dados

O tratamento dos dados obtidos através do método da eletrorresistividade constou da preparação ainda em trabalhos de campo, de gráficos bilogarítmicos, estando a distância $AB/2$ (em metros) nas abscissas e os valores de resistividade aparente (em Ohm.m) nas ordenadas (para diferença de potencial-DV em milivolts e intensidade de corrente-I em miliamperes), obtendo-se desta forma a “curva de sondagem elétrica”.

Os dados foram reunidos em bancos de dados com utilização do programa Excel e aplicação de método de ponto auxiliar e do “software” Resist da UFC/DEGEO/Laboratório de Geofísica de Prospecção. Este procedimento geofísico permitiu estabelecer em profundidade os estratos geoeletricos, dispostos horizontal ou subhorizontalmente.

Para o desenvolvimento das sondagens elétricas (SEVs), distribuídas na seção entre Prainha e Catuana (plotadas no mapa de localização que se acha intercalado no texto do capítulo 6) totalizando 17 sondagens, foram utilizados no arranjo Schlumberger, os seguintes utilitários: eletrodos de aço inoxidável (para corrente) e de latão (para diferença de potencial), além de eletrodos com solução de sulfato de cobre; cabos para composição elétrica (corrente e potencial); e, também, o instrumento eletrorresistivímetro PER-80 e uma bateria elétrica de 12 volts.

Em campo, foram obtidos os dados das sondagens e criadas as curvas de campo para acompanhamento das SEV's.

Para tratamento dos dados foram utilizados os “softwares” Excel e Resist, cujos dados são apresentados no item abaixo. Acrescenta-se, ainda, que nas inversões geoeletricas foi utilizado o procedimento do “software” Resist que permitem uma interpretação comparativa entre os dados de campo e os dados teóricos introduzidos.

5.4 - Interpretação das SEV's

A interpretação das SEV's constou na análise geoeletrica dos dados, procedendo-se o estudo das curvas geradas e o modelo de camadas geoeletricas caracterizadas, onde foi possível estabelecer três grupos distintos de perfil geoeletrico. Esta interpretação seguiu o procedimento de tentativa e erro, tendo as disposições, em termos percentuais, diminuindo na medida em que o modelo proposto fornecia dados compatíveis com os dados de campo.

As resistividades caracterizadas em cada unidade geolétrica estão representadas nas sondagens (figuras 5.6 a 5.21 inseridas na descrição das unidades geolétricas), associadas aos estratos observados. As resistividades baixas com indicação de maiores profundidades que alcançam até 58,3 metros, estão mais distribuídas nas regiões dos sedimentos do Grupo Barreiras, no setor leste da seção estudada, tendo também, distribuição em alguns outros segmentos na área de Maracanaú (Quadro 5.2).

As características geolétricas vão gradativamente variando seus valores para o oeste da seção (Prainha e Catuana), até atingir os segmentos do embasamento cristalino onde ocorrem as áreas de exploração de Pedreiras.

QUADRO 5.2 – Distribuição e integração das SEV's

| Unidade Geolétrica | SEV's | Estratos Geolétricos | Altitude (m) | Profundidade Alcançada (m) |
|---------------------------|--------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| A | 16 | 2 | 20,60 | 54,0 |
| | 03 | 3 | 19,20 | 54,4 |
| | 05 | 4 | 25,80 | 36,7 |
| | 06 | 3 | 33,70 | 48,1 |
| | 07 | 3 | 28,40 | 58,3 |
| AS (subunidade) | 01 | 3 | 16,50 | 16,3 |
| | 02 | 4 | 18,40 | 21,8 |
| B | 11 | 3 | 17,00 | 24,7 |
| | 14 | 2 | 44,50 | 13,0 |
| | 15 | 2 | 20,54 | 12,3 |
| | 17 | 3 | 24,50 | 9,5 |
| C | 09 | 3 | 38,00 | 24,4 |
| | 10 | 3 | 21,20 | 18,7 |
| | 04 | 3 | 30,20 | 18,1 |
| | 12 | 3 | 33,20 | 15,1 |
| | 13 | 3 | 39,20 | 23,8 |

Na região estudada, as unidades geoeletricas A e C mostram-se com as características geoeletricas mais representativas dos aquíferos, comparadas com a unidade (B), inclusive respaldadas pelos dados dos poços tubulares existentes nas regiões de Aquiraz e Euzébio, com profundidades, preferencialmente entre 40 e 70 metros.

São apresentadas a seguir as análises das unidades geoeletricas, procurando-se também, integrá-las aos dados gravimétricos e magnéticos além da correlação com poços tubulares existentes nas imediações da seção.

• Unidade A

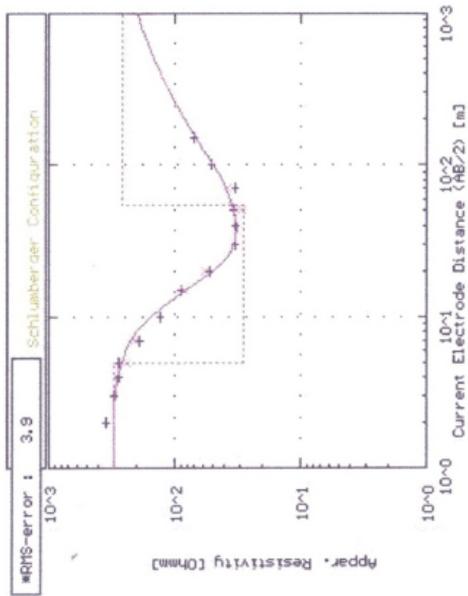
Esta unidade está melhor representada nas SEV's 16, 03, 05, 06 e 07 (figuras 5.6 a 5.10), mostra a suavidade nas curvas, representativa de áreas com sedimentos do Grupo Barreiras. As resistividades desse estrato geoeletrico "Grupo Barreiras", com espessura, preferencialmente entre 40 a 50 metros, são normalmente um pouco baixa, na ordem de 27 a 28 ohm.m, com variações em algumas sondagens com valores na ordem de 48 e 49 ohm.m e 18 ohm.m, exibindo uma profundidade que alcança comumente a ordem de 54 metros, que corresponde ao topo do embasamento cristalino.

A integração dos dados da unidade A com os dados de poços tubulares (com profundidade de 40 a 70 m) mostra uma correspondência de profundidade assinalada por valores Bouguer que apresentam valores mais elevados na região de Euzébio ($g_{AB} = 28,14$ mgal e 22,67 mgal) e valores mais baixos no oeste, área de Maracanaú ($g_{AB} = 17,41$ a 14,73 mgal).

• Subunidade A

A curva de resistividade aparente nesta unidade é do tipo $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ e $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$, na conceituação de Keller (1976), com valores da resistividade aparente dos estratos geoeletricos elevados e com espessuras menores relativas a unidade A.

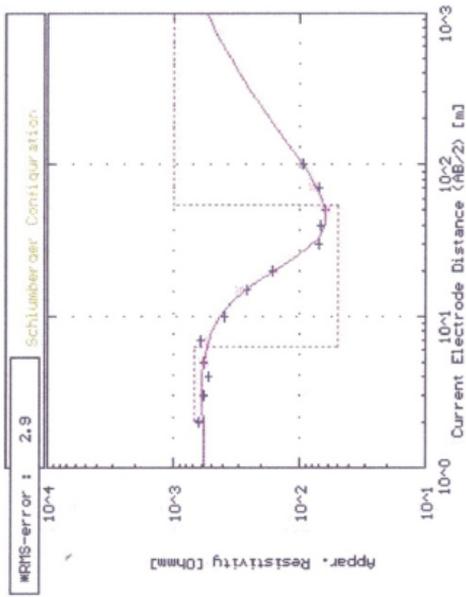
Esta unidade está representada nas SEV's 01 e 02 (figuras 5.11 e 5.12), caracterizadas por 3 e 4 estratos geoeletricos distintos, mostrando espessuras delgadas que alcançam até 9,5 metros e profundidades até o topo do embasamento cristalino de 16,3 a 21,8 metros.



| No | Res | Thick | Depth |
|----|-------|-------|-------|
| 1 | 306.2 | 48.9 | 4.0 |
| 2 | 260.5 | 48.9 | 64.0 |
| 3 | 260.5 | 48.9 | 100.0 |

■ RMS on smoothed data

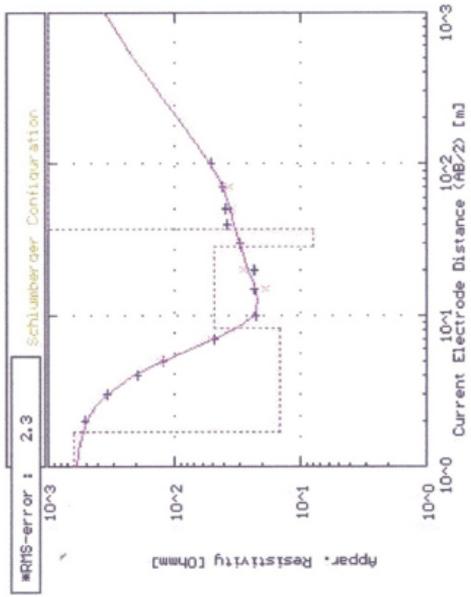
Figura 5.6 - SEV 16 (Fontaleza)



| No | Pes | Thick | Depth |
|-----|-----|-------|-------|
| 577 | 0 | 2.0 | 2.0 |
| 622 | 40 | 4.0 | 4.0 |
| 699 | 160 | 16.0 | 16.0 |
| 888 | 320 | 32.0 | 32.0 |

■ RMS on smoothed data

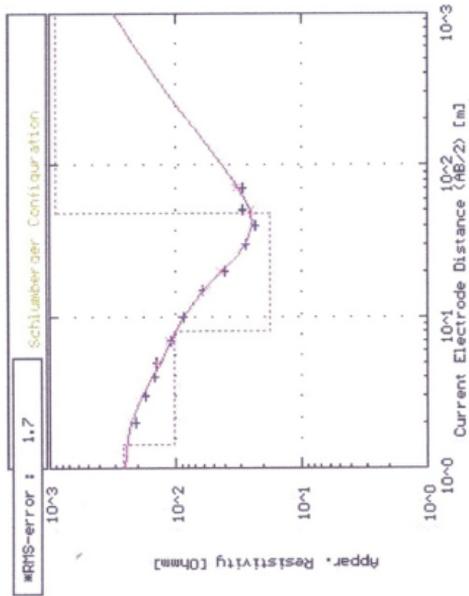
Figura 5.7 - SEV 03 (Fortaleza)



| No | Res | Thick | Depth |
|----|-------|-------|-------|
| 1 | 623.0 | 1.7 | 1.7 |
| 2 | 17.0 | 6.0 | 3.2 |
| 3 | 48.0 | 20.9 | 38.0 |
| 4 | 397.0 | 8.2 | 36.7 |
| 5 | 997.0 | - | - |

* RIS on smoothed data

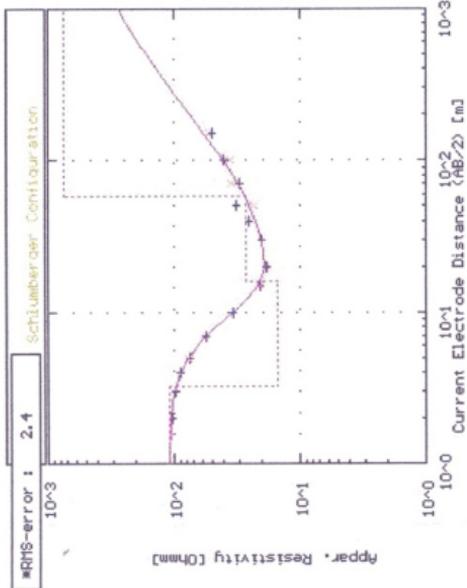
Figura 5.8 - SEV 05 (Fortaleza)



| No. | Res | Thick | Depth |
|-----|--------|-------|-------|
| 1 | 764.3 | 1.4 | 1.4 |
| 2 | 1762.3 | 2.6 | 3.1 |
| 3 | 182.3 | +0.1 | +6.1 |
| 4 | 8000.0 | - | - |

* RMS on smoothed data

Figura 5.9 - SEV 06 (Fortaleza)



| No. | Res | Thick | Depth |
|-----|-------|-------|-------|
| 1 | 109.4 | 3.3 | 3.3 |
| 2 | 15.2 | 12.8 | 16.1 |
| 3 | 766.6 | 42.3 | 58.3 |
| | | | |
| | | | |

* RHS on smoothed data

(Figura 5.10 - SEV 07 (Fortaleza))

| No. | Res | Thick | Depth |
|-----|--------|-------|-------|
| 1 | 3140,2 | 2,6 | 10,4 |
| 2 | 182,1 | 5,8 | 10,4 |
| 3 | 38,0 | 6,3 | 12,3 |
| 4 | 1184,8 | - | - |

* RHS on smoothed data

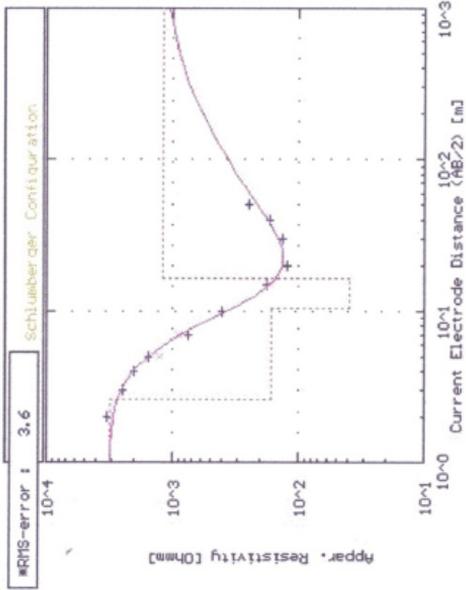
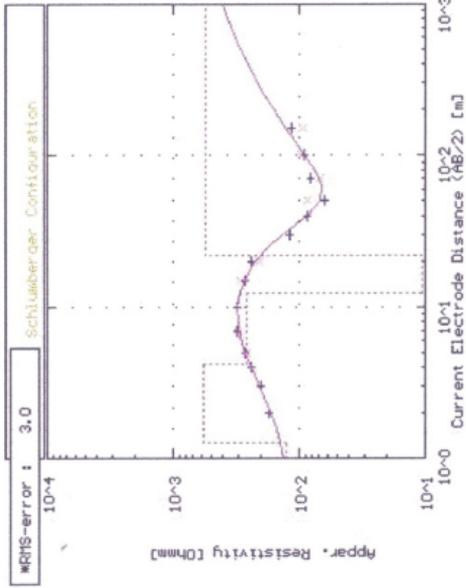


Figura 5.11 - SEV 01 (Fortaleza)



| No. | Res | Thick | Depth |
|-----|-------|-------|-------|
| 1 | 124.8 | 1.3 | 1.3 |
| 2 | 201.0 | 1.3 | 1.3 |
| 3 | 262.6 | 1.3 | 1.3 |
| 4 | 308.4 | 1.3 | 1.3 |
| 5 | 350.4 | 1.3 | 1.3 |
| 6 | 388.4 | 1.3 | 1.3 |
| 7 | 422.4 | 1.3 | 1.3 |
| 8 | 452.4 | 1.3 | 1.3 |
| 9 | 478.4 | 1.3 | 1.3 |
| 10 | 500.4 | 1.3 | 1.3 |

* RRS on smoothed data

Figure 5.12 - SEV 02 (Fortaleza)

Sua distribuição na região de Aquiraz/Euzébio/Messejana em segmentos do Grupo Barreiras guarda possível influência de área remobilizada. O valor Bouguer nesse segmento $g_{AB} = 31,38$ mgal e $g_{AB} = 27,53$ mgal, mostra um valor muito próximo ao apresentado em Euzébio, que corresponde aos valores Bouguer mais elevados da seção estudada.

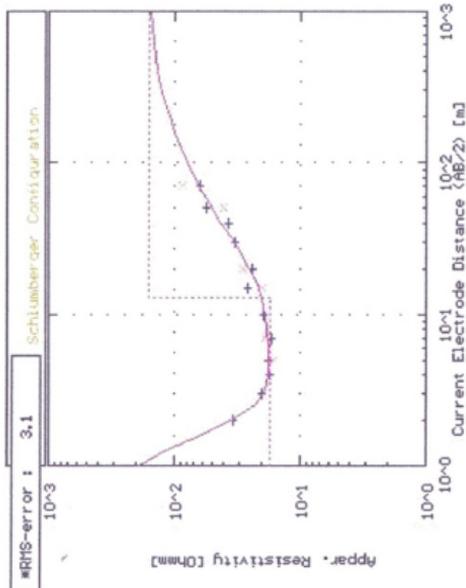
• Unidade B

A unidade B está representada nas SEV's 11, 14, 15 e 17 (figuras 5.13 a 5.16) e representativa de rochas do embasamento cristalino, relaciona-se ao tipo de curvas $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, com estratos geoeletricos delgados (2 e 3 estratos), onde a profundidade do embasamento cristalino mostra-se normalmente na ordem de 9,1 a 13 metros, destacando-se a SEV-11 com profundidade de 24,7 metros que se localiza mais distante das pedreiras e apresenta seqüência sedimentar mais espessa (18,3 metros). Nas SEV's apresentadas a resistividade aparente das rochas cristalinas mostra valores elevados.

Concernente à integração dos valores desta unidade, são apresentados em vários poços tubulares vazão na ordem de 1,20 m³/h a 9,3 m³/h, mostrados em poços com profundidades de 50 a 70 metros. Os valores Bouguer ($g_{AB} = 14,94$ mgal a 22,00 mgal) menores que os da porção leste da seção, exibem variação do litótipos do embasamento cristalino com presença de granitóides de natureza intrusiva.

• Unidade C

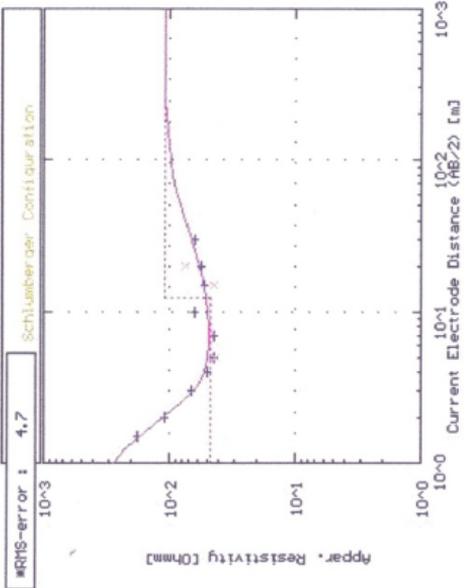
A unidade C está representada pelas Sev's 9, 10, 04, 12 e 13 em terrenos de coberturas de colúvio-eluviais mostrando-se caracterizada pelas curvas do tipo $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ (SEV's 9 e 13) e $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ (SEV's 4, 10 e 12), ilustradas nas figuras anexas (figuras 5.17 a 5.21). Seus estratos geoeletricos são distintos (ordem de 3), onde as resistividades aparente mais baixa do tipo $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, apresentam espessuras mais elevadas, 17,2 m e 11,2 m, com profundidades de 24,4 m e 23,8 m, relacionadas ao topo do embasamento ígneo-metamórfico. Nas curvas do tipo $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, o estrato geoeletrico mais profundo (3), com resistividade aparente variando de 39,8 a 51,0 ohm.m e espessura na ordem de 5,3 a 9,3 m, apresenta profundidade de 15,1 a 18,7 m, representativa do topo do embasamento cristalino.



| No | Res | Thick | Depth |
|----|-------|-------|-------|
| 1 | 493.7 | 0.4 | 0.4 |
| 2 | 12.2 | 12.6 | 13.0 |
| 3 | 188.6 | - | - |

● DHS on smoothed data

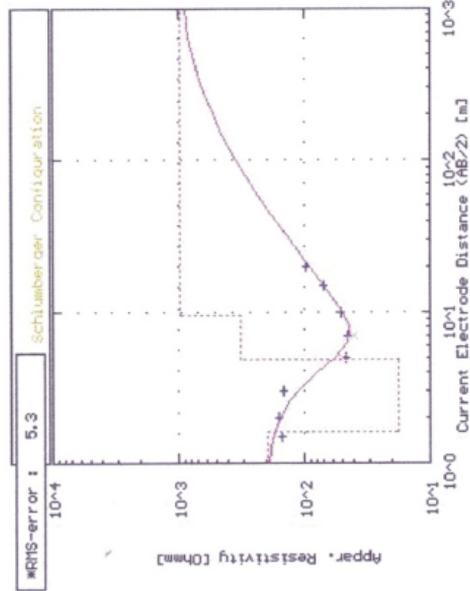
Figura 5.13 - SEV 14 (Fortaleza)



| No | Res | Thick | Depth |
|----|-------|-------|-------|
| 1 | 400.1 | 0.6 | 0.6 |
| 2 | 46.4 | 11.7 | 12.3 |
| 3 | 110.6 | - | - |

* RHS on smoothed data

Figura 5 14 - SEV 15 (Fortaleza)



| No. | Res | Thick | Depth |
|-----|-------|-------|-------|
| 1 | 137.0 | 1.6 | 1.6 |
| 2 | 36.0 | 3.2 | 4.8 |
| 3 | 30.1 | 4.7 | 8.5 |
| 4 | 37.6 | - | - |

* RMS on smoothed data

Figura 5.15 - SEV 17-1 (Fortaleza)

| No. | Res. | Thick. | Depth. |
|-----|-------|--------|--------|
| 1 | 262.3 | 1.8 | 1.8 |
| 2 | 133.0 | 17.2 | 24.4 |
| 3 | 788.0 | 1.2 | 1.2 |

* RHS: on, smoothed data.

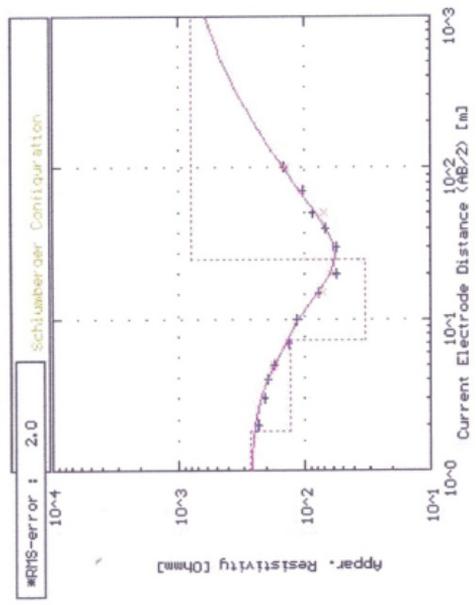
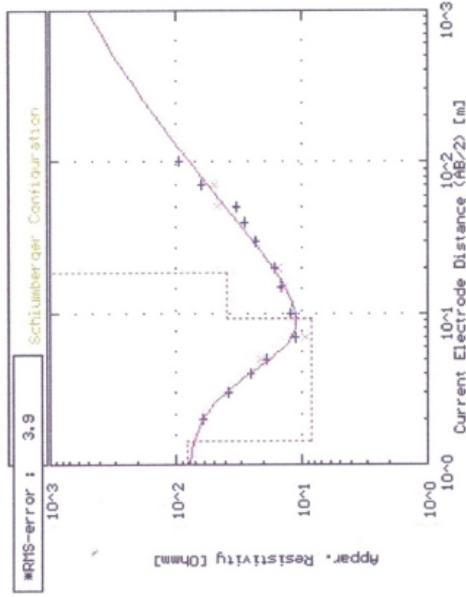


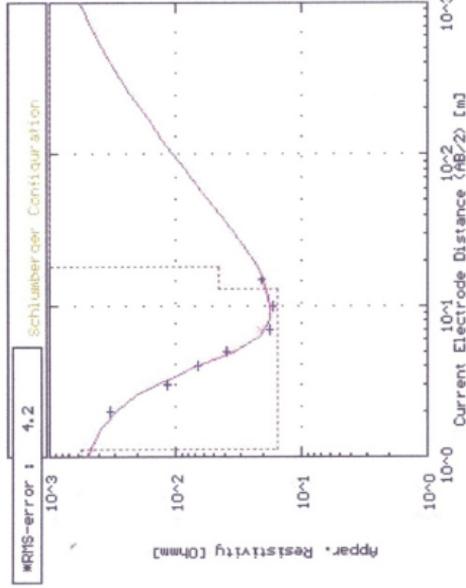
Figura 5.16 - SEV 09 (Fortaleza)



| No | Res | Thick | Depth |
|----|--------|-------|-------|
| 1 | 21.3 | 4.0 | 10.0 |
| 2 | 28.8 | 3.3 | 16.7 |
| 3 | 1052.8 | - | - |

* RMS on smoothed data

Figura 5.17 - SEV 10 (Fortaleza)



| No | Res | Thick | Depth |
|----|-------|-------|-------|
| 1 | 574.5 | 1.4 | 17.6 |
| 3 | 42.0 | 16.3 | 178.9 |
| 4 | 990.5 | - | - |

* RMS on smoothed data

Figua 5.18 - SEV 04 (Fortaleza)

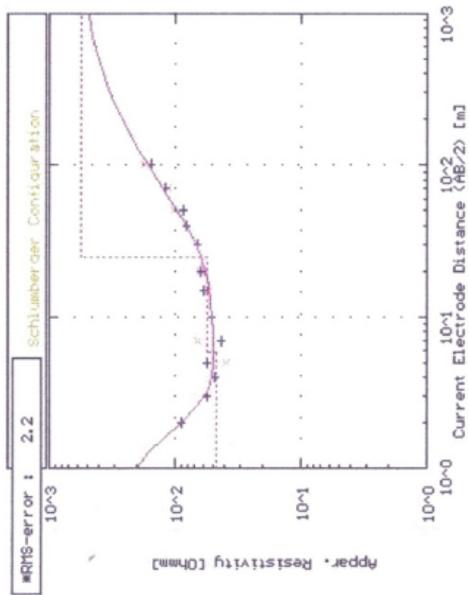
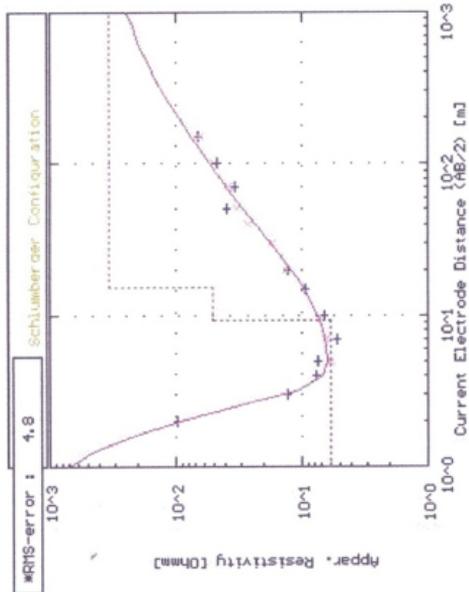


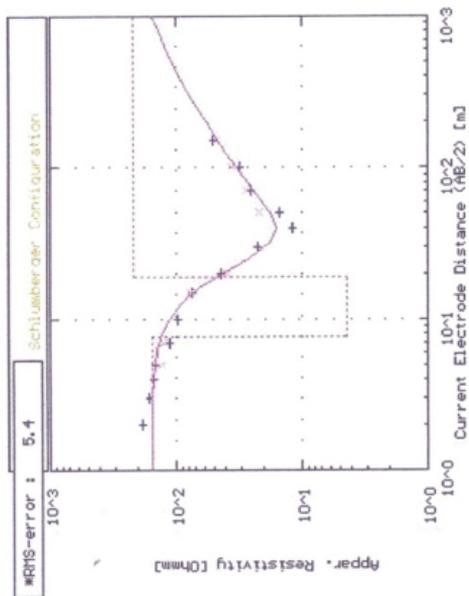
Figura 5.19 - SEV 11 (Fortaleza)



| No. | Res | Thick | Depth |
|-----|--------|-------|-------|
| 1 | 1557.8 | 0.5 | 0.5 |
| 2 | 81.0 | 8.0 | 16.0 |
| 3 | 341.0 | - | - |

* RHS on smoothed data

Figura 5 20 - SEV 12 (Fortaleza)



| No | Res | Thick | Depth |
|----|-------|-------|-------|
| 1 | 195,0 | 7,5 | 7,5 |
| 2 | 4,5 | 11,5 | 15,0 |
| 3 | 218,2 | -,- | -,- |

* RHS on smoothed data

Figura 5.21 - SEV 13 (Fortaleza)

Na área desta unidade, relativo a sua integração com outros dados, os valores Bouguer apresentados pouco variam, na ordem de g_{AB} 18,83 mgal a 22,22 mgal. Concernente a poços tubulares, os dados em área mais distante da SEV, com profundidade de 36 m, fornece uma vazão de 1,50 m³/h.

CAPÍTULO 6 - INTEGRAÇÃO DOS DADOS

Na integração dos dados geofísicos estudados na Região Metropolitana de Fortaleza que localiza-se numa latitude magnética baixa, são apresentados (intercalados nas páginas seguintes) o mapa geológico, mapa de interpretação magnética de campo total, mapa de interpretação gravimétrica de anomalia Bouguer, mapa de localização e o quadro de integração e distribuição em profundidade dos estratos geoeletricos (figura 6.1).

A integração de dados permite estabelecer a relação entre os dados geofísicos e geológicos descrita a seguir:

i) A aeromagnetometria favoreceu em muito a compartimentação litológica, estando a unidade magnética M1 associada a área de maior predominância de corpos graníticos de natureza intrusiva (ilustrada no mapa geológico e mapa magnético de campo total). Nessa área são destaques os granitóides sin-Brasílios evidenciados pela ação de deformação dos alinhamentos nas direções NE-SW e NW-SE, este último com sentido de movimento dextrógiro.

Esses corpos granitóides mostram-se revelados na gravimetria (mapa gravimétrico de anomalia Bouguer) pela unidade gravimétrica U2 que apresenta baixo gradiente com valores na ordem de 18 a 12 mgal, encerrando uma marcante anomalia no sudoeste da região que se mostra alongada e demarcando o conjunto granitóide na região metropolitana;

ii) Os estudos magnetométricos apontam uma unidade magnética M2 que se demarca nos cantos SE e NW da região metropolitana de Fortaleza correlatada no mapa geológico por rochas gnáissicas e migmatíticas do embasamento, pobres em minerais ferromagnéticos. Essas rochas mais antigas, representadas por gnaisses e migmatitos de composição diversa, mostram-se não provocando nenhum contraste de susceptibilidade magnética;

No contexto da gravimetria essa região, recoberta por sedimentos de cobertura pouco espessa (do grupo Barreiras e colúvio-eluviais), corresponde a valores acima de 20 mgal no mapa de anomalia Bouguer;

iii) Ademais, são acrescentados junto à interpretação dos dados, a correspondência das sondagens elétricas verticais exibindo características geoeletricas para maiores

ALTITUDE (m)

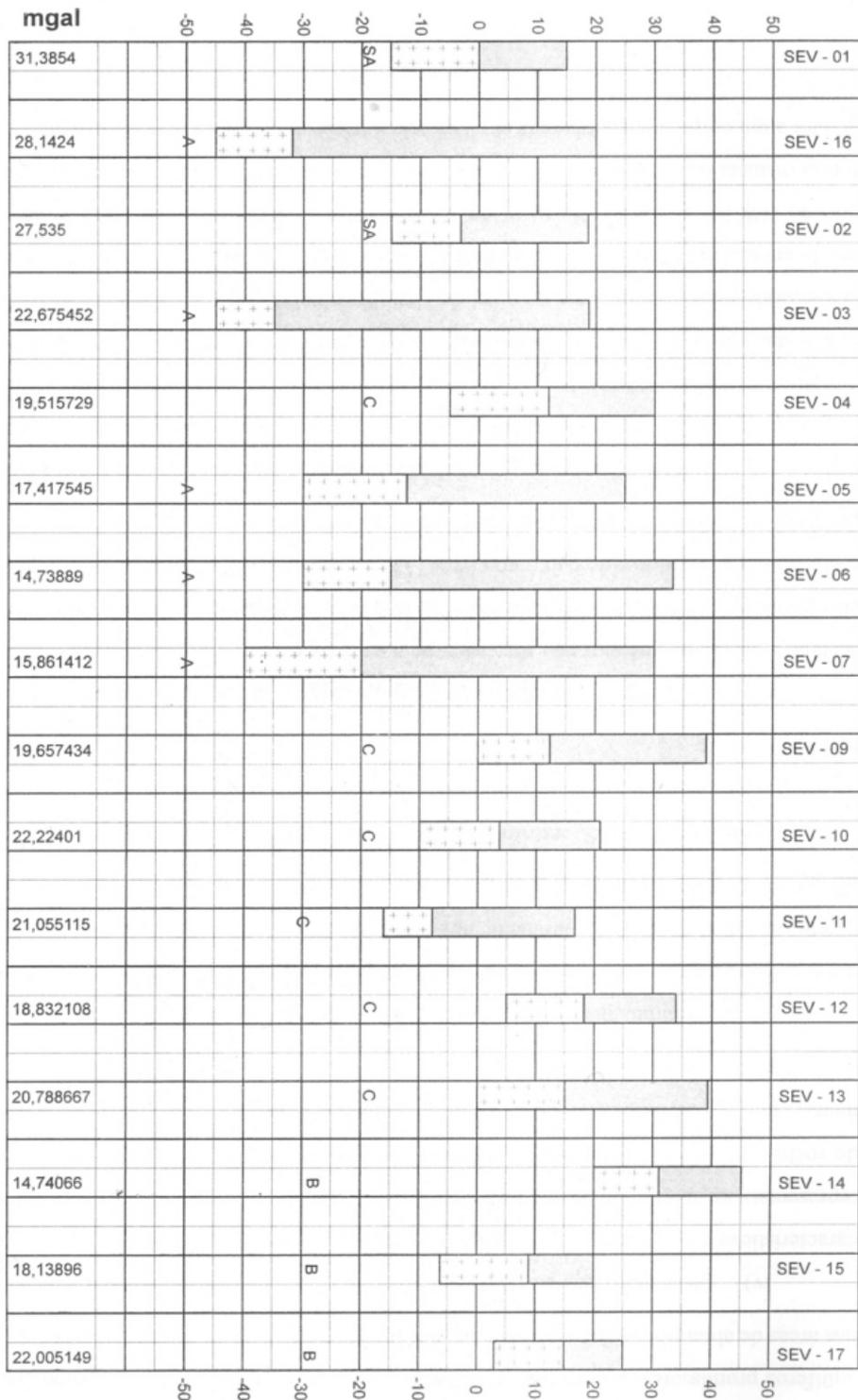


Figura 0.1 - Integração e distribuição em proximidade dos estratos geométricos

LEGENDA

aqüíferos promissores na parte sudeste da região situados em sedimentos do grupo Barreiras nas áreas de abrangência das unidades magnéticas M1 e M2 e unidade gravimétrica U1;

iv) Os estudos das sondagens elétricas verticais permitem assinalar a relação das características geoeletricas com conjuntos litológicos, evidenciados pelas SEV's da unidade A representativas de predomínio de sedimentos do Grupo Barreiras, unidade B representativas de rochas granitóides e unidade C (figura 6.1) representativa de sedimentos predominantemente colúvio-eluviais, cujas características geoeletricas mostram a variação da anisotropia desses terrenos colúvio-eluviais;

v) Os alinhamentos na direção NE-SW observados na magnetometria e gravimetria correspondem aos alinhamentos estruturais da geologia, inclusive com marcante preenchimento de diques básicos. Os alinhamentos NW-SE e E-W são presentes na magnetometria e gravimetria, estando o E-W restrito no setor leste de Fortaleza.

O alinhamento N-S, restrito no canto NW da região, revelado pela gravimetria, mostra sua correspondência no mapa geológico e apresentando-se distintamente nos dados magnéticos.

vi) Os corpos assinalados no canto nordeste da RMF pela magnetometria apresentando baixos magnéticos são marcados pela gravimetria por valores, respectivamente, de alto gradiente (30,8 mgal) nas proximidades do bairro do Mucuripe, podendo corresponder à rochas máficas e valores de baixo gradiente (15 mgal) localizado a sul-sudoeste do primeiro, podendo corresponder à granitóides similares às rochas tipo Itaitinga.

vii) Nos mapas magnéticos de continuação para cima nos respectivos níveis de observação de 250m, 500m, 1km, 2km, 5km e 10km (apresentados no final do texto e apenas um, nível de 250m, intercalado no capítulo 3) as anomalias são marcadas por aumento de sua amplitude das curvas isogâmicas e destacando os principais corpos a partir do nível de 500m, estabelecendo mais intensamente no nível de 2km. No nível de 5km, acha-se caracterizada uma ampla anomalia de forma sigmoideal, onde o "trend" NE-SW é o principal e o alinhamento na direção NW-SE é restrito. No nível de 10km acha-se estabelecida uma ampla anomalia de forma ovalada na direção NE-SW, com reflexo de maior área de observação, podendo corresponder a um corpo que guarda uma similaridade a feição apresentada pela gravimetria.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos dos métodos geofísicos magnetométrico, gravimétrico e de eletroresistividade empregados para fornecer contribuições à geologia na Região Metropolitana de Fortaleza, permitem concluir pela viabilidade da aplicação desses métodos para solução dos problemas de estruturas geológicas na referida região.

Os métodos potenciais magnetométrico e gravimétrico fundamentados na susceptibilidade magnética e densidade das rochas, respectivamente, permitem, com auxílio de sofisticado e avançado meio de processamento, ampla análise para a definição do arcabouço geológico e suas implicações.

O método da eletroresistividade, tradicionalmente utilizado na pesquisa de águas subterrâneas, com o auxílio das modernas técnicas analíticas e de processamento de dados, tem se mostrado muito versátil e com respostas mais rápidas e confiáveis nos estudos de água subterrânea.

As informações obtidas com o emprego dos métodos magnetométricos, gravimétricos e eletroresistividade neste trabalho, permitem estabelecer as seguintes conclusões, discernidas a seguir:

1 - Os dados magnéticos permitiram delinear duas unidades magnéticas, contactadas por zonas de cisalhamentos em sua maior extensão, que favoreceram em muito a compartimentação litológica na Região Metropolitana de Fortaleza. A unidade magnética M1 é representativa de rochas metamórficas do embasamento com intensa participação de rochas granitóides de natureza intrusiva. A outra unidade magnética M2 é representativa de rochas metamórficas do embasamento de composição provável félsica, pobre em minerais ferromagnéticos.

2 - Os corpos rochosos estabelecidos pelos dados magnéticos, reunidos na unidade magnética M1 (e subunidade magnética M1a), tipo Itaitinga, Maranguape, Aratanha e Juá, mostram-se mais envolvidos por alinhamentos (falhas e/ou fraturas) na superfície que em profundidade, evidenciados nos mapas magnéticos de Campo Total, Primeira Derivada Vertical e Continuação para Cima. Esses corpos, de composição granítica, são relacionados, na compartimentação litológica, a sin-transcorrência Brasileira.

3 - As feições das isogamas permitem estabelecer uma compartimentação litológica distinta relacionada às unidades magnéticas e respectivas susceptibilidades magnéticas, e também, à estruturação dos corpos intrusivos.

4 - Os alinhamentos magnéticos delimitaram alinhamentos estruturais que podem representar zonas de cisalhamento, falhas e/ou fraturas no embasamento. São apresentados duas direções principais de alinhamentos nordeste-sudoeste (NE-SW) e noroeste-sudeste (NW-SE), estando o NW-SE interceptando o NE-SW e mostrando-se com movimento no sentido dextrógiro. Em alguns segmentos da área, destaca-se alinhamento na direção leste-oeste (E-W) e restritamente na direção norte-sul (N-S), este mais recente na região.

5 - São caracterizantes no setor nordeste da região, uma faixa de alinhamentos de falha na direção NW-SE, com destaque de um alto magnético, evidenciando mobilização do embasamento, que no contexto geológico pode sugerir uma zona de rifte, com parte emersa na área da plataforma continental.

6 - Os alinhamentos magnéticos, no contexto da hidrogeologia, na direção NW-SE, mais recentes e de regime frágil, são mais promissores à recarga pela sua viabilidade de favorecer a ocorrência de “fraturas abertas”.

7 - Os mapas magnéticos de continuação para cima, campo total, primeira derivada vertical e susceptibilidade magnética aparente favoreceram a interpretação qualitativa à eliminação da ambigüidade na área. O mapa de primeira derivada vertical favoreceu à interpretação dos realces dos corpos litológicos de natureza intrusiva e alinhamentos marcados pelos resultados da oxidação de minerais ferro-magnéticos. O mapa de continuação para cima favoreceu a interpretação das anomalias em vários níveis de observação. O mapa da susceptibilidade magnética aparente permitiu uma análise das anomalias relacionadas à redução ao polo.

8 - Estão caracterizadas no mapa gravimétrico de anomalia Bouguer (g_{AB}) duas unidades gravimétricas limitadas por alinhamentos estruturais e quatro sistemas de falhamentos sendo dois principais, nas direções NE-SW e NW-SE, e dois, de restrita intensidade, nas direções E-W e N-S, resultados de prováveis reativações mais recentes.

9 - A estruturação realçada na gravimetria caracteriza conjuntos litotípicos para o embasamento com segmentos metamórficos e granitóides, que estão sobrepostos pelos sedimentos do grupo Barreiras e de seqüências terciárias e quaternárias.

10 - Os altos e baixos gravimétricos sugerem uma geometria dos alinhamentos geotectônicos onde o "trend" NE-SW é o principal e o mais antigo da região.

11 - A eletroresistividade, através das sondagens elétricas verticais (SEVs), permitiu estabelecer três unidades geoeletricas e uma subunidade de características geoeletricas distintas, sublinhando, três principais áreas com estratos geoeletricos com indicação de predomínio de conjuntos litológicos na compartimentação estratigráfica.

12 - As características geoeletricas das SEV's apontam uma importante área de aquífero distribuída na região de Euzébio/Aquiraz, com a presença dos sedimentos do Grupo Barreiras alcançando uma profundidade na ordem de 54 metros que corresponde a altitude do topo do embasamento cristalino.

13 - As SEV's apontam na porção leste da seção estudada maior espessura de sedimentos e maior profundidade do topo do embasamento cristalino, onde ocorre um suave relevo magnético e elevados valores de anomalia Bouguer.

14 - Os resultados apresentados sugerem estimular a pesquisa de novos estudos para descrever a evolução desse segmento litosférico na Região Metropolitana de Fortaleza e suas implicações nos quadros geotectônico e hidrogeológico. O levantamento da eletroresistividade só é recomendável na Região Metropolitana de Fortaleza nas áreas de restrita povoação. O levantamento gravimétrico com a utilização do gravímetro tipo Worder Seintrex CG-2 na RMF não é muito recomendável considerando-se maiores custos operacionais, comparados aos valores apresentados com a utilização do gravímetro Rosemberg La Coste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M de. Geologia e Patrelogia do Arquipélago de Fernando de Noronha. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, 1958.
- ALMEIDA, F. F. M de, HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., FUCK, R. Províncias estruturais brasileiras. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 7, Campina Grande, 1977. *Atas...* Campina Grande: SBG, 1977. 449p:il. p. 363-391
- ALMEIDA, F. F. M de, HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B. He Uppert Precambrian of South America. *Boletim IG*, São Paulo, v.7, p. 45-80, 1976.
- ARTHAUD, M. H. & HARTMANN, M. B. A geologia da região de independência (CE): um exemplo de tectônica de nappe no Ceará. In: CONGR. BRAS. GEOL., 34. Goiânia,1986. *Anais...*Coiânia,SBG.v.3,p.1160-1169.
- ASMUS, H. E. Geologia da Margem Continental Brasileira. In: SHOBHENHAUS, C. et alli. *Geologia do Brasil: Texto explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da área oceânica Adjacente incluindo Depósitos Minerais*. Brasília: DNPM, 1984.
- BARRETO, A. *Sumário geológico da região rutilífera de Independência-CE*. Fortaleza: SUDENE, 1967.
- BENEVIDES, H. C. Projeto mapas metalogenéticos e de previsão de recursos minerais. Folha SB.24-V-D; QUIXERAMOBIM, ESCALA 1:250.000. Fortaleza, DNPM/CPRM, 1983. 2v.
- BLAKELY, R. J. *Potential theory in Gravity & Magnetic Applications*. Cambridge University Press, 1995. Reprinted 1996.
- BRAGA, A. de P. G., PASSOS, C. A. B., SOUZA, E. M. de et alli. *Projeto Fortaleza. Relatório Final*. Recife; DNPM/CPRM, 1977. V.1.
- BRANDÃO, Ricardo L. *Diagnóstico geoambiental e os principais problemas de ocupação do meio Físico da Região Metropolitana de Fortaleza*. Fortaleza: CPRM, 1995. 105p:il.
- BRITO NEVES, B. B. de. *Regionalização geotectônica do Pré-cambriano nordestino*. São Paulo, 1975. 198p. Tese (Doutorado)- Instituto de Geociências, USP.

- . _ *Tectonic regimes in the proterozoic of Brazil*. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 12, João Pessoa, 1986. *Atas...* João Pessoa: SBG, 1986. 556p:il.
- CABY, R., ARTHAUD, M. Major precambrian napes of the Brazilian belt, Ceará, Northeast Brazil. *Geology*, v.14, p. 871-874, 1986.
- CAMPOS, M. de, BRAGA, A. de P.G., SOUZA, E. M. et al. *Projeto Rio Jaguaribe. Relatório Final*. Recife: DNPM/CPRM, 1976.. v.1. 2983p.
- CASTRO, D. L., MEDEIROS, W. E. Afinamento crustal associado à implantação das bacias intracratônicas do Trend Cariri-Potiguar. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 17, Fortaleza, 1997. *Resumos expandidos*. Boletim 15, p. 334-338.
- CAVALCANTE, J. C. FERREIRA, C. A., MEDEIROS, M. de F. et al. *Mapa Geológico do Estado do Ceará*. Brasília: DNPM/CPRM, 1983. Esc. 1:500.000.
- CRANDALL, R. Geographia, geologia, suprimento d'água, transporte e açudagem nos estados orientais do nordeste do Brasil, Parahyba, Rio Grande do Nordeste e Ceará. Rio de Janeiro: IFOCS, 1910.
- DOBRIN, M.B. Introduction to Geophysical Prospecting. 3. ed. New York: McGraw Hill, 1976, 630 p.
- ELLERT, Nelson. Prospecção geofísica aplicada à poluição das Águas Subterrâneas. Curso técnico. Fortaleza: Departamento de Geologia/UFC, 1997. 23p.
- GOMES, J. R. de C. et alli. Geologia. In: PROJETO RADAMBRASIL. Folhas SB24/25 Jaguaribe/Natal. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia/DNPM, 1981. 740p (Levantamento de Recursos Minerais, 23).
- GRANT, F.S., WEST, G.F. Interpretation Theory in Applied Geophysics. New York: McGraw-Hill, 1965, 584 p.
- HARTMANN, M.B. & ARTHAUD, M. H. *Complexo Pedra Branca: Aspectos descritivos da deformação crustal profunda*. Fortaleza: UNIFOR, 1986. 3p.

JARDIM DE SÁ, E. F., FOWLER, H. A. Orogênese brasileira e a suas relações com faixas supracrustais no nordeste do Ceará. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 10, Recife, 1981. *Atas ...* Recife: SBG, 1981. 513p:il p. 337-350.

JARDIM DE SÁ, E. F., MEDEIROS, W. E. de., CASTRO, D. L. de. Contribuição da Gravimetria aos modelos de estruturação crustal da província Borborema, Nordeste do Brasil. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 17, Fortaleza, 1997. *Resumos expandidos*. Boletim 15. Fortaleza: SBG, 1997. p. 352-357.

KELLER, G. V. & FRISCHKNECHT, F. C. Electrical Methods in Geophysical Prospecting. 1966. Pergamon Press Inc. International Series in Electromagnet Waves vol. 10.

LEAL, O. Inventário hidrogeológico do Nordeste: Folha nº 9, Jaguaribe-NO. Recife: SUDENE, 1970. 178p. (Série Hidrogeologia, 29).

LIMA, Cláudio Coelho., VIVIERS, Martha Cláudia., MOURA, Josilda R. S. O Grupo Barreiras na Bacia Potiguar: Relações entre padrão de afloramento, estruturas pré-Barreiras e Neotectonismo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, Natal, 1990. *Anais...* Natal: SBG, 1990. p. 607-619

MACEDO, M. A. de F., SÁ, S. M., KAWASHITA, K. A idade da faixa Orós: dados preliminares. *Rev. Bras. de Geociências*, v.18, n.3, p. 362-368, 1988.

MARINHO, J. M. L., CASTELO BRANCO, R. M. G., FRACALOSSO JÚNIOR, M. et al. Estudos gravimétricos e magnetométricos preliminares da zona costeira de Aracati-Ce. *Revista de Geologia* 1990, vol. 3: 51 a 57.

MEIRELES, A. J. de A., CASTRO, J. W. de A., BARBOSA, S. S. C. et al. Dinâmica sedimentar entre as praias do futuro e Iparana. Fortaleza. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, Natal, 1990. *Anais...* Natal: SBG, 1990. p. 796-806, V.2.

MENDONÇA, J. C. G. de S. & BRAGA, de P. G. Caracterização estratigráfica dos metassedimentos da região de Itaitaia-CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, Salvador, 1982. *Anais...* Salvador: SBG, 1982.. p. 325-338, V.1.

- MENDONÇA, J. C. G. de S., BRAGA, A. de P. G. As faixas vulcano-sedimentares de Orós e Jaguaribe: um greenstone belt? *Rev. Bras. de Geociências*, v.17, n.3, p. 225-241, 1987.
- MONTEIRO, A. C. & SINCLAIR, R. Mapa aeromagnético do Brasil (campo total reduzido do IGRF - relevo sombreado. CPRM & PGW, 1996.
- NASCIMENTO, D. A. do., GAVA, A., PIRES, J. de L. et al. Geologia. *Mapeamento regional*. In: Projeto RADAMBRASIL. Folha SA.24-Fortaleza. Rio de Janeiro: DNPM, 1981. v.21, p. 23-133.
- NUCLEBRÁS. *Projeto Aerogeofísico Itatira*. Rio de Janeiro, 1977
- OLIVEIRA, J.F. de. & CAVALCANTE, J.C. Folha Mombaça. *Mapeamento Geológico. Relatório Final*. Recife: DNPM, 1993 v.1.
- OLIVEIRA, J.F. de. Interpretação magnetométrica e radiométrica da folha Riacho Queimadas. In: 3^o. Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, 1995. V.I. p.498 a 502.
- OLIVEIRA, J.F. & CASTELO BRANCO, R.M.G. Subsídios de dados aeromagnéticos para a neotectônica na região Metropolitana de Fortaleza. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 17, Fortaleza, 1997. *Resumos expandidos*. Boletim n.15. Fortaleza: SBG, 1997. p. 361-364.
- PARENTE, C.V., FUCK, R. A. Geologia da ocorrência de cobre de mandacaru(PI). *Rev. Bras. de Geociências*, v.17, n.1, p. 21-32, 1987.
- PASSOS, C. A. B., GOMES, F. E. M. *Projeto Alcalina do Salgadinho: Relatório Final*. Recife: DNPM/CPRM, 1979.
- PESSOA, R. R., & ARCHANJO, C. J. *Contribuição ao estudo de evolução geocronológica do maciço de Tróia-CE*. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 12, João Pessoa, 1986. *Atas...* João Pessoa: SBG, 1986. p. 75-88.
- SANTOS, E. J. *Mapa Geológico preliminar do estado do Ceará*. Recife: CPRM, 1972. Escala 1:500.000.

SANTOS, E.J. dos., BRITO NEVES, B.B. de. Província Borborema. In: *O Pré-cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgard Blucher, 1984. 378p:il p. 123-186.

SCHOBENHAUS, C. *Mapa Geológico do Brasil*. Rio de Janeiro: DNPM, 1982. Escala 1:2.500.000.

SOUZA, E.M. de 7 BRAGA, A. Caracterização tectonometamórfica do Arqueano/Proterozóico da região de Irauçuba-CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34, Goiânia, 1986. *Anais...* Goiânia: SBG, 1986. p. 770-783, V.2.

TORQUATO, J. R. , PEREIRA, L. H., CAVALCANTE, V. M. M. Reconhecimento geocronológico e químico da província subvulcânica do Maracaú-Folha de Santa Quitéria(CE). In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 12, João Pessoa, 1986. *Atas ...* João Pessoa: SBG, 1986. 556p. (Boletim, 10) p. 94-108.

VANDOROS, P., OLIVEIRA, M. A. F. Sobre o fonolito de Messejana, Ceará. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 40, n.2, p. 203-206, 1968.

WINKLER, H.G. E. *Petrogênese de rochas metamórficas*. Porto Alegre: Edgard Blucher, 1977.