



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

TIAGO SIQUEIRA DE MIRANDA

**ESTUDO GEOFÍSICO E GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA CHAPADA DO APODI,
BACIA POTIGUAR**

RECIFE-PE

2011

TIAGO SIQUEIRA DE MIRANDA

Geólogo, Universidade Federal de Pernambuco, 2008

ESTUDO GEOFÍSICO E GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA CHAPADA DO APODI,
BACIA POTIGUAR

Dissertação que apresentou ao Programa de Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, orientada pelos Professores Joaquim Alves da Motta e João Manoel Filho, como preenchimento parcial dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Geociências, área de concentração Geofísica, Geoquímica e Evolução Crustal, defendida e aprovada em 04 de fevereiro de 2011.

RECIFE-PE

2011

Catálogo na fonte

Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

M672e Miranda, Tiago Siqueira de.

Estudo Geofísico e Geológico-Estrutural da Chapada da Apodi, Bacia Potiguar / Tiago Siqueira de Miranda. - Recife: O Autor, 2011.

x, 165f., il., figs., gráfs.; tabs.

Orientadores: Prof^o. Dr^o. Joaquim Alves da Motta.

Prof^o. Dr^o. João Manoel Filho.

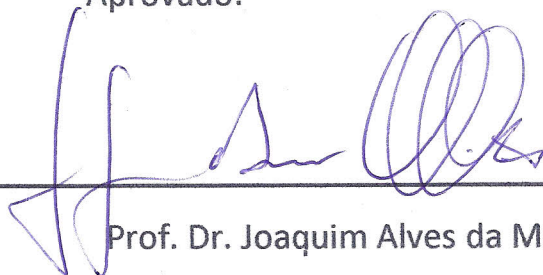
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós Graduação em Geociências, 2011.

Inclui Referências Bibliográficas e Anexos.

1. Geociências. 2. Geologia Estrutural. 3. Gravimetria. 4. Eletroresistividade. 5. Chapada do Apodi. I. Motta, Joaquim Alves da. II. Manuel Filho, João. III. Título.

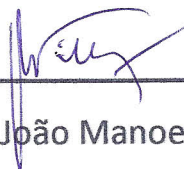
Tiago Siqueira de Miranda

Aprovado:



Prof. Dr. Joaquim Alves da Motta

04/02/2011



Prof. Dr. João Manoel Filho

04/02/2011

Prof. Dr. Francisco Hilário Bezerra

04/02/2011

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família pelo amor, carinho e educação.

A minha amada Cristiana Duarte pela força em todos os momentos durante esta jornada.

Ao professor João Manoel pela oportunidade de fazer parte do Projeto Apodi. Obrigado pela confiança, respeito, honestidade, compreensão, motivação e orientação durante todo o nosso trabalho, contribuindo para o meu desenvolvimento técnico, profissional, intelectual e humano.

Ao professor Joaquim Alves da Motta pela compreensão, orientação, motivação, sugestões valiosas em todas as etapas deste trabalho e pela hospitalidade no LGA.

Ao professor Edilton Feitosa pela orientação, discussões técnicas, esclarecimentos, apoio e atenção. Afinal muito deste trabalho teve a sua participação, durante o campo e fora dele.

Ao técnico em geofísica Paulo Pedrosa pela amizade e orientação nas atividades de campo.

Agradeço também a todos que fizeram parte do Projeto Apodi e me ajudaram de forma decisiva durante as etapas de campo, Edjânio Francisco, Pedro Vinícius, Rodrigo Ribeiro, Danilo Câmera, Karlla Michele, Lindoelma Muniz e em especial a Dona Socorro, nossa matriarca, sempre nos dando força em todos os momentos.

Ao professor Benjamim Bley de Brito Neves, pelos grandiosos esclarecimentos durante as etapas de campo.

Ao professor José Geílson Alves Demétrio pelas valiosas conversas e disponibilidade de uso do LABHID durante a fase de elaboração deste trabalho.

Ao professor Hilário Bezerra pelas dúvidas esclarecidas e trabalhos cedidos.

À Tereza Maciel pela delicadeza e presteza junto à secretaria do LABHID.

Aos professores Gorki Mariano, Sérgio Pacheco Neves e Paulo de Barros Correia pela força, tanto geológica, como pessoal.

Aos amigos e companheiros de pós-graduação pela força e entusiasmo, Wilker dos Santos, Lorena Coccentino, Mário Valença e Wellington Stanford.

Agradecimentos são devidos também ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, principalmente à Elizabeth Galdino.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Geologia/UFPE, especialmente a Maria Rosa de Paula, Sônia Agostinho e Janice Gomes.

À Agência Nacional de Águas e à Associação Tecnológica de Pernambuco, pelo apoio financeiro.

À Capes, pela bolsa de estudos concedida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE FOTOS	VI
LISTA DE TABELAS.....	VIII
RESUMO	IX
ABSTRATC	X
CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	1
1.1- APRESENTAÇÃO	1
1.2 - JUSTIFICATIVA	1
1.3 - OBJETIVO	1
1.4 - CARACTERIZAÇÕES DA ÁREA DE ESTUDO	1
1.4.1 - LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E GEOLÓGICA	1
1.4.2 - DADOS HIDROCLIMÁTICOS	4
1.4.3 - CLIMA	5
1.4.4 - TEMPERATURA	5
1.4.5 - UMIDADE RELATIVA	5
1.4.6 - HIDROGRAFIA.....	6
1.4.7 - VEGETAÇÃO	9
1.4.8 - GEOMORFOLOGIA	9
CAPÍTULO 2 - GEOLOGIA REGIONAL, GEOLOGIA LOCAL E CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO.....	11
2.1 – GEOLOGIA REGIONAL	11
2.1.1 – BACIA POTIGUAR – UMA PEQUENA INTRODUÇÃO À GEOLOGIA E TECTÔNICA	11
2.1.2 – ARCABOUÇO ESTRUTURAL DA BACIA POTIGUAR	14
2.1.3 – LITOESTRATIGRAFIA DA BACIA POTIGUAR.....	16
2.2 – GEOLOGIA LOCAL.....	19
2.2.1 - EMBASAMENTO PALEOPROTEROZÓICO A PROTEROZÓICO	21
2.2.1.1 - <i>Paleoproterozóico: Grupo Orós (PPoq)</i>	21
2.2.1.2 - <i>Granitóides Neoproterozóicos (NP3Y2it45)</i>	22
2.2.2 - OCORRÊNCIAS CRETÁCIAS	23
2.2.3 - DEPÓSITOS DO NEÓGENO.....	25
2.2.3.1 - <i>Depósitos Pleistocênicos</i>	25
2.3 – CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO.....	27
2.3.1 – AQUÍFERO JANDAÍRA	27
2.3.2 – AQUÍFERO QUEBRADAS	27
2.3.3 – AQUÍFERO AÇU.....	27
CAPÍTULO 3 - GEOLOGIA ESTRUTURAL.....	28
3.1 – INTRODUÇÃO.....	28
3.2 - FOTOLINEAMENTOS.....	30
3.3 - ACAMAMENTO.....	32

3.3.1 - FORMAÇÃO JANDAÍRA	32
3.3.2 - FORMAÇÃO AÇU	35
3.4 – FRATURAS DE EXTENSÃO	36
3.4.1 - FORMAÇÃO JANDAÍRA (K2J)	36
3.4.2 - FORMAÇÃO AÇU (K12A)	41
3.5 – FALHAS DISTENSIONAIS	42
3.5.1 - FALHA DAS PEDRINHAS	42
3.5.2 - FALHA VERTENTE - SANTA CRUZ	44
3.6 – JUNTAS ESTILOLÍTICAS	45
3.7 – EVOLUÇÃO TECTÔNICA E ESTRUTURAS RELACIONADAS À ÁREA DE ESTUDO	47
3.8 – VAZÕES INFORMADAS DO AQUIFERO JANDAÍRA ASSOCIADAS À GEOLOGIA ESTRUTURAL	50
3.9 – FENÔMENOS CÁRSTICOS ASSOCIADOS À GEOLOGIA ESTRUTURAL	52
3.9.1 - CARSTIFICAÇÃO	52
3.9.2 - CAVERNAS	55
3.9.2.1 - <i>Complexo Espeleológico da Furna Feia</i>	57
3.9.3 – SUMIDOUROS	60
3.9.4 - DOLINAS	63
CAPÍTULO 4- GRAVIMETRIA	65
4.1 – INTRODUÇÃO	65
4.2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	65
4.2.1 – LEI DA ATRAÇÃO GRAVITACIONAL	65
4.2.2 – CAMPO GRAVITACIONAL TERRESTRE	65
4.2.3 – POTENCIAL GRAVITACIONAL	66
4.2.4 – A GRAVIMETRIA E AS CORREÇÕES GRAVIMÉTRICAS	67
4.2.5 – DENSIDADE DAS ROCHAS	67
4.2.6 – TÉCNICA DE SEPARAÇÃO GRAVIMÉTRICA	68
4.3 - MATERIAIS E MÉTODOS	68
4.4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.4.1 - MAPA BOUGUER	72
4.4.2 - MAPA GRAVIMÉTRICO RESIDUAL	74
4.4.3 - MAPA GRAVIMÉTRICO REGIONAL	74
4.4.4 - MODELAGEM GRAVIMÉTRICA 3D DA TOPOGRAFIA DO TOPO DO EMBASAMENTO	77
4.4.5 - MODELAGEM GRAVIMÉTRICA 2D	79
4.4.5.1 - <i>Perfil A-A'</i>	81
4.4.5.2 - <i>Perfil B-B'</i>	81
4.4.5.3 - <i>Perfil C-C'</i>	82
4.4.5.4 - <i>Perfil D-D'</i>	83
4.4.5.5 - <i>Perfil E-E'</i>	84
4.5 – INTEGRAÇÃO DOS PERFIS 2D E SUA CORRELAÇÃO COM O MODELO 3D	85
4.6 – ANÁLISE E INTEGRAÇÃO DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS E GRAVIMÉTRICOS	86
CAPÍTULO 5 - ELETRORRESISTIVIDADE	88

5.1 – INTRODUÇÃO.....	88
5.2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	88
5.2.1 – LEI DE OHM	88
5.2.2 – CONDUTIBILIDADE DAS ROCHAS	89
5.2.3 – LEI DE ARCHIE	90
5.2.4 – MEDIDAS DA RESISTIVIDADE EM QUADRIPOLOS	90
5.2.5 – RESISTIVIDADE APARENTE	90
5.2.6 – TÉCNICAS DE MEDIÇÃO	91
5.2.7 – RESISTÊNCIA TRANSVERSAL E CONDUTÂNCIA LONGITUDINAL.....	91
5.3 – MATERIAS E MÉTODOS.....	92
5.3.1 - INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DAS MEDIÇÕES ELÉTRICAS.....	93
5.3.2 – ELABORAÇÃO DOS MAPAS TEMÁTICOS	97
5.4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
5.4.1 - MAPA DO TOPO DO EMBASAMENTO CRISTALINO.....	99
5.4.2 – MAPA DE ISÓPACAS DA FORMAÇÃO AÇU.....	102
5.4.3 – MAPA DE ISÓPACAS DA FORMAÇÃO JANDAÍRA.....	104
5.4.4 – MAPAS DE RESISTÊNCIAS TRANSVERSAIS DA FORMAÇÃO JANDAÍRA	106
5.4.5 – MAPA DE CONDUTÂNCIAS LONGITUDINAIS DA PORÇÃO MÉDIA DA FORMAÇÃO JANDAÍRA	106
CAPÍTULO 6 - DISCUSSÃO.....	110
6.1 – COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL DA CHAPADA DO APODI.....	110
6.2 – DEPOCENTRO DE BARAÚNA	111
CAPÍTULO 7- CONCLUSÕES	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
ANEXO 1 - TABELA DE DESCRIÇÃO DOS AFLORAMENTOS LEVANTADOS EM CAMPO.....	122
ANEXO 2 - DADOS BRUTOS DO LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO	136
ANEXO 3 - METODOLOGIA DE DENSIDADE PELO MÉTODO DE MERCÚRIO.....	140
ANEXO 4 – SEVS : LOCALIZAÇÃO (UTM), CURVAS DE CAMPO E CALCULADAS.....	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização geográfica da área de estudo.....	2
Figura 1.2 – Mapa de localização geológica da área de estudo.	4
Figura 1.3 – Temperaturas médias mensais nos postos de Jaguaruana-CE e Mossoró-RN, na Chapada do Apodi.(Normais Climatológicas 1961-1990).....	5
Figura 1.4 – Distribuição da umidade relativa média mensal nos postos de Jaguaruana-CE e Mossoró-RN, segundo as Normais Climatológicas (1961-1990).....	6
Figura 1.5 – Mapa da distribuição das bacias de drenagem e corpos d’água superficiais da área de estudo.	8
Figura 1.6 - Mapa Hipsométrico da área de estudo.	10
Figura 2.1 – Mapa de localização da área de estudo dentro do contexto da Bacia Potiguar.	12

Figura 2.2 – Comparação da interpretação dos subdomínios geofísicos-tectônicos da Província Borborema com o mapa de componente regional do campo magnético total reduzido ao pólo magnético. Fonte: Oliveira, 2008.	13
Figura 2.3 – Modelo de evolução tectônica da Bacia Potiguar ilustrando a variação do campo de tensões e eixos cinemáticos do Neoproterozóico ao Pleistoceno (Fonte: Sousa et al. 2002).	14
Figura 2.4 – Compartimentação estrutural da Bacia Potiguar (modificado de Feitosa & Melo, 1998).	15
Figura 2.5 – Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar (Pessoa Neto et al. 2007).	17
Figura 2.6 - Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar com destaque da linha de costa (traço preto interrompido) e do Grupo Apodi (retângulo vermelho) (modificado de Pessoa Neto et al. 2007).....	18
Figura 2.7 – Mapa geológico da área de estudo com afloramentos visitados.....	20
Figura 3.1 - Mapa geológico-estrutural da área de estudo.	29
Figura 3.2 – Mapa de fotolineamentos da Chapada do Apodi.....	31
Figura 3.3 – Diagrama da distribuição dos pólos das atitudes na Formação Jandaíra, produzidos com auxílio do software Stereonet® (n= número total de atitudes).	32
Figura 3.4 - Diagrama da distribuição dos pólos das atitudes na Formação Açú, produzidos com auxílio do software Stereonet® (n= número total de atitudes).	35
Figura 3.5 – Diagramas de roseta para fraturas extensivas. a) Direções do fraturamento principal. b) Direções do fraturamento secundário (n= número de medidas).	37
Figura 3.6 – Diagrama de roseta com as direções das fraturas na Formação Açú (n= número de medidas).	41
Figura 3.7 – Bloco diagrama dos campos de esforços em ambiente extensional ao qual está relacionada a área de estudo. Destaque para juntas estilolíticas (horizontal) e as fraturas de extensão (vertical). ...	47
Figura 3.8 – Modelo de campo de tensões e estruturas (Neocomiano ao Neógeno) da Bacia Potiguar (modificado de Medeiros et al. 2001).	49
Figura 3.9 – Distribuição espacial das vazões informadas do aquífero Jandaíra na área de estudo, sobre o mapa geológico estrutural.....	51
Figura 3.10 – Mapa geológico-estrutural da área de estudo com feições cársticas da formação Jandaíra.	54
Figura 3.11 - Diagrama de rosetas evidenciando a direção de abertura das cavernas da Formação Jandaíra.	57
Figura 3.12 – Diagrama de rosetas para direção de abertura dos sumidouros da Formação Jandaíra na Chapada do Apodi.	60
Figura 4.1 – Aceleração centrífuga (ac), aceleração de atração (a), aceleração da gravidade (g) e Φ a latitude em que se encontra o corpo. Fonte: Luiz & Silva (1995).	66
Figura 4.2 – Mapa geológico com estações gravimétricas e de amostragem para densidade das rochas.	69
Figura 4.3 - Mapa de anomalia bouguer mostrando o ajuste entre as principais anomalias gravimétricas.	73
Figura 4.4 – Mapa gravimétrico residual destacando anomalias de curto comprimento de onda.	75
Figura 4.5 – Mapa gravimétrico regional mostrando as estruturas de caráter profundo e regionais.	76
Figura 4.6 – Mapa de profundidade do topo do embasamento – (Modelo 3D).	78

Figura 4.7 – Mapa Bouguer da área de estudo com a localização dos perfis 2D e dos poços profundos perfurados pela PETROBRAS.	80
Figura 4.8 – a) Perfil A-A' (dir. NW-SE) com destaque para locação dos poços 1SMO1RN e 9MOP25RN (exagero de escala vertical 2,5); b) localização do modelo 2D no mapa gravimétrico bouguer.....	81
Figura 4.9 – a) Modelo B-B' de direção N-S, destaque para a ocorrência de rocha vulcânica a sul (exagero de escala vertical 2,5); b) localização do perfil B-B' no mapa bouguer.	82
Figura 4.10 – a) Perfil C-C' de direção E-W, ressalva para falhas extensionais do embasamento (exagero de escala vertical 2,5); b) Localização do modelo C-C' no mapa bouguer.....	83
Figura 4.11 - a) Perfil D-D' de direção E-W e 90 km de extensão (exagero vertical 2,5); b) localização do modelo D-D' no mapa gravimétrico bouguer.	84
Figura 4.12 – a) Perfil E-E' de direção NW-SE e 50 km de comprimento (exagero vertical 2,5); b) localização do modelo no mapa bouguer.	85
Figura 4.13 – Mapa aeromagnético da Chapada do Apodi.	87
Figura 5.1 – Condutor ôhmico de resistividade R (Fonte: Feitosa et al. 2008)	88
Figura 5.2 – Mapa de localização das SEVs realizadas na área de estudo.	94
Figura 5.3– Correlação Resistência Transversal dos Resistivos x Espessura da Formação Jandaíra. Fonte: Feitosa (2003a).....	95
Figura 5.4 – SEV 43. Curva característica da região estuda. Destaque para os horizontes elétricos identificados.	96
Figura 5.5 – Mapa do topo do embasamento cristalino	100
Figura 5.6 – Potenciometria da Região de Mossoró (Fonte: Feitosa, 1996).	101
Figura 5.7 – Isópacas da Formação Açú	103
Figura 5.8 – Isópacas da Formação Jandaíra	105
Figura 5.9 – Mapa de resistências transversais do calcário inferior (calcário 2).	107
Figura 5.10 – Mapa de resistências transversais do calcário superior (calcário	108
Figura 5.11 – Mapa de condutâncias longitudinais da porção média da Formação Jandaíra (folhelhos e/ou margas).	109
Figura 6.1 – Compartimentação estrutural da Chapada do Apodi mostrando o Depocentro de Baraúna.	113
Figura 6.2 – Mapa geológico integrado com a compartimentação estrutural da Chapada do Apodi...114	
Figura 6.3 – Mapa Bouguer com localização das estações gravimétricas.....	115

LISTA DE FOTOS

Foto 2.1 – Blocos rolados de quartzito no Serrote dos Porcos, alto do embasamento presente no extremo norte da área de estudo (ANA-24: 649847, 9453300).....	21
Foto 2.2 – Quartzito Orós, Serrote dos Porcos, alinhado NE-SW. (ANA-24; 649847, 9453300).....	22
Foto 2.3 – Granitóide com enclave diorítico orientado segundo a foliação de fluxo magmático. (ANA-32; 606279, 9433374).	22

Foto 2.4 – Inselbergs de Quixeré, granitóides como testemunhos do embasamento na borda sudoeste da Chapada do Apodi (ANA-32: 606279, 9433374)	23
Foto 2.5 – Arenito Açú médio a grosso de matriz predominantemente argilosa com estratificação cruzada de pequeno porte. (ANA-11; 611032, 9437982).	23
Foto 2.6 – Argilitos avermelhados, folhelhos e arenitos finos caulínicos da Formação Quebradas na cuesta da Chapada do Apodi. (ANA-92: 618248,9441849).....	24
Foto 2.7 – Calcário Jandaíra carstificado e erodido, Lajedo Escada, Baraúna - RN (ANA-31; 641018, 9428612).	25
Foto 2.8 – Cobertura areno-argilosa ferruginosa com cascalhos soltos numa matriz fina. (ANA-14:679371,9433592)	26
Foto 2.9 – Arenito fino a médio, silicificado, da Formação Serra do Martins (?), Serra Mossoró (ANA-03; 670914, 9438294).	26
Foto 2.10 – Aluvião do rio Jaguaribe, (BR-116; 593232, 9431181).	27
Foto 3.1 – Camadas inclinadas da Formação Jandaíra (160Az/20°/NE), borda noroeste da Chapada do Apodi, Lajedo Largo em Jaguaruana - CE (ANA-52; 641339, 9456841).	33
Foto 3.2 – Juntas de alívio de pressão dispostas horizontalmente e paralela ao acamamento (315 Az/horizontal) no calcário Jandaíra, Pedreira Bonsucesso – Jaguaruana/CE (ANA-108; 638136, 9441433).	34
Foto 3.3 – Juntas de alívio de pressão cortadas por fraturas extensivas ortogonalmente formando mullions de interseção, calcário Jandaíra. Pedreira Bonsucesso (ANA-61; 638136, 9441433).....	34
Foto 3.4 – Arenito Açú, plano de acamamento com direção 54 Az mergulhando 11° para sudeste (ANA-56; 633531, 9453594).	35
Foto 3.5 – Furna dos Ossos, Lajedo Escada (ANA-31; 641018, 9428612). Feição desenvolvida segundo a direção do fraturamento principal, 310 Az.	38
Foto 3.6 – Fraturas extensivas principais (NW-SE) conectadas ortogonalmente às secundárias, Calcário Jandaíra, Lajedo Mato Alto (ANA-46; 638700, 9436100).....	39
Foto 3.7 – Calcário Jandaíra com veios de calcita preenchendo fraturas de direção N-S (ANA-29; 656414, 9443643).	39
Foto 3.8 – Caverna do lajedo Largo, desenvolvida a partir da fratura, direção 295 Az (ANA-52).	40
Foto 3.9 – Fratura de direção 165 Az, com exibição do nível estático da água no aquífero Jandaíra (ANA-07; 626791, 9422768).	40
Foto 3.10 – Fraturas no arenito da Formação Açú, preenchidas por material carbonático, direção 38 Az (ANA-11;611985,9436144).	41
Foto 3.11 – Escarpa sudoeste da Chapada do Apodi, arenitos finos intercalados com argilitos e folhelhos (Formação Quebradas/Açú), camadas com direção 130 Az mergulhando 10° para nordeste (ANA-85A; 605152, 9426601).....	43
Foto 3.12 – Intercalação de arenitos finos, folhelhos e argilitos com estratos verticalizados de direção 30 Az com mergulho forte de 70° para sudeste (ANA-85B; 605152, 9426601).....	43
Foto 3.13 – Falha normal com blocos da Formação Jandaíra basculados, borda sudoeste da Chapada do Apodi (ANA-85: 605152, 9426601)..	44
Foto 3.14 – Falha Vertente-Santa Cruz, evidencia da tectônica distensional durante o Néogeno (ANA-10: 613985,9436144)	45

Foto 3.15 – Ocorrência de estilólito na Formação Jandaíra. Em destaque as setas vermelhas mostrando o posicionamento das juntas na horizontal. Serra do Vieira – Jaguaruana/CE (ANA-59: 631085,9448787).....	46
Foto 3.16 – Estilólitos em testemunho de sondagem do calcário Jandaíra, destaque das setas em vermelho mostrando a ocorrência na horizontal. Fábrica de cimento localizada no município de Baraúna.	46
Foto 3.17 – Fissura alargada pela movimentação da água gerando sumidouro na Formação Jandaíra. Estrutura alinhada 310 Az. (ANA-40:654676,9429858)	52
Foto 3.18 – Galeria com abóboda em forma de arco no Abrigo do Letreiro, Complexo Espeleológico da Furna Feia, Baraúna – RN (ANA-19; 662069, 9441784).....	55
Foto 3.19 – Estalactite em destaque na Caverna Pinga-Pinga localizada na Área de Reserva Legal, Baraúna – RN (ANA-18; 661907, 9441425).....	58
Foto 3.20 – Pinturas rupestres grafadas no calcário Jandaíra, Abrigo do Letreiro, Área de Reserva Legal (ANA-19; 662069; 9441784).....	59
Foto 3.21 – Boca de entrada da caverna Furna Feia (ANA 01; 659759; 9443129).....	59
Foto 3.22 – Espelotemas no salão da caverna Furna Feia (ANA 01; 659759; 9443129).....	60
Foto 3.23 – Sumidouro intermitente no Calcário Jandaíra, Sítio Ubaia (ANA-73; 632863, 9432853). 62	
Foto 3.24 – Sumidouro elíptico com eixo maior alinhando a 5 Az, Sítio Velame I, Baraúna (PO-24; 649043, 9438647).....	62
Foto 3.25 – Dolina formada por dissolução no Calcário Jandaíra, totalmente preenchida por água durante as chuvas (ANA-39; 618855, 9426829).	63
Foto 3.26 – Dolina formada por colapso ou abatimento do Calcário Jandaíra. Localizada na região do Mato Alto, Baraúna – RN (ANA-44; 623652, 9445421).....	64
Foto 5.1 – Instrumentos utilizados na sondagem elétrica vertical: resistivímetro GEOTRADE (modelo GTR-3), fios, bobinas e eletrodos. (SEV 37: 657825, 9450063).....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Percentual aproximado de ocupação da área de estudo por 3 (três) municípios do Rio Grande do Norte (54%) e 6 (seis) municípios do Ceará (46%).	3
Tabela 1.2 – Variáveis meteorológicas em Jaguaruana e Mossoró segundo as Normais Climatológicas 1961-1990.....	4
Tabela 3.1 – Cavernas visitadas na Formação Jandaíra nos municípios de Baraúna e Jaguarana.	56
Tabela 3.2 – Descrição dos sumidouros da Formação Jandaíra visitados na área de estudo	61
Tabela 4.1 – Coordenadas das estações gravimétricas realizadas dentro da área de estudo.	70
Tabela 4.2 – Valores de densidade (g/cm^3) das unidades litoestratigráficas presentes na área de estudo.	71
Tabela 5.1 – Horizontes Elétricos.....	95
Tabela 5.2 – SEVs Antigas Utilizadas	98
Tabela 5.3 – Poços Utilizados (Sistema geodésico UTM SAD 69).....	99

RESUMO

A região de estudo fica localizada entre as cidades de Mossoró, no Rio Grande do Norte e Limoeiro do Norte, no Ceará. Geologicamente a Chapada do Apodi está inserida na Plataforma Aracati e abrange o Grupo Apodi. O sistema aquífero Apodi é composto do topo para a base, pelo aquífero livre cárstico-fissural Jandaíra, pelo aquitard Quebradas e o aquífero semi-confinado Açú. O levantamento geológico-estrutural determinou a evolução tectono-estrutural no cenário hidrogeológico regional, em especial quanto ao desenvolvimento das feições cársticas da Formação Jandaíra. Fraturas de extensão, com direção NW-SE e NE-SW, são as principais estruturas que governam a recarga do aquífero Jandaíra e a formação das cavernas, sumidouros e dolinas. Feições estruturais observadas ao longo da *cuesta* oeste da Chapada do Apodi envolvem falhas distensionais de direção NNW, com mergulhos de alto ângulo. Estudos gravimétricos determinaram a distribuição espacial do sistema aquífero Apodi, estimando os pacotes sedimentares para avaliação das reservas disponíveis de água subterrânea. A integração da modelagem gravimétrica 2D e 3D apresentou o contorno superior do embasamento com mergulho suave no sentido norte e nordeste. A profundidade máxima de 930 m foi atingida no depocentro de Baraúna, mostrando tendência distensiva e de afinamento crustal. A região leste e oeste da área ficaram caracterizadas pelo controle de falhas normais e o conseqüente desenvolvimento de *horsts* e *grabens* formando janelas de sedimentação com até 730 m de profundidade. A porção sul é marcada por forte anomalia gravimétrica positiva de direção E-W, explicada pela ocorrência de rochas vulcânicas, possivelmente associadas ao evento magmático Rio Ceará Mirim. A eletorresistividade determinou a compartimentação estrutural da Chapada do Apodi, em quatro patameres: Alto de Lagoinha (cotas variando entre -330 e -200 metros), Plataforma de Baraúna (cotas variando de -400 a -550 metros), Baixo da MAISA (cotas atingem -700 metros) e Graben de Boa Vista (cotas atingem -900 metros), esses blocos estão condicionados pelo sistema de falhamento de Tiradentes, Falha da MAISA e Juremal. Com os dados obtidos neste trabalho foi visto que a compartimentação tectônica da Chapada do Apodi é controlada por falhas extensionais associadas ao embasamento, formando depressões que são de fundamental importância para acúmulo de água subterrânea.

Palavra-chave: Gravimetria, Eletorresistividade, Chapada do Apodi, Aquífero Açú, Aquitard Quebradas, Aquífero Jandaíra, Compartimentação Estrutural

ABSTRACT

The study area is located between the cities of Mossoró, in Rio Grande do Norte State and Limoeiro do Norte, in Ceará State. Geologically the Apodi Plateau is part of the Aracati Platform onshore Potiguar Basin and covers the Group Apodi. The Apodi aquifer system includes from top to bottom the karstic-fractured Jandaíra aquifer, Quebradas aquitard, and semi-confined Açu aquifer. The geological-structural survey has determined the tectono-structural regional hydrogeologic setting, particularly regarding the development of karstic features. Extension fractures, with NW-SE and NE-SW orientations, are the main structures governing the recharge of Jandaíra aquifer and the development of caves, sinkholes and dolines. Structural features observed along the western *cuesta* of the Apodi Plateau involve extensional faults of NNW direction, with high angle dips. The study area is characterized as an extensional environment. The spatial distribution and geometry of the Apodi aquifer system, evidenced through gravimetric field studies and modeling, have provided the basis for evaluating the groundwater reserves. The integration of 2D and 3D gravity modeling showed the upper border of the basement with gentle dip towards north and northeast. The maximum depth of 930 m was reached in the depocenter of Baraúna showing tensional trend and crustal thinning. The east and west control area were characterized by normal faulting and the subsequent development of grabens forming windows horsts and sedimentation up to 730 m depth. The southern portion is marked by strong positive gravity anomaly of EW direction, which is explained by the occurrence of volcanic rocks, possibly associated with the magmatic event Rio Ceará Mirim. Electro-resistivity surveys determined the structural subdivision of Apodi Plateau in four levels: the Upper Lagoinha (dimensions ranging between -330 and -200 meters), Baraúna Platform (dimensions ranging from -400 to -550 meters), Down's MAISA (dimensions reach -700 meters) and Boa Vista Graben (dimensions reach -900 meters), such blocks being conditioned by the system of faults Tiradentes, and MAISA-Juremal. With the data obtained it was seen that the tectonic separation of Apodi Plateau is controlled by extensional faults associated with basement, forming depressions which are of fundamental importance for the accumulation of groundwater.

Key-words: Gravity, Electro-resistivity, Apodi Plateau, Açu Aquifer, Quebradas Aquitard, Jandaíra Aquifer, Structural Subdivision

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

1.1- APRESENTAÇÃO

Esta dissertação apresenta uma síntese das informações coletadas durante o mapeamento geológico-estrutural e aquisição de dados geofísicos através do uso dos métodos de eletrorresistividade e gravimetria na Chapada do Apodi.

É parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGEOC) do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). O trabalho foi orientado pelo Prof. Dr. Joaquim Alves da Motta, Prof. Dr. João Manoel Filho e orientação extracurricular do Prof. Edilton Carneiro Feitosa. A pesquisa teve o suporte financeiro através do projeto *“Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Proposição de Modelo de Gestão Compartilhada para os Aquíferos da Chapada do Apodi, entre os Estados do Rio Grande do Norte e Ceará”*, desenvolvido pelo consórcio PROJETEC-TECHNE, com recursos da AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA dentro do Programa Nacional de Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (Acordo de Empréstimo N° 7420-BR/Banco Mundial). O autor recebeu bolsa de estudo da CAPES (Cordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior) dentro do Programa de Fomento à Pós-Graduação (PROF) no período de março de 2010 a janeiro de 2011.

1.2 - JUSTIFICATIVA

O estudo da atividade tectônica é importante para a identificação de estruturas relacionadas ao ambiente hidrogeológico. Entre os diversos fatores que influenciam o comportamento do fluxo das águas subterrâneas, a permeabilidade da formação é um dos pontos importantes na exploração. Tal permeabilidade é sensível à deformação causada pelas tensões atuantes nos aquíferos.

Os estudos geofísicos de gravimetria e eletrorresistividade são importantes fontes de pesquisa que fornecem informações do contorno da superfície topográfica do embasamento. Definem o modelo tridimensional do pacote sedimentar, possibilitando a identificação e localização de estruturas e alinhamentos estruturais.

1.3 - OBJETIVO

O principal enfoque deste trabalho é integrar os dados geológicos com os geofísicos (gravimetria e eletrorresistividade) para compreender a evolução tectono-estrutural no cenário hidrogeológico regional, em especial quanto ao desenvolvimento das feições cársticas da Formação Jandaíra (principal aquífero da região) e determinar a distribuição espacial do sistema aquífero Apodi, visando o entendimento e a quantificação tridimensional do pacote sedimentar para avaliar reservas disponíveis de água subterrânea.

1.4 - CARACTERIZAÇÕES DA ÁREA DE ESTUDO

1.4.1 - Localização geográfica e geológica

A área de estudo fica localizada na faixa compreendida entre as cidades de Mossoró, no Rio Grande do Norte e Limoeiro do Norte, no Ceará. Cobre uma superfície de 2608 km², sendo 1427 km² no Rio Grande do Norte e 1181 km² no Ceará, formando, na direção leste-oeste, um polígono trapezoidal limitado pelo rio Apodi/Mossoró, a leste e pelos rios Quixeré e Jaguaribe, a oeste (**figura 1.1**).

Atualmente na região estudada encontram-se grandes empresas agrícolas com perímetros irrigados para produção de fruticultura, transformando a região em um importante pólo econômico de exportação de frutas para Europa e América do Norte.

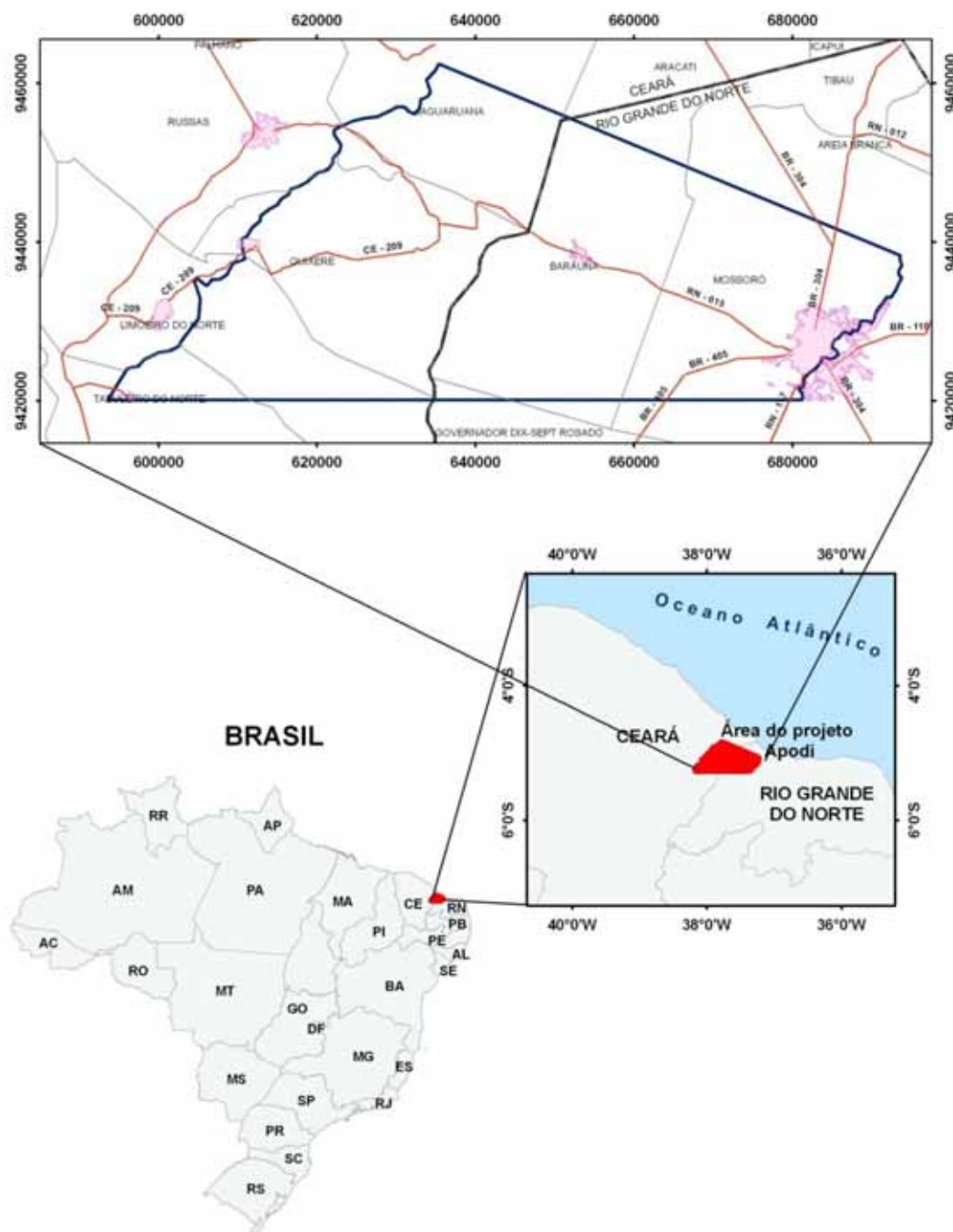


Figura 1.1 – Localização geográfica da área de estudo.

O território da área de estudo se distribui por 9 (nove) municípios, conforme mostrado na tabela 1.1. No Rio Grande do Norte, Baraúna (30%), e Mossoró (24%), possuem a maior ocupação territorial (54%) tendo Dix-Sept Rosado menos de 1%.

Tabela 1.1 – Percentual aproximado de ocupação da área de estudo por 3 (três) municípios do Rio Grande do Norte (54%) e 6 (seis) municípios do Ceará (46%).

Município	Area km ²	Fração	Percentual
Mossoró	638.0	0.24	24
Baraúna	775.7	0.30	30
Gov. Dix-Sept Rosado	13.2	0.00	0
Aracati	0.2	0.00	0
Jaguaruana	274.4	0.11	11
Russas	29.9	0.01	1
Quixeré	551.8	0.21	21
Limoeiro do Norte	251.5	0.10	10
Tabuleiro do Norte	73.3	0.03	3
Área Total	2608	1.00	100

No Ceará, que ocupa cerca de 46% do território, os municípios de Quixeré (21%), Jaguaruana (11%) e Limoeiro do Norte (10%), são os de maior domínio territorial, secundados por Tabuleiro do Norte (3%), e Russas (1%). O município de Aracati tem participação praticamente desprezível, com apenas 0,2 km² ou 0,1% na área de estudo.

Geologicamente a Chapada do Apodi está inserida na “Plataforma” de Aracati, porção emersa da Bacia Potiguar, dentro da supersequência Drifte Albiano/Campaniano, é caracterizada por sedimentação flúvio-marinha transgressiva (**figura 1.2**). A área de estudo abrange as formações Açu, Jandaíra e depósitos cenozóicos.

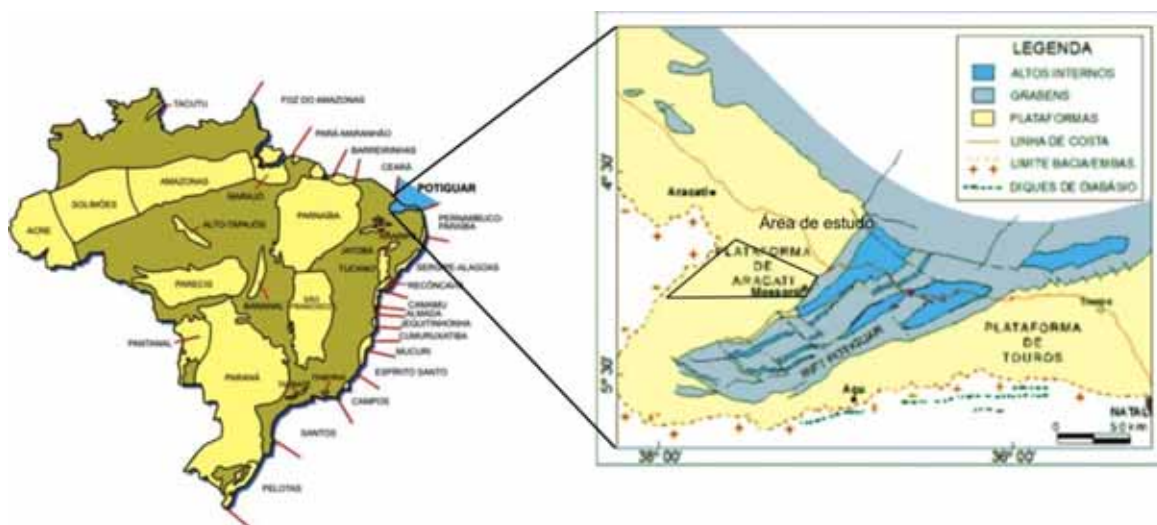


Figura 1.2 – Mapa de localização geológica da área de estudo (Fonte: Fundação Phoenix).

1.4.2 - Dados Hidroclimáticos

Os dados hidroclimáticos disponíveis incluem variáveis meteorológicas e hidrológicas. No que se refere aos dados climatológicos, a caracterização dos elementos e fatores do clima na área de estudo foi feita a partir de dados fornecidos pelas Normais Climatológicas de 1961-1990 (temperatura, umidade relativa, ventos, insolação) para as estações meteorológicas de Jaguaruana no Ceará e Mossoró, no Rio Grande do Norte, únicos municípios da área de estudo que possuem esse tipo de estação (tabela 1.2). As informações sobre ventos foram obtidas das Normais Climatológicas de 1911-1942 da Área da SUDENE (SUDENE, 1963).

Tabela 1.2 – Variáveis meteorológicas em Jaguaruana e Mossoró segundo as Normais Climatológicas 1961-1990.

Meses	Temperatura °C		Umidade relativa %		Insolação (horas/mês)	
	Jaguaruana	Mossoró	Jaguaruana	Mossoró	Jaguaruana	Mossoró
Jan	27,9	26,8	71,0	67,0	255,3	236,6
Fev	24,0	27,0	75,0	72,0	194,4	185,2
Mar	26,9	27,3	82,0	78,0	180,4	194,2
Abr	26,9	27,3	82,0	74,0	198,9	194,4
Mai	25,2	27,0	79,0	76,0	220,7	217,5
Jun	26,1	26,7	77,0	72,0	121,5	218,3
Jul	26,0	26,5	74,0	69,0	236,9	234,3
Ago	26,4	27,1	68,0	62,0	280,5	269,3
Set	27,3	27,7	68,0	61,0	268,2	254,0
Out	27,5	28,1	67,0	62,0	296,8	287,6
Nov	28,1	28,3	68,0	63,0	271,5	266,8
Dez	26,0	28,7	69,0	66,0	275,1	221,9
MÊS	26,5	27,4	73,3	68,5	233,4	231,7
ANO	°C		Horas/ano			
	26,5	27,4	73,3	68,5	2800,2	2780,1

1.4.3 - Clima

Segundo as Normais Climatológicas do Ministério da Agricultura e Reforma Agrária (1961-1990) (Mara, 1992), na área de estudo os dados meteorológicos se restringem aos postos de Jaguaruana e Mossoró. O clima da área é do tipo Bsh de Koeppen, semi-árido, caracterizado pela ocorrência de duas estações distintas: uma de chuvas, denominada de inverno com duração aproximada de 4 (quatro) meses e uma de estiagem nos 8 (oito) meses restantes do ano hidrológico.

1.4.4 - Temperatura

As temperaturas médias mensais oscilam na faixa compreendida entre 24° a 28,7°C (**figura 1.3**). No posto de Jaguaruana os valores médios de 24 °C em fevereiro e de 25,2 °C em maio fogem do comportamento normal, pois são inferiores aos 26 °C que caracterizam as médias dos meses mais frios, que são junho e julho.

Em Mossoró, as temperaturas médias mensais, mesmo sendo mais altas que as de Jaguaruana, apresentam um comportamento mais estável e compatível com o ciclo anual das oscilações do clima. A amplitude térmica em Jaguaruana chega a 4,1° C enquanto que em Mossoró fica em apenas 2,2°C.

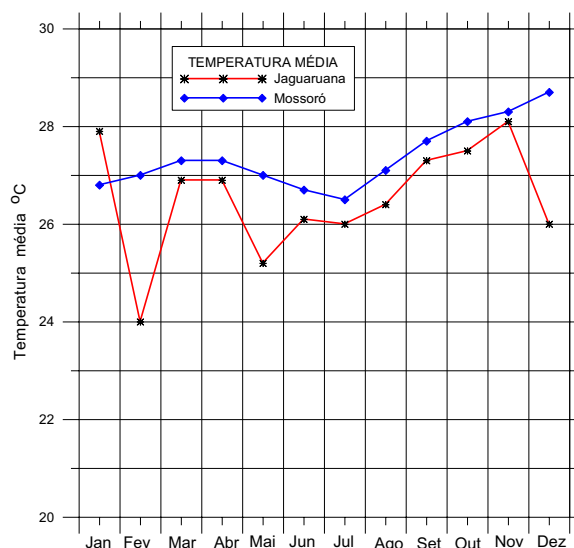


Figura 1.3 – Temperaturas médias mensais nos postos de Jaguaruana-CE e Mossoró-RN, na Chapada do Apodi.(Normais Climatológicas 1961-1990).

1.4.5 - Umidade relativa

A distribuição da umidade relativa média mensal do ar (**figura 1.4**) exhibe um comportamento que reflete o ciclo anual de mudança do clima. Os maiores valores médios em Jaguaruana atingem 82% nos meses de março e abril e em Mossoró 78% em março, ou seja, no período chuvoso. Os menores valores médios ocorrem no trimestre de setembro a novembro, em pleno período de estiagem, e os seus valores médios vão de 67% a 68% em Jaguaruana e de 61% a 63% em Mossoró.

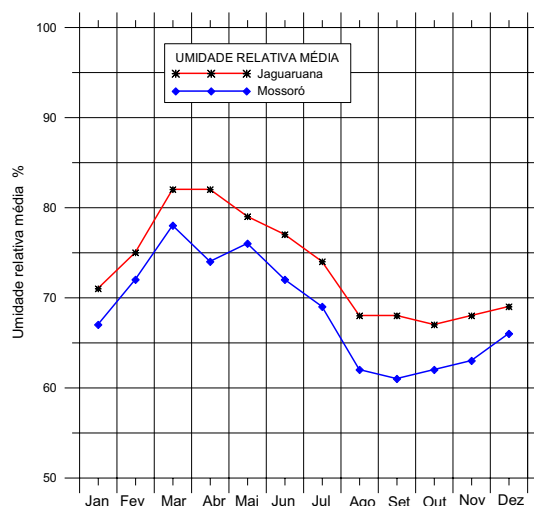


Figura 1.4 – Distribuição da umidade relativa média mensal nos postos de Jaguaruana-CE e Mossoró-RN, segundo as Normais Climatológicas (1961-1990).

1.4.6 - Hidrografia

A rede de drenagem e corpos d'água superficiais da área de estudo descrita neste item é ilustrada no mapa da **figura 1.5**. Essa rede se distribui por três bacias hidrográficas:

Bacia do rio Jaguaribe: a oeste, drena os cursos d'água originados nas vertentes ocidentais da cuesta da Chapada do Apodi. São riachos temporários, de pequena extensão e forte declividade cujas nascentes são condicionadas por fontes que emergem nas encostas a partir dos calcários Jandaíra, nos períodos de recarga. Muitos desses riachos formam lagoas na sua parte terminal, antes de alcançar o rio Jaguaribe. É o caso das lagoas que se observam a noroeste, no mapa da figura 1.5, no trecho situado entre os municípios de Jaguaruana, Russas e norte de Quixeré e também a sudoeste, no município de Tabuleiro do Norte, onde se encontra a lagoa da Salina. Nessa bacia hidrográfica a drenagem superficial e subterrânea se realiza sobre os arenitos da Formação Açu aflorante e sobre folhelhos e siltitos da Formação Quebradas.

Bacia do rio Apodi: situada no leste, drena os cursos d'água formados a partir da linha divisória de águas superficiais que atravessa a área do projeto de sudeste para nordeste em toda a sua extensão. A partir dessa linha divisória (cujas cotas chegam a 250 m na Serra Mossoró), a drenagem se realiza, quase inteiramente no município de Mossoró, através de cursos d'água orientados de NW para SE (riachos Cabelo Negro, Pajeú e Nogueira Grande), e orientados de NNW para SSE (Riacho Grande e Riacho do Junco), em direção ao vale do rio Apodi. Nessa bacia, o desenvolvimento da rede de drenagem superficial se realiza principalmente sobre os depósitos coluviais/eluviais e secundariamente sobre as porções dos calcários da Formação Jandaíra, interdidadas por intercalações de folhelhos da Formação Quebradas.

Bacia do Riacho Mata Fresca: é a principal bacia de drenagem das águas precipitadas na área de interesse. Situada entre as bacias dos rios Apodi-Mossoró e Jaguaribe, essa bacia, de domínio da União, ocupa a parte principal da área de estudo e inclui a região de fronteira entre os Estados do Ceará e Rio Grande do Norte. No Ceará, engloba parcialmente os municípios de Jaguaruana, Quixeré, Limoeiro do Norte e Tabuleiro do Norte; no Estado do Ceará são incluídas partes dos municípios de Dix-Sept Rosado, Baraúna e Mossoró. Duas zonas de drenagem distintas podem ser visualizadas dentro dessa bacia:

Zona cárstica, sem drenagem superficial: correspondente à porção da bacia, que ocupa todo o setor centro sul e sudoeste da área do projeto, formado por uma superfície estrutural plana, característica da Chapada do Apodi. Esta superfície se desenvolve com mergulho suavemente inclinado na direção geral NE, exibindo inúmeras pequenas depressões isoladas que na verdade são aberturas formadas por fenômenos cársticos. Toda essa área é destituída de rede de drenagem superficial, uma vez que as águas pluviais se infiltram diretamente nos sumidouros e cavernas existentes.

Zona cárstica, com drenagem superficial incipiente: pode ser caracterizada, a partir da altura da rodovia Baraúna-Quixeré (RN-015/CE-209), como uma extensão da zona cárstica anterior, porém com uma drenagem superficial incipiente. Nela se encontram os riachos formadores do Mata Fresca, cuja drenagem ultrapassa os limites da área do projeto e prossegue até o seu exutório final, que é o oceano atlântico.

Quanto aos corpos de águas superficiais, destacam-se, no setor leste da área, no município de Mossoró, várias fazendas de aquicultura que aproveitaram a depressão onde havia a antiga Lagoa da Raiz. Ao sul de Mossoró, encontra-se o Açude do Saco, alimentado pelos riachos Bonsucesso e Nogueira Grande.

Na zona oeste, além das lagoas já mencionadas na zona drenada pelo rio Jaguaribe, ocorre sobre a Chapada, nas proximidades da localidade de Bonsucesso, a Lagoa Pirobaba, exemplo marcante de nascente do Riacho Mata Fresca, que se caracteriza como ponto da transição entre a *zona cárstica sem escoamento superficial* e a *zona cárstica com escoamento superficial incipiente*, ambas definidas no presente trabalho.

1.4.7 - Vegetação

A vegetação predominante é a caatinga hiperxerófila composta, sobretudo, de plantas cactáceas. Contudo, o extrativismo da madeira associado à exploração agrícola do algodão e mais recentemente da fruticultura, acabaram por produzir o desaparecimento de grande parte dessa vegetação.

1.4.8 - Geomorfologia

A área de estudo apresenta relevo quase plano com declives suaves por tratar-se de uma superfície estrutural desenvolvida sobre calcários da Formação Jandaíra. O mergulho geral dessa superfície se realiza para o mar.

Três feições morfológicas principais podem ser destacadas, como pode ser visto no mapa hipsométrico (**figura 1.6**):

- a)** Os Vales dos rios Apodi/Mossoró, a leste, e do rio Jaguaribe a oeste, com cotas que variam de 0 na linha costeira até 50 m;
- b)** As Encostas da Chapada, numa faixa de cotas compreendidas entre 50 e 100 m, intermediária entre os vales dos dois grandes rios mencionados e a Chapada do Apodi. Nessa faixa, com largura que varia de 10 km a 25 km, a declividade do terreno supera os 5 m/km e possibilita o desenvolvimento de uma rede de drenagem superficial marcada pela presença de vários riachos. Esses riachos escoam, a partir da Chapada, principalmente para leste em direção ao vale do Apodi e para norte em direção ao oceano.
- c)** A Chapada do Apodi, cujo relevo é em forma de *cuesta*, se desenvolve entre as cotas de 100 m e 150 m aproximadamente, apresentando declividades inferiores a 2 m/km na qual praticamente inexistem rede drenagem superficial. Essa ausência de rios e riachos sobre a Chapada é explicada pelo fato de existirem inúmeros sumidouros cujo desenvolvimento foi condicionado por fenômenos cársticos que atuaram sobre os calcários da Formação Jandaíra. Dentro da Chapada a região de mais alta cota é a Serra Mossoró, cujo topo tem altitude com cerca de 270 m.

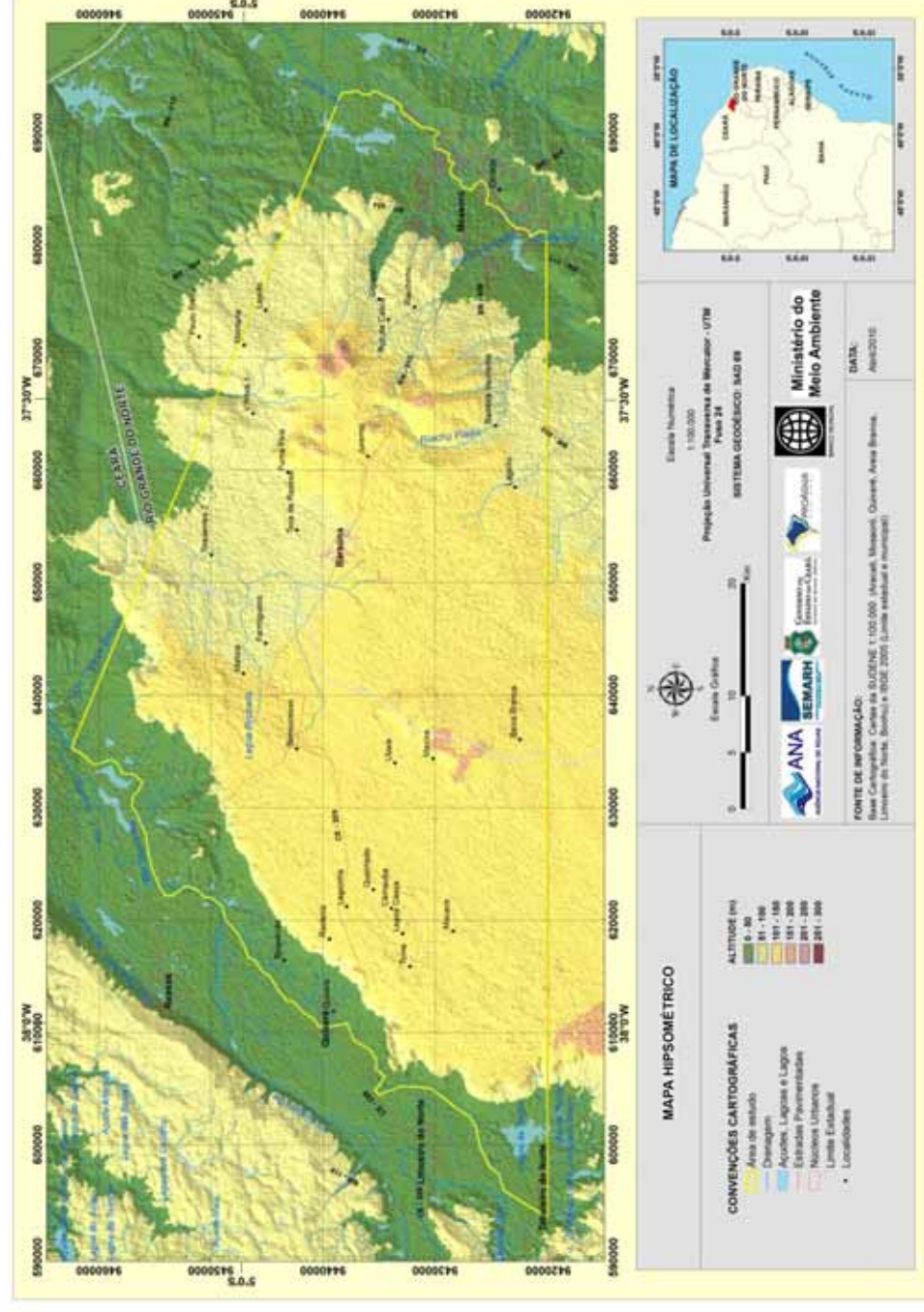


Figura 1.6 - Mapa Hipsométrico da área de estudo.

CAPÍTULO 2 - GEOLOGIA REGIONAL, GEOLOGIA LOCAL E CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

2.1 – GEOLOGIA REGIONAL

2.1.1 – Bacia Potiguar – Uma Pequena Introdução à Geologia e Tectônica

A margem continental da América do Sul se desenvolveu progressivamente com a fissão do supercontinente Pangea do Triássico para os nossos dias. Este processo magno evolutivo se fez em diferentes segmentos, em termos de tempo, estrutura e características provinciais: o Equatorial (das Guianas ao Rio Grande do Norte (pós Neocomiano), o Central (de Maragogi-PE para Florianópolis) e o Meridional (de Florianópolis para a Patagônia). O “4º segmento” pode ser considerado o saliente oriental nordestino, entre o Alto de Touros e Maragogi, cuja fissão completa só se realizou bem mais tarde (foi um *land bridge* com o continente africano) em tempos do final do Cretáceo.

No contexto da margem equatorial, há um diferencial de tempo (sucedeu no tempo o segmento central e meridional), no registro litoestratigráfico (faltam representantes completos da fase pré-rifte e protooceânica), e no quadro geotectônico. Neste último caso, pelo destaque do controle das estruturas do embasamento Pré-Cambriano e pelo componente de transformância que caracterizou a abertura oceânica (relativamente bem mais rápida que as demais). A Bacia Potiguar com cerca de 50.000 km² (45% emersos) até a isóbata de 2000m, nos estados do Ceará e Rio Grande do Norte é a expressão mais sul e oriental deste segmento equatorial (**figura 2.1**).

A Bacia Potiguar mostra na sua esquematização uma notável componente de herança tectônica do embasamento, legados estruturais que estiveram presentes no momento inicial da instalação (rifte central estruturado sobre a zona de cisalhamento Portalegre) e delimitação (o Alto de Touros se alinha com a zona de cisalhamento de Picuí – João Câmara) e a borda oriental mais conspícua no Ceará se alinha com a zona de cisalhamento Jaguaribe. A propósito disto é justo acrescentar que a bacia está sobre o domínio geotectônico-geofísico indissociável do maciço do Rio Piranhas e a Faixa Seridó, e balizada a leste (maciço São José do Campestre) e a oeste (Domínio Jaguaribeano) por domínios geotectônicos-geofísicos consumados em tempos Pré-Cambrianos (**figura 2.2**). Os domínios mais antigos tendem em geral a formar altos no Fanerozóico (o equilíbrio isostático e termal já consumados) e os domínios mais novos (mais quentes) tendem às maiores movimentações na vertical. Este legado do embasamento voltou a se manifestar de forma conspícua no Terciário, sendo particularmente marcante as movimentações de antigas linhas de falhas, sobretudo daquela de Portalegre (cortando a Unidade Serra do Martins).

Esta notória estruturação geotectônica e estrutural do embasamento sobreviveu e pode ser observada ainda (com repercussão no panorama fisiográfico e hidrogeológico da bacia como um todo) ao processo de formação da margem continental Atlântica Equatorial. No computo completo da Bacia está a representação, os registros litológicos materializados típicos de várias fases evolutivas, a saber: 1) a fase de quebra ou **Rifte**, de intensa subsidência associada com processos rupturais do neocomiano para o aptiano; 2) a Fase **Pós-Rifte**, com predomínio da subsidência térmica, transicional de sedimentos continentais para sedimentos marinhos; 3) A seqüência **Drifte**, de abertura oceânica propriamente dita, com um ciclo transgressivo (Açu-Jandaíra e depósitos congêneres) e um longo ciclo regressivo, que se demorou do final do Cretáceo até aos tempos atuais (Tibau-Guamaré-Ubarana), este em grande parte ocupando a porção *off shore* ou a subsuperfície. A coluna completa da Bacia Potiguar, se colocada em sucessão ideal, atinge facilmente acima de 10.000m de espessura (vide tópico 2.1.3). O contexto *on shore*, continental, emerso é predominantemente marcado pela seqüência transgressiva na parte Drifte inferior, com participação secundária da Formação Tibau e do Grupo Barreiras, este último um produto da história fisiográfica (de desnudação erosiva e agitação) do terciário mais superior. Sousa (2002) propôs um modelo estrutural e evolução tectônica da Bacia Potiguar evidenciando a variação do campo de tensões, desde o Pré-Cambriano ao Recente (**figura 2.3**).

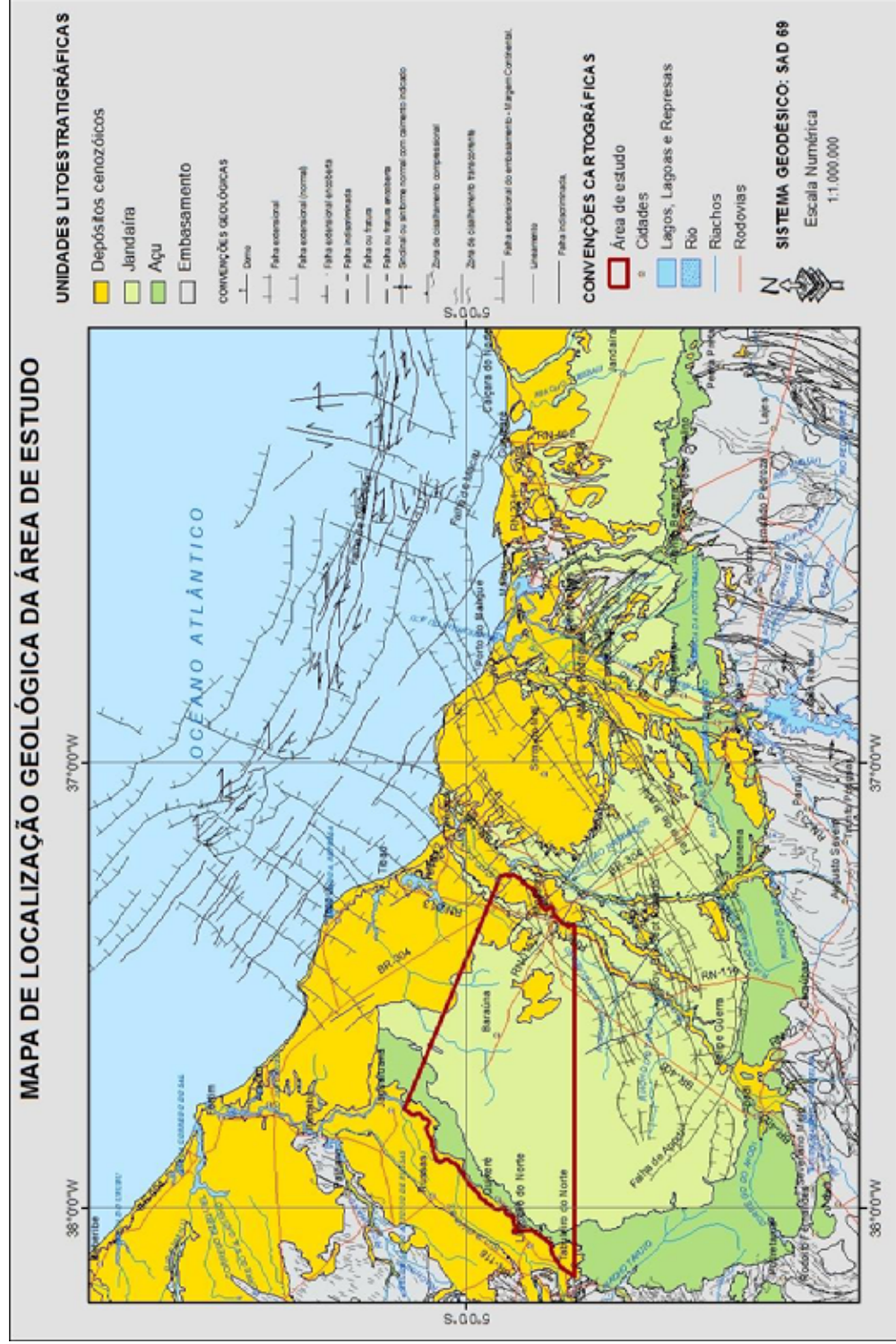


Figura 2.1 – Mapa de localização da área de estudo dentro do contexto da Bacia Potiguar. Modificado de Angelim et. al (2007) e Cavalcante et. al (2003).

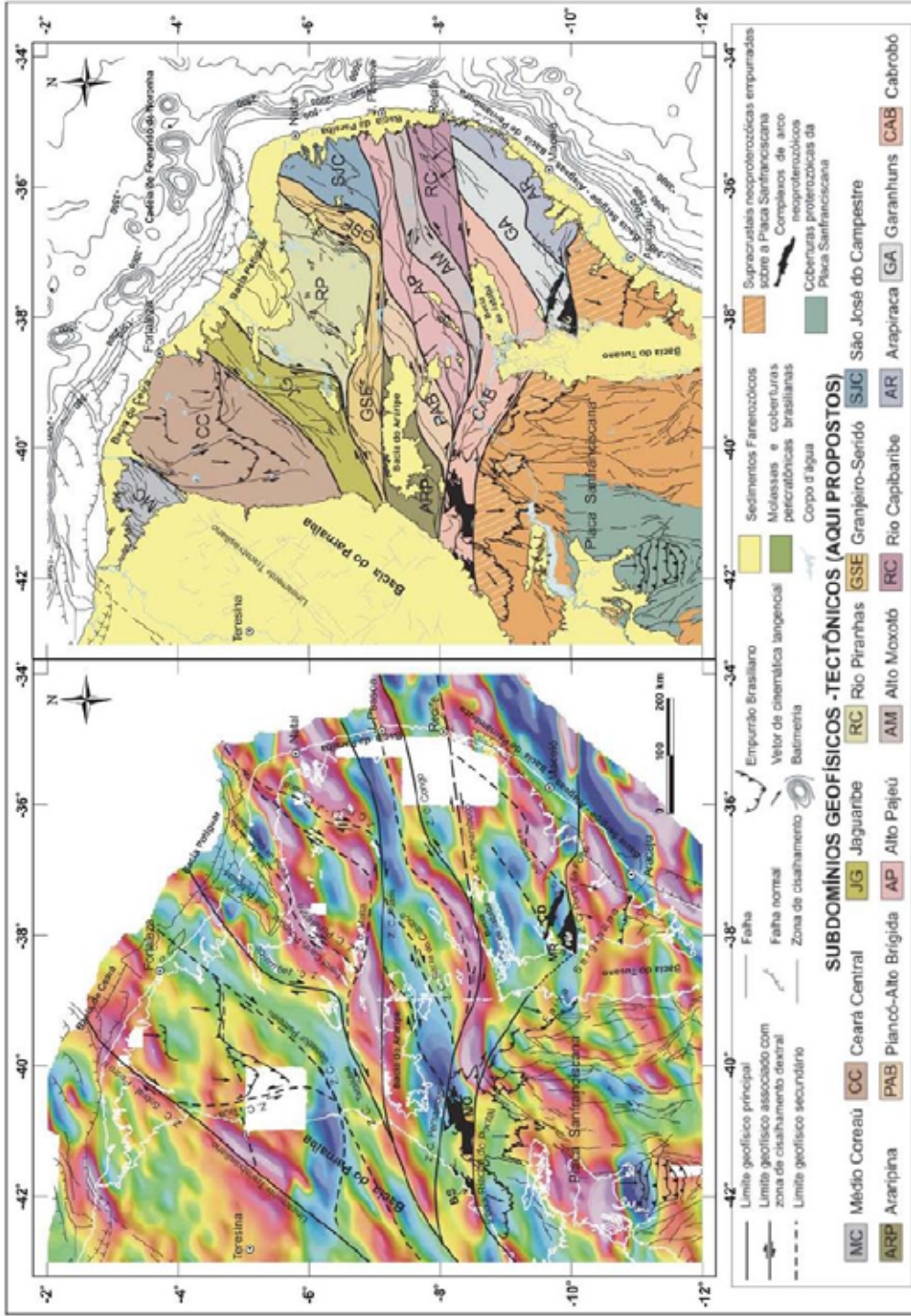


Figura 2.2 – Comparação da interpretação dos subdomínios geofísicos-tectônicos da Província Borborema com o mapa de componente regional do campo magnético total reduzido ao pólo magnético. Fonte: Oliveira, 2008.

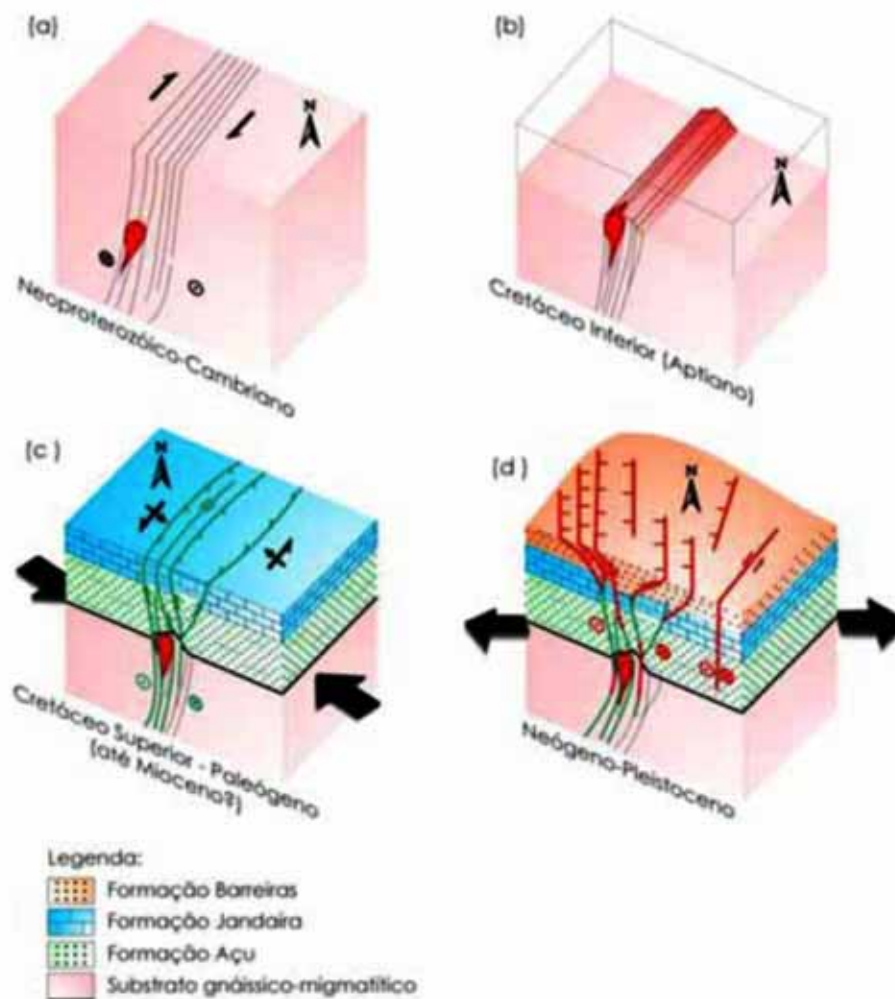


Figura 2.3 – Modelo de evolução tectônica da Bacia Potiguar ilustrando a variação do campo de tensões e eixos cinemáticos do Neoproterozóico ao Pleistoceno (Fonte: Sousa et al. 2002).

2.1.2 – Arcabouço Estrutural da Bacia Potiguar

A arquitetura geral da Bacia Potiguar é composta de três unidades: grabens, altos internos e plataformas do embasamento, conforme é visto na **figura 2.4**.

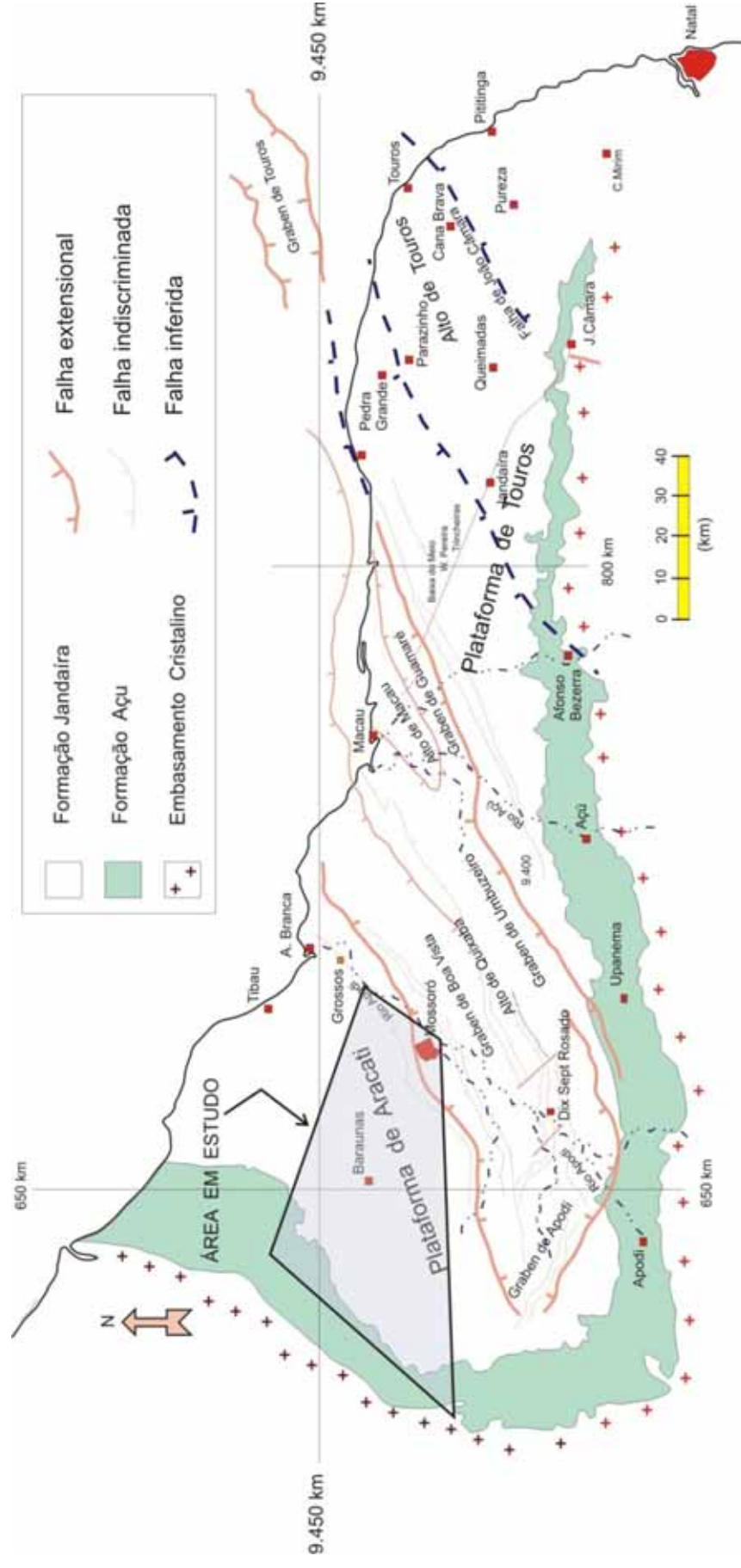


Figura 2.4 – Compartimentação estrutural da Bacia Potiguar (modificado de Feitosa & Melo, 1998).

Na porção emersa da bacia os grabens (Boa Vista, Guamaré, Umbuzeiro e Apodi) apresentam direção geral NE-SW, sendo margeados pelas duas “plataformas” rasas denominadas de Aracati (a oeste) e Touros (a leste).

Os altos internos dispõem-se como cristas do embasamento, alongadas subparalelamente ao eixo dos baixos adjacentes. Limitam-se a noroeste por falhas antitéticas de grande rejeito e a sudeste por falhas sintéticas que apresentam mergulho suave para a bacia. Os principais altos são os de Quixaba e Macau. As “plataformas” do embasamento de Touros e de Aracati são feições rasas que limitam os baixos a leste e a oeste, respectivamente. A leste este limite é feito através dos Sistemas de Falhas de Carnaubais, de direção NE-SW, e a oeste pelo Sistema de Falhas de Areia Branca, NE-SW (Bertani et al. 1990).

Na parte submersa a direção predominante das feições estruturais é NW-SE, por efeito de uma tectônica transtensional dextral em resposta ao processo de separação continental América do Sul-África (Françolim & Szatmari, 1987). Estas feições são o produto de duas grandes falhas lítricas cuja profundidade máxima de descolamento foi estimada entre 20 e 22 km (Matos, 1992).

Segundo Hackspacher *et al.* (1985), além das estruturas de direção NE-SW presentes na bacia, são observadas outras importantes estruturas de direção NW-SE, interpretadas como produto de reativações pós-campanianas. Cremonini *et al.* (1996) caracterizaram este padrão de falhamentos NW-SE e NE-SW, na porção submersa da bacia, como sendo o produto de superposição de fases de rifteamento.

Matos (1992) propôs que o Rift Potiguar foi implantado sobre as rochas do embasamento cristalino durante o Cretáceo Inferior, aproveitando seu *trend* predominante de direção NE-SW e sendo o sistema de Falhas de Carnaubais o principal sistema de Rife Potiguar.

2.1.3 – Litoestratigrafia da Bacia Potiguar

A litoestratigrafia foi adotada a partir da carta estratigráfica da Bacia Potiguar correspondente à última revisão efetuada por Pessoa Neto et al (2007), apresentada nas **figuras 2.5 e 2.6**. O registro estratigráfico inclui três supersequências:

✓ Supersequência Rife

Depositada no Cretáceo Inferior e representada pelos depósitos flúvio-deltaicos e lacustres das formações Pendência e Pescada (Berriasiano/EoAptiano) que correspondem a maioria das formações do Grupo Areia Branca (formações Pendência e Pescada).

✓ Supersequência Pós-Rife

Depositada durante o andar Alagoas e caracterizada pela deposição de uma sequência flúvio-deltaica, com os primeiros registros de ingressão marinha (Formação Alagamar), final da sedimentação do Grupo Areia Branca.

✓ Supersequência Drifte

Depositada entre o Albiano e o Recente, é caracterizada por uma sequência flúvio-marinha transgressiva composta pelas formações Açu, Ponta do Mel, Quebradas, Jandaíra e Ubarana que são recobertas por uma sequência clástica e carbonática regressiva (formações Ubarana, Tibau e Guamaré). Esta supersequência abrange o Grupo Apodi (sequências marinhas transgressivas) e Agulha (sequências marinhas regressivas).

De acordo com Pessoa Neto et al. (2007), três eventos magmáticos principais são identificados na Bacia Potiguar: Rio Ceará Mirim, Cuó e Macau. O evento Rio Ceará Mirim de idade Valanginiano a Hauteriviano, ocorre na forma de diques de diabásio com forte orientação E-W no embasamento

adjacente à borda Sul da Bacia Potiguar. O evento magmático do Turoniano conhecido como Serra do Cuó também ocorre na borda sul da Bacia Potiguar, contudo são derrames de basalto com tendência alcalina. As rochas magmáticas basálticas do Evento Macau foram depositadas entre o Eoceno e o Oligoceno em formas de derrames na bacia.

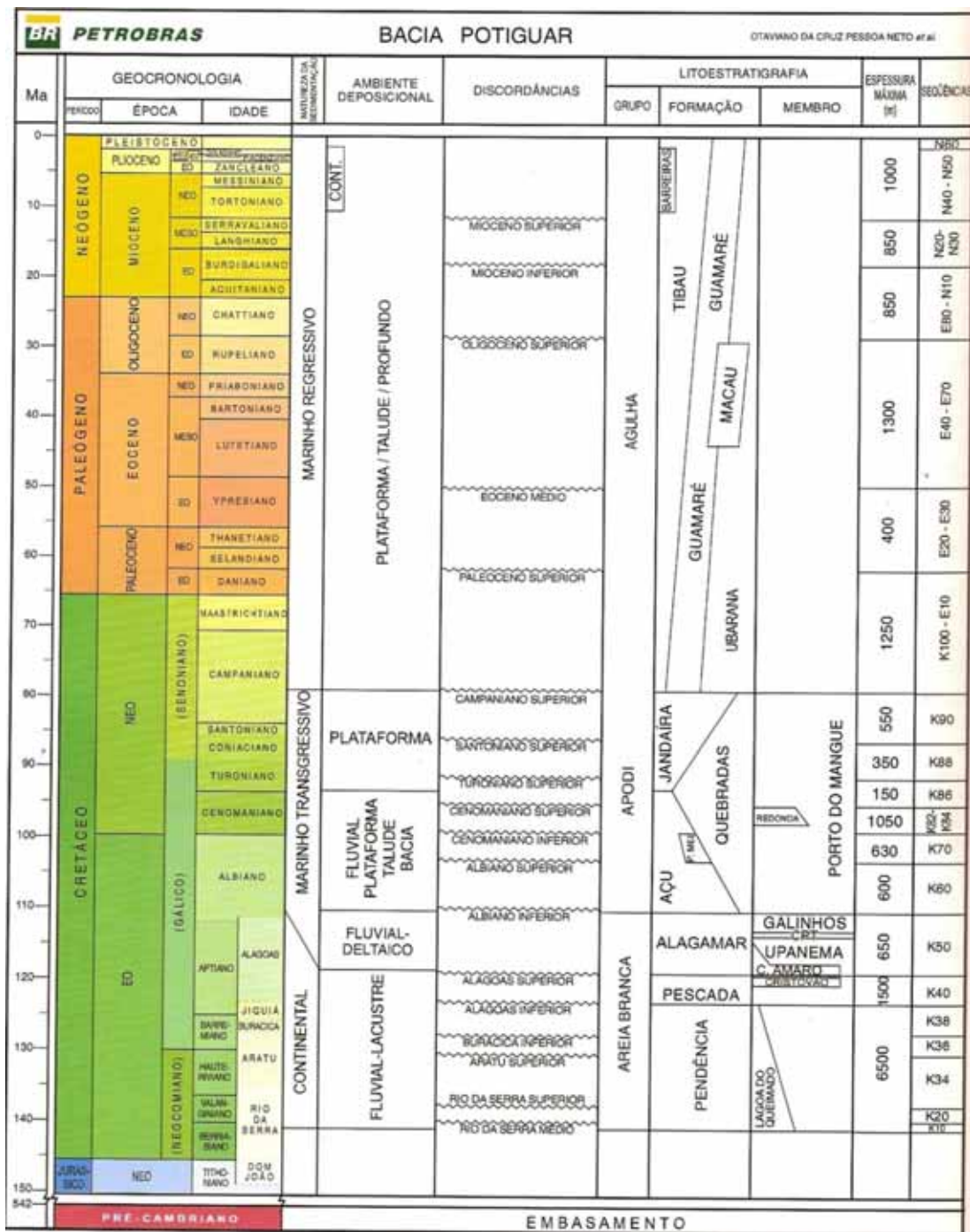


Figura 2.5 – Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar (Pessoa Neto et al. 2007).

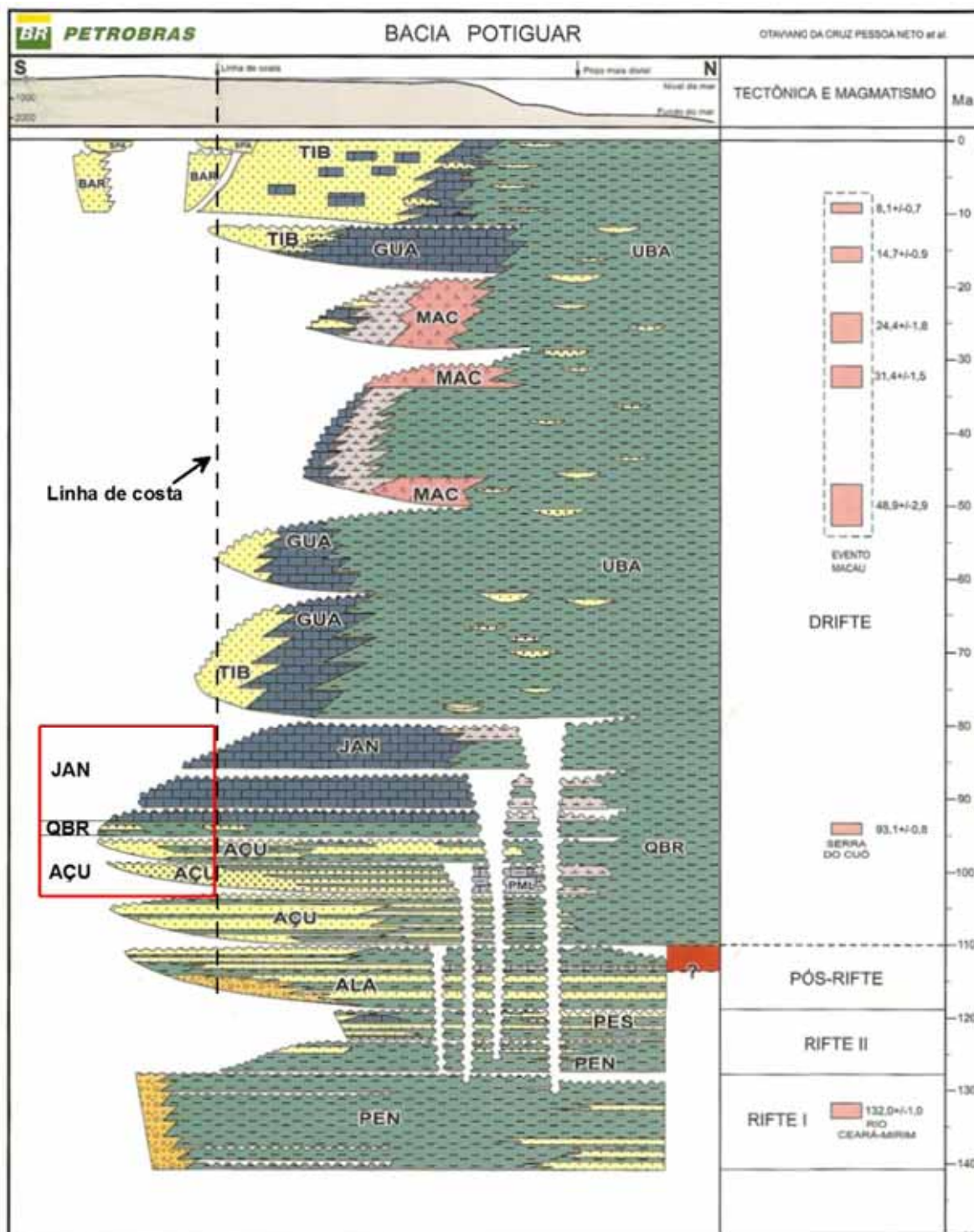


Figura 2.6 - Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar com destaque da linha de costa (traço preto interrompido) e do Grupo Apodi (retângulo vermelho) (modificado de Pessoa Neto et al. 2007)

2.2 – GEOLOGIA LOCAL

Dentro do contexto geológico da Bacia Potiguar a área de estudo está inserida na sua porção emersa, “Plataforma” Aracati e abrange a Supersequência Drifte que é caracterizada por um pacote de sedimentos flúvio-marinhos transgressivos, Grupo Apodi (Formações Açú, Ponta do Mel, Quebradas e Jandaíra) (Pessoa Neto et al. 2007). A área em pauta é limitada a leste pela planície aluvial do rio Apodi-Mossoró e a oeste pela planície aluvial do Baixo Jaguaribe.

Durante a etapa de campo foram visitados 156 afloramentos, dentre os quais 48 denominados como “PO”, são pontos de observação (sumidouros, solo, vegetação, etc.). Procurou-se adensar a malha de afloramentos por toda área, mas em algumas porções não ocorre afloramento ou existe mata fechada ou ainda área de cultivo. É o caso, por exemplo, do perímetro de irrigação na região do Tomé, no Ceará, onde o solo residual do calcário Jandaíra é espesso. Já na zona leste da área ocorrem as coberturas areno-argilosas coluviais e eluviais, onde o relevo é plano, dissecado e erodido.

A descrição dos afloramentos com a localização geográfica, cota do terreno, litologia, formação geológica, atitudes de camadas e *trends* estruturais é mostrada no **anexo 1**.

O mapa geológico da região foi confeccionado a partir da integração dos dados de campo com a base cartográfica digitalizada da SUDENE, 2003 (cartas planialtimétricas na escala 1:100.000: Aracati, Mossoró, Quixeré, Areia Branca, Limoeiro do Norte e Bonhu); IBGE, 2005 (limite estadual e municipal) e com a base temática: Mapa Geológico do Estado Rio Grande do Norte (Angelim et al. 2007); Atlas Digital de Geologia e Recursos Minerais do Ceará (Cavalcante et al. 2003); Mapa Geológico da folha Jaguaribe SB.24 (Schobbenhaus et al. 2004) e Mapa Geológico da Bacia Potiguar (Cypriano & Nunes, 1968).

A distribuição das unidades litoestratigráficas mapeadas dentro da área de estudo está ilustrada no mapa geológico com os afloramentos visitados (**figura 2.7**).

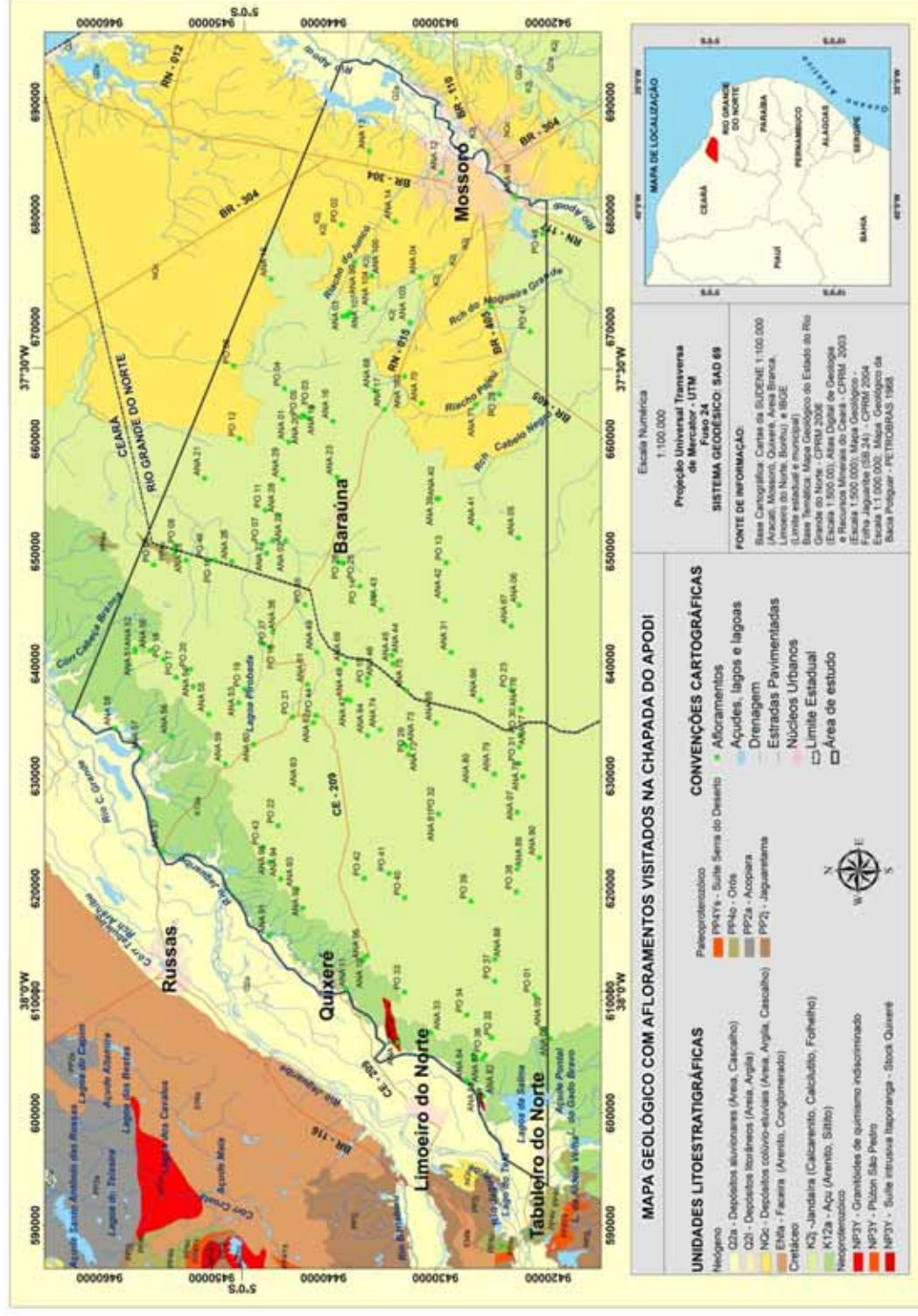


Figura 2.7 – Mapa geológico da área de estudo com afloramentos visitados.

2.2.1 - Embasamento Paleoproterozóico a Proterozóico

As unidades litoestratigráficas precambrianas cartografadas no mapa geológico da área de estudo, estão descritas de acordo com os domínios tectonoestruturais da Província Borborema, conforme ilustrado na figura 2.2.

Na Plataforma de Aracati afloram altos do embasamento, cuja expressão geomorfológica em superfície pode ser observada em duas unidades proeminentes dentro da área de estudo. Estão evidenciadas a norte pelos quartzitos do Grupo Orós (Serra Dantas e Serrote dos Porcos) e a sudoeste pelos granitóides de Quixeré. Estes exemplares do embasamento cristalino podem ter sido estruturados pelo lineamento NE que é representado por uma zona de cisalhamento regional de natureza transcorrente herdada do ciclo Brasileiro que foi rastreada para SW até o lineamento Patos, na Paraíba (Fortes, 1987). Possivelmente este lineamento NE seja a continuação ou ramificação da importante zona de cisalhamento Jaguaribe.

2.2.1.1 - Paleoproterozóico: Grupo Orós (PPoq)

As rochas do Grupo Orós são do Estateriano e fazem parte do Domínio Jaguaribeano (Angelim et al. 2007). São compostas por metacalcários, xistos, gnaisses e quartzitos. Na área de estudo essas rochas afloram no extremo norte, ocorrem como blocos rolados de quartzitos formando os chamados Serrote dos Porcos e Serra Dantas (**foto 2.1**). Os fotolineamentos apontam o Serrote dos Porcos e a Serra Dantas (**foto 2.2**) alinhados na direção NE e também evidenciam deslocamento horário entre as Serras.



Foto 2.1 – Blocos rolados de quartzito no Serrote dos Porcos, alto do embasamento presente no extremo norte da área de estudo (ANA-24: 649847, 9453300).

Vale ressaltar a importante informação de ocorrência dessas rochas dentro da área de estudo, pois afloram dentro da Bacia Potiguar e formam altos estruturais afogados pela Formação Jandaíra. Infelizmente não foi possível obter a relação de contato desta unidade com a Formação Jandaíra, devido à ausência de afloramentos.



Foto 2.2 – Quartzito Orós, Serrote dos Porcos, alinhado NE-SW. (ANA-24; 649847, 9453300).

2.2.1.2 - Granitóides Neoproterozóicos (NP3Y2it45)

Segundo Cavalcante et al.(2003) estes granitóides pertencem ao Domínio Jaguaribeano e são do tipo Itaporanga, do Ediacarano. Afloram no extremo oeste da área, tratam-se de granitos cálcioalcalinos de alto potássio, são mesocráticos e porfíricos com fenocristais de K-feldspato variando de 2 a 2,5 cm (**foto 2.3**).



Foto 2.3 – Granitóide com enclave diorítico orientado segundo a foliação de fluxo magmático. (ANA-32; 606279, 9433374).

Os minerais estão orientados de acordo com a foliação de fluxo magmático, de direção nordeste mergulhando 30° para sudeste. É característica dessa associação calcioalcalina de alto potássio a ocorrência de enclaves dioríticos, que neste caso também seguem a direção do fluxo magmático. O *Stock* Quixeré pode ser reconhecido como *Inselberg* (**foto 2.4**). Estes morros testemunhos ocorrem na zona de afloramento da Formação Açú, entre as cidades de Quixeré e Limoeiro do Norte, ambas no

Ceará. Assim como o Serrote dos Porcos e Serra Dantas, o *Stock* Quixeré ocorre também como importante alto estrutural da borda oeste da Bacia Potiguar.



Foto 2.4 – Inselbergs de Quixeré, granitóides como testemunhos do embasamento na borda sudoeste da Chapada do Apodi (ANA-32: 606279, 9433374)

2.2.2 - Ocorrências Cretácicas

As rochas deste Período que afloram na área de estudo são Albianas a Neocampanianas com natureza de sedimentação marinha transgressiva e pertencem ao **Grupo Apodi**. Estas unidades litoestratigráficas compõem o sistema aquífero Apodi, objeto principal das investigações desenvolvidas na presente dissertação. A seguir as formações serão descritas da base para o topo:

a) na parte inferior, a **Formação Açú (K12a)**, aflora em toda borda oeste da área, do sopé da escarpa da Chapada do Apodi até o contato com a aluvião do rio Jaguaribe. Data do Albiano ao Cenomaniano com sedimentação fluvial. É constituído de depósitos formados litologicamente por arenitos finos a médios de coloração cinza (cinza claro), avermelhada e esverdeada com matriz argilosa (**foto 2.5**), bem a mal selecionados, podendo conter níveis conglomeráticos. Também ocorrem intercalados com folhelhos argilitos e siltitos. Tais litótipos interdigitam-se lateralmente com as rochas da Formação Quebradas e estão sotopostos concordantemente às rochas carbonáticas da Formação Jandaíra. Na região de estudo o arenito Açú aflora em toda a borda oeste da Chapada do Apodi capeando o embasamento cristalino, com exceção dos *Inselbergs* de Quixeré.



Foto 2.5 – Arenito Açú médio a grosso de matriz predominantemente argilosa com estratificação cruzada de pequeno porte. (ANA-11; 611032, 9437982).

b) a porção intermediária, **Formação Quebradas**, data do Albiano ao Campaniano. Litologicamente formada por argilitos, folhelhos e siltitos avermelhados também ocorre como arenitos finos esbranquiçados com matriz caulínica (**foto 2.6**). Aflora nas escarpas da borda da Chapada do Apodi, tem espessura entre 20 e 60 metros e as suas ocorrências em superfície não são mapeáveis na escala de 1:100.000 estabelecida neste trabalho. Entretanto compõe o *aquitard* do Sistema Aquífero Apodi. Pode ser interpretada como camadas de folhelhos (argilitos) que afogam o sistema fluvial da Formação Açú;



Foto 2.6 – Argilitos avermelhados, folhelhos e arenitos finos caulínicos da Formação Quebradas na cuesta da Chapada do Apodi. (ANA-92: 618248,9441849)

c) na parte superior aflora a **Formação Jandaíra (K2j)**, de sedimentação em plataforma/rampa carbonática de mar raso, Turoniano a Eocampaniano. Está presente praticamente em toda a área, onde se encontra intensamente carstificada e erodida (**foto 2.7**). As rochas carbonáticas dessa formação dispõem-se concordantemente sobre as rochas siliciclásticas das formações Açú/Quebradas e encontram-se parcialmente recobertas pelos depósitos colúvies e elúvies do Neógeno. A Formação Jandaíra congrega *mudstones* a *grainstones* bioclásticos e intraclásticos, com eventuais intercalações de arenitos, folhelhos, margas e evaporitos. Representa o principal aquífero da área de estudo, de natureza cárstico-fissural livre. De acordo com o **anexo 1** em muitos afloramentos o calcário Jandaíra ocorre como extensos lajedos com espetaculares formas cársticas controladas por fraturas extensivas (vide cap. 3), em especial no Complexo Espeleológico da Furna Feia. Nas zonas sem afloramento, como por exemplo, nas regiões oeste e sudoeste da área, na Chapada do Apodi, entre as cidades de Quixeré, Limoeiro do Norte e Tabuleiro do Norte, ocorre solo espesso residual do calcário, que é geralmente aproveitado para agricultura e campos de pasto para animais.



Foto 2.7 – Calcário Jandaíra carstificado e erodido, Lajedo Escada, Baraúna - RN (ANA-31; 641018, 9428612).

2.2.3 - Depósitos do Neógeno

São representados por elúvios e colúvios arenosos e argilosos, coberturas inconsolidadas e cascalheiras de terraços de pequena espessura, bem como coberturas lateríticas (**NQc**). Ocorre na área de estudo capeando de forma concordante o calcário Jandaíra, abrange em grande maioria o município de Mossoró, porção ENE da área. Estas coberturas por serem muito delgadas na região não são aproveitadas como aquífero, mas é conspícua a infiltração das águas das chuvas.

Um possível testemunho da Formação Serra do Martins ocorre na Serra Mossoró, que é o ponto de mais alta cota dentro área, com topo aproximadamente a 270 m e altitude. O contato com a Formação Jandaíra é feito na cota 215 m, representando no máximo uma espessura de 55 m da Formação Serra do Martins. Ressalta-se que no cume da Serra Mossoró, essa formação ocorre como arenito fino a médio bem consolidado (litificado) com estratificação cruzada (**foto 2.9**).

2.2.3.1 - Depósitos Pleistocênicos

São representados por **aluviões (Q2a)** constituídos por areias diversas com intercalações de sedimentos pelíticos, ocupando os vales dos rios. Ocorrem, essencialmente, nos vales do rio Apodi/Mossoró e Jaguaribe (**foto 2.10**). Originam-se por processos de tração subaquosa, compreendendo fácies de canal e barras de canal fluvial. Essas planícies de depósitos aluviais formam aquíferos livres cuja potencialidade está intrinsecamente ligada às interações com os respectivos rios.

Os depósitos de canal se constituem nos principais jazimentos de areia em volume de reservas para uso na construção civil, enquanto nos depósitos de planície (várzea) encontram-se as argilas vermelhas e subordinadamente as argilas brancas.



Foto 2.8 – Cobertura areno-argilosa ferruginosa com cascalhos soltos numa matriz fina. (ANA-14:679371,9433592)



Foto 2.9 – Arenito fino a médio, silicificado, da Formação Serra do Martins (?), Serra Mossoró (ANA-03; 670914, 9438294).



Foto 2.10 – Aluvião do rio Jaguaribe, (BR-116; 593232, 9431181).

2.3 – CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

A região de interesse é caracterizada pelo sistema aquífero Apodi (Manoel Filho & Miranda, 2009). Este sistema é formado por três unidades aquíferas. No topo ocorre o aquífero livre Jandaíra, na porção central, o aquitard Quebradas e na base o aquífero semi-confinado Açú.

2.3.1 – Aquífero Jandaíra

É a principal unidade hidrogeológica da área. É classificado como aquífero livre, cárstico-fissural. Encontra-se atualmente em fase de intensa exploração, através de poços tubulares e cacimbas, tanto para uso agrícola (fruticultura irrigada) como o uso animal. Este aquífero repousa sobre arenitos finos, siltitos e folhelhos, da Formação Quebradas ou dela correlatos. A transmissividade mediana é da ordem de $3,0\text{E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$ e a porosidade efetiva, para fins de cálculo, é estimada em 5% (Manoel Filho *et al.* 2003).

2.3.2 – Aquitard Quebradas

A Formação Quebradas posicionada na transição entre as Formações Açú e Jandaíra é composta por sedimentos pelíticos, pouco permeáveis, que incluem argilitos avermelhados e arenitos caulínicos, formando uma camada intermediária semipermeável, caracterizando-se como aquitard (Manoel Filho & Miranda, *op. cit.*).

2.3.3 – Aquífero Açú

Trata-se de um arenito médio a grosso com níveis conglomeráticos, que corresponde ao membro inferior da Formação Açú. Dentro da área de estudo é explorado para consumo humano nas cidades de Baraúna e Mossoró. Suas águas são minerais e térmicas. Quanto aos parâmetros hidráulicos medianos, tem-se uma transmissividade de $3,8\text{E-}3 \text{ m}^2/\text{s}$, uma porosidade efetiva na zona livre de 8% e um coeficiente de armazenamento de $1,7\text{E-}4$ (Manoel Filho *et al.* *op. cit.*).

CAPÍTULO 3 - GEOLOGIA ESTRUTURAL

3.1 – INTRODUÇÃO

O mapeamento geológico estrutural foi feito visando compreender a evolução tectono-estrutural no cenário hidrogeológico regional, em especial quanto ao desenvolvimento das feições cársticas da Formação Jandaíra, principal aquífero da região. Este estudo foi realizado em perfis transversais às principais estruturas da área. Os trabalhos de campo permitiram reconhecer estruturas de escala mesoscópica ou macroscópica, que apresentam boa relação com os fotolineamentos mapeados na área de estudo. Foram coletadas atitudes de camadas litológicas e orientações preferenciais de fraturas (principais e secundárias). Falhas distensionais foram mapeadas ao longo da *cuesta* ocidental da Chapada do Apodi. Foi enfatizado o reconhecimento da geometria das dolinas e de outras formas cársticas, além do esclarecimento da relação entre as dolinas e os fraturamentos. Juntas estilolíticas foram mapeadas em ocorrências esparsas na Formação Jandaíra e a sua integração com as fraturas extensivas e falhas distensionais permitiu esboçar um modelo de campo de tensões atuantes na área de estudo.

O trabalho resultou na construção e interpretação do mapa geológico-estrutural da área de estudo (**figura 3.1**).

3.2 - FOTOLINEAMENTOS

O material utilizado para a extração dos fotolineamentos foi constituído de:

- Imagens CBERS 2. Optou-se por escolher as bandas 2, 3 e 4 nas composições 4R3G2B e 3R4G2B, sendo estas composições as melhores para separar as lineações de relevo;
- Integração do mapa geológico e do mapa da rede de drenagem com o Modelo Digital de Elevação SRTM. No software ArcGIS 9.3, foi realizado um sombreamento (hillshade) das imagens SRTM, com exagero vertical de 3 vezes, para melhor visualização dos lineamentos.

Os lineamentos evidenciados através da análise foto-geológica e das visitas de campo à área de estudo, são apresentados no mapa da **figura 3.2**. Conforme se pode observar, através do exame detalhado desse mapa, os lineamentos mapeados se distribuem regionalmente de maneira descontínua. Isso naturalmente pelo fato de que somente podem ser detectados nas zonas de exposição do calcário Jandaíra. Resta dizer que ocorrem amplas áreas com cobertura de solos residuais onde nenhum lineamento pode ser observado, seja na foto-interpretação seja no campo.

Todavia, nas suas zonas de exposição, os calcários, em escala mesoscópica, ora se apresentam sob a forma de amplos lagedos que chegam a cobrir centenas de metros, com presença de grandes aberturas de dissolução cárstica, ora sob a forma de blocos de dimensões relativamente reduzidas que afloram aqui e ali, dispersos como pequenas ilhas, num verdadeiro mar de solos residuais.

Em todas essas exposições é marcante a presença de juntas com direções principais bastante diversificadas, cuja descrição detalhada se faz no decorrer deste capítulo. No mapa de fotolineamentos são passíveis de destaque:

Lineamentos de direção E-W na região de Tiradentes, no norte da área, na altura da fronteira Ceará - Rio Grande do Norte e ainda, de forma menos expressiva, a nordeste de Macaco e a leste de Baixa Branca no extremo sul da área.

Lineamentos de direções NW-SE, são os mais expressivos e constituem, por assim dizer, o *trend primário*, dessas estruturas na área de estudo. Podem ser vistos na zona oeste, principalmente entre a fronteira estadual e a borda da Chapada do Apodi passando ao sul de Bonsucesso. Mais ao sul, a leste de Baixa Branca essa mesma direção de lineamento também assume expressão significativa. Por fim, também a leste, no complexo espeleológico da Furna Feia, entre a cidade de Baraúna e a Serra Mossoró.

Lineamentos de direção geral NE-SW constituem o *trend secundário* das estruturas do calcário Jandaíra na área de estudo. Se manifestam principalmente na zona leste, no complexo espeleológico da Furna Feia, a leste da Serra Mossoró e também no sudoeste da área de estudo, ao sul da localidade de Macaco.

Alinhamentos estruturais de direção N-S são vistos no extremo sul da área a leste de Baixa Branca e no extremo norte da área, na altura de Vila Nova, no domínio das coberturas colúvias-elúvias, condicionando a drenagem superficial da área do complexo espeleológico da Furna Feia para além dos limites da área de estudo.

3.3 - ACAMAMENTO

A partir do Albiano tem início a deposição da sequência flúvio-marinha transgressiva na bacia Potiguar, Grupo Apodi. O apogeu desta transgressão ocorreu na passagem do Cenomaniano para o Turoniano, sendo marcada pelo afogamento dos sistemas fluviais da Formação Açu, bem como pela implantação de uma ampla plataforma carbonática (Formação Jandaíra), cujos sedimentos mais novos apresentam idade mesocampaniana. O padrão estratal dos sedimentos desta sequência apresenta camadas alinhadas NE-SW com mergulhos suaves para sudeste, com clinoformas sigmoidais típicas de bacias de margem em rampa (Cremonini, *et. al* 1998).

Do ponto de vista prático e hidrogeológico os *trends* de acamamento da Formação Açu foram mapeados para caracterização da sua direção e sentido de mergulho em relação ao gradiente hidráulico do fluxo da água subterrânea. Enquanto na Formação Jandaíra os planos de acamamento estão em direta relação com a ocorrência das juntas de alívio de pressão que se desenvolvem no mesmo *trend* das camadas e podem assumir orientação mais variável, em parte controlada pela topografia, em parte por mudanças no mergulho das camadas. As juntas de alívio de pressão condicionam o fluxo das águas subterrâneas no aquífero Jandaíra, pois se comportam como zonas de recarga, circulação e armazenamento para o aquífero.

O padrão de acamamento para as Formações Jandaíra e Açu é descrito a seguir:

3.3.1 - Formação Jandaíra

Esta formação mostra algumas atitudes de camadas que corroboram com o padrão regional. O diagrama de pólos das atitudes coletadas em campo está ilustrado na **figura 3.3**.

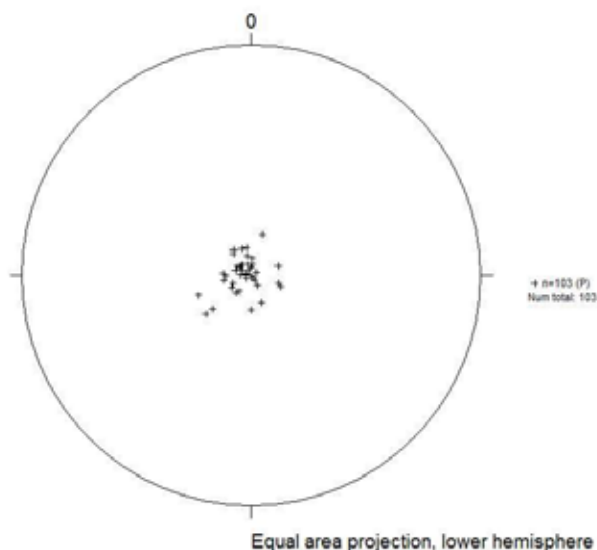


Figura 3.3 – Diagrama da distribuição dos pólos das atitudes na Formação Jandaíra, produzidos com auxílio do software Stereonet® (n= número total de atitudes).

As camadas possuem direção preferencial NE-SW com mergulho variando entre 1° a 10° tanto para sudeste, como para noroeste. Secundariamente as camadas seguem *trend* NW-SE, mergulhos fracos a moderados, variando de 2° a 21°, para nordeste e sudoeste. A variação das direções NE e NW, onde localmente a posição dos estratos da Formação Jandaíra se acha evidenciada pela topografia, foi condicionada pelo soerguimento da plataforma carbonática. Este fato ocorre principalmente na borda ocidental da Chapada do Apodi e reflete em camadas inclinadas com mergulhos moderados de até 21° (**foto 3.1**). Regionalmente os mergulhos das camadas são fracos, resultando em camadas subhorizontais.



Foto 3.1 – Camadas inclinadas da Formação Jandaíra (160Az/20°/NE), borda noroeste da Chapada do Apodi, Lajedo Largo em Jaguaruana - CE (ANA-52; 641339, 9456841).

As juntas de alívio de pressão ocorrem paralelas ao acamamento da Formação Jandaíra e dispostas horizontal a subhorizontalmente, de acordo com o mergulho dos estratos (**foto 3.2**). A formação das juntas de alívio foi condicionada pela erosão das rochas sedimentares sobrejacentes à Formação Jandaíra (Grupo Agulha) e até mesmo pelo intemperismo e erosão do próprio calcário Jandaíra. A espessura de abertura das juntas varia de 10 cm a 15 cm. Estas estruturas estão ligadas ortogonalmente com as fraturas extensivas formando *mullions* de interseção (**foto 3.3**). As juntas resultam na superfície em zonas de recarga para o aquífero e em subsuperfície favorecem o armazenamento e o fluxo das águas subterrâneas. Essas estruturas ocorrem em superfície principalmente onde o calcário Jandaíra encontra-se arqueado e intensamente erodido. Boas exposições em afloramento podem ser vistas nos lajedos da Furna Feia (ANA-01), Escada (ANA-31), Largo (ANA-52), Mato Alto (ANA-45), Pedreira Bom-sucesso (ANA-61) e Formigueiro (ANA-108). Já em subsuperfície essas estruturas foram observadas em furos de sondagem (Fábrica de cimentos – Baraúna/RN) e através da perfilagem ótica dos poços de pesquisa no aquífero Jandaíra, do Projeto Apodi (ANA-1434, 1435 e 1436).



Foto 3.2 – Juntas de alívio de pressão dispostas horizontalmente e paralela ao acamamento (315 Az/horizontal) no calcário Jandaíra, Pedreira Bonsucesso – Jaguaruana/CE (ANA-108; 638136, 9441433).



Foto 3.3 – Juntas de alívio de pressão cortadas por fraturas extensivas ortogonalmente formando mullions de interseção, calcário Jandaíra. Pedreira Bonsucesso (ANA-61; 638136, 9441433).

3.3.2 - Formação Açú

O diagrama sucinto da **figura 3.4** mostra o padrão sistemático das camadas da Formação Açú.

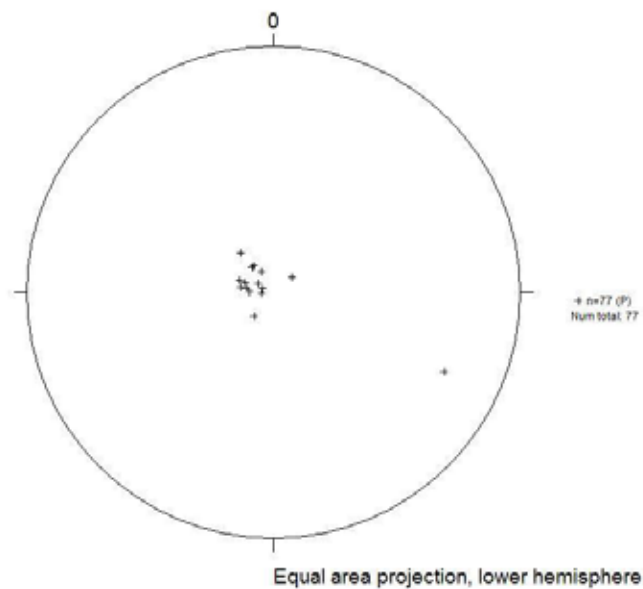


Figura 3.4 - Diagrama da distribuição dos pólos das atitudes na Formação Açú, produzidos com auxílio do software Stereonet® (n= número total de atitudes).

77% das camadas possuem direção preferencial NE-SW com mergulhos fracos a moderados variando de 8° a 20°, com 61,5% dos mergulhos para sudeste e 7,7% para noroeste. Apenas 23% das atitudes seguem direção preferencial NW-SE com mergulhos fracos a suaves, 15% com mergulhos para nordeste e 7% para sudoeste (**foto 3.4**).



Foto 3.4 – Arenito Açú, plano de acamamento com direção 54 Az mergulhando 11° para sudeste (ANA-56; 633531, 9453594).

As camadas da Formação Açú têm majoritariamente direção NE-SW e mergulhos suaves para SE, ou seja, os estratos estão inclinados para o interior da Bacia Potiguar. Do ponto de vista hidrogeológico a zona de afloramento dessa formação, na área de estudo, foi sempre imaginada como importante zona de recarga do Aquífero Açú. Portanto na região de Quixeré exhibe litotipos argilosos que sugerem comportamento hidrogeológico de um *aquitard*, ou seja, pode conter quantidades apreciáveis de água, mas a transmitem muito lentamente.

3.4 – FRATURAS DE EXTENSÃO

As principais estruturas rúpteis mapeadas na área de estudo foram classificadas como *juntas* ou *diáclases* por não apresentarem evidências visíveis de deslocamentos. Por outro lado, a ocorrência de separação entre os blocos nos lados opostos da superfície de ruptura das juntas permitiu a sua classificação como **fraturas de extensão**. Algumas dessas estruturas são preenchidas por recristalização de calcita originando *veios*.

As fraturas de extensão são as estruturas mais comuns presentes na área em pauta e podem apresentar padrões bastante sistemáticos. O estudo das fraturas tem mais implicações práticas que teóricas, sendo essencial na avaliação do potencial do aquífero Jandaíra, devido sua natureza cárstico-fissural. Porém, a análise integrada das fraturas de extensão, falhas normais e das juntas estilolíticas é de suma importância para a determinação da orientação dos esforços tectônicos principais.

De acordo com o modelo de evolução tectônica da Bacia Potiguar (Medeiros et al. 2001), as fraturas de extensão possivelmente foram formadas durante o evento deformacional que ocorreu no Neógeno. Este evento envolveu uma distensão principal E-W, também acoplada com outra distensão N-S (**figura 3.8**).

A seguir estão descritos os principais padrões estruturais observados nas Formações Jandaíra e Açú:

3.4.1 - Formação Jandaíra (K2j)

Os resultados gerais para a Formação Jandaíra obtidos a partir de trabalhos de campo e da análise estrutural, podem ser visualizados na **figura 3.5** (a, b), onde são mostrados os diagramas sinópticos produzidos a partir das medidas das fraturas extensivas observadas em afloramentos. Estas estruturas foram classificadas como principais e secundárias. Sendo diferenciadas pela frequência que ocorrem e pela penetratividade, abertura e conectividade.

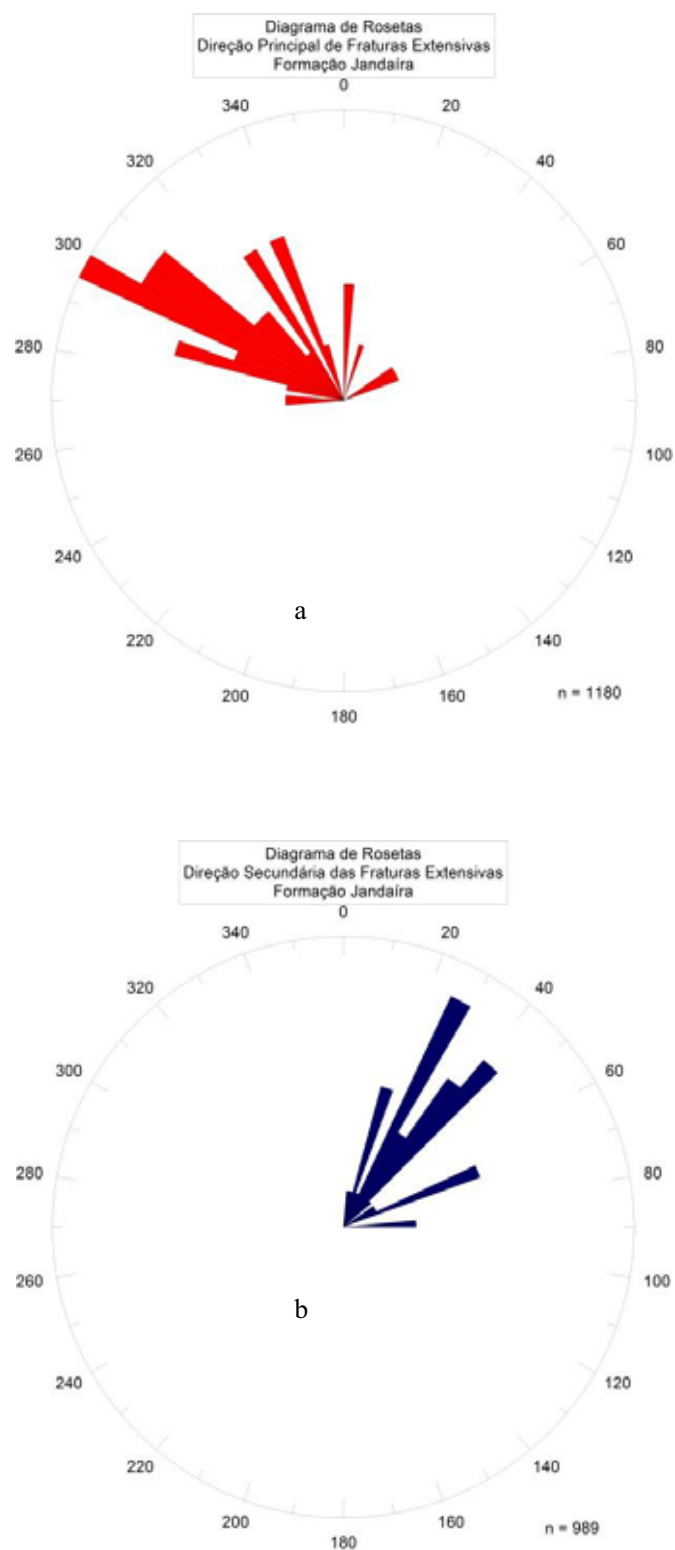


Figura 3.5 – Diagramas de roseta para fraturas extensivas. a) Direções do fraturamento principal. b) Direções do fraturamento secundário (n= número de medidas).

O padrão sistemático de fraturamento principal que ocorre na Formação Jandaíra é dominado por fraturas de extensão, sem preenchimento, com abertura de até 2 m e com grande penetratividade (**foto 3.5**). Possui *trend* principal de alinhamento WNW, variando de 280 Az a 340 Az, com frequência máxima em 300 Az.



Foto 3.5 – Furna dos Ossos, Lajedo Escada (ANA-31; 641018, 9428612). Feição desenvolvida segundo a direção do fraturamento principal, 310 Az.

O fraturamento principal está conectado ortogonalmente com as fraturas secundárias, de menor dimensão, abertura e penetratividade (**foto 3.6**). Ocorrem preferencialmente na direção NE-SW, com maior frequência em 30 Az (**figura 3.5b**). Veios com *trends* N-S e E-W também ocorrem, mas não são significativos, representando menos de 10% do total coletado. São em sua maioria recristalização de calcita, preenchendo as fissuras, com até 0,5 cm de largura (**foto 3.7**).



Foto 3.6 – Fraturas extensivas principais (NW-SE) conectadas ortogonalmente às secundárias, Calcário Jandaíra, Lajedo Mato Alto (ANA-46; 638700, 9436100).



Foto 3.7 – Calcário Jandaíra com veios de calcita preenchendo fraturas de direção N-S (ANA-29; 656414, 9443643).

As fraturas extensionais tanto as principais como as secundárias estão diretamente ligadas à formação de sumidouros, furnas e cavernas. Conditonam claramente o desenvolvimento de fenômenos cársticos na região (**foto 3.8**).

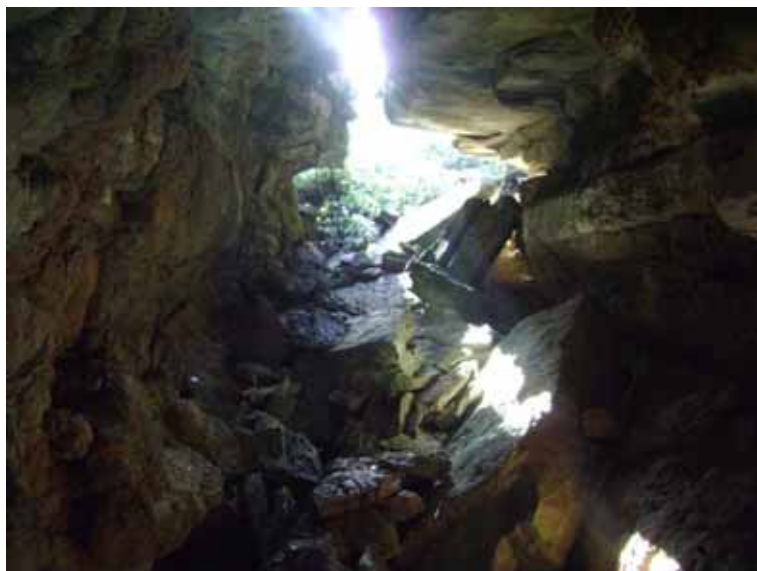


Foto 3.8 – Caverna do lajedo Largo, desenvolvida a partir da fratura, direção 295 Az (ANA-52).

Durante o período chuvoso na Chapada do Apodi algumas das fissuras abertas exibem o nível estático da água, no aquífero Jandaíra (**foto 3.9**).



Foto 3.9 – Fratura de direção 165 Az, com exibição do nível estático da água no aquífero Jandaíra (ANA-07; 626791, 9422768).

3.4.2 - Formação Açu (K12a)

As fraturas presentes nesta unidade são fechadas, parcialmente preenchidas por material carbonático, possivelmente durante a deposição dos calcários da Formação Jandaíra. (**foto 3.10**). O diagrama de roseta da **figura 3.6** exibe um padrão de distribuição aleatório das fraturas nos arenitos da Formação Açu. Porém é possível determinar que as estruturas ocorrem em maior frequência em pelo menos três direções : W-E, NW e NE.

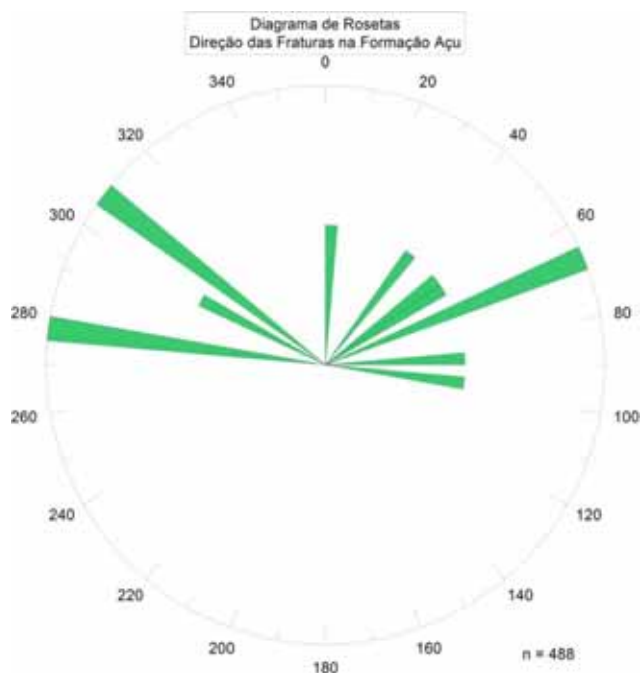


Figura 3.6 – Diagrama de roseta com as direções das fraturas na Formação Açu (n= número de medidas).



Foto 3.10 – Fraturas no arenito da Formação Açu, preenchidas por material carbonático, direção 38 Az (ANA-11; 611985,9436144).

3.5 – FALHAS DISTENSIONAIS

Estas feições estruturais foram observadas ao longo da cuesta da Chapada do Apodi, envolvem falhas distensionais de direção NNW (330 Az), com mergulhos de alto ângulo. São em geral falhas planares com o acamamento basculado em ângulos de 20° a 60°, ou mesmo verticalizado.

Esta forte deformação que ocorreu na borda ocidental da Chapada do Apodi pode ser relacionada com as estruturas desenvolvidas no litoral cearense, Icapuí, praia de Ponta Grossa. Segundo Sousa (2002) a tectônica que ocorre em Ponta Grossa, é caracterizada pelo evento principal de distensão E-W. Pode ser integrada a um sistema de transcorrências com *trend* NE e cinemática sinistral. Este sistema vem sendo interpretado por Sousa (2002) como contemporâneo ao Vulcanismo Macau e à subsequente deposição da Formação Barreiras, durante o Neógeno, no contexto evolutivo transformante da Margem Equatorial. Mas também de acordo com modelo proposto por Meideiros et al. (2001), é provável que a formação das falhas da borda oeste da Chapada tenham ocorrido durante o evento deformacional do Santoniano ao Paleógeno inferior (**figura 3.8**). Neste evento, entre outras, foram formadas falhas de distensão NW.

A seguir estão descritas as estruturas mapeadas na borda oeste da Chapada do Apodi, nomeadas como Falha das Pedrinhas e Falha Vertente-Santa Cruz. A primeira recebeu este nome devido à proximidade com a barragem das Pedrinhas no município de Limoeiro do Norte/CE e a última por estar localizada em sítio homônimo.

3.5.1 - Falha das Pedrinhas

Uma evidência das reativações tectônicas na Bacia Potiguar durante o Santoniano-Paleógeno/Neógeno pode ser vista na borda sudoeste da Chapada do Apodi, descida para a barragem das Pedrinhas, município de Limoeiro do Norte/CE (ANA-85). Ali, as camadas subhorizontais a horizontais da intercalação de arenitos finos, argilitos e folhelhos da Formação Quebradas/Açu foram subverticalizadas (**fotos 3.11 e 3.12**). A verticalização ocorre na direção NE-SW com mergulhos fortes variando de 65° a 70° para sudeste.

Esta tectônica sugere sua formação pela reativação da zona de cisalhamento transcorrente de direção NE (zona de cisalhamento Jaguaribe), que segundo Fortes (1987) foi herdada do ciclo Brasileiro.



Foto 3.11 – Escarpa sudoeste da Chapada do Apodi, arenitos finos intercalados com argilitos e folhelhos (Formação Quebradas/Açu), camadas com direção 130 Az mergulhando 10° para nordeste (ANA-85A; 605152, 9426601).



Foto 3.12 – Intercalação de arenitos finos, folhelhos e argilitos com estratos verticalizados de direção 30 Az com mergulho forte de 70° para sudeste (ANA-85B; 605152, 9426601).

Falha distensional foi identificada no mesmo afloramento (ANA-85), agora com direção NW. A falha de *trend* 340 Az tem mergulho de 45° para SW. Os estratos da Formação Jandaíra encontram-se basculados e os arenitos finos, argilitos e folhelhos da Formação Quebradas inclinados (**foto 3.13**).

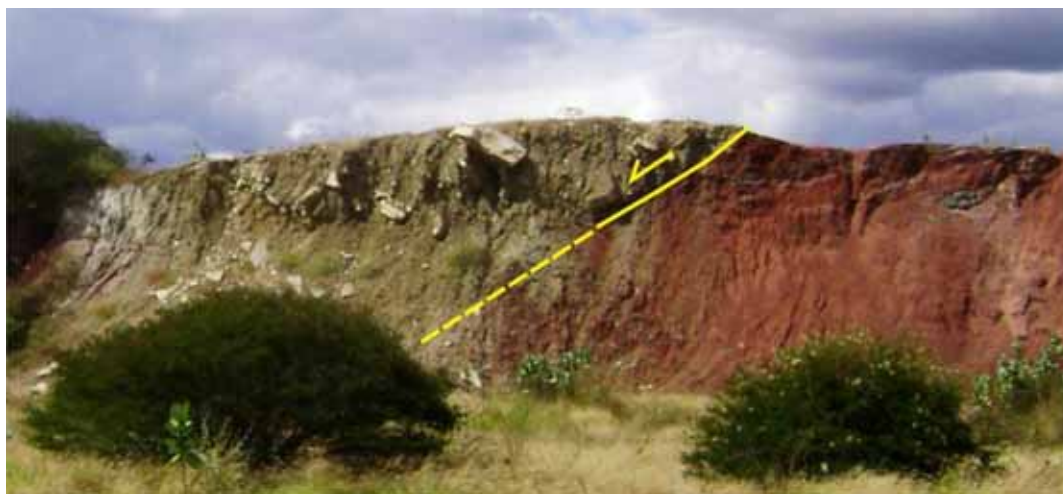


Foto 3.13 – Falha normal com blocos da Formação Jandaíra basculados, borda sudoeste da Chapada do Apodi (ANA-85: 605152, 9426601).

3.5.2 - Falha Vertente - Santa Cruz

Na *cuesta* oeste da Chapada do Apodi na descida para a cidade de Quixeré/CE, Sítio Vertente-Santa Cruz, está localizada a Falha Vertente-Santa Cruz (ANA-10). Trata-se de uma estrutura de distensão, falha normal. É possível observar as camadas dos calcarenitos da Formação Jandaíra inclinados com *trend* NW mergulhando até 50° para sudoeste (**foto 3.14**). *Gouges* foram formados no plano de falha devido ao quebramento durante a tectônica distensional. No destaque em azul da **foto 3.14** é evidenciada uma discordância intraestratal. Neste afloramento ocorrem também estratificações cruzadas a plano-paralelas. Vale ressaltar o grande conteúdo fossilífero e a ocorrência de tufas calcárias nesta porção da escarpa da Chapada.



Foto 3.14 – Falha Vertente-Santa Cruz, Formação Jandaíra, evidencia da tectônica distensional durante o Santoniano-Paleógeno (ANA-10: 613985,9436144)

3.6 – JUNTAS ESTILOLÍTICAS

Na Formação Jandaíra os estilólitos ocorrem de forma esparsa em escala meso e macroscópica. Contudo a bibliografia da região (eg. Córdoba, 2001) indica que em lâminas petrográficas do calcário Jandaíra essas estruturas ocorrem em maior frequência. O estilólito é evidenciado pela presença de picos e depressões com forma de cone. Estas estruturas se originaram na Formação Jandaíra devido a uma compressão que provocou a dissolução da calcita e um enriquecimento relativo em minerais menos solúveis, que normalmente têm coloração escura, como os óxidos.

A análise integrada de fraturas de extensão e de juntas estilolíticas foi usada como trunfo na determinação da orientação dos esforços principais, já que as primeiras formam-se paralelas a σ_1 e as segundas perpendicularmente a σ_1 . As juntas estilolíticas observadas nos afloramentos ANA-60, ANA-61, ANA-74 e testemunhos de sondagem estão dispostas na horizontal (**foto 3.15 e 3.16**), já as fraturas de distensão estão na vertical. Este comportamento implica sua formação por pressão com campo de esforço principal (σ_1) na vertical, característico de ambientes extensionais. O bloco diagrama da **figura 3.7** ilustra a formação dessas estruturas em ambiente de extensão.

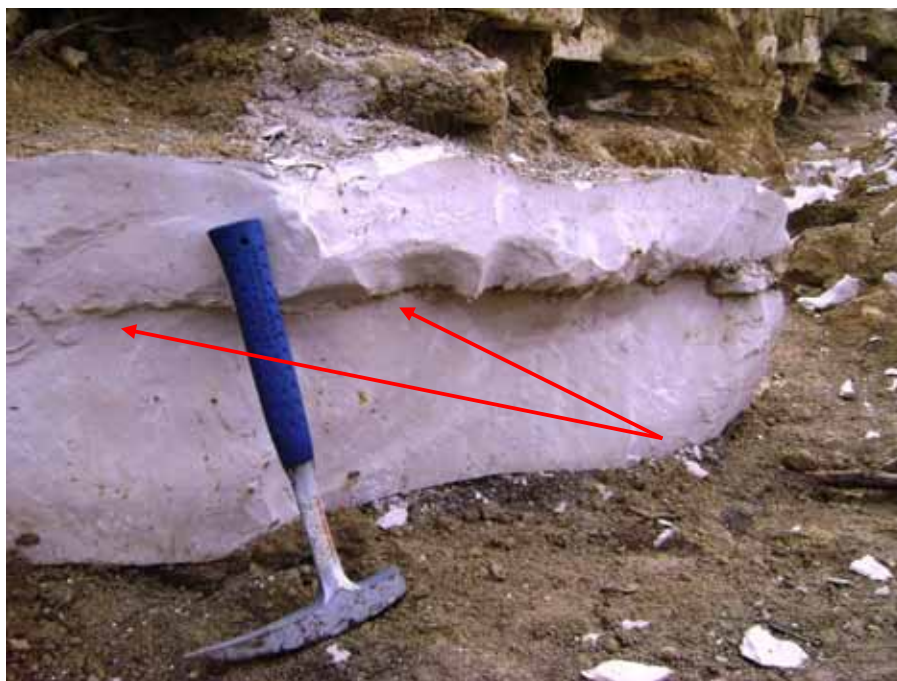


Foto 3.15 – Ocorrência de estilólito na Formação Jandaíra. Em destaque as setas vermelhas mostrando o posicionamento das juntas na horizontal. Serra do Vieira – Jaguaruana/CE (ANA-59: 631085,9448787).

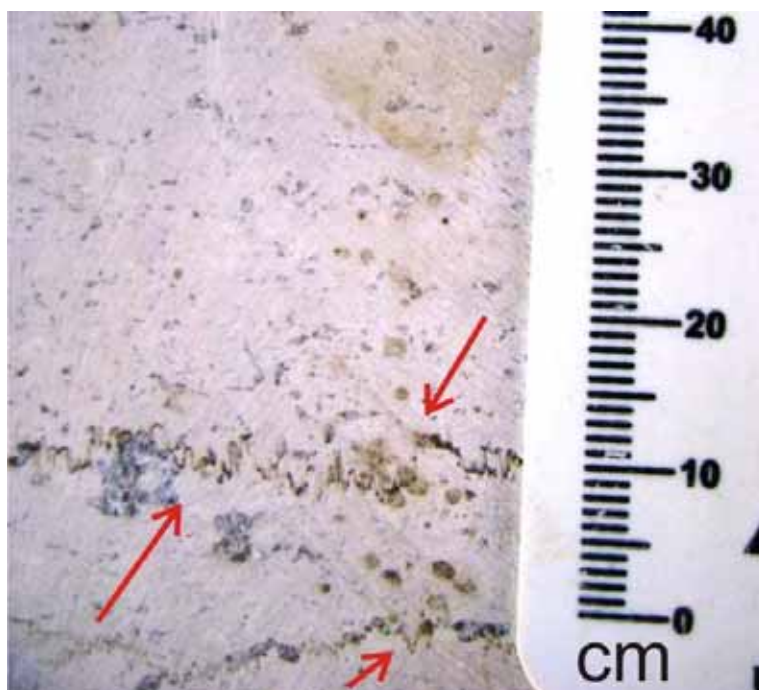


Foto 3.16 – Estilólitos em testemunho de sondagem do calcário Jandaíra, destaque das setas em vermelho mostrando a ocorrência na horizontal. Fábrica de cimento localizada no município de Baraúna.

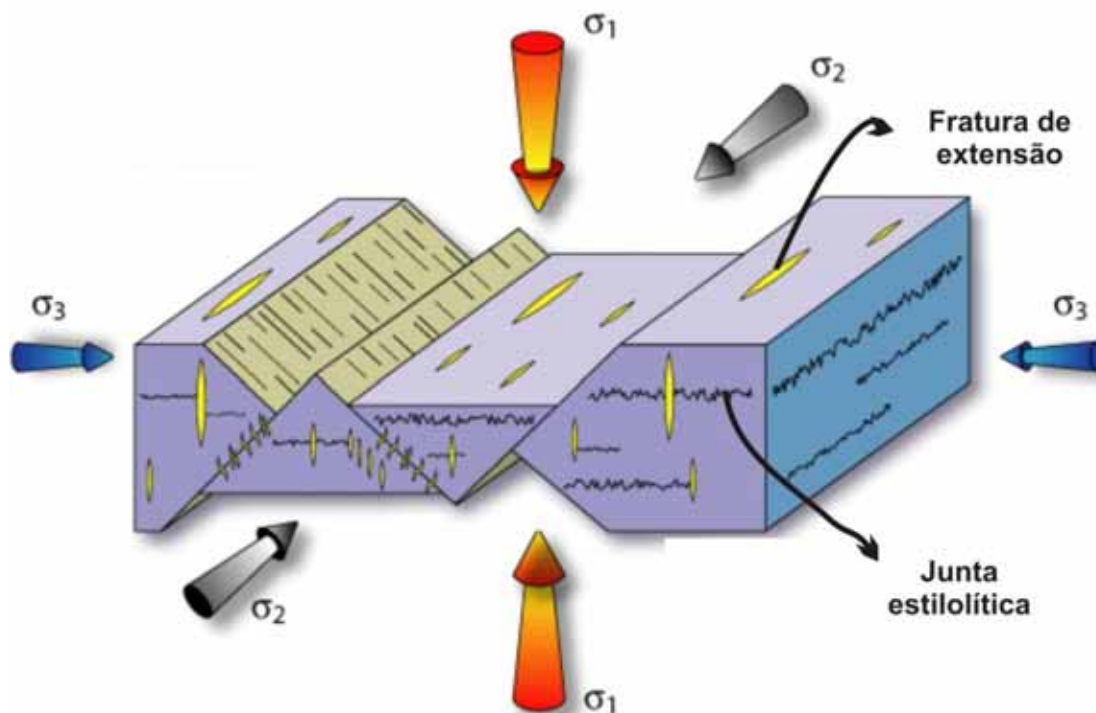


Figura 3.7 – Bloco diagrama dos campos de esforços em ambiente extensional ao qual está relacionada a área de estudo. Destaque para juntas estilolíticas (horizontal) e as fraturas de extensão (vertical) (Modificado de: <http://www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/>).

3.7 – EVOLUÇÃO TECTÔNICA E ESTRUTURAS RELACIONADAS À ÁREA DE ESTUDO

Com o objetivo de resumir o estudo estrutural da área em pauta, este item descreve os modelos estruturais já conhecidos em outras áreas de trabalho da Bacia Potiguar e no embasamento a sul (Medeiros et al. 2001), de modo a permitir comparações e correlações com as estruturas identificadas na região. Os campos de tensões e estruturas relacionadas à evolução Cretácea-Cenozóica da Bacia Potiguar estão ilustrados na **figura 3.8**.

O Rifteamento Neocomiano-Barremiano foi condicionado por um campo de extensão NW, produzindo estruturas tipo *graben* com direções NE a ENE, também controladas pelo *fabric* tectônico do embasamento. Falhas normais ou juntas de distensão NE, bem como falhas de transferência ou normais/oblíquas NW, são as estruturas resultantes deste sistema de esforços (**figura 3.8A**). Um estágio inicial com distensão N-S a NNW parece estar refletido no enxame de diques Rio Ceará-Mirim (Medeiros et al. 2001). Esta sequência tectônica estruturou o rifte Potiguar e antecede as formações sedimentares presentes na região de estudo.

A partir do Barremiano superior-Aptiano, o regime de abertura transcorrente-transformante dextral, na Margem Equatorial, impôs outro conjunto de estruturas, melhor desenvolvidas na atual plataforma continental, mas também reconhecidas no interior do continente. Tendo em vista a idade dos marcadores estratigráficos envolvidos (formações Açu e Jandaíra), estimado uma idade máxima variando de pós-Santoniana ao Paleógeno inferior, para as estruturas deste período de evolução. Neste regime foram formadas falhas transcorrentes dextrais E-W (principais), WNW (R) e WSW (P); transcorrentes antitéticas, sinistrais, NNW a N-S (R'); falhas normais ou fraturas de distensão NW (**figura 3.8B**). As estruturas presentes neste regime estão refletidas nas falhas distensionais das

Pedrinhas e Verntente-Santa Cruz cujo *trend* principal é NW e estão mapeadas na borda oeste e sudoeste da Chapada do Apodi, dentro da área de estudo.

Durante o Neógeno-Pleistoceno, o tectonismo contemporâneo ao Vulcanismo Macau e à deposição das formações Tibau e Barreiras que envolveu um campo de tensões complexo, dominado por distensão principal E-W, também acoplada com distensão N-S (**figura 3.8C**). Provavelmente este campo representa a interferência entre o regime transcorrente/transformante dextral e as tensões relacionadas a um domo térmico Neógeno (Jardim de Sá et al. 1999; Jardim de Sá 2000). As estruturas resultantes compreendem falhas transcorrentes NW (dextrais, a exemplo da Falha Afonso Bezerra) e NE (sinistrais; de Icapuí (Sousa, 2002)), falhas normais e juntas de distensão N-S (e subordinamente, E-W). As fraturas de extensão observadas no calcário Jandaíra podem ser relacionadas com este evento tectônico do Neógeno.

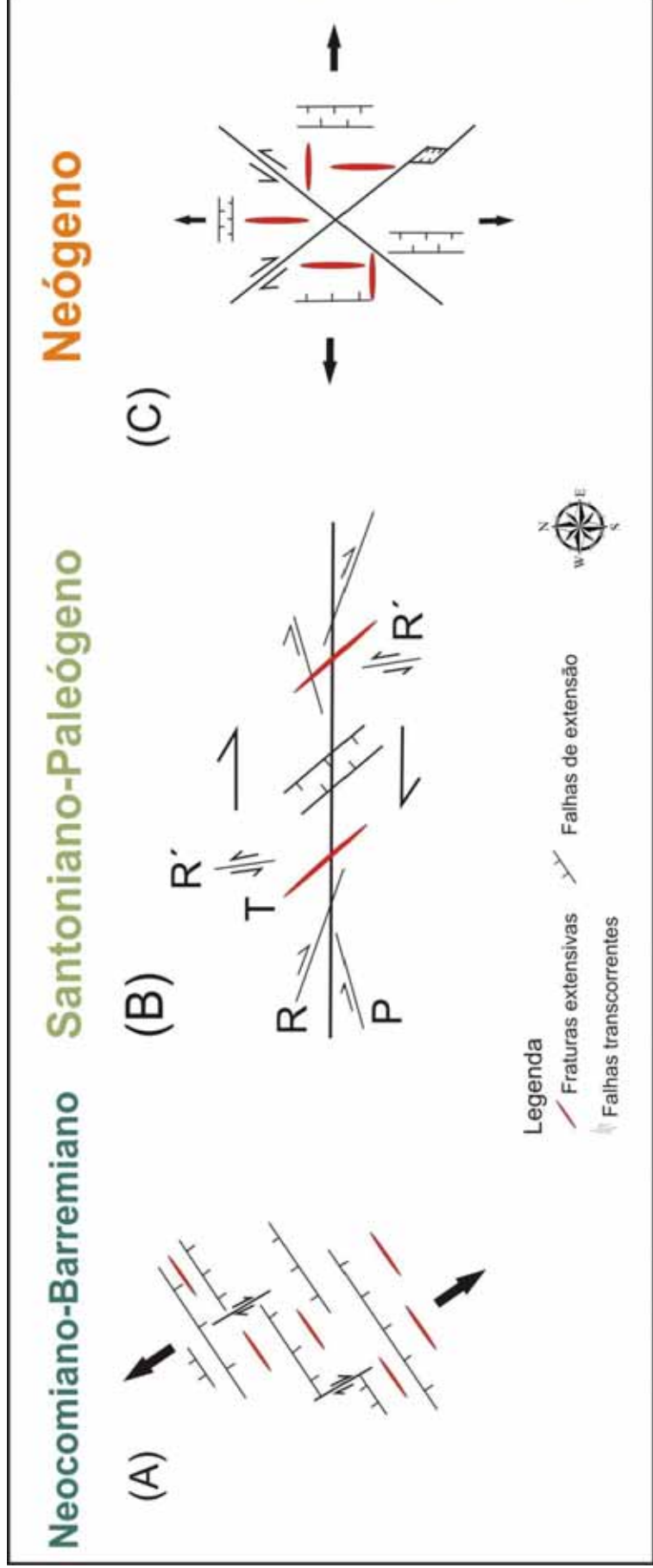


Figura 3.8 – Modelo de campo de tensões e estruturas (Neocomiano ao Neógeno) da Bacia Potiguar (modificado de Medeiros et al. 2001).

3.8 – VAZÕES INFORMADAS DO AQUÍFERO JANDAÍRA ASSOCIADAS À GEOLOGIA ESTRUTURAL

Visando correlacionar a geologia estrutural com as vazões informadas dos poços cadastrados no aquífero Jandaíra foi elaborada a interpretação dos dados durante o cadastramento dos poços na região estudada (ANA, 2010). As vazões variam de 0,5 a 250 m³/h e possuem média de 62 m³/h. Os dados relativos a uma amostra de 492 valores de vazão informada, do aquífero Jandaíra, ilustrados na **figura 3.9** apresentam uma distribuição em faixas transversais à área do projeto. Essas faixas apresentam **direção geral NE-SW**.

A primeira faixa, no setor oeste, fica no Estado do Ceará e se desenvolve nas proximidades da borda da Chapada do Apodi, sendo marcada pelo predomínio de vazões superiores a 100 m³/h, até 250 m³/h.

Segue-se, para leste, na parte central da área, uma segunda faixa, envolvendo a região de Baraúna (onde se encontra a maioria dos poços) na qual as vazões predominantes situam-se no intervalo de 50 m³/h a 100 m³/h;

Continuando para leste, entre as regiões de Baraúna e Mossoró, surge uma terceira faixa marcada pela maior frequência de vazões informadas inferiores a 50 m³/h, incluindo um valor isolado de 250 m³/h.

Finalmente, já na região de Mossoró aparece a 4ª e última faixa de vazões informadas, agora com valores novamente da mesma ordem de grandeza dos observados na segunda faixa.

A disposição espacial desses valores, nitidamente orientada na direção NE-SW segundo faixas distribuídas ao longo de toda a extensão transversal da área de estudo, sugere uma influência dos principais lineamentos estruturais no desenvolvimento das zonas cársticas cuja presença possivelmente se reflete nas vazões dos poços. Devido à variação no índice de concentração de poços na área de estudo e à grande dispersão dos valores, a representação pontual, usando as cores do espectro (**figura 3.9**) revelou-se melhor, na interpretação dos resultados, do que a representação através de isolinhas, construída usando métodos de interpolação.

3.9 – FENÔMENOS CÁRSTICOS ASSOCIADOS À GEOLOGIA ESTRUTURAL

3.9.1 - Carstificação

Define-se como *carste*, o conjunto de feições subterrâneas e superficiais formadas em rochas calcárias. O termo *Karst* significa campo de pedras calcárias e tem origem na região de Rjeka, ao norte do mar Adriático, na ex-Iugoslávia.

O relevo cárstico é caracterizado por formas específicas que se desenvolvem devido à ação das águas subterrâneas, águas pluviais e fluviais relacionadas à direção preferencial de fraturamento. Porém, outros fatores são igualmente importantes, como: pureza do calcário, clima, cobertura vegetal e a posição geomorfológica do pacote rochoso, que deverá conter uma porção acima do nível hidrostático, para que haja a livre circulação da água meteórica que infiltra.

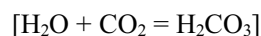
O poder de dissolução da água torna-a o principal agente de elaboração do relevo cárstico. Na formação Jandaíra, diferentemente da formação Açú, as fraturas e as juntas de alívio sofrem um aumento da largura com a circulação da água e o processo de dissolução, em curto espaço de tempo na escala geológica. Dessa forma, as descontinuidades presentes no calcário tornam-se zonas que favorecem a percolação de água, formando caminhos preferenciais para o processo de hidratação e dissolução (**foto 3.17**).



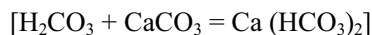
Foto 3.17 – Fissura alargada pela movimentação da água gerando sumidouro na Formação Jandaíra. Estrutura alinhada 310 Az. (ANA-40:654676,9429858)

A ação para a formação das feições cársticas ocorre de maneira simples na seguinte ordem:

a) Água (H_2O) da chuva capta gás carbônico (CO_2) da atmosfera ou do solo, formando uma solução ácida – ácido carbônico (H_2CO_3);



b) Água ácida (H_2CO_3) escorre pela rocha calcária – carbonato de cálcio ($CaCO_3$), por sua superfície ou por fendas, ranhuras, lâminas, juntas, fraturas, ataca e modifica a rocha formando o bicarbonato de cálcio ($Ca(HCO_3)_2$) solúvel, que dissolve-se e é transportado pela água.



Com o estudo sistemático realizado na Formação Jandaíra, constatou-se que as principais feições cársticas estão, em grande parte, intimamente relacionadas aos alinhamentos estruturais, ou seja, a carstificação segue o *trend* NW-SE, NE-SW das fraturas de extensão e da direção preferencial do acamamento da Formação Jandaíra.

O mapa das estruturas e feições cársticas criadas por fenômenos de dissolução a partir de estruturas rúpteis que afetaram as rochas carbonáticas da área de estudo, é apresentado na **figura 3.10**. Nele distinguem-se três categorias de feições cársticas dominantes na área de estudo: cavernas, sumidouros e dolinas.

Cavernas: ocorrem majoritariamente no município de Baraúna, a sua formação é diretamente relacionada com o *trends* NE-SW e NW-SE das fraturas de extensão. Ao norte de Jurema encontra-se o Complexo Espeleológico da Furna Feia, que reúne em um só lugar, um conjunto de feições cársticas que incluem dolinas, sumidouros e cavernas.

Sumidouros: os sumidouros da área de estudo se distribuem principalmente numa ampla faixa de direção geral NE-SW, que tem início ao sul de Tiradentes 2, na altura da linha que une as localidades de Toca da Raposa, no município de Baraúna e Formigueiro, no município de Jaguaruana, na região fronteira dos Estados do Ceará e Rio Grande do Norte. Essa faixa avança até o extremo sul da área, cortando a linha que une as localidades de Macaco, na fronteira municipal de Quixeré e Limoeiro do Norte, e Baixa Branca, no município de Baraúna.

Dolinas: as dolinas são as formas mais amplamente disseminadas na área do projeto, concentrando-se especialmente na região próxima à borda ocidental da Chapada do Apodi, em torno da localidade de Lagoinha, no município de Quixeré e secundariamente na região ao sul da localidade de Tomé, no município de Limoeiro do Norte. No Rio Grande do Norte as dolinas ocorrem em número bem mais reduzido e de forma dispersa.

3.9.2 - Cavernas

Os fenômenos responsáveis pelo desenvolvimento das cavernas estão submetidos a vários processos geológicos e climáticos que modelam o relevo da superfície e do subsolo, geralmente composto por rochas carbonáticas, que são solúveis, como é o caso dos calcários, carbonato de cálcio (CaCO_3) e dolomitos, carbonato de cálcio e carbonato duplo de cálcio e magnésio – $\text{MgCa}(\text{CO}_3)$.

Na Formação Jandaíra a ação da água ácida através de drenagem, sobretudo subterrânea, condiciona processos químicos (corrosão e dissolução) e físicos (erosão), responsáveis pela formação de um relevo cuja paisagem característica tem aspecto ruiniforme, esburacado, frequentemente em vales fechados, onde são visíveis as **macroformações** (dolinas, torres, pontes, arcos de pedra, grandes paredes verticais, *canyons*, sumidouros, ressurgências, abismos, cavernas) e as **microformações** (lápias e espeleotemas).

As cavernas são uma das formas no karst, e nelas se pode encontrar uma vastíssima gama de macro e microformas, que incluem galerias, câmaras e outros condutos (**foto 3.18**).



Foto 3.18 – Galeria com abóboda em forma de arco no Abrigo do Letreiro, Complexo Espeológico da Furna Feia, Baraúna – RN (ANA-19; 662069, 9441784).

A ação de dissolução irregular e descontínua da água ácida que penetra pelo solo, alcança a rocha, por meio de suas fendas, fraturas, laminações, formando principalmente as microformas, como: estalactites, estalagmites, colunas, cortinas, vulcões, flores, helictites, lápias.

A descrição das cavernas visitadas na área estudo pode ser vista na **tabela 3.1**.

Tabela 3.1 – Cavernas visitadas na Formação Jandaíra nos municípios de Baraúna e Jaguarana.

Afloramento	X	Y	Localidade	Município	Descrição de Campo	Direção das Fraturas	Caverna
ANA 01	659759	9443129	Complexo Espeleológico da Furna Feia	Baraúna	Calcário micrítico, com fraturas verticais e horizontais. Abertura da caverna orientada pelas fraturas.	25 Az 270 Az	Furna/Caverna. Conhecida como Furna Feia. Dissolução intensa, segundo a orientação das fraturas.
ANA 18	661907	9441425	Complexo Espeleológico da Furna Feia	Baraúna	Calcário maciço, cobertura cinza a creme		Caverna do Pinga, estalactites com água pingando, origem do nome. Difícil acesso.
ANA 19	662069	9441784	Complexo Espeleológico da Furna Feia	Baraúna	Calcário maciço, micrítico, creme	22 Az	Caverna ou Furna, várias pinturas rupestres distribuídas nas paredes da galeria
ANA 31	641018	9428612	Escada	Baraúna	Ooesparito, creme.	310 Az 30 Az	São três cavernas de fácil acesso: do Banho, Sem Fundo e dos Ossos.
ANA 40	654728	9429731	Rancho do Pereiro	Baraúna	Micrito, creme.	310 Az	Caverna com acesso difícil. Boca de entrada estreita (1m). sumidouro.
ANA 44	640761	9433891	Mato Alto	Baraúna	Calcário maciço recristalização de calcita, coloração creme (Dolomito ?)	90 Az	Preenchida por água
ANA 46	638700	9436100	Sítio dos Macacos	Jaguaruana	Lajedo. Calcário maciço, creme	325 Az 70 Az	Segue direção principal de fraturamento, exibição do nível estático da água.
ANA 52	641339	9456841	Lagedo Largo	Jaguaruana	Caverna do Lajedo Largo. Afloramento com estruturas cruzadas. Bioesparito creme.	295 Az	Desenvolvida segundo abertura das fraturas, dir 295 Az. Ocorrência de várias estalactites.
PO 05	661965	9442031	Complexo Espeleológico da Furna Feia	Baraúna	Carstificação intensa. Abertura da caverna alinhada com o fraturamento extensivo.	70 Az	Caverna com entrega larga (3x3m) (60 Az) acesso fácil. Salão com cerca de 20 m².

As cavernas da Formação Jandaíra seguem orientação de abertura segundo os *trends* de alinhamento das fraturas de extensão, ou seja, com direções principais NW-SE e NE-SW (**figura 3.11**).

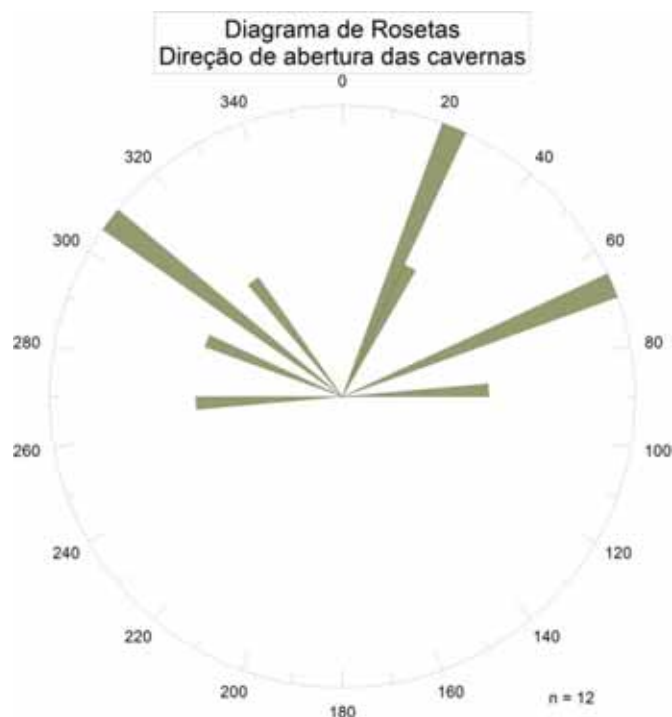


Figura 3.11 - Diagrama de rosetas evidenciando a direção de abertura das cavernas da Formação Jandaíra.

3.9.2.1 - Complexo Espeleológico da Furna Feia

Atualmente na área de estudo encontra-se a segunda maior caverna do Rio Grande do Norte em desenvolvimento linear, a caverna Furna Feia, com 760 m de extensão linear. Está localizada no município de Baraúna/RN a cerca de 8 km da sede municipal e encontra-se inserida na Área de Reserva Legal do Projeto de Assentamento Eldorado dos Carajás II.

Segundo dados do Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas – CECAV/ICMBio, a Área de Reserva Legal é formada por um complexo espeleológico onde estão inseridas várias cavernas, entre elas a Furna Feia.

O CECAV/RN tem o objetivo de apresentar a proposta, já aprovada pelo MMA, de criação de uma Unidade de Conservação Federal na área. A proposta inicial abrangia apenas a Área de Reserva Legal do Projeto de Assentamento (PA) Eldorado dos Carajás II (4.043,5 hectares), mas, por meio de análises de imagens de satélite de alta resolução, o CECAV/RN apresentou nova proposta incluindo áreas de caatinga conservada e afloramentos calcários adjacentes, totalizando 8.765,6 hectares (Cruz et al, 2009).

No Complexo Espeleológico da Furna Feia entre as cavernas mapeadas destacam-se:

a **Gruta do Pinga (foto 3.19)**, por ter gotejamento no teto durante todo o ano e em tempos passados, nas grandes secas, era fonte de água para os moradores das redondezas;

o **Abrigo do Letreiro (foto 3.20)**, destaca-se pelos diversos painéis de pintura rupestre existentes nas suas paredes. Embora este seja o único registro arqueológico conhecido na área de estudo, a região possui um alto potencial arqueológico.

e a *Furna Feia* (fotos 3.21 e 3.22), interessante por abrigar a maior variedade de invertebrados cavernícolas (Ferreira et al., 2008), além de ter sido recentemente declarada integrante do patrimônio cultural, histórico, geográfico, natural, paisagístico e ambiental do Rio Grande do Norte pela Lei Estadual nº 9.035/07.

Com a criação do Parque Nacional na área, será a primeira Unidade de Conservação no Estado, com cavernas. Isso é de especial relevância se considerarmos que o Rio Grande do Norte é atualmente o oitavo em número de cavernas no Brasil (ICMBio/CECAV, 2008) e que a indústria da mineração vem crescendo assustadoramente no Estado.



Foto 3.19 – Estalactite em destaque na Caverna Pinga-Pinga localizada na Área de Reserva Legal, Baraúna – RN (ANA-18; 661907, 9441425).



Foto 3.20 – Pinturas rupestres grafadas no calcário Jandaíra, Abrigo do Letreiro, Área de Reserva Legal (ANA-19; 662069; 9441784).



Foto 3.21 – Boca de entrada da caverna Furna Feia (ANA 01; 659759; 9443129).



Foto 3.22 – Espelotemas no salão da caverna Furna Feia (ANA 01; 659759; 9443129).

3.9.3 – Sumidouros

Como já citado, o karst representa um tipo peculiar de relevo caracterizado por feições de pequenas e grandes dimensões. Particularmente importantes para a hidrogeologia são as depressões superficiais nas quais se desenvolvem sumidouros que se constituem em vias de recarga direta das águas pluviais:

A origem dos principais sumidouros identificados na área também ocorre segundo um alinhamento governado pelo *trend* das fraturas extensivas, cuja direção principal (62% dos casos) é NW-SE e tendo como orientação secundária (38% dos casos) a NE-SW (**figura 3.12**).



Figura 3.12 – Diagrama de rosetas para direção de abertura dos sumidouros da Formação Jandaíra na Chapada do Apodi.

As descrições detalhadas das observações de campo sobre as ocorrências de sumidouros são apresentadas na **tabela 3.2**.

Tabela 3.2 – Descrição dos sumidouros da Formação Jandaíra visitados na área de estudo

Afloramento	X	Y	Sumidouro	Direção de abertura (Az)
ANA 18	661907	9441425	Circular (abertura com 1m de diâmetro em direção a caverna)	
ANA 19	662069	9441784	Forma circular	22
ANA 22	650969	9443397	Parcialmente preenchidos por sedimentos carregados pela água das chuvas. Abertura alinhada 300 Az	300
ANA 30	646016	9435564	Preenchido parcialmente por sedimentos e coberto nas bordas por gramíneas. Forma elíptica, eixo maior alinhado 15 Az.	15
ANA 40	654728	9429731	Alinhado segundo as fraturas, formação de caverna.	330
ANA 41	652067	9426153	3 sumidouros coligados, abertura alinhada a 20Az.	20
ANA 42	645622	9429148	Forma circular, levemente alinhado 135Az.	135
ANA 43	644821	9434874	Alinhando segundo as fraturas	320
ANA 44	640761	9433891	Subsidência do calcário e também formação de caverna. Exibição do nível estático da água	90
ANA 47	636721	9437644	Pouco sedimento como preenchimento, dir. 110 Az.	110
ANA 69	640014	9438110	Alinhada segundo a direção das fraturas, 305 Az.	305
ANA 72	632700	9432633	Preenchido por blocos de calcário (Soterrado)	340
ANA 73	632863	9432853	Alinhado a 20 Az.	20
ANA 89	621745	9422791	Sumidouro preenchido parcialmente por sedimento	70
PO 05	661965	9442031	Furnas com aberturas pequenas (até 30 cm) ao longo das fraturas.	70
PO 07	650649	9445464	Preenchido por sedimento e vegetação. Alinhado 125 Az.	125
PO 14	646905	9436762	Preenchido por vegetação e sedimentos.	
PO 15	638107	9436089	Preenchido por sedimentos e blocos de calcário 105 Az.	105
PO 16	641748	9445354	Alinhado 85 Az.	85
PO 24	649043	9438647	Preenchido parcialmente preenchido por sedimentos. Profundidade 3m.	5
PO 25	648959	9438247	Soterrado. Usado como descarga local da Usina de Reciclagem Recicool Nordeste.	
PO 26	648974	9438296	Soterrado com blocos de calcário.	
PO 42	620894	9436386	Soterrado por blocos de calcário e sedimentos	
PO 45	645235	9441654	Alinhado segundo o fraturamento.	305

Os sumidouros estudados foram classificados quanto a forma, regime e preenchimento como: a) intermitentes, ou seja, “funcionam” somente nas épocas chuvosas (**foto 3.23**); b) de forma circular a elíptica (**foto 3.24**) e c) parcialmente preenchidos por sedimentos carregados pela água da chuva.



Foto 3.23 – Sumidouro intermitente no Calcário Jandaíra, Sítio Ubaia (ANA-73; 632863, 9432853).



Foto 3.24 – Sumidouro elíptico com eixo maior alinhando a 5 Az, Sítio Velame I, Baraúna (PO-24; 649043, 9438647).

3.9.4 - Dolinas

São depressões fechadas que se formam em rochas solúveis, tendo várias formas em sua abertura, podendo variar de poucos centímetros a dezenas de metros, em geral, mais largas que profundas.

As dolinas presentes no calcário Jandaíra foram notadamente estudadas, com vistas à caracterização de sua geometria, com grandes variações de: *forma* (cônica, cilíndrica, prato, bacia, tigela), *dimensão* (variando de alguns a mais de uma centena de metros) e *profundidade*.

Quanto a origem das dolinas no Calcário Jandaíra foi possível a distinção das originadas por:

Dissolução – quando rochas carbonáticas sofrem, na superfície, corrosão e dissolução por águas ácidas provocando a formação de depressões normalmente mais largas que profundas. **(foto 3.25);**

Colapso ou Abatimento quando devido a presença de uma cavidade mais profunda, ocorre o desabamento de seu teto, surgindo uma depressão na superfície, que pode ou não, se comunicar com o interior da cavidade **(foto 3.26).**



Foto 3.25 – Dolina formada por dissolução no Calcário Jandaíra, totalmente preenchida por água durante as chuvas (ANA-39; 618855, 9426829).



Foto 3.26 – Dolina formada por colapso ou abatimento do Calcário Jandaíra. Localizada na região do Mato Alto, Baraúna – RN (ANA-44; 623652, 9445421).

CAPÍTULO 4- GRAVIMETRIA

4.1 – INTRODUÇÃO

A gravimetria é baseada principalmente na análise da aceleração da componente vertical do campo gravitacional, em resposta às variações de densidade das rochas. A prospecção gravimétrica procura identificar as massas locais de maior ou menor contraste de densidade e extrair informação sobre a forma e a profundidade a partir de anomalias no campo gravimétrico da terra.

Na Chapada do Apodi foram desenvolvidos estudos geofísicos gravimétricos com modelagem 2D e 3D devido este método apresentar-se como uma importante ferramenta de pesquisa, a qual fornece informações do contorno da superfície topográfica do embasamento. A gravimetria auxilia na definição do modelo tridimensional do pacote sedimentar e possibilita a identificação e localização de estruturas e alinhamentos tectônicos pretéritos. A identificação de falhas verticais e de espessamentos sedimentares (depressões tectônicas) tem uma importância fundamental na delimitação de aquíferos e, conseqüentemente, na sua modelagem e na locação de poços. Dessa forma, a gravimetria contribuiu expressivamente para a pesquisa de água subterrânea na Chapada do Apodi, pois visou o entendimento da deposição das formações Açú e Jandaíra, fornecendo valiosas informações para avaliação e gerenciamento das reservas.

4.2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.2.1 – Lei da atração gravitacional

A aplicação do Método Gravimétrico envolve diretamente a atração de massas, pois durante o levantamento gravimétrico é medida a atração que as massas da subsuperfície exercem sobre uma massa localizada no instrumento medidor (gravímetro) (Luiz & Silva, 2002).

A atração entre as massas é regida pela lei de Newton de atração gravitacional, segundo a qual, no universo as partículas atraem-se com uma força de intensidade diretamente proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que separa seus centros de massa. Portanto, duas partículas de massas m_1 e m_2 , separadas pela distância r , experimentam forças de atração com intensidade igual a:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde G é constante de gravitação que tem o valor $6,67 \times 10^{-8}$ dina.cm²/g², no sistema cgs ($6,67 \times 10^{-11}$ N.m²/kg², no Sistema Internacional de Unidades-SI).

4.2.2 – Campo gravitacional terrestre

Corpos esféricos completamente homogêneos do ponto de vista da densidade ou formados por camadas esféricas homogêneas exercem atração equivalente a que seria exercida se toda a sua massa estivesse concentrada no seu centro (Kellogg, 1954). Assim, a massa da Terra pode ser tomada como se estivesse concentrada no seu centro, nos estudos de atração de massas. Logo os corpos colocados na proximidade da superfície terrestre são atraídos com uma aceleração

$$a = \frac{GM}{R^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

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 encontra-se na superfície, R é o raio da Terra.

Como a Terra não é perfeitamente esférica (o seu raio polar é menor do que o raio equatorial), a força e aceleração exercidas sobre o corpo variam ao longo da superfície. Ambas crescem a partir do equador, em direção aos pólos. Tanto a força de atração como a aceleração são quantidades vetoriais

que definem campos. Às proximidades da Terra esses campos são caracterizados por vetores orientados para o seu centro (Luiz & Silva op. cit.).

Devido ao seu movimento de rotação e ao referencial, a Terra está sujeita a uma força centrífuga. Esta força depende do raio de rotação l e da velocidade angular de rotação w . A aceleração centrífuga associada a esta força é definida por

$$a_c = w^2 l \quad (\text{Eq. 3})$$

Um corpo localizado na superfície da Terra fica então sujeito às acelerações de atração e centrífuga. No entanto a aceleração de atração é orientada para o centro da Terra, já a aceleração centrífuga se orienta em sentido contrário (**figura 4.1**). 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

$$g = G \int_V \frac{dM}{r} - w^2 l \cos \Phi \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo Φ a latitude em que se encontra o corpo. O vetor g define o campo gravitacional terrestre.

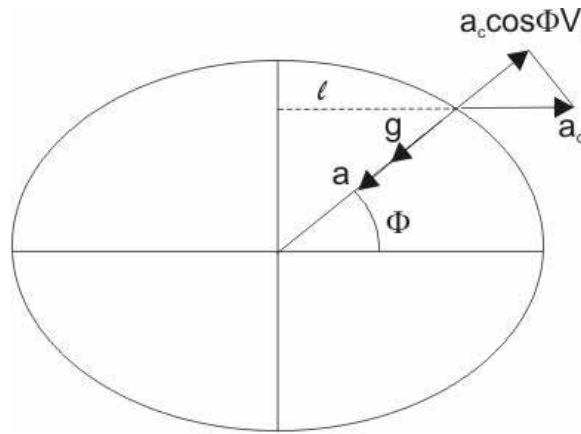


Figura 4.1 – Aceleração centrífuga (a_c), aceleração de atração (a), aceleração da gravidade (g) e Φ a latitude em que se encontra o corpo. Fonte: Luiz & Silva (1995).

O raio de rotação l tem o seu valor máximo no Equador e mínimo (igual a zero nos pólos). Logo, a aceleração centrífuga alcança seu valor máximo (cerca de $3,4 \text{ cm/s}^2$) no Equador e assume valor zero nos pólos. A variação da gravidade com a latitude é de aproximadamente 978 cm/s^2 , no Equador, 983 cm/s^2 , nos pólos.

A unidade de aceleração no sistema cgs, cm/s^2 , é denominada de **Gal** em homenagem a Galileu. No trabalho gravimétrico, é tradicional o uso do mGal (10^{-3} Gal).

4.2.3 – Potencial gravitacional

O campo gravitacional é um campo conservativo, isto é, o trabalho necessário para mover uma massa dentro do campo independe do caminho percorrido, somente importam o ponto inicial e final. A aceleração da gravidade pode ser expressa como gradiente do potencial de acordo com o teorema de Helmholtz (Seeber, 1993):

$$g(P) = \nabla U(P) \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo U a função potencial, aqui denominada potencial gravitacional, e ∇ (nabla) o operador diferencial que produz o gradiente. O potencial gravitacional é representado por:

$$U = -G \int_V \frac{dM}{r} + \frac{w^2 l^2}{2} \quad (\text{Eq. 6})$$

Na representação da Terra por uma esfera, o potencial gravitacional é uma constante para um determinado valor r_1 e a equação 6 define uma superfície equipotencial que envolve a Terra. Essa equipotencial é denominada de geóide (Luiz & Silva op. cit.). O geóide é uma superfície equipotencial de referência para altitudes ortométricas (Torge, 1991).

4.2.4 – A gravimetria e as correções gravimétricas

A aceleração da gravidade varia na superfície da Terra como consequência de fatores como a latitude, as diferenças de elevações entre estações, as irregularidades da topografia e as marés (variação regular do campo gravitacional da Terra, produzida pela atração gravitacional do Sol e da Lua). Torna-se necessário corrigir os dados obtidos (valores lidos) em um levantamento gravimétrico durante o processamento, para compensação desses efeitos, evidenciando as procuradas variações laterais e verticais de densidade e, a partir daí, gerar os mapas gravimétricos e perfis que possibilitem a interpretação da área estudada.

O método gravimétrico tem como finalidade principal detectar pequenas e grandes estruturas geológicas, bem como concentrações minerais em subsuperfície, através de distorções que estes produzem no campo gravitacional normal que envolve a Terra. Essas distorções (anomalias) estão diretamente relacionadas a diferentes distribuições laterais na densidade dos materiais da subsuperfície. Assim, ressalta-se que é condição fundamental a existência de contraste de densidade para o emprego deste método.

Dependendo de como seja adquirido o valor de gravidade, determinadas correções deverão ser realizadas para que se possa posicionar o ponto na superfície geoidal da estação medida. Assim, sobre os valores medidos nas estações gravimétricas terrestres deverão ser realizadas as seguintes correções gravimétricas (Correia, 1989 e Motta, 1986):

Correção de Latitude – Corrige os efeitos resultantes da forma e rotação da Terra; Variação de g devido à variação da força centrífuga, que é máxima no equador e mínima nos pólos.

Correção de Ar Livre – é aplicada para eliminar o efeito causado pela diferença de altitude (distância ortométrica) entre o ponto de observação e o nível físico médio do mar (superfície do geóide) no valor da gravidade (Teixeira op. cit.). Corrige os efeitos decorrentes da diferença de altitude entre as estações e o nível de referência (estação-base) ou nível do mar. Ela apresentará valores positivos se a estação estiver acima do nível de referência.

Correção de Bouguer – Aplica-se a correção Bouguer para eliminar o efeito gravitacional da porção de massa crustal entre o ponto de medida e o nível físico médio do mar, sendo conveniente conhecer sua densidade com a melhor exatidão possível (Teixeira op. cit.).

Correção de terreno ou topográfica – É aplicada a levantamentos de detalhe, realizados em regiões muito acidentadas, onde se tornam relevantes as feições da área, corrigindo a influência das elevações e depressões do terreno considerado com relação ao ponto medido.

4.2.5 – Densidade das rochas

A densidade é a propriedade física das rochas que controla as variações do campo de gravidade da Terra. A densidade das rochas é controlada por três fatores: a densidade das partículas que formam a massa rochosa, a porosidade e o fluido que preenche os poros (Teixeira op. cit.). Como o contraste de densidade é o principal fator levado em conta na interpretação de um levantamento gravimétrico, é fundamental ter um bom controle da densidade das rochas na área de levantamento. No estudo da Chapada do Apodi o contraste de densidade entre as rochas sedimentares e cristalinas e a espessura do pacote sedimentar, é que determinará a forma e a intensidade da anomalia gravimétrica.

4.2.6 – Técnica de separação gravimétrica

Nesta dissertação foi usada a técnica de separação pelo método Gaussiano para a obtenção do mapa residual e regional a partir do mapa Bouguer. Este método é suave e funciona como uma passa-banda. Porém, os dados de saída apresentam uma distribuição gaussiana (normal), e o ponto de corte escolhido é o desvio padrão da função gaussiana.

Em termos práticos, a componente residual deve conter predominantemente anomalias com fontes rasas, associadas aos pequenos comprimentos de onda, enquanto que a componente regional conterá as fontes profundas associadas aos grandes comprimentos de onda.

4.3 - MATERIAIS E MÉTODOS

O levantamento gravimétrico foi executado utilizando-se o gravímetro da marca La Coste & Romberg, Modelo G-994, que tem precisão de 0,01 mgal. O posicionamento das estações foi obtido com o uso de equipamentos auxiliares, como o DGPS (ou GPS diferencial com portadora L1) com precisão de 10 a 20 cm nas coordenadas (x, y, z) (**tabela 4.1**), a precisão da altitude é um dos fatores mais importantes para a qualidade do cálculo final da anomalia Bouguer. Os dados foram processados no programa Oasis Montaj versão 7.1. Cinquenta e três estações gravimétricas foram estabelecidas em malha parcialmente regular, com espaçamento médio de 4 km (**figura 4.2**).

Os valores de anomalia Bouguer estão correlacionados à Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira com valores de exatidão da ordem de $\pm 0,02$ mgal. Foi usada a Fórmula Internacional de Gravidade de 1967 (Turcotte, 1982) como referência para correções de latitude, considerando ainda o valor de $2,67 \text{ g/cm}^3$ para a densidade Bouguer. Os valores brutos do levantamento gravimétrico encontram-se no anexo 2.

O Mapa Gravimétrico Bouguer foi obtido a partir das correções gravimétricas (Bouguer, ar livre, maré, latitude e drift do instrumento). Este mapa representa a soma dos comprimentos de onda (anomalias) regionais e residuais, obtidas utilizando a técnica de separação pelo método Gaussiano.

O modelo gravimétrico 3D foi executado utilizando valores de densidades obtidas a partir de 88 sub-amostras coletadas em campo, em afloramentos de interesse, buscando uma representatividade das unidades litoestratigráficas presentes na área de estudo (**tabela 4.2**). As amostras foram todas coletadas atendendo as especificações adotadas pelo LGA (Laboratório de Geofísica Aplicada/UFPE). Para determinação da densidade das rochas foi usado o método de imersão em mercúrio (anexo 3). Os valores de densidades calculadas foram de: $2,80 \text{ g/cm}^3$ para o embasamento cristalino, $2,20 \text{ g/cm}^3$ para o arenito Açú e $2,58 \text{ g/cm}^3$ para o calcário Jandaíra. Na modelagem 3D foi empregada a inversão de um plano de referência locado inicialmente a uma profundidade de 500 m, com densidade calculada de $2,8 \text{ g/cm}^3$, limitado acima pela superfície topográfica e sobreposto pelo pacote sedimentar de densidade média $2,40 \text{ g/cm}^3$.

A modelagem 2D foi realizada pelo método direto. Inicialmente foi proposto um modelo básico onde o mesmo está condicionado a elementos restritivos e de conhecimento prévio. Nestes modelos são considerados como elementos restritivos os contatos geológicos, feições estruturais, posição e profundidade de poços, densidade das unidades litológicas e qualquer outro elemento que condicione o modelo a uma solução geofísica e geologicamente coerente. Os elementos variáveis na modelagem 2D foram apenas as densidades e o contato entre a formação Jandaíra e Açú. Com objetivo de proceder a calibração dos valores de densidade, foi selecionado o perfil 2D A-A' (**figura 4.7**) correspondente a uma seção geológica executada pela Petrobras, a qual está inserida no lineamento entre os poços MOP-25-RN e SMO-1-RN, todos atingindo o embasamento cristalino.

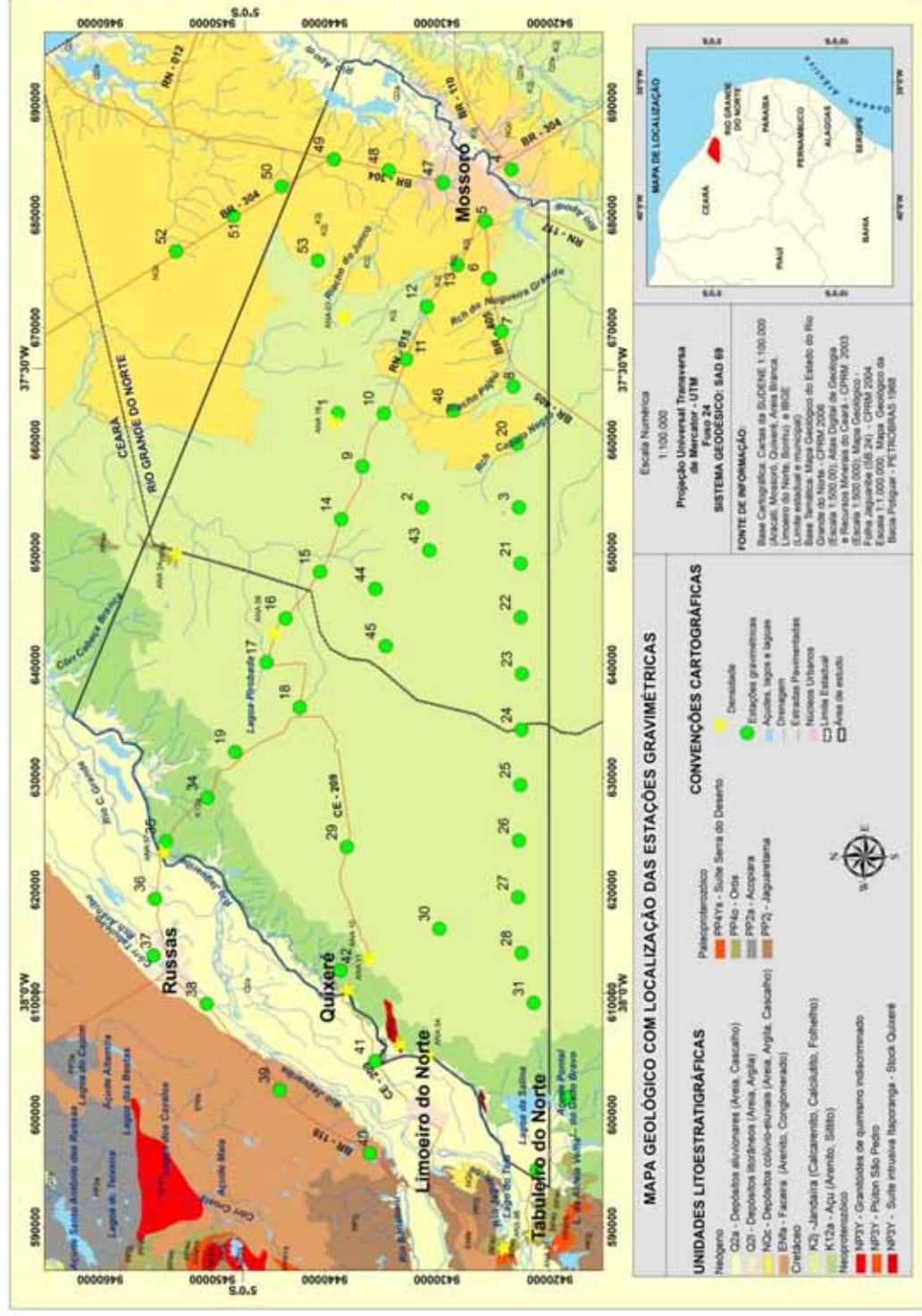


Figura 4.2 – Mapa geológico com estações gravimétricas e de amostragem para densidade das rochas.

Tabela 4.1 – Coordenadas das estações gravimétricas realizadas dentro da área de estudo.

ESTAÇÃO	UTM_E	UTM_N	COTA (m)
1	662369	9438806	135.525
2	674403	9431314	58.378
3	654004	9422769	108.350
4	684055	9423437	19.464
5	679472	9425720	24.107
6	674384	9425396	55.454
7	669658	9424315	61.339
8	664755	9423257	71.665
9	657651	9436641	108.179
10	662362	9434725	126.952
11	667179	9432744	129.555
12	671844	9430883	73.243
13	675539	9428176	43.811
14	652957	9438523	95.213
15	648263	9440398	95.999
16	644137	9443472	98.755
17	640240	9445171	106.337
18	636235	9442207	115.383
19	632263	9447958	120.647
20	659687	9422952	87.914
21	649020	9422619	115.069
22	644227	9422627	110.560
23	639207	9422501	122.051
24	634249	9422533	129.103
25	629318	9422646	133.296
26	624380	9422771	134.836
27	619336	9422855	136.658
28	614387	9422549	142.005
29	623807	9438019	129.145
30	616559	9429771	134.696
31	609951	9421452	142.810
32	601543	9418560	30.765
33	595122	9421195	33.384
34	628191	9450443	40.541
35	624320	9454144	18.820
36	619203	9455125	18.448
37	614170	9455242	19.686
38	609849	9450503	29.332
39	602208	9444016	90.430
40	596595	9435966	58.208
41	604780	9435529	27.989
42	612832	9438595	30.366
43	650179	9430666	104.522
44	646763	9435467	102.142
45	641692	9434562	109.822
46	662604	9428549	96.075
47	682890	9429435	20.870
48	683963	9434279	55.743
49	684955	9439151	42.826
50	682546	9443819	56.850
51	679941	9448121	46.308
52	676775	9453233	39.219
53	675954	9440600	78.049

Tabela 4.2 – Valores de densidade (g/cm³) das unidades litoestratigráficas presentes na área de estudo.

AMOSTRAS	DENSIDADE MÉDIA (g/cm ³)	MAIOR DENSIDADE (g/cm ³)	MENOR DENSIDADE (g/cm ³)	TOTAL AMOSTRAS
ANA - 01	2,599	2,657	2,564	7
ANA - 02	2,706	2,715	2,69	7
ANA - 03	2,263	2,317	2,212	6
ANA - 10	2,181	2,283	2,065	6
ANA - 16A	2,56	2,653	2,516	7
ANA - 16B	2,54	2,555	2,525	6
ANA - 32A	2,821	2,856	2,771	6
ANA - 32B	2,746	2,758	2,728	7
ANA - 32C	2,664	2,706	2,636	6
ANA - 34B	2,195	2,232	2,142	6
ANA - 35	2,518	2,564	2,485	6
ANA - 36	2,619	2,64	2,592	6
ANA - 37	2,195	2,264	2,165	6
ANA - 38	2,45	2,549	2,377	6

4.4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi procedida uma análise comparativa entre as feições gravimétricas e estruturais presentes no Mapa Gravimétrico Residual para os Mapas Bouguer e Regional. Este procedimento visa posicionar as mesmas com relação aos outros mapas de comprimento de onda diferente.

4.4.1 - Mapa Bouguer

O mapa bouguer representa o somatório dos efeitos gravitacionais produzidos por fontes de origem rasa (residual) e profunda (regional). As anomalias com grandes comprimentos de onda são associadas a fontes de origem profunda e caracterizam as estruturas regionais. As anomalias com pequenos comprimentos de onda são associadas a fontes de origem rasa e caracterizam discontinuidades intracrustais.

A primeira e grande feição observada no mapa de anomalia bouguer (**figura 4.3**) se caracteriza por um mergulho suave do embasamento no sentido leste com gradiente de 10 a 15%. Este mergulho é obliterado na região de Quixeré pela possível reativação da borda da Bacia Potiguar, tendo havido um basculamento de blocos gravimetricamente positivos e negativos, ou seja, formando sistemas de *horsts* e *grabens*. Devido a estes movimentos tectônicos desenvolveram-se janelas de sedimentação com variação brusca de espessura do sedimento. O embasamento se aprofunda até valores de 800 a 930 m à NW da cidade de Baraúna. Na porção sul/sudeste da área, os valores de gravidade sofrem aumentos anômalos não justificados (correspondendo a 220 m de profundidade), em contradição aos valores de profundidade de poços existentes na área, perfurados pela Petrobras: 1-REC-1RN com profundidade de 614 m e o poço 1-FV-1-RN (504 m). Assim essa anomalia diz respeito à provável presença de corpo rochoso mais denso cujos valores se sobrepõem àqueles relacionados com a profundidade do embasamento. Milani & Latgé (1987) em trabalho gravimétrico realizado em toda a Bacia Potiguar, modelaram feições semelhantes próximo desta região, propondo a associação destas estruturas à presença de diques de diabásio em subsuperfície. Assim esta anomalia gravimétrica positiva de direção E-W pode ser explicada devido à ocorrência do evento magmático Rio Ceará Mirim de idade Valanginiano a Hauteriviano, que ocorre na forma de diques de diabásio com forte orientação E-W no embasamento adjacente à borda Sul da Bacia Potiguar (Pessoa Neto et al. 2007).

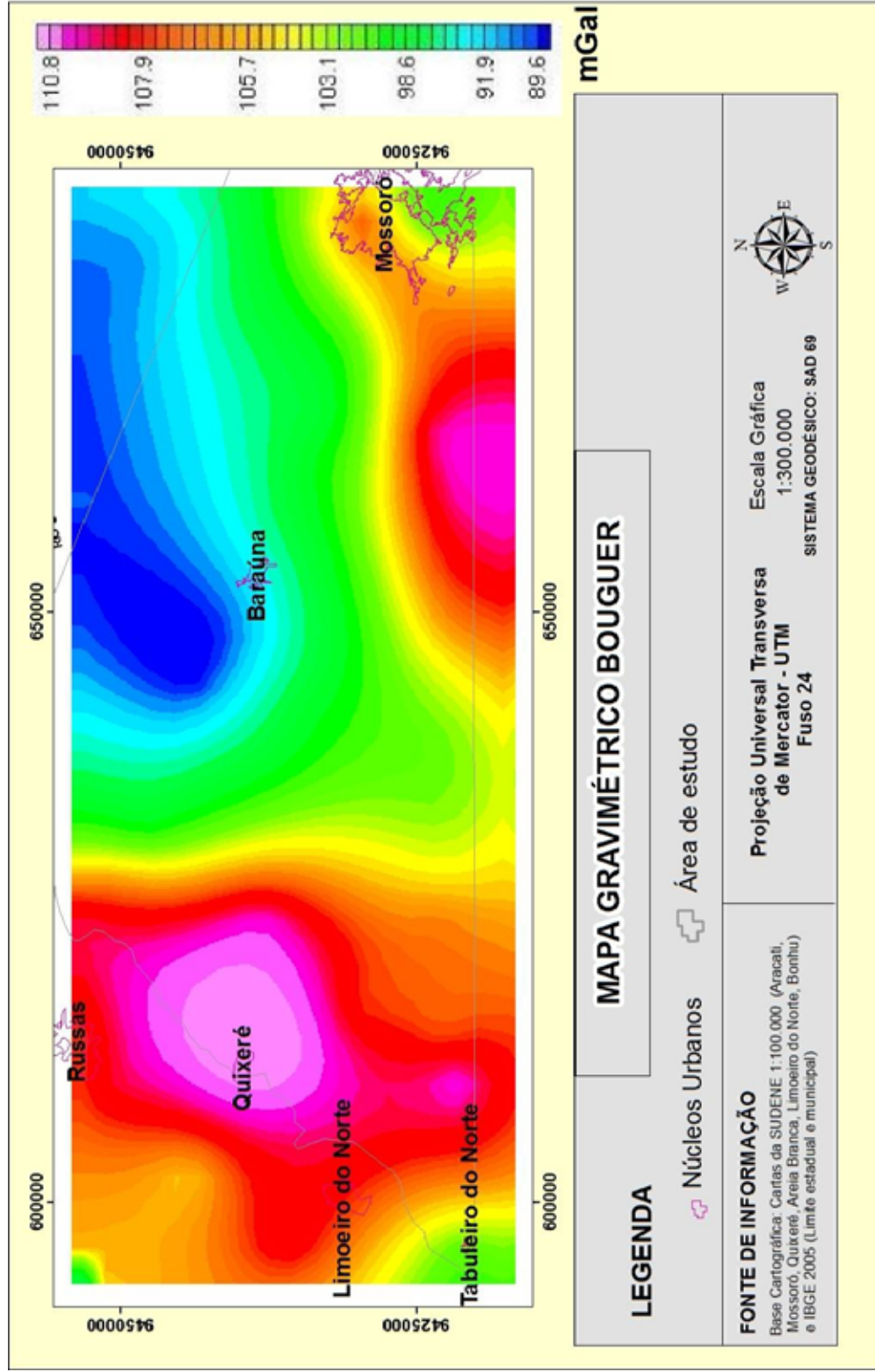


Figura 4.3 - Mapa de anomalia bouguer mostrando o ajuste entre as principais anomalias gravimétricas.

4.4.2 - Mapa gravimétrico residual

O mapa gravimétrico residual (**figura 4.4**) foi obtido através da filtragem do mapa bouguer, no domínio da frequência sendo aplicado o Método Gaussiano. Este mapa mostra com mais detalhes áreas onde se tem anomalias de curto comprimento de onda que estariam em condições mais rasas. Três importantes estruturas residuais foram identificadas e analisadas: 1) feição localizada a oeste da área forma um sistema de blocos positivos e negativos alternados apontando para um basculamento de blocos com pequena intensidade formando *horsts* e *grabens*, possivelmente causados por reativação da bacia nesta região; 2) corresponde a um conjunto de blocos mais negativos locados na região centro-norte, caracterizado por um baixo estrutural formando o depocentro da área de estudo e 3) anomalia positiva com alinhamento E-W, pode está associada à presença de diques vulcânicos.

4.4.3 - Mapa gravimétrico regional

O mapa gravimétrico regional exibe o contorno basal mais profundo e mais suavizado de corpos próximos ao embasamento (**figura 4.5**). Nele as grandes estruturas são evidenciadas. Com comprimento de ondas maiores, as anomalias de menor porte são extraídas, permanecendo aquelas de maior extensão ou profundidade. Toda a área oeste, de caráter positivo, mostra o arqueamento do embasamento marcada em afloramento pelo *Stock* Quixeré. Esta região é caracterizada pela borda oeste da Bacia Potiguar recoberta apenas pela sedimentação basal do Grupo Apodi (Formação Açú) em contato com o embasamento cristalino.

Na região centro-norte e nordeste a anomalia negativa destacada no mapa bouguer, mostra-se em sua maior expressão caracterizando, de maneira inequívoca, a presença do grande bloco negativo.

E finalmente a sul e sudeste a anomalia positiva alongada de direção E-W, corrobora a existência de corpos intrusivos densos que obliteram o mergulho do embasamento para leste. Em complemento a deflexão de valores mais negativos no extremo sudeste que identifica a proximidade da linha de charneira de Areia Branca, região do *graben* central do *rift* Potiguar (Milani & Latgé, 1987).

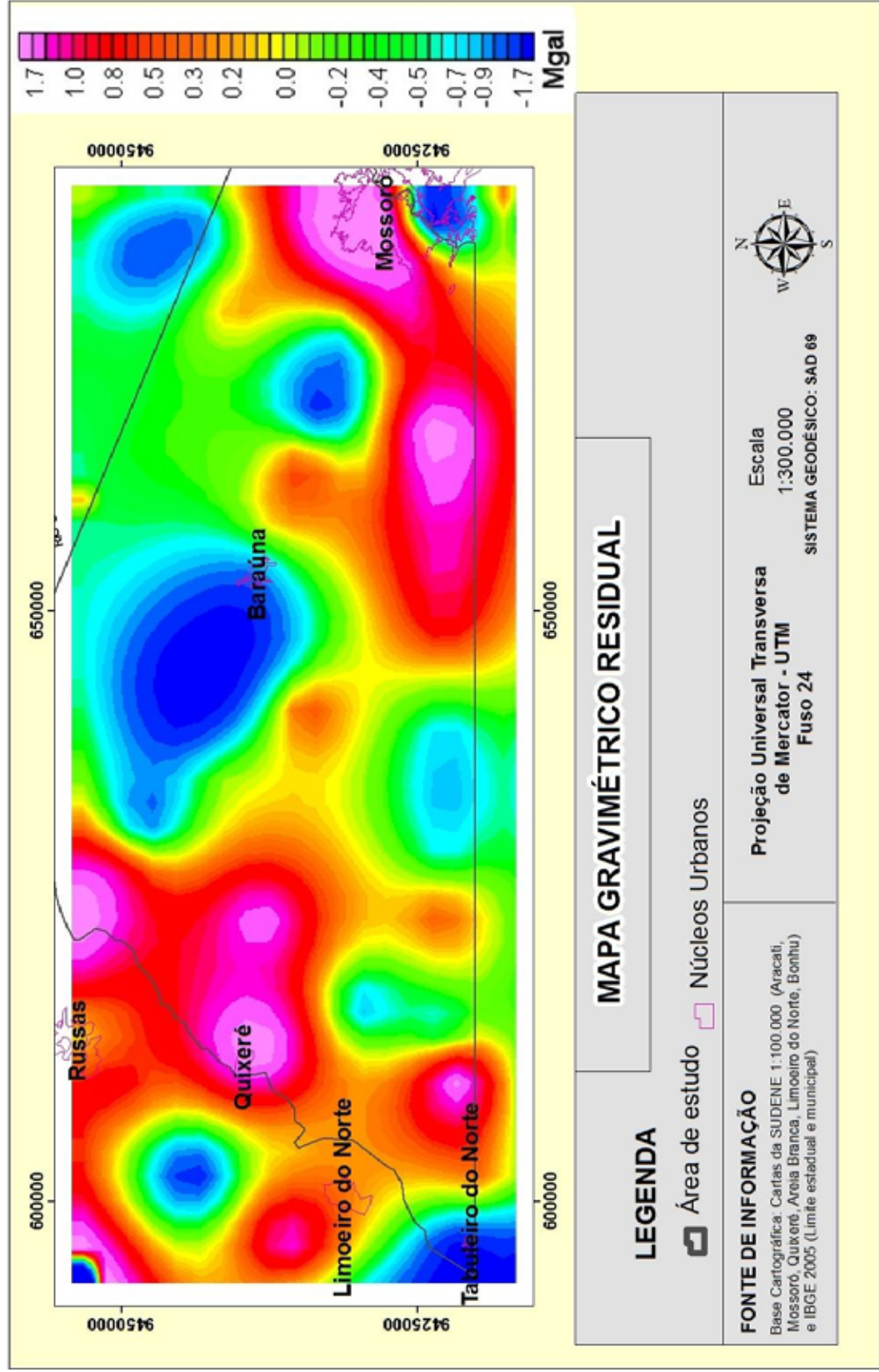


Figura 4.4 – Mapa gravimétrico residual destacando anomalias de curto comprimento de onda.

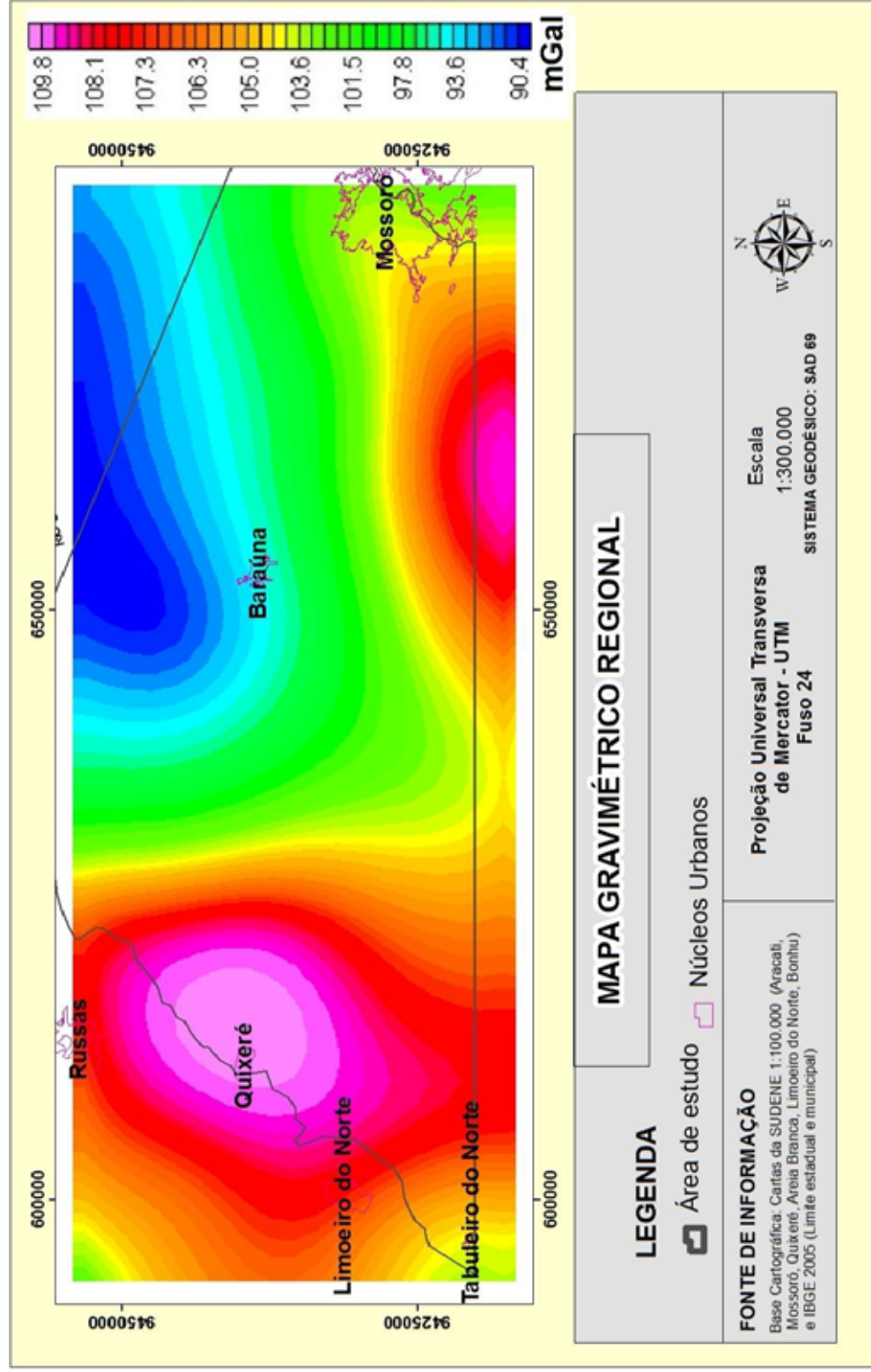


Figura 4.5 – Mapa gravimétrico regional mostrando as estruturas de caráter profundo e regionais.

4.4.4 - Modelagem gravimétrica 3D da topografia do topo do embasamento

O mapa de profundidade do topo do embasamento (**figura 4.6**) ressalta as estruturas que se relacionam com anomalias gravimétricas observadas tanto no mapa gravimétrico bouguer como no regional e residual.

1- O bloco a oeste caracteriza-se por apresentar menor profundidade representando o embasamento cristalino soerguido. Nesta região o embasamento aflora com alinhamento na direção NE-SW. Este alto estrutural é concebido pelos inselbergs do chamado Stock Quixeré.

2- Na região norte ocorre o depocentro de Baraúna, bloco resultante do afundamento da bacia devido ao afinamento crustal, mostra-se como região de importância fundamental para acúmulo água subterrânea.

3- A sul e sudeste destaca-se uma anomalia positiva de direção E-W, que corrobora a existência de corpos intrusivos densos, possivelmente associados ao evento magmático Rio Ceará Mirim.

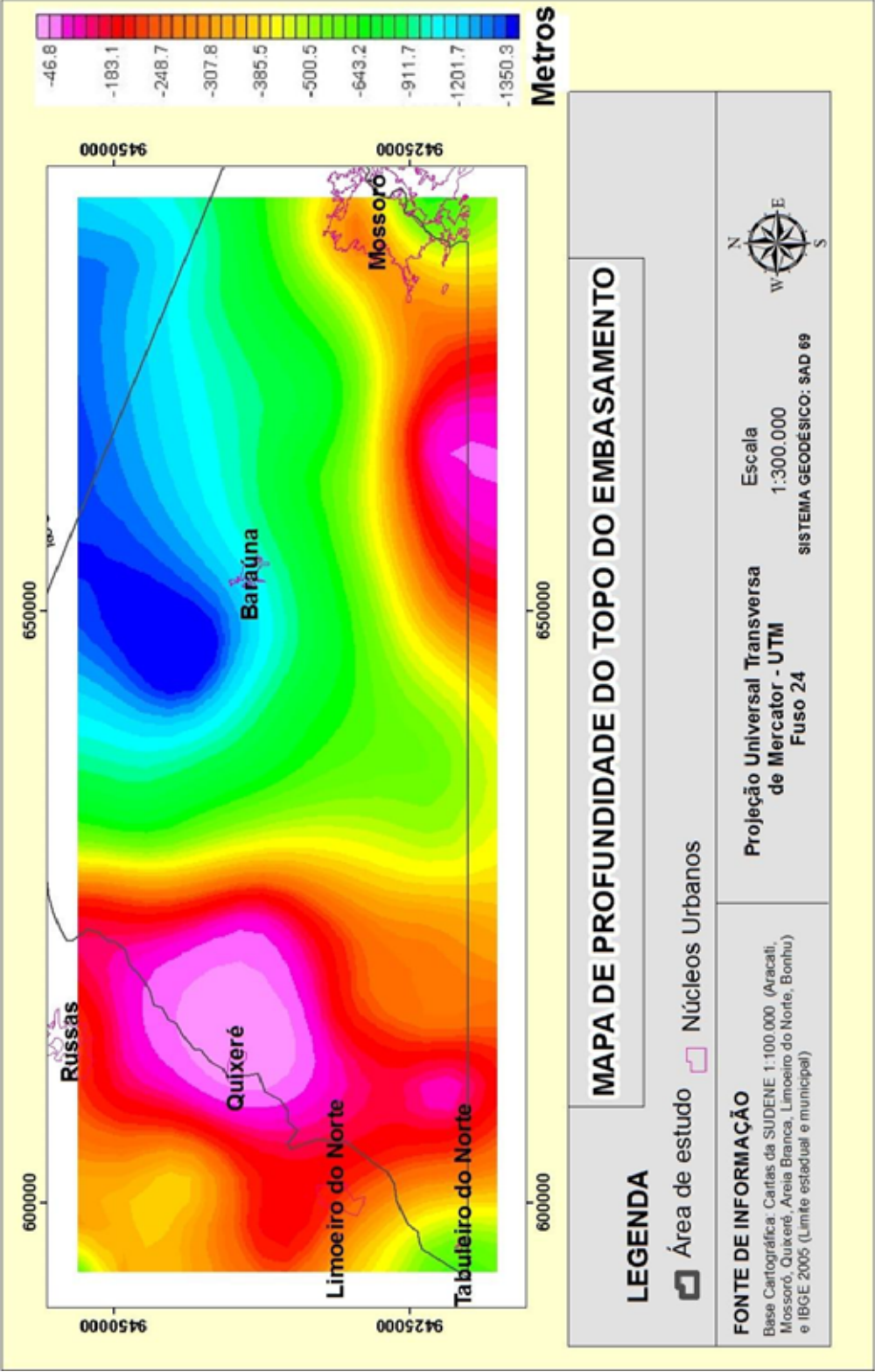


Figura 4.6 – Mapa de profundidade do topo do embasamento – (Modelo 3D).

4.4.5 - Modelagem gravimétrica 2D

A modelagem gravimétrica 2D foi executada em 5 perfis levando em consideração a distribuição das estações gravimétricas e principalmente obedecendo direção transversal as estruturas geológicas. Com o objetivo maior de quantificar dos pacotes sedimentares para avaliar reservas de água subterrânea do sistema aquífero Apodi.

Os perfis 2D auxiliam no melhor entendimento das soluções 3D, uma vez que o conjunto de ajustes é considerado como vetores variando em apenas duas direções (profundidade e extensão). Assim os perfis serão analisados individualmente e sempre correlacionados aos modelos interceptados. Posteriormente eles serão analisados em seu conjunto e, quando pertinente, correlacionados com o modelo 3D.

O mapa bouguer (**figura 4.7**) mostra a distribuição dos perfis e sua localização espacial dentro da área em pauta, assim como a localização dos poços profundos perfurados pela PETROBRAS.

Os perfis possuem comprimentos de 10 a 90 km e estão corrigidos na vertical com exagero de escala da ordem de 2,5 vezes. Foi executado tendo em vista que as estruturas encontram-se a uma pequena profundidade com relação a sua extensão. Portanto as ondulações, aclives, declives e estruturas geológicas estão deformadas e sua análise deve ser feita com certa reserva.

A seguir a análise dos perfis A-A', B-B', C-C', D-D' e E-E' salientando as principais estruturas tectônicas presente na região de estudo.

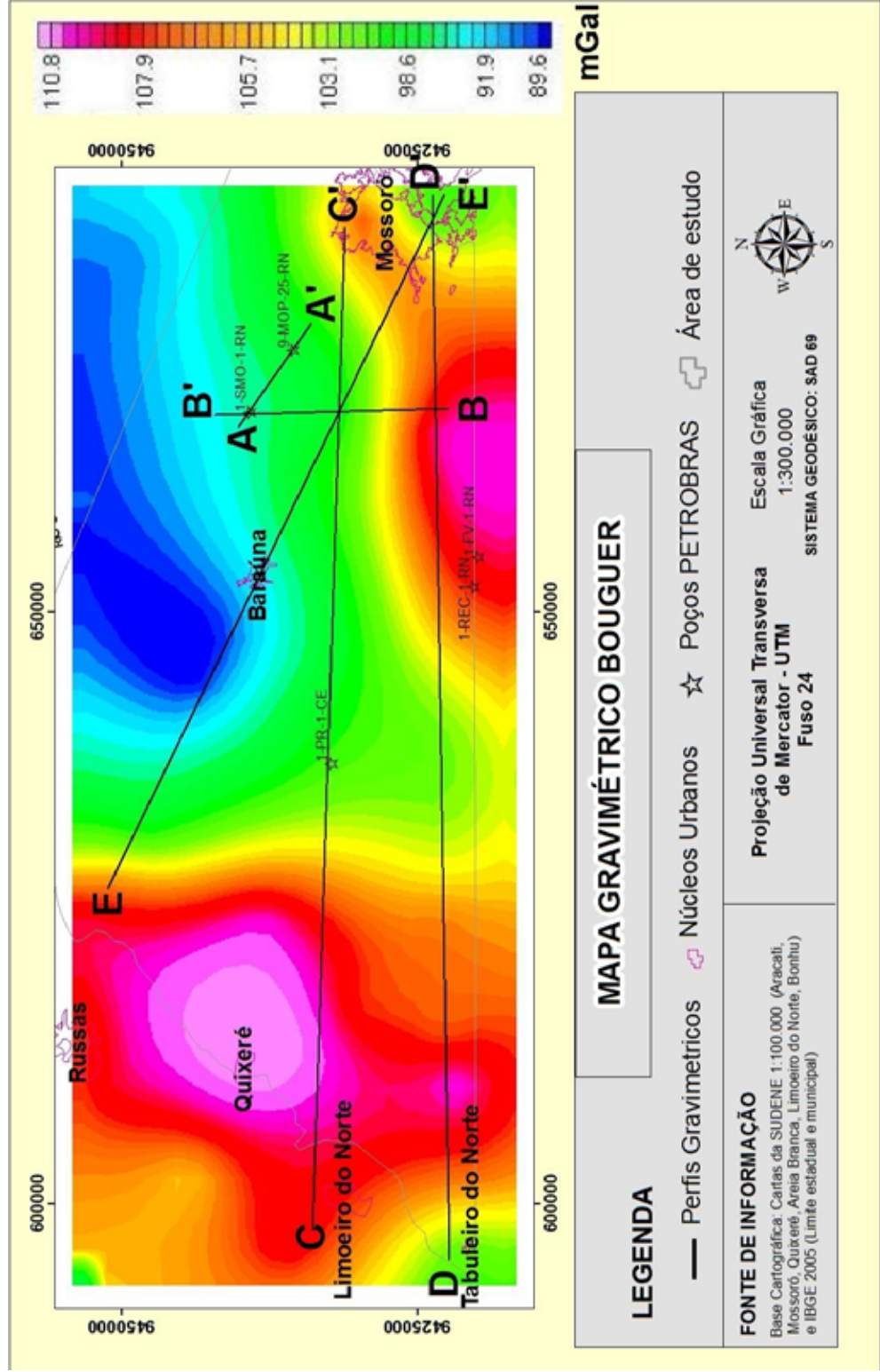


Figura 4.7 – Mapa Bouguer da área de estudo com a localização dos perfis 2D e dos poços profundos perfurados pela PETROBRAS.

4.4.5.1 - Perfil A-A'

Este modelo de direção NW-SE e com cerca de 10 km de extensão, foi executado para servir de calibração no ajuste final das densidades (**figura 4.8**). O perfil é seccionado pelos poços 1-SMO-1-RN e 9-MOP-25-RN perfurados pela PETROBRAS, atingindo o embasamento com 800 e 513 metros, respectivamente. Mantendo a profundidade dos poços como elemento restritivo fez-se variar as densidades para o ajuste das curvas observadas e calculadas. Observa-se na modelagem um leve arqueamento do embasamento na porção central, que está relacionado a pequenas variações de profundidades do embasamento e de espessura da Formação Açu.

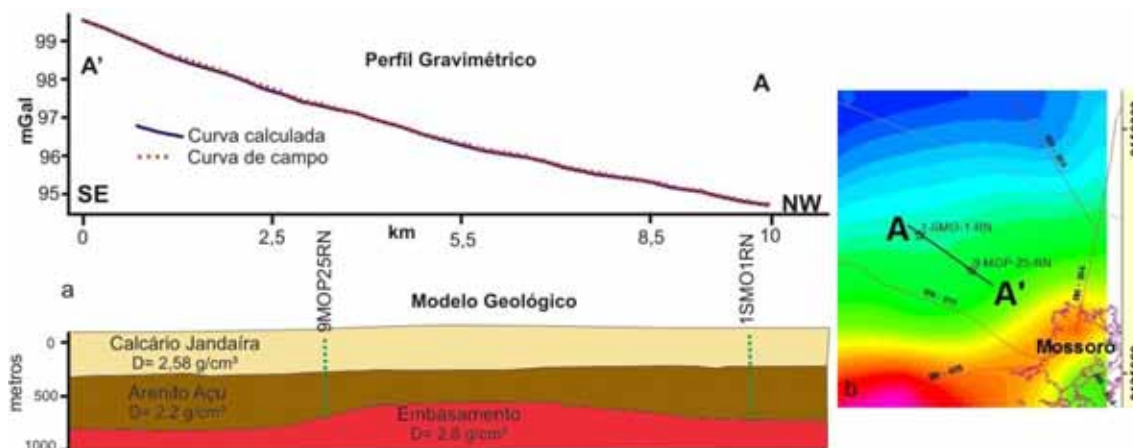


Figura 4.8 – a) Perfil A-A' (dir. NW-SE) com destaque para localização dos poços 1SMO1RN e 9MOP25RN (exagero de escala vertical 2,5); b) localização do modelo 2D no mapa gravimétrico bouguer.

4.4.5.2 - Perfil B-B'

O perfil B-B' (**figura 4.9**) tem aproximadamente 20 km de extensão e direção N-S, fica localizado a leste da área de estudo e está seccionado pelos perfis A-A', C-C' e D-D'. De acordo com o ajuste do modelo são notáveis variações no embasamento, onde caracteristicamente foi observado um leve arqueamento na região central e a presença do dique vulcânico a sul, evidenciado pela forte anomalia positiva. A modelagem com este dique vulcânico (2,98 g/cm³) ajusta a curva calculada e observada, resultando em uma resposta satisfatória para o modelo. As profundidades verdadeiras na porção da anomalia positiva foram obtidas de acordo com os poços da Petrobras existentes em regiões próximas do perfil. O embasamento se mantém a profundidade média entre 400 a 600 m apresentando progressivo mergulho para norte em direção a região do Depocentro de Baraúna.

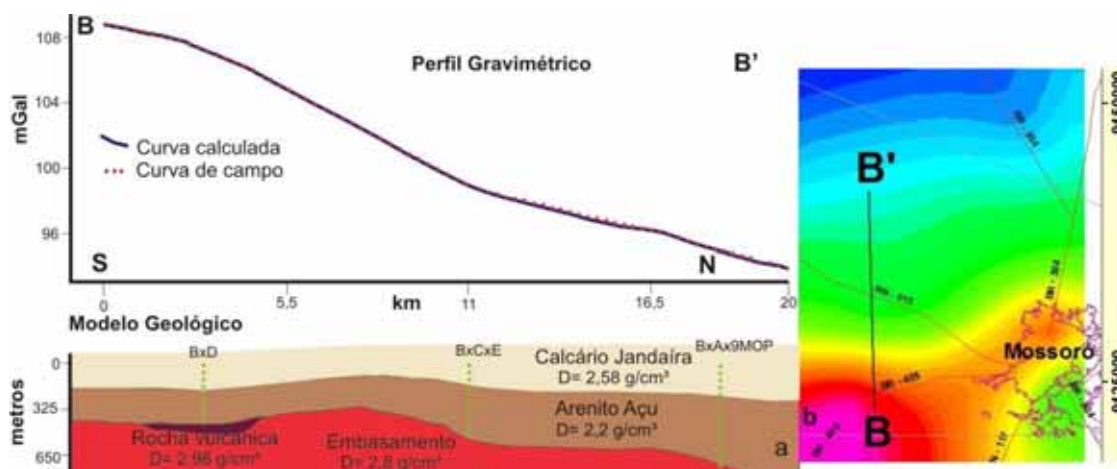


Figura 4.9 – a) Modelo B-B' de direção N-S, destaque para a ocorrência de rocha vulcânica a sul (exagero de escala vertical 2,5); b) localização do perfil B-B' no mapa bouguer.

4.4.5.3 - Perfil C-C'

Este perfil tem cerca de 85 km de extensão e direção geral E-W, corta longitudinalmente a área e está seccionado pelos perfis B-B' e E-E' (figura 4.10). Como controle de qualidade, o perfil foi locado sobre o poço 1-PR-CE, no qual a profundidade do embasamento é de 382 m. Ao longo deste perfil o embasamento cristalino possui profundidades variando entre 700 m e 200 m. A espessura da Formação Jandaíra tem em média 150 m, enquanto que a da Formação Açú possui valores médios de 400 m. Neste modelo foi possível a identificação de várias falhas extensionais associadas ao embasamento. Na porção oeste entre as cidades de Limoeiro do Norte e Quixeré, acredita-se que a estruturação tectônica foi condicionada pelo basculamento de blocos altos e baixos na borda da Bacia Potiguar. Devido a este falhamento foram originadas janelas de sedimentação com até 650 m de espessura. A partir de Quixeré o embasamento ocorre com mergulho moderado para leste, contudo a sul de Baraúna ocorre uma depressão tectônica com aproximadamente 600 m de profundidade. Na região de Mossoró (extremo leste) é notável a ocorrência de *horts* e *grabens* controlados por falhas normais. Estas estruturas formam depocentros locais (650 m) que são importantíssimos para o acúmulo de água subterrânea no Aquífero Açú. A estruturação tectônica da “Plataforma” de Aracati foge de um “homoclinal” simples com mergulho suave para nordeste. Este modelo 2D mostra claramente que o embasamento é desenhado por vales falhados e preenchidos por sedimentos cretáceos formadores do sistema aquífero Apodi.

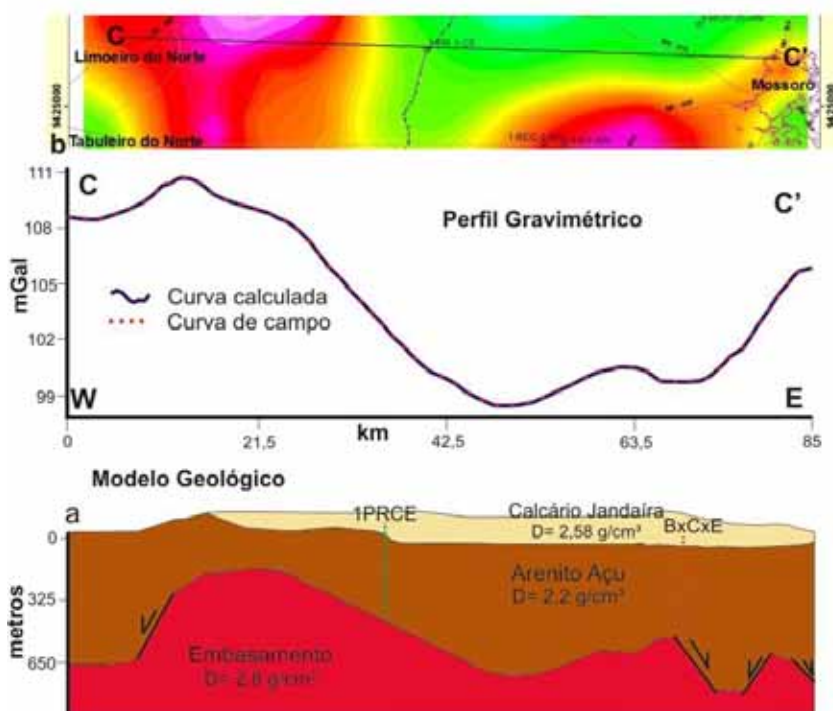


Figura 4.10 – a) Perfil C-C' de direção E-W, ressalva para falhas extensionais do embasamento (exagero de escala vertical 2,5); b) Localização do modelo C-C' no mapa bouguer.

4.4.5.4 - Perfil D-D'

Este modelo possui a maior extensão entre os perfis 2D obtidos neste trabalho, com 90 km de comprimento, direção E-W, corta todo o extremo sul da área e é seccionado pelo perfil B-B' (**figura 4.11**). Na região oeste do modelo é notável o espessamento da Formação Açú, formando uma fossa tectônica (730 m) controlada por falha vertical. Em seguida o embasamento se apresenta arqueado marcando o limite oeste da Bacia Potiguar e o início da Chapada do Apodi. Suave mergulho do embasamento para leste é observado até a região de Mossoró, onde se desenvolvem estruturas com falhamento devido à proximidade do *graben* central do *rift* Potiguar. A presença de rochas vulcânicas, com densidade de 2,98g/cm³, compensa o déficit negativo do pacote sedimentar mostrado nas curvas de anomalia Bouguer. Estes diques ocorrem em toda a parte sul/sudeste, formando anomalias positivas de gravidade.

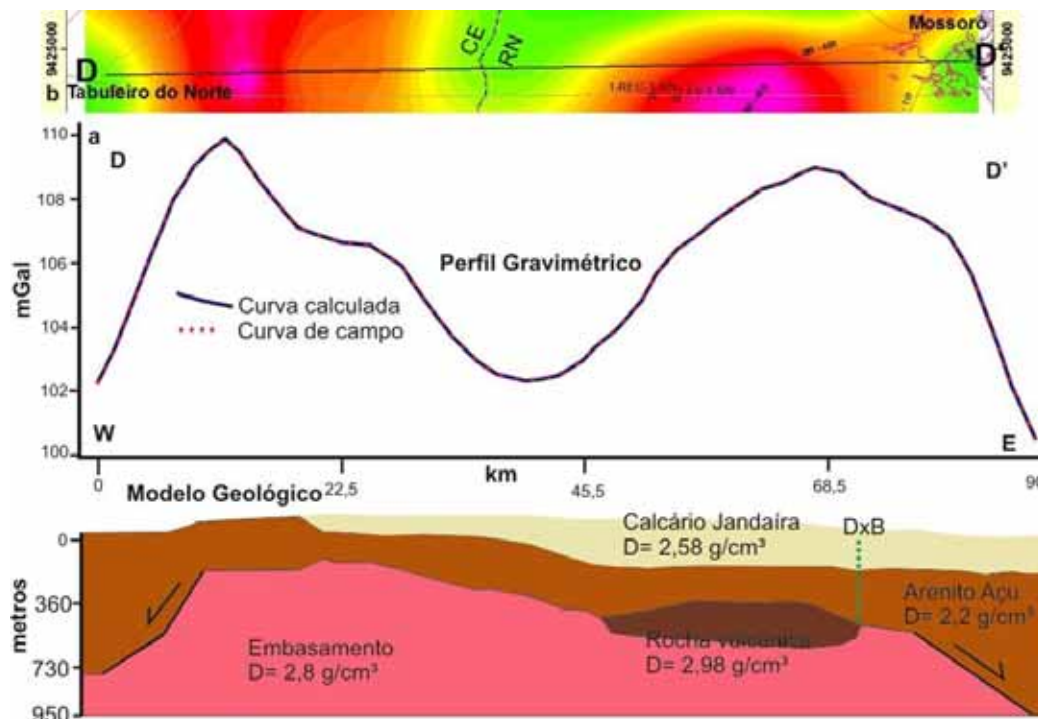


Figura 4.11 - a) Perfil D-D' de direção E-W e 90 km de extensão (exagero vertical 2,5); b) localização do modelo D-D' no mapa gravimétrico bouguer.

4.4.5.5 - Perfil E-E'

Este modelo tem 50 km de extensão e corta transversalmente a área com direção NW-SE (**figura 4.12**). Como controle de qualidade, o perfil foi locado sobre as estações gravimétricas, o poço 9-BA-1-RN (profundidade de 504 m) e cruzando os perfis B-B' e D-D'. Neste perfil o embasamento possui profundidades variando entre 930 m (depocentro de Baraúna) e 300 m em regiões mais rasas. A principal feição observada neste perfil é o depocentro de Baraúna, com 930 m de profundidade e ocorre limitado por falhas extensionais do embasamento. No depocentro a curva gravimétrica chega a menos 90 mGal, esta anomalia negativa é devido a grande espessura do pacote sedimentar, em especial a Formação Açú (700 m). Na porção leste ocorre uma elevação do embasamento e falhas verticais formando depressões associadas devido à proximidade da linha de charneira de Areia Branca.

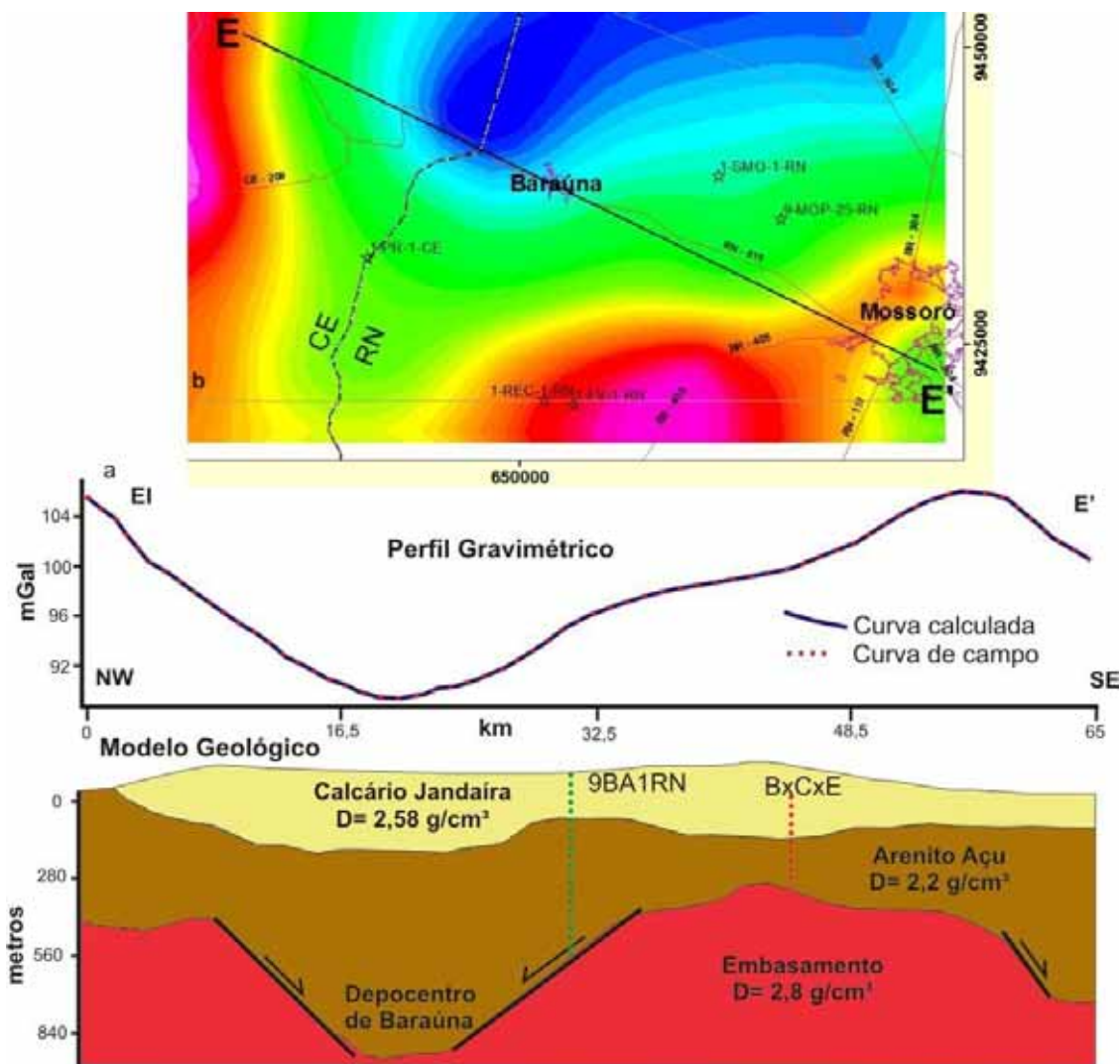


Figura 4.12 – a) Perfil E-E' de direção NW-SE e 50 km de comprimento (exagero vertical 2,5); b) localização do modelo no mapa bouguer.

4.5 – INTEGRAÇÃO DOS PERFIS 2D E SUA CORRELAÇÃO COM O MODELO 3D

Visando a pesquisa de água subterrânea na Chapada do Apodi, procurou-se o entendimento das feições geológico-estruturais e a quantificação dos aquíferos Jandaíra e Açú através da análise e integração da modelagem gravimétrica 2D e 3D.

O contorno superior do embasamento mostrou uma tendência de mergulho no sentido norte e nordeste com profundidades variando entre 0 m (Stock Quixeré) e 930 m no depocentro de Baraúna. A região oeste é caracterizada ora pelo arqueamento do embasamento, marcando o limite oeste da Bacia Potiguar, ora pelo basculamento de blocos permitindo o desenvolvimento de *horsts* e *grabens*, com formação de janelas de sedimentação de até 730 m de profundidade. A porção leste é marcada por falhas extensionais do embasamento ligadas a tectônica do *rift* Potiguar.

Através da análise dos perfis 2D e sua correlação com o modelo 3D foram determinadas as espessuras médias das formações do sistema aquífero Apodi. A Formação Açú apresenta espessura máxima de 700 m no depocentro de Baraúna e mínima de 80 m ao longo da borda oeste da bacia. A Formação

Jandaíra está depositada concordantemente sobre o arenito Açú e apresenta espessura máxima de 280 m ao longo do depocentro de Baraúna passando a zero na escarpa oeste da Chapada do Apodi.

A ocorrência de corpos intrusivos vulcânicos em diferentes profundidades deve ser analisada com cuidado uma vez que eles influenciam na resposta gravimétrica, simulando a subida do embasamento e com isto induzindo a uma análise errada do modelo. A região sul mostrou valores gravimétricos muito diferentes dos preditos devido a estas intrusões e então sugere-se a realização de trabalhos mais detalhados envolvendo o uso do método magnético, de grande sensibilidade no estudo de corpos básicos.

4.6 – ANÁLISE E INTEGRAÇÃO DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS E GRAVIMÉTRICOS

O mapa de campo total aeromagnético ilustrado na **figura 4.13**, apresenta configuração onde são definidas pelo menos 3 grandes estruturas apresentando direção geral NE em uma sequência de blocos altos e baixos alternados. Estes blocos estão caracterizados por movimentos verticais de baixa amplitude e que pode estar associada uma suposta reativação da bacia. Estas estruturas, de maneira geral, concordam com aquelas individualizadas no mapa de anomalia Bouguer (**figura 4.3**). Neste caso existe um suposto deslocamento entre as feições originado do fato de que como o mapa é de campo total o corpo está determinado por pares de anomalias positivas e negativas uma vez que aqui é considerado uma anomalia bipolar e o mapa gravimétrico monopolar. O mapa de profundidade topo do embasamento (**figura 4.6**) caracteriza numericamente estas estruturas e as posiciona no domínio tridimensional.

O sistema de alinhamentos apresentados na **figura 4.13** é coerente com o sistema distensional de direção NW-SE que gerou falhamentos em sua maioria normais de direção NE-SW proposto por Amaral (2000).

Os alinhamentos magnéticos com direção geral NE corroboram a hipótese de ambiente extensional, onde movimentos tectônicos de distensão suave caracterizam a presença de falhas normais com direções aproximadamente paralelas as estruturas magnéticas.

CAPÍTULO 5 - ELETORRESISTIVIDADE

5.1 – INTRODUÇÃO

O levantamento geofísico de eletorresistividade foi conduzido pela equipe do Consórcio Techne/Projetec no âmbito do Projeto Apodi. A equipe foi constituída pelo professor Edilton Carneiro Feitosa, do Departamento de Geologia/UFPE, o operador sênior de eletorresistividade Paulo de Melo da Cunha Pedrosa e pelo autor, que teve participação tanto na etapa de campo como na construção dos mapas temáticos. Os resultados deste trabalho foram usados nesta dissertação como contribuição na determinação do arcabouço tectônico do sistema aquífero Apodi.

O método de eletorresistividade consiste de medidas de impedância, com subsequente interpretação em termos de propriedade elétrica da estruturação geológica em sub-superfície, baseado na resposta de cada material ao fluxo de uma corrente elétrica (Ward, 1990).

Quando uma corrente elétrica é introduzida no subsolo através de dois eletrodos (AB), esta produz uma diferença de potencial que é medida por um segundo par de eletrodos (MN). O valor medido desta diferença de potencial é função da distribuição de resistividades verdadeiras do subsolo e do arranjo geométrico dos eletrodos, sendo que a profundidade investigada é diretamente proporcional ao espaçamento entre esses eletrodos (Orellana, 1972). Qualitativamente, resistividade é uma medida da dificuldade que um determinado material impõe à passagem de uma corrente elétrica, correspondendo ao inverso da condutividade.

5.2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

5.2.1 – Lei de Ohm

O método de eletorresistividade baseia-se fundamentalmente na Lei do Ohm. Esta lei expressa a proporcionalidade direta, entre a intensidade da corrente elétrica (i) que percorre um condutor metálico e a diferença de potencial (ΔV) entre os terminais (M e N) desse condutor (**figura 5.1**).

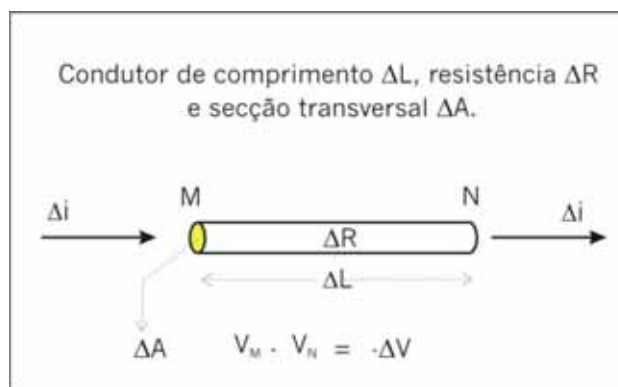


Figura 5.1 – Condutor ôhmico de resistividade R (Fonte: Feitosa et al. 2008)

Com a entrada da constante de proporcionalidade $1/R$, obtém-se a relação apresentada na equação 5.1, conhecida como lei de Ohm. A constante $1/R$ é a condutância (C), onde o seu denominador R , também constante, é a resistência elétrica.

$$i = \frac{\Delta V}{R} \quad \text{Equação 5.1}$$

A unidade de medida adota no Sistema Internacional (SI) para i é *ampère*, ou seja, 1volt/1ohm ou 1A = 1V/1Ω.

Analisando-se a resistência elétrica (R) de um condutor cilíndrico ou prismático, verifica-se que essa varia na razão direta de seu comprimento (ΔL) e na razão inversa da seção transversal (ΔA), como apresentado na equação 5.2.

$$R = \rho \frac{\Delta L}{\Delta A} \quad \text{Equação 5.2}$$

O fator de proporcionalidade ρ é denominado resistividade. No SI a unidade utilizada para resistividade é o ohm.m, conforme ilustrado na equação 5.3.

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad \text{Equação 5.3}$$

Onde, $\rho = [(\text{ohm.m}^2)/\text{m}] = \text{ohm.m}$.

A resistividade, também chamada resistência específica, caracteriza eletricamente o material considerado, pois não depende das dimensões do mesmo e sim da sua natureza, estado físico e temperatura.

O inverso da resistividade é a condutividade elétrica (σ), ou seja, a facilidade que o meio oferece a passagem de corrente elétrica. A equação 5.4 é a definição da condutividade (σ):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \text{Equação 5.4}$$

Logo a unidade (SI) de σ é ohm/m. Foi convencionado chamá-la de Mho.

A partir da equação 5.2, observa-se que:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA} \quad \text{Equação 5.5}$$

Como: $R = \Delta V/i$, então $\sigma = (i/A)(\Delta V/L)$, assim:

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad \text{Equação 5.6}$$

A equação 5.6 reproduz a forma mais usual da lei de Ohm. J , ou seja, i/A corresponde à densidade de corrente elétrica, enquanto E , ou $\Delta V/L$, corresponde ao campo elétrico, também chamado de gradiente de potencial. Tanto a densidade de corrente como o campo elétrico são grandezas vetoriais.

5.2.2 – Condutibilidade das rochas

Dois tipos de condutibilidade elétrica são conhecidos: a condutibilidade metálica ou eletrônica e a condutibilidade eletrolítica ou iônica (Feitosa et al. 2008). A primeira é a condutibilidade característica dos metais. Neste caso, a matéria do condutor participa ativamente da transmissão da corrente elétrica através do transporte de elétrons. A condutibilidade eletrolítica ou iônica ocorre nas soluções de ácidos, bases ou sais em água (Feitosa op. cit).

As rochas sedimentares em geral, apresentam condutibilidade iônica. Estas rochas conduzem eletricidade graças à água de saturação e tanto mais quanto mais salinizada for esta água. Assim, a resistividade das rochas depende fundamentalmente dos seguintes fatores:

- Resistividade da água de saturação;
- Porosidade total da rocha;
- Geometria dos poros e extensão do seu preenchimento; e
- Litologia

5.2.3 – Lei de Archie

A existência de uma correlação linear entre a resistividade da rocha saturada (ρ_r) e a resistividade da água de saturação (ρ_e) foi estudada por Archie (1942). Ele observou que a razão ρ_r/ρ_e se mantinha constante para qualquer valor de ρ_e , com ρ_r tendendo para zero quando ρ_e tendia para zero. Esta razão foi denominada por Archie de *formation resistivity factor* ou fator de formação, que não depende da salinidade da água de saturação, mas apenas da textura e porosidade da rocha.

5.2.4 – Medidas da resistividade em quadripolos

As medições da resistividade (ρ) do subsolo são feitas, basicamente, com o auxílio de voltímetros e amperímetros. Os voltímetros medem a diferença de potencial entre dois pontos. Já a medição da corrente elétrica, que exige o fechamento de um circuito, é realizada pelo amperímetro.

Assim foi adotada naturalmente a utilização de quadripolos como dispositivos práticos de medição da resistividade. Nesses quadripolos, o circuito elétrico é fechado através de dois eletrodos cravados no solo, o que permite a medição da corrente **I**. A diferença de potencial resultante dessa corrente, por sua vez, é medida através de dois outros eletrodos, situados internamente em relação aos eletrodos de corrente **A** e **B**, e simétricos em relação ao centro **O** do dispositivo. As distâncias **AB** e **MN** ficarão implícitas na constante geométrica do quadripolo utilizado.

Os quadripolos mais utilizados em levantamentos elétricos são os quadripolos lineares simétricos. Entre estes, os mais conhecidos são os do tipo Wenner e Schlumberger. Em tais dispositivos os eletrodos de corrente **A** e **B** (externos) e os de potencial **M** e **N** (internos) se distribuem ao longo de uma linha reta, simetricamente em relação a um ponto central **O**, chamado de centro do dispositivo.

5.2.5 – Resistividade aparente

O método de eletrorresistividade não permite, naturalmente, obter diretamente as resistividades verdadeiras das diferentes rochas presentes no volume de terreno envolvido na medição. Obtêm-se, antes, as resistividades aparentes cujos valores dependem dos valores das resistividades verdadeiras das rochas presentes.

De acordo com Feitosa et al. (2008), a resistividade aparente de um solo real é definida como sendo a resistividade de um solo fictício, homogêneo e isotrópico tal, que provocaria, em resposta à corrente **i** que lhe fosse injetada, a mesma diferença do potencial ΔV observada entre os eletrodos **M** e **N** do quadripolo utilizado.

Para a obtenção da resistividade aparente (ρ_a), mede-se a diferença de potencial elétrico ΔV , criada entre os eletrodos internos **M** e **N** do quadripolo quando se faz circular no solo, através dos eletrodos externos **A** e **B**, uma corrente elétrica contínua de intensidade **i** conhecida. A resistividade aparente para um dado arranjo do quadripolo AMNB é obtida a partir da equação 5.7:

$$\rho_a = K\Delta V/i \quad \text{Equação 5.7}$$

onde:

ρ_a = Resistividade aparente em ohm.m

K = Constante dependente do arranjo geométrico AMNB, em metros.

ΔV = Diferença de potencial elétrico, em mV, medida entre os eletrodos internos M e N do quadripolo.

i = Intensidade da corrente elétrica contínua, medida em mA, que circula no solo através dos eletrodos externos A e B.

5.2.6 – Técnicas de medição

São muitas as técnicas de medição que podem ser adotadas para a obtenção da resistividade. As principais técnicas são: a exploração vertical, ou sondagem elétrica, e a exploração horizontal ou perfil de resistividade. Nesta dissertação foi usada unicamente a técnica da sondagem elétrica vertical (SEV). Neste caso se mantém fixo o centro do quadripolo AMNB e realiza-se uma série de medições de resistividade aparente, aumentando-se o espaçamento AB a cada nova medição, simetricamente em relação ao centro O do dispositivo. Faz-se assim uma exploração vertical, pois em cada nova medição a corrente elétrica circulará mais profundamente que na medição anterior. Os valores de resistividade aparente assim obtidos, plotados graficamente em papel bilogarítmico contra os respectivos valores de $AB/2$, permitem obter uma curva que é a representação gráfica da função $\rho_a(AB/2)$. Esta curva é comumente denominada de curva de resistividades aparentes ou diagrama elétrico ou, simplesmente, sondagem elétrica.

As sondagens elétricas fornecem, portanto, informações sobre a variação vertical das resistividades aparentes e esta última, criteriosamente interpretada, permite avaliar a natureza e a estrutura das rochas em subsuperfície.

5.2.7 – Resistência transversal e condutância longitudinal

Resistência transversal e condutância longitudinal são os parâmetros de Dar Zarrouk. Estes conceitos foram estudados pelo físico Raymond Malett em 1947 (Orellana op. cit). Resistência transversal unitária (R) de uma camada é definida pelo produto da sua espessura (h) pela sua resistividade verdadeira (ρ), conforme a equação 5.8:

$$R = \rho \cdot h \quad \text{Equação 5.8}$$

Esta resistência é transversal porque diz respeito a uma corrente elétrica transversal em relação à extensão lateral da camada elétrica. Ela é unitária porque é definida por unidade de superfície horizontal da camada elétrica considerada. As dimensões da resistência transversal unitária são, de acordo com a equação 5.8, as de uma resistividade (ohm.m) vezes o comprimento linear (m), ou seja, ohm.m².

A condutância longitudinal (C) de uma dada camada elétrica, por sua vez, é definida como a razão da sua espessura (h) pela sua resistividade verdadeira (ρ), ou seja:

$$C = \frac{h}{\rho} \quad \text{Equação 5.9}$$

Conforme a equação 5.9 a condutância é longitudinal unitária porque diz respeito a uma corrente elétrica longitudinal em relação a um corte considerado e é unitária porque é definida para um condutor de comprimento unitário. As dimensões da condutância longitudinal são, de acordo com a equação 5.9, (mho.m⁻¹) x m, ou seja, mho.

A bibliografia especializada (Feitosa op. cit) explica com maiores detalhes os conceitos e as utilizações da resistência transversal e da condutividade longitudinal na interpretação geológica das medições elétricas. No momento é suficiente dizer que a resistência transversal caracteriza os horizontes eletricamente resistivos, enquanto que a condutância longitudinal caracteriza os horizontes eletricamente condutivos.

5.3 – MATERIAS E MÉTODOS

O estudo de eletrorresistividade aplicado nesta dissertação envolveu a utilização da técnica de Sondagem Elétrica Vertical, ou SEV.

Foi adotado como dispositivo de medição das resistividades aparentes, o quadripolo linear simétrico AMNB de Schlumberger, tendo sido utilizado como equipamento um resistivímetro GEOTRADE, modelo GTR-3 e seus acessórios, como fios, bobinas e eletrodos (**foto 5.1**).



Foto 5.1 – Instrumentos utilizados na sondagem elétrica vertical: resistivímetro GEOTRADE (modelo GTR-3), fios, bobinas e eletrodos. (SEV 37: 657825, 9450063)

Foram realizadas 50 sondagens elétricas verticais com comprimento de linha AB de envio de corrente variando entre 600 e 8400 metros, em função da profundidade do embasamento cristalino. As medições foram iniciadas com $AB/2 = 10$ metros. Na resolução das curvas de sondagem elétrica, a primeira camada é geralmente, portanto, uma camada fictícia, eletricamente equivalente, introduzida para permitir o ajuste de uma curva teórica à curva de campo. Na borda oeste da bacia e em particular sobre a Formação Açú aflorante, foram requeridas menores linhas AB. A **figura 5.2** mostra a localização das SEVs realizadas dentro da área de estudo.

Todas as SEVs utilizadas foram locadas numa imagem de satélite SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), a partir da qual foram obtidas suas cotas com um erro máximo de 5 metros (Demétrio, 2006). Considerando os erros bem maiores envolvidos na interpretação quantitativa das SEVs, bem como a grande área em que essas SEVs são distribuídas, o erro de 5% na avaliação das cotas é perfeitamente admissível para os fins pretendidos.

5.3.1 - Interpretação e discussão das medições elétricas

De acordo com recomendação de Feitosa et al. (1967), todas as planilhas de campo foram analisadas, com especial ênfase na verificação da precisão das medições. A partir das planilhas verificadas e corrigidas foram traçadas as SEVs definitivas. Estas foram objeto de uma análise comparativa, na qual foram identificados os horizontes elétricos presentes e rastreadas suas variações espaciais. Nesta etapa foram também corrigidas as embreagens e obtidas as curvas contínuas de resistividade aparente, para posterior resolução. As SEVs realizadas neste trabalho (campo e calculadas) com a localização geográfica (UTM – SAD 69) encontram-se no anexo 4.

A resolução das SEVs foi feita com o auxílio de um modelo analítico de resolução do problema direto (RESE112) desenvolvido pelo Professor José Márcio Lins Marinho, da Universidade Federal do Ceará.

Feitosa (2003a) verificou que a resistividade verdadeira dos calcários varia dentro de amplos limites, como demonstrado na **figura 5.3**. Julgou-se preferível, assim, adotar, na quantificação dos horizontes resistivos, os valores de resistividade verdadeira mínimos possíveis, sugeridos pela feição das curvas. No que diz respeito aos níveis condutivos no seio da Formação Jandaíra, adotou-se o mesmo procedimento, sendo consideradas, entretanto, as maiores resistividades possíveis. Esse procedimento pode levar à obtenção de espessuras máximas para os calcários e para os níveis condutivos intercalados, mas, em contrapartida, torna essas espessuras compatíveis entre si, minimizando a possibilidade de grandes erros localizados.

Para o condutivo basal, cujo comportamento elétrico é mais homogêneo, foi adotada sistematicamente uma resistividade equivalente de 6,0 ohm.m, o que nos retorna espessuras compatíveis entre si e bem mais confiáveis.

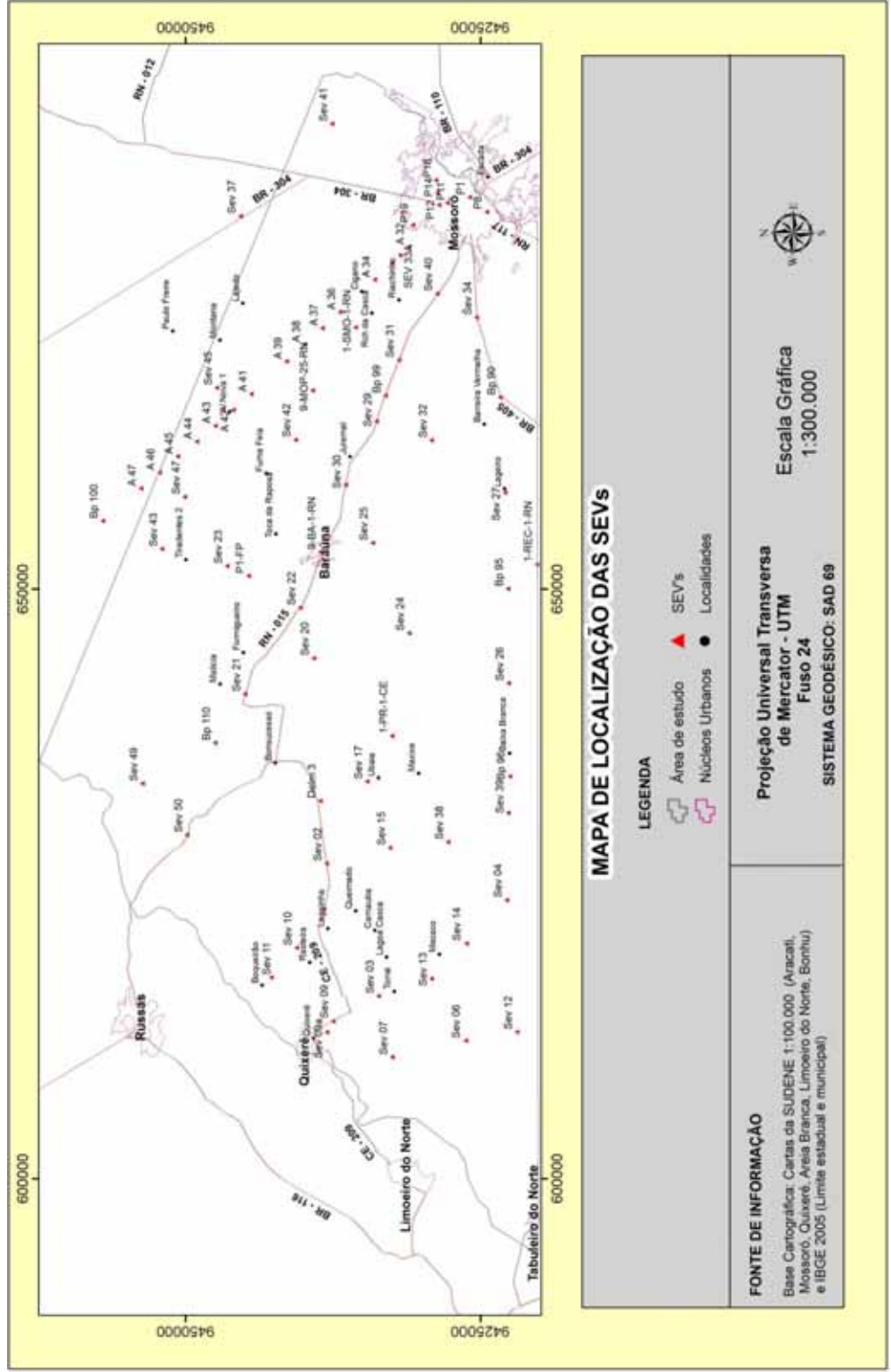


Figura 5.2 – Mapa de localização das SEVs realizadas na área de estudo.

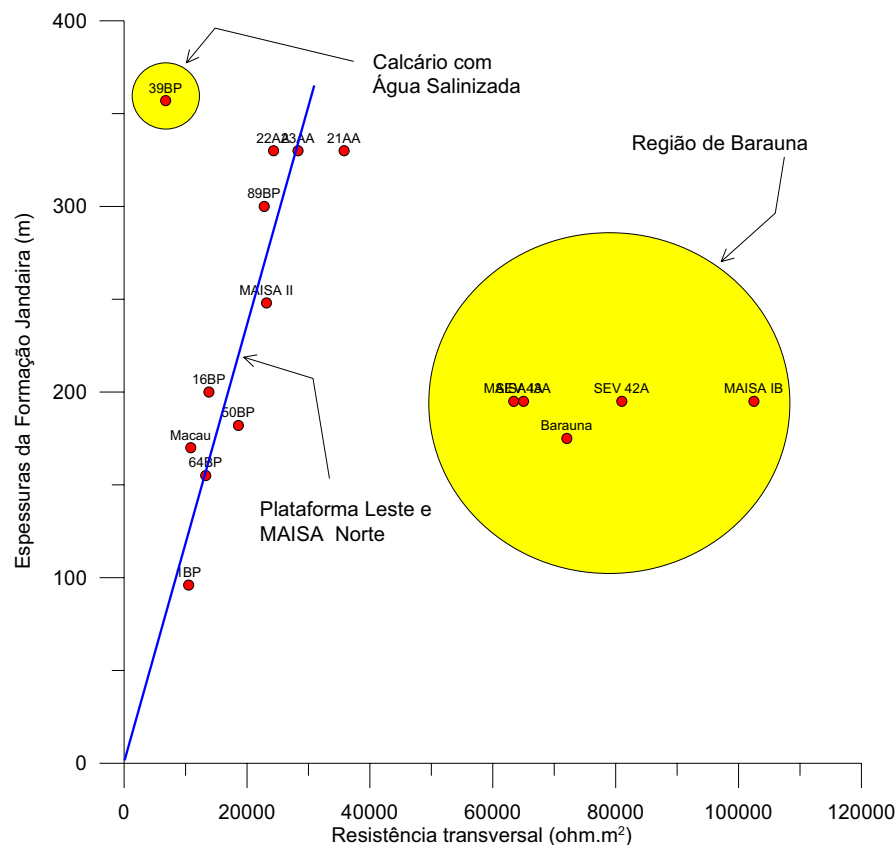


Figura 5.3– Correlação Resistência Transversal dos Resistivos x Espessura da Formação Jandaíra. Fonte: Feitosa (2003a).

As sondagens elétricas realizadas na área evidenciam a existência, regionalmente, de sete horizontes elétricos principais. Com base em perfis litológicos de poços disponíveis, em análises fotogeológicas, em inspeções geológicas de campo, bem como na análise de estudos anteriores na região (Feitosa & Demétrio, 1999ab, Feitosa, 1996, Feitosa, 2000, Feitosa, 2003b, Feitosa, 2004a, Feitosa, 2004b) é possível correlacionar esses horizontes à seqüência litológica, conforme mostrado na **tabela 5.1** a seguir:

Tabela 5.1 – Horizontes Elétricos

HOR.	Resistividade (Ohm.m)		LITOLOGIA	FORMAÇÃO
	Resist. Verd.	Resist. Equiv.		
1	1 a 300		Solos e elúvios ou folh. cinza c/ interc. calcário	Form. Jandaíra
2	50 a 400		Calcários ou alternância calc./folhelhos cinza	
3	5 a 10		Altern. 1) Folhelhos cinza e/ou calcário argiloso Altern. 2) Zona carstificada	
4	90 a 700		Calcários ou alternância calc./folhelhos cinza	
5	3 a 8	6 a 9	Folhelhos cinza e argilas variadas	F. Quebradas e/ou F. Açú Sup.
6	12 a 16		Arenito continentais	Form. Açú Inf.
7	>> 1000		Rochas cristalinas	Embas. Pré-Camb.

A **figura 5.4** mostra uma sondagem elétrica vertical (SEV 43) característica da área de estudo, com destaque para os horizontes elétricos identificados.

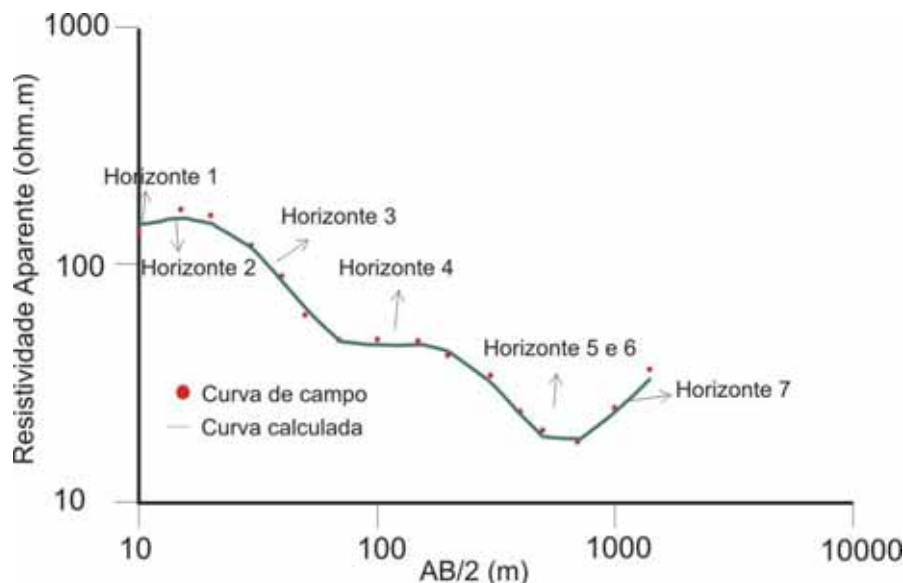


Figura 5.4 – SEV 43. Curva característica da região estudada. Destaque para os horizontes elétricos identificados.

A correlação entre os horizontes elétricos e a sequência litológica, admite os seguintes comentários:

Horizonte Elétrico 1: A espessura e a resistividade variam amplamente de local a local. Este horizonte é representado litologicamente por solos e elúvios que constituem o recobrimento dos calcários ou, eventualmente, por folhelhos cinza da Formação Jandaíra, nos locais onde esta rocha predomina em superfície. Este horizonte pode incluir também, na porção leste da área, sedimentos areno-argilosos pouco espessos dos depósitos coluviais/eluviais.

Horizonte Elétrico 2, resistivo: Representado pelo que vamos chamar de calcários superiores da Formação Jandaíra ou, informalmente, Calcário 1. A magnitude desse horizonte varia amplamente nas sondagens elétricas, traduzindo a variação de espessura desses carbonatos e, sabemos agora, a maior ou menor densidade de intercalações de folhelho. As maiores magnitudes, traduzidas em termos do parâmetro elétrico resistência transversal, foram obtidas nas SEVs A-40, A-41, BP-109, ANA-25, ANA-30, ANA-24 e BP-95, na porção central da área estudada. Dentre as menores magnitudes, ou menores resistências transversais, cita-se a SEV Delmonte-3 realizada no Poço Sandoval 1, no Ceará, na área da Delmonte Fresh do Brasil.

Horizonte Elétrico 3: Representa uma intercalação condutiva no seio do conjunto dos calcários da Formação Jandaíra. Este horizonte, quando muito delgado, não é percebido visualmente nas curvas de resistividade aparente. Este nível aparenta notável continuidade lateral e pode ser associado a uma provável regressão abortada. No Projeto Apodi (ANA, 2010), entretanto, a perfuração do Poço Exploratório P1-FP (ANA-1434), no Sítio Furna de Pedra, levanta dúvidas quanto ao significado desse horizonte condutivo. Esse poço, com efeito, cuja amostragem foi cuidadosamente analisada e descrita, não revela qualquer litologia, no âmbito da formação Jandaíra, que possa ser considerada como eletricamente condutiva. São essencialmente calcários compactos em toda a seção perfurada. A única descontinuidade, na sequência de calcários compactos é uma zona de grande intensidade de carstificação situada entre os 40 e os 50 metros. Embora o poço esteja situado a 2,0 km da SEV mais próxima (SEV 23), considera-se lícito admitir, como segunda alternativa, a possibilidade de que o extensivo horizonte condutivo (horizonte 3) possa ser condicionado por essa zona carstificada, situada pouco abaixo do freático regional. No estágio atual de conhecimentos do problema, essa possibilidade fica aqui registrada para posterior averiguação. Quando o horizonte 3 tem grande magnitude, é mais provável que ele seja devido aos folhelhos escuros. O comportamento geral das SEVs sugere que esses folhelhos separam geralmente o calcário 1 do calcário 2 (horizonte 4).

Horizonte Elétrico 4, resistivo: Representado pelo que vamos chamar de calcários inferiores da Formação Jandaíra ou, informalmente, Calcário 2, posicionado abaixo do horizonte condutivo 3. O horizonte 4 é geralmente bem mais desenvolvido que o horizonte 2. Cabem aqui as mesmas considerações acima tecidas sobre a magnitude do horizonte 2, pois que, em grande parte das SEVs esses dois horizontes se comportam, visualmente, como uma única unidade elétrica.

Horizonte Elétrico 5, condutivo: Esse horizonte é chamado comumente de condutivo basal. Ele engloba geralmente as argilas e argilitos do topo da Formação Açu. Nos locais onde a base dos calcários apresenta folhelhos escuros, essas rochas se incluem eletricamente neste horizonte 5. Em presença de grandes espessuras do Calcário 2, o horizonte elétrico 5 inclui também os arenitos aquíferos basais, como discutido a seguir.

Horizonte Elétrico 6, resistivo: Esse horizonte é representado pelos arenitos basais da Formação Açu ou, em outras palavras, constitui o Aquífero Açu propriamente dito. Este horizonte 6 é perceptível visualmente nas SEVs realizadas sobre a zona de afloramento da Formação Açu ou em presença de pequenas espessuras de calcários. É mais comum, entretanto, em presença de grandes magnitudes dos horizontes 2 e 4, que este horizonte 6 fique eletricamente suprimido. Nessas condições, o condutivo basal (horizonte 5) engloba toda a sequência pelítica (Quebradas + Açu Superior) e os arenitos do Açu Inferior, sendo caracterizado por uma resistividade verdadeira equivalente, da ordem de 6 a 9 ohm.m.

Horizonte 7, resistivo: Constitui um substrato elétrico muito resistivo que pode ser atribuído no presente caso, sem dúvidas, ao embasamento cristalino. Este substrato foi detectado, com maior ou menor nitidez, na quase totalidade das SEVs obtidas no presente estudo.

5.3.2 – Elaboração dos mapas temáticos

Na elaboração dos mapas temáticos foram consideradas não apenas as SEVs realizadas no âmbito do presente estudo, mas também 23 SEVs realizadas no âmbito de estudos anteriores (**Tabela 5.2**), nas quais as formações Jandaíra, Açu e o embasamento cristalino se manifestam eletricamente de forma conspicua (Feitosa et al. 1967, Feitosa & Demétrio 1999ab).

Para interpolação dos dados e posterior confecção dos mapas foi usado o software ArcGis 9.3, extensão Geostatistical Analyst.

Tabela 5.2 – SEVs Antigas Utilizadas

SEV	Estudo	AB (m)
95 BE	Bacia Escola/SUDENE, 1967	6.000
96 BE	Bacia Escola/SUDENE, 1967	6.000
100 BE	Bacia Escola/SUDENE, 1967	3.000
101 BE	Bacia Escola/SUDENE, 1967	3.000
109 BE	Bacia Escola/SUDENE, 1967	6.000
110 BE	Bacia Escola/SUDENE, 1967	4.000
32 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	10.000
33 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	10.000
34 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	10.000
35 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	10.000
36 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	10.000
37 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	10.000
38 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	10.000
39 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	10.000
40 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	10.000
41 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	12.000
42 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	10.000
43 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	10.000
44 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	6.000
45 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	6.000
46 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	4.000
47 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE,	4.000
03 DELM	Delmonte Fresh do Brasil, 1999	2.000

Foram também utilizados os dados dos seguintes poços existentes, mostrados na **Tabela 5.3** a seguir:

Tabela 5.3 – Poços Utilizados (Sistema geodésico UTM SAD 69)

Poço	Proprietário	UTM E	UTM N
1-PR-1-CE	Petrobras	637.542,77	9.432.425,92
9-BA-1-RN	Petrobras	653.156,00	9.438.524,00
9-MOP-25-RN	Petrobras	666.848,00	9.439.192,00
1-SMO-1-RN	Petrobras	672.183,00	9.435.527,00
1-REC-1-RN	Petrobras	652.093,00	9.420.185,00
9-MOC-1-RN	Petrobras	665.216,00	9.446.789,00
P1-FP	ANA/SEMARH-RN	651.131,00	9.444.623,00
P14 CAERN	CAERN/RN	683.560,00	9.428.602,00
P32 ESAM	CAERN/RN	685.367,00	9.424.873,00
P07 CAERN	CAERN/RN	684.990,00	9.427.555,00
Panela do Amaro	CAERN/RN	677.252,69	9.415.174,00

5.4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.4.1 - Mapa do topo do embasamento cristalino

As profundidades do embasamento cristalino foram obtidas como o somatório das espessuras dos horizontes elétricos, nas SEVs resolvidas.

A partir das profundidades do embasamento e das cotas das SEVs foram obtidas as cotas do topo do embasamento cristalino e foi, enfim, elaborado o Mapa do Topo do Embasamento (**Figura 5.5**).

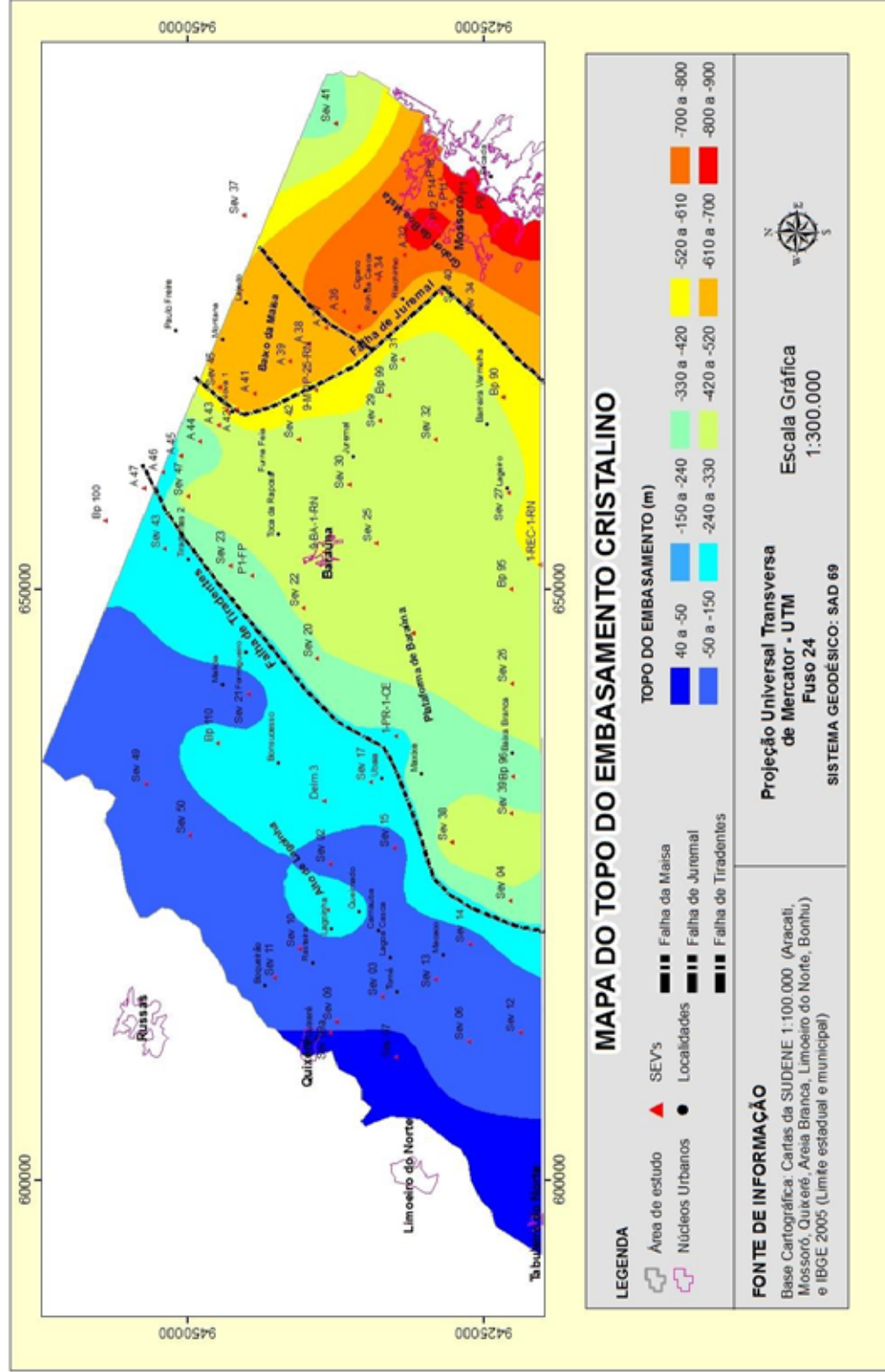


Figura 5.5 – Mapa do topo do embasamento cristalino

O embasamento cristalino exibe uma compartimentação estrutural caracterizada, de oeste para leste, por uma seqüência de quatro patamares de cotas sucessivamente decrescentes. Esses patamares, que chamaremos de Alto de Lagoinha, Plataforma de Baraúna, Baixo da MAISA e Graben de Boa Vista, serão descritos a seguir, de oeste para leste:

Alto de Lagoinha - Trata-se de uma feição bem definida, alongada NE-SW. Os fortes gradientes das cotas do embasamento sugerem uma descida repentina para a Plataforma de Baraúna, com um desnível de 200 metros em distâncias variando de 3 a 6 km. Esse comportamento é compatível com um falhamento extensional do embasamento, alinhado NE-SW ou, quando menos, com uma pronunciada flexura, separando essa feição da Plataforma de Baraúna. Chamaremos essa descontinuidade de Falha de Tiradentes. As SEVs 1, 2, 8 e 10, situadas no Alto de Lagoinha, exibem comportamento muito anômalo, denunciador de descontinuidades laterais. Acredita-se, assim, que essa feição possa ser tectonicamente muito perturbada. Lembremos, a propósito, a ocorrência de arenitos e argilitos, Formação Açú/Quebradas, com direção NE-SW mergulhando de 65° a 70° para sudeste, registrados no capítulo 3, Falha das Pedrinhas. Convém ainda registrar que a Serra Dantas e o Serrote dos Porcos, representam altos do embasamento em pleno domínio da bacia, situa-se neste bloco. As cotas no Alto de Lagoinha variam entre 40 metros, borda oeste da bacia Potiguar (Stock Quixeré) a - 330 metros, Falha de Tiradentes.

Plataforma de Baraúna – Essa feição pode ser encarada como um vasto degrau, pelo qual se passa do Alto de Lagoinha para o Baixo da MAISA e para o Graben de Boa Vista. Ocupa o terço central da área, exibindo um suave, mas decidido caimento para leste e sudeste, com cotas variando de -400 a - 550 metros. A Plataforma de Baraúna é limitada a leste, com o Baixo da MAISA e o Graben de Boa Vista por um provável sistema de falhamentos (Falha de Juremal), indicados na **Figura 5.5**. A Falha de Tiradentes a separa do Alto de Lagoinha, situado a oeste.

Baixo da MAISA – Esse baixo constitui mais um degrau, na porção norte da área, através do qual se passa da Plataforma de Baraúna ao Graben de Boa Vista. O falhamento ou flexura que o separa a oeste da Plataforma de Baraúna encontra respaldo em outras evidências que não elétricas. Feitosa (1996), com efeito, havia já observado que a potenciometria do Aquífero Açú na região de Mossoró, elaborada com base em cerca de 60 poços, esbarrava em nítidas descontinuidades a oeste e a sul, conforme mostrado na **Figura 5.6**.

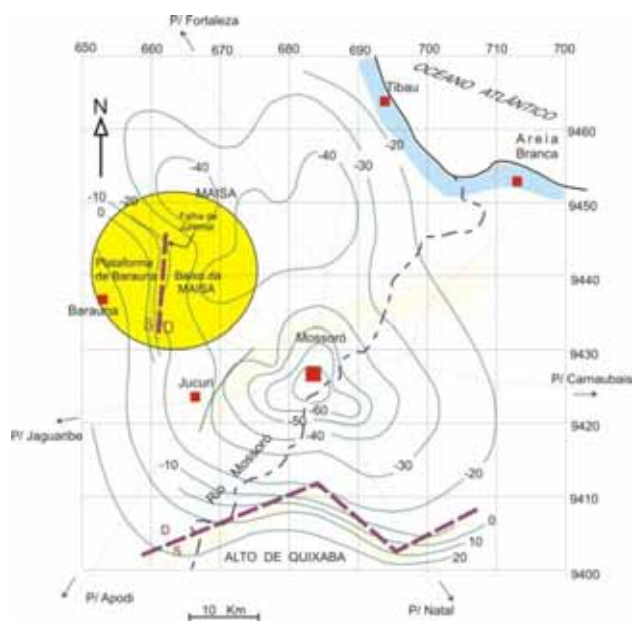


Figura 5.6 – Potenciometria da Região de Mossoró (Fonte: Feitosa, 1996).

As evidências elétricas agora obtidas concordam significativamente com as antigas evidências hidráulicas acima mostradas, tornando verossímil a Falha de Juremal. A passagem do Baixo da MAISA para o degrau mais baixo da compartimentação da Chapada do Apodi, o Graben da Boa Vista, é feita pela denominada Falha da MAISA. Esta estrutura tem característica de extensão e possui direção preferencial NE-SW.

As cotas mais baixas no Baixo da MAISA chegam a -700 metros.

Graben de Boa Vista – Essa estrutura, assim denominada anteriormente pela Petrobras, que ocupa o extremo leste da área, integra já o chamado Graben Central da Bacia Potiguar. As cotas mais baixas aqui mapeadas chegam a -900 metros. O Graben da Boa Vista é limitado a oeste pelo sistema de falhamentos extensionais do embasamento, associado à tectônica do Rift Potiguar. Desse sistema de falhamentos, a eletroresistividade conseguiu identificar, na borda da Linha de Charneira de Areia Branca, as falhas de Juremal e da MAISA.

5.4.2 – Mapa de isópacas da Formação Açu

As espessuras da Formação Açu foram obtidas a partir das SEVs interpretadas quantitativamente, conforme apresentado no mapa da **Figura 5.7**.

A análise do Mapa de Isópacas da Formação Açu permite tecer as seguintes considerações:

O evento Açu assoreou depressões preexistentes do embasamento cristalino. Assim, são de se esperar maiores espessuras dessa formação nos baixos estruturais do embasamento, o que efetivamente ocorre no Baixo da MAISA e no Graben de Boa Vista. Nessas depressões, a Formação Açu exibe espessuras superiores a 300 metros, chegando a 550 metros.

O Alto de Lagoinha, limitado a leste pela Falha de Tiradentes, parece não ter desempenhado qualquer papel no condicionamento do assoreamento Açu. Observa-se aí, inclusive, uma zona de espessuras acima de 200 metros, na região da Delmonte, no Ceará. Não se observam diferenças de comportamento entre o Alto de Lagoinha e a Plataforma de Baraúna, em termos de sedimentação da Formação Açu. Este fato leva a admitir uma movimentação tectônica pós-Açu e pré-Jandaíra que teria gerado a chamada falha de Tiradentes. Esta falha seria, assim, bem mais recente que o sistema de falhamentos associado a estruturação do Rift Potiguar. A sedimentação Açu, a oeste da Falha de Tiradentes, teria assoreado uma paleosuperfície de topografia relativamente monótona, diferenciada posteriormente por esta estrutura.

As menores espessuras da Formação Açu, inferiores a 200 metros, são registradas na porção sudeste da Plataforma de Baraúna, entre as localidades de Juremal, Riacho Grande e Barreira Vermelha; sobre o Alto de Lagoinha, e em toda a faixa de afloramento dessa formação, na borda oeste da Bacia Potiguar.

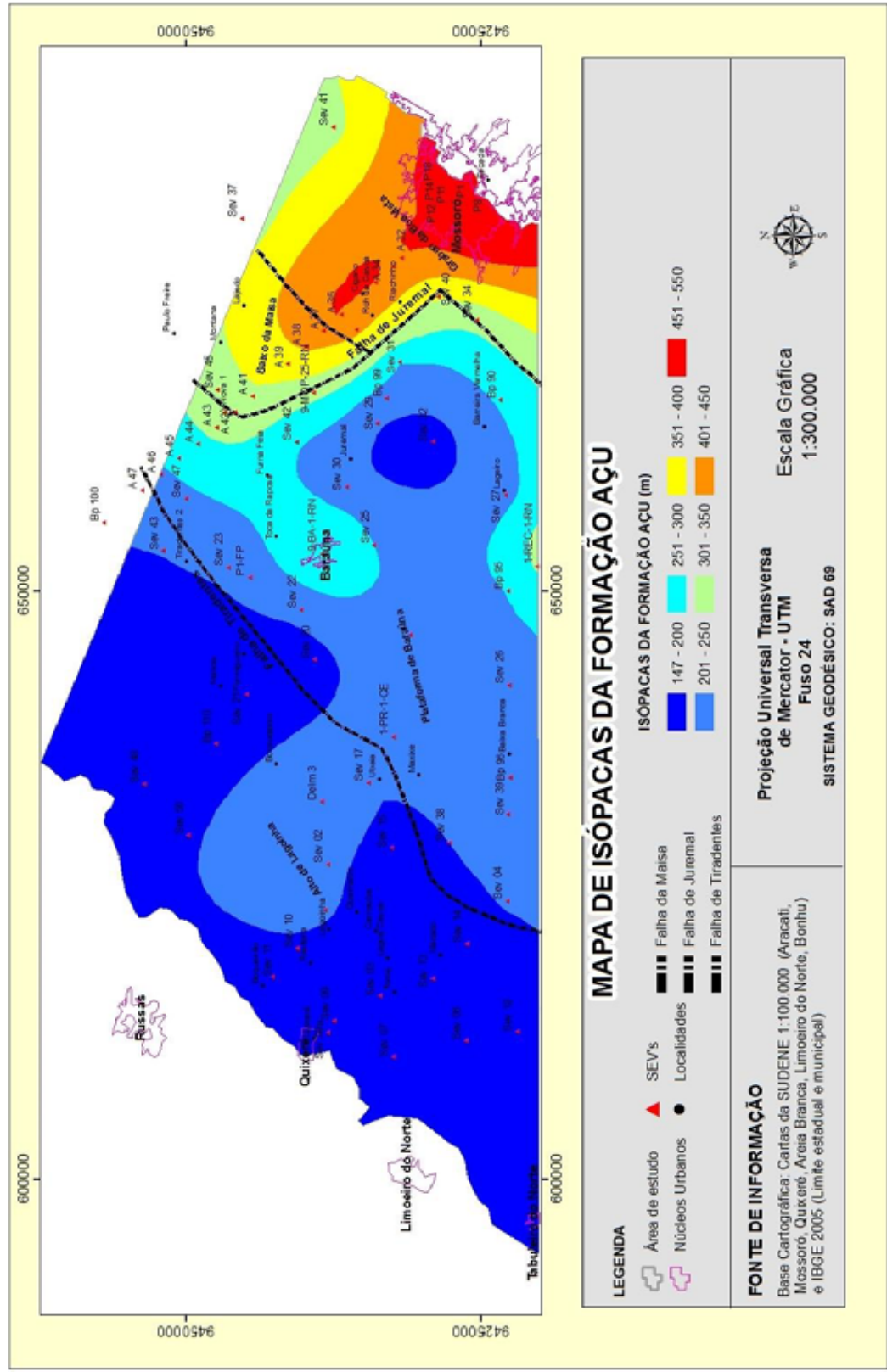


Figura 5.7 – Mapa de isópacas da Formação Açú

5.4.3 – Mapa de isópacas da Formação Jandaíra

As espessuras da Formação Jandaíra foram obtidas dos cortes geoeletricos que resultaram da resolução das SEVs. Essas espessuras obtidas, considerando-se as resistividades verdadeiras adotadas, devem ser consideradas como máximas.

Além das SEVs foram consideradas as espessuras reais da Formação Jandaíra obtidas dos seguintes poços da Petrobras: 1-PR-1-CE, 9-BA-1-RN, 9-MOP-25-RN, 1-SMO-1-RN, 1-REC-1-RN, 1-FV-1-RN e 9-MOC-1-RN.

A análise do Mapa de Isópacas (**figura 5.8**) da Formação Jandaíra permite tecer as seguintes considerações:

O evento Jandaíra, que representa a culminação da transgressão marinha cretácea da Bacia Potiguar, recobriu uma paleosuperfície suavizada pelo assoreamento continental da formação Açu. Nessas condições, a deposição dos carbonatos não foi significativamente condicionada pelo sistema de falhamentos (Falha de Juremal e Falha da Maisa) que formaram as grandes depressões tectônicas da área. Na zona ocupada pelas feições denominadas de Plataforma de Baraúna, Baixo da Maisa e Graben de Boa Vista, as espessuras da Formação Jandaíra variam geralmente entre 250 e 400 metros. As maiores espessuras, que podem atingir cerca de 500 metros, são registradas entre as localidades de Barreira Vermelha e Juremal. Existe a possibilidade de que, nessa zona de maior espessura da Formação Jandaíra as resistividades verdadeiras dos calcários basais sejam anormalmente elevadas. É possível, assim, que se tenham considerado, na quantificação, resistividades verdadeiras aquém das resistividades verdadeiras reais, o que teria resultado aí numa superestimação das espessuras.

Se a deposição dos calcários ignorou os grandes falhamentos associados ao Rift Potiguar, o mesmo não parece ter acontecido em relação à Falha de Tiradentes. A disposição das isópacas, cerradas ao longo dessa descontinuidade, sugere que o Alto de Lagoinha estava presente na época da transgressão marinha do Cretáceo, tendo funcionado como uma possível barreira ao avanço dos carbonatos para noroeste. Dessa forma, a Formação Jandaíra exibe espessuras reduzidas sobre este alto, geralmente inferiores a 170 metros e, mesmo, inferiores a 55 metros nas proximidades da escarpa da Chapada do Apodi. A Falha de Tiradentes deve ter sido originada numa fase tectônica posterior à deposição da Formação Açu, tendo rebaixado essa formação, mas mantendo suas espessuras sem alterações significativas.

5.4.4 – Mapas de resistências transversais da Formação Jandaíra

De acordo com os parâmetros de Dar Zarrouk foram construídos dois mapas de resistências transversais do calcário Jandaíra. O primeiro, mostrado na **figura 5.9**, é diz respeito aos calcários basais (calcário 2), ou ainda de acordo com a tabela 5.1, refere-se ao horizonte 4. O segundo mapa, **figura 5.10**, é referente aos calcários superiores (calcário 1), ou seja, ao horizonte 2 da tabela 5.1.

No zoneamento das resistências transversais dos calcários, os maiores valores correspondem às maiores espessuras dessa rocha.

De acordo com o mapa da figura 5.9, as maiores espessuras dos calcários basais ocorrem na Plataforma de Baraúna, entre as localidades do Lageiro, porção sul, e Vila Nova, ao norte da área.

As maiores espessuras do calcário 1 da Formação Jandaíra, ocorrem com direção preferencial NE-SW, entre a Plataforma de Baraúna e o Alto de Alagoinha, com a Falha de Tiradentes limitando parcialmente o avanço da transgressão marinha.

5.4.5 – Mapa de condutâncias longitudinais da porção média da Formação Jandaíra

Outro importante parâmetro de Dar Zarrouk é o da condutância longitudinal. Foi construído o mapa da distribuição das condutâncias longitudinais (**figura 5.11**) do horizonte condutivo 3 (**ver Tabela 5.1**), que representa a porção média da Formação Jandaíra. Estratigraficamente este horizonte condutivo 3 é mais jovem que o chamado calcário 2. O conjunto das informações disponíveis leva a admitir que as maiores magnitudes desse horizonte (maiores condutâncias longitudinais) estejam associadas a espessas intercalações de folhelhos, enquanto que as menores magnitudes podem ser condicionadas pelo nível carstificado regional. As menores espessuras dos folhelhos estão localizadas principalmente entre região de Baraúna e a escarpa da Chapada do Apoodi, onde se encontra atualmente a maior concentração de poços tubulares do aquífero Jandaíra.

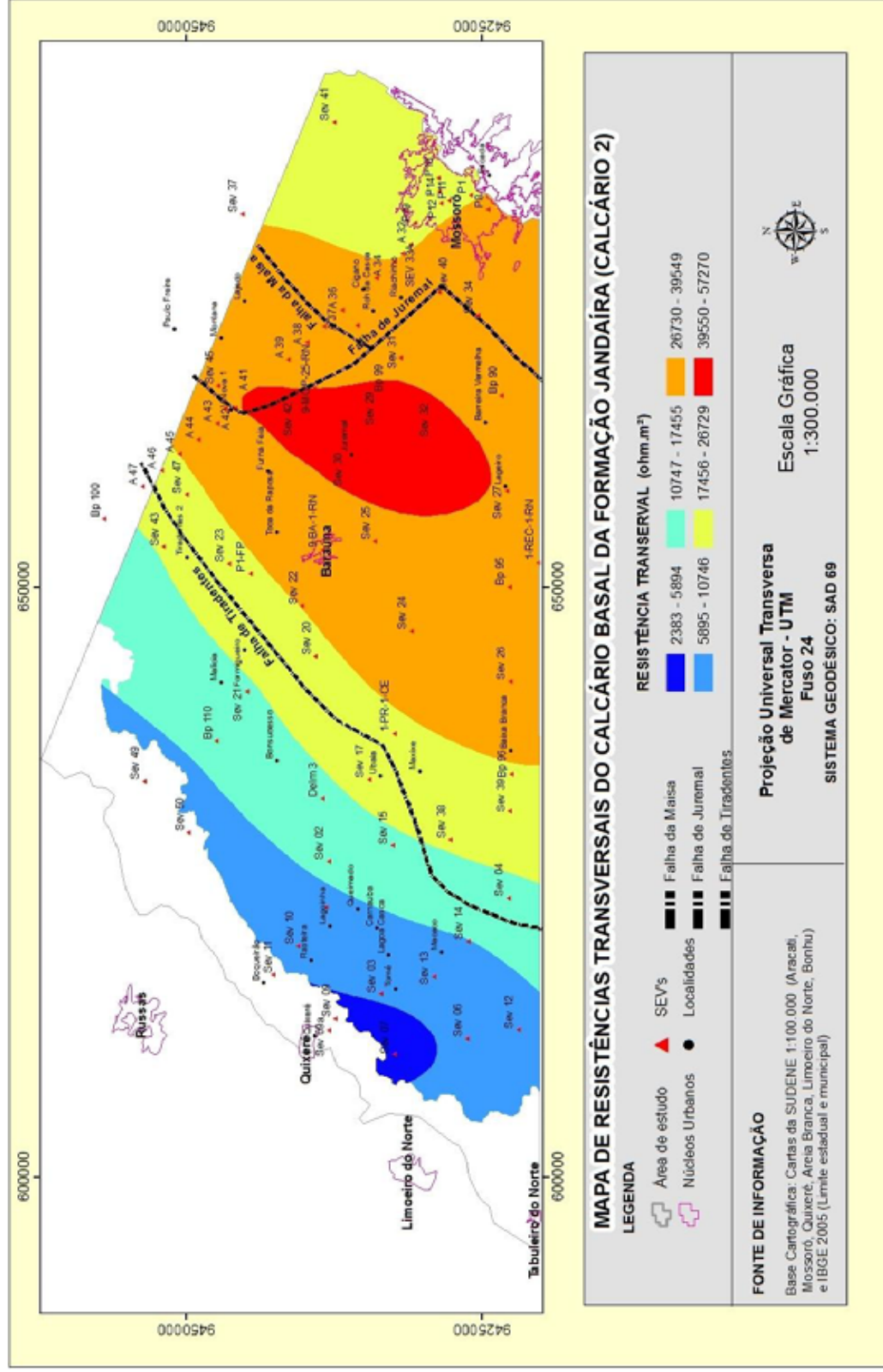


Figura 5.9 – Mapa de resistências transversais do calcário inferior (calcário 2).

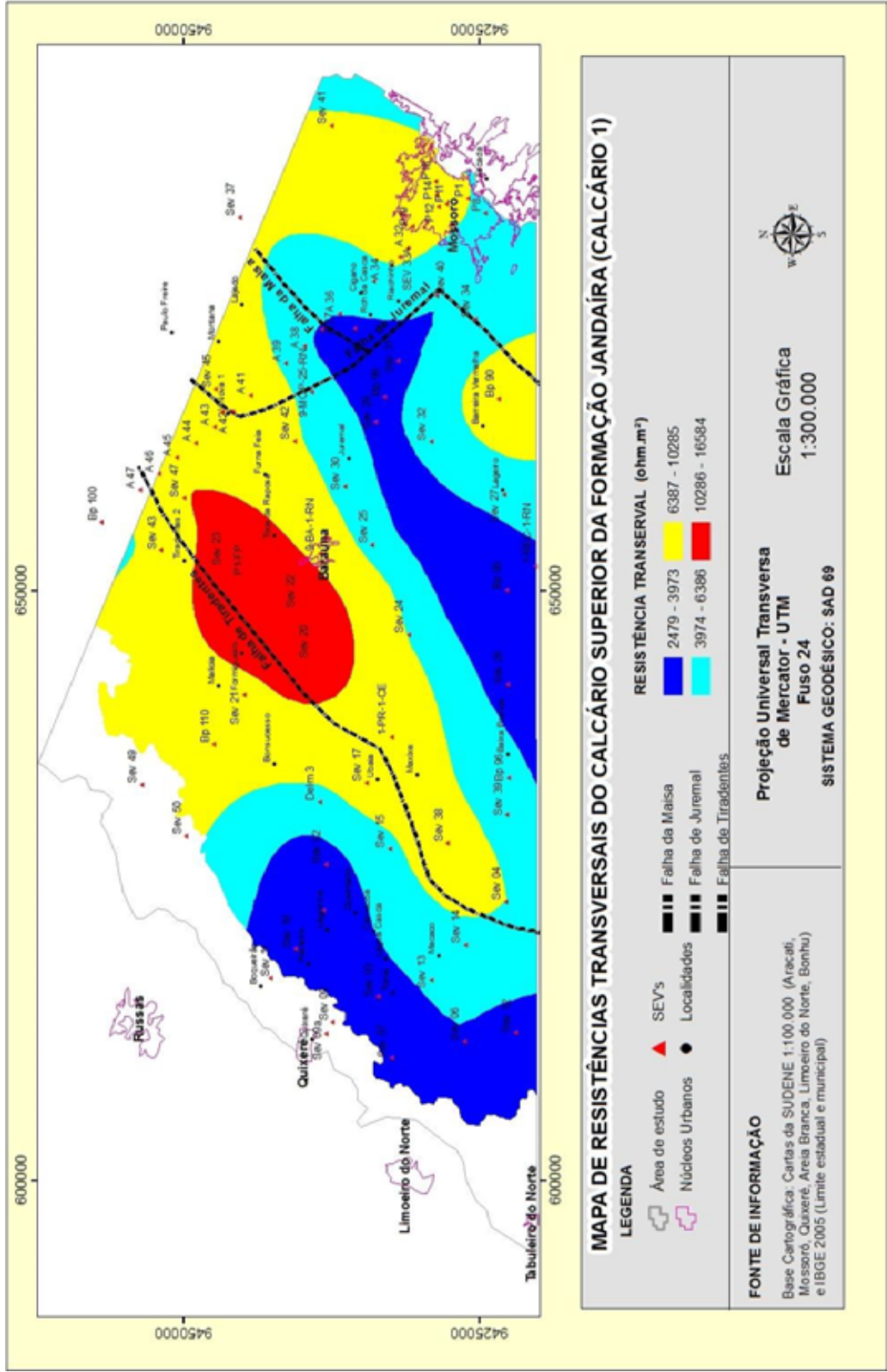


Figura 5.10 – Mapa de resistências transversais do calcário superior (calcário 1).

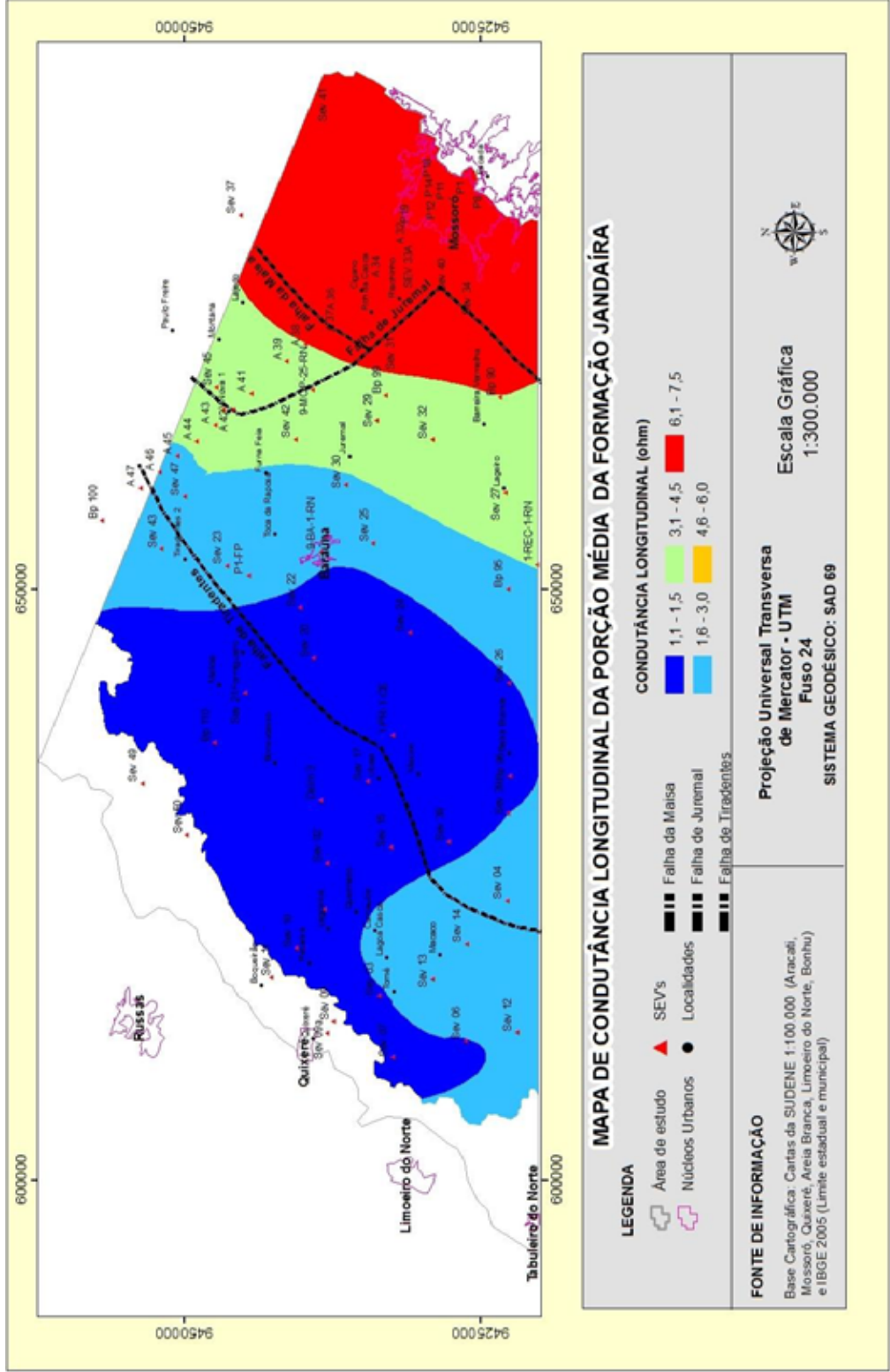


Figura 5.11 – Mapa de condutâncias longitudinais da porção média da Formação Jandaíra (folhelhos e/ou margas).

CAPÍTULO 6 - DISCUSSÃO

6.1 – COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL DA CHAPADA DO APODI

Os estudos geofísicos gravimétricos e elétricos (resistividade) foram realizados objetivando, entre outros, a visualização do topo do embasamento cristalino.

A eletrorresistividade propôs uma compartimentação estrutural da área que foi, em suas linhas gerais, ratificada pela gravimetria. Essa compartimentação estrutural, mostrada na **figura 6.1**, envolveu feições que foram denominadas de Alto de Lagoinha, Plataforma de Baraúna, Baixo da MAISA e Graben da Boa Vista. Discutiremos a seguir essas feições, buscando enfatizar seus aspectos geofísicos e estruturais.

O Alto de Lagoinha é uma feição estrutural alongada NE-SW, gravimetricamente caracterizada pelo arqueamento do embasamento através de basculamentos de blocos, formando *horsts* e *grabens* possivelmente causados pela reativação da bacia nesta região. No levantamento estrutural foram mapeadas falhas distensionais que refletem as reativações na borda oeste da Chapada do Apodi. O modelo gravimétrico 2D C-C' ressalta, na mesma porção oeste, a ocorrência de uma janela de sedimentação, que pode ter sido formada a partir de falhamentos normais ligados a reativação tectônica da borda da Bacia Potiguar. O Alto de Lagoinha é limitado a leste pela Falha de Tiradentes, que tem direção NE-SW. Essa falha é evidenciada no modelo 3D gravimétrico do topo do embasamento (**figura 4.6**). De acordo o modelo de evolução tectônica da Bacia Potiguar (Medeiros et al. 2001), a Falha de Tiradentes possivelmente foi formada durante o evento tectônico do pós-Santoniano ao Paleógeno inferior, tendo em vista a idade dos marcadores estratigráficos envolvidos (formações Açú e Jandaíra). A eletrorresistividade reflete este fato devido a falha ter servido de barreira à sedimentação da Formação Jandaíra e não ter influenciado o assoreamento da Formação Açú

A Plataforma de Baraúna é uma feição estrutural localizada na porção central da área, entre o Alto de Lagoinha, o Baixo da MAISA e o Graben da Boa Vista. De acordo com a eletrorresistividade, essa plataforma exibe um suave caimento para leste e sudeste, com cotas do embasamento variando de -400 a -610 metros. O Mapa Bouguer mostra, entretanto, uma anomalia positiva nessa plataforma, a sul/sudeste da área, resultando em profundidades do embasamento bem menores que aquelas sugeridas pela resistividade. Uma análise dessa discrepância mostrou que a anomalia positiva gravimétrica decorre da existência de diques de provável composição diabásica, com trend E-W, encaixados no embasamento. A densidade desses diques vem somar-se à densidade das rochas do embasamento, maximizando o efeito desse último e simulando um alto estrutural, na realidade inexistente. Prevalecem, assim, as cotas do embasamento fornecidas pela resistividade e aferidas pela existência dos poços da PETROBRAS que atingiram o embasamento na área: 1-REC-1RN e 1-FV-1RN, com profundidades de 614 m e 504 m, respectivamente. Estes corpos ígneos também estão presentes no embasamento adjacente à borda sul da bacia Potiguar, são referentes ao evento magmático Rio Ceará Mirim. A Plataforma de Baraúna é limitada a leste com o Baixo da MAISA e o Graben de Boa Vista por um complexo sistema de falhamentos (Falha de Juremal e Falha da MAISA).

O Baixo da MAISA fica localizado no extremo nordeste da área de estudo, é limitado pela Falha de Juremal a oeste e a sul e pela Falha da MAISA, a leste. Gravimetricamente este baixo faz parte de uma estrutura negativa de maior porte, que se desenvolve para NNE segundo estudos geofísicos desenvolvidos anteriormente (Milani & Latgé, 1987). No extremo leste do perfil C-C' (**figura 4.10**) obtido por modelagem gravimétrica 2D, a Falha de Juremal é evidenciada por um movimento de blocos associado a atividades tectônicas, formando *horsts* e *grabens*. A Falha de Juremal ocorre como prolongamento de falhas extensionais associadas ao embasamento (**figura 6.1 e 6.2**). A chamada Falha da MAISA está evidenciada nos modelos gravimétricos D-D' e E-E' (**figuras 4.11 e 4.12**). Na porção leste destes perfis, próximo a cidade de Mossoró, é notável a ocorrência de falhas verticais que caracterizam a descida do embasamento em direção ao Graben da Boa Vista. O sistema de falhamento que envolve as Falhas de Juremal e da MAISA deve estar associado, em relação a evolução tectônica

da Bacia Potiguar, ao rifteamento Neocomiano-Barremiano. Esta tectônica foi condicionada por um campo de extensão NW, produzindo estruturas tipo *graben* com direções NE a ENE, também controladas pelo *fabric* tectônico do embasamento (Medeiros et al. 2001).

O Graben da Boa Vista ocupa o extremo leste da área, integrando já o chamado Graben Central da Bacia Potiguar. As cotas mais baixas aqui mapeadas chegam a -900 metros. Gravimetricamente o graben está caracterizado por movimentos de blocos orientados NE-SW, compatíveis com a formação do rift Potiguar (Neocomiano-Barremiano), mostrando um gradativo afundamento do embasamento de oeste para leste, evidenciado no perfil gravimétrico 2D D-D' (**figura 4.11**). No mapa geológico-estrutural (**figuras 3.1 e 6.2**) estão mapeadas falhas de extensão do embasamento (Angelim, 2007) com direções tanto NE-SW como NW-SE que concordam com as estruturas geofísicas aqui propostas.

6.2 – DEPOCENTRO DE BARAÚNA

Dentre todas as feições estruturais mapeadas pela geofísica no presente trabalho, uma única não é comungada pelos dois métodos utilizados. Trata-se da feição discernida pela gravimetria e denominada de Depocentro de Baraúna, ilustrada nas **figura 6.1 e 6.2**.

O Depocentro de Baraúna tem sua maior expressão na região centro-norte e nordeste da área estudada. Neste local a anomalia negativa mostrada no mapa Bouguer (**figura 6.3**), caracteriza a presença do grande bloco negativo. O mapa gravimétrico do topo do embasamento (**figura 4.6**) mostra valores próximos de -900 m (cota do embasamento). Tectonicamente essa feição seria decorrente de afinamento crustal ocasionado por movimentos distensivos no sentido NNW, de expressão muito maior que a mapeada. Duas hipóteses foram levantadas para explicar a presença dessa anomalia negativa, sugestiva de uma grande depressão, não percebida pela eletrorresistividade. A primeira hipótese considerou a ocorrência das serras de quartzitos (Serra Dantas e Serrote dos Porcos) circundada por sedimentos da Formação Jandaíra, no extremo norte do Alto de Lagoinha (**figura 6.2**). A grande concentração de quartzo nos quartzitos, com densidade menor que as demais rochas cristalinas, teria acarretado, na modelagem gravimétrica 2D, espessuras de sedimentos maiores que as espessuras reais.

A segunda hipótese contemplou uma grande intensidade de carstificação nos calcários superiores da Formação Jandaíra, que teriam, assim, densidade menor que aquela considerada nas modelagens. O efeito final seria, teoricamente, idêntico ao anterior, isto é, aumento da espessura de sedimentos e, conseqüentemente, a configuração de um aparente baixo estrutural. As duas hipóteses foram simuladas, tendo sido obtidos novos modelos que pouco diferiram do modelo original, motivo pelo qual a feição denominada de Depocentro de Baraúna foi mantida, em termos gravimétricos.

Vale ressaltar que as estações gravimétricas foram realizadas com até 4 km de espaçamento, este intervalo é considerado grande para as dimensões da área de estudo. Apenas as estações 14, 15, 16 e 17 marcam a ocorrência da depressão (**figura 6.3**). Contudo, Milani e Latgé (1987) modelaram na região do depocentro, um baixo estrutural que se prolonga da região NW de Baraúna até próximo a linha de costa (fora da área de estudo).

A Falha de Tiradentes, mapeada pela resistividade, divide aproximadamente ao meio o Depocentro de Baraúna, tal como mapeado pela gravimetria (**figura 6.1**). Poder-se-ia admitir que o traçado da falha esteja muito impreciso, devido ao grande espaçamento entre as SEVs, e que o depocentro esteja totalmente inserido do bloco rebaixado. O grande espaçamento entre as SEVs, teria também feito essa depressão passar despercebida eletricamente. Ora, as SEVs 23, 43, 47, BP100, A47, A46, A45 e A44, são sondagens elétricas muito bem definidas, situam-se na área do depocentro em questão e mostram nitidamente a presença de um substrato muito resistivo, relativamente raso, que vem sendo rastreado em toda a área e atribuído ao embasamento cristalino. A única possibilidade de esse substrato não ser devido ao embasamento seria a presença, abaixo da Formação Açu, de sedimentos muito espessos e muito resistivos, o que não é compatível com o que se conhece da geologia da área. Acresce o fato de que a Serra Dantas e Serrote dos Porcos, que constituem um alto do embasamento (quartzitos), situa-se imediatamente na borda noroeste do Depocentro de Baraúna, sugerindo eloquentemente a presença

do embasamento cristalino a pouca profundidade em suas imediações. Em função da argumentação acima apresentada, considera-se pouco provável que o Depocentro de Baraúna constitua uma depressão mais pronunciada, no bloco baixo da Falha de Tiradentes. Na porção oeste da área de estudo também ocorre outro alto do embasamento, o chamado Stock Quixeré. Gravimetricamente esta região comporta-se como um bloco falhado com formação de *grabens* e *horsts*, chegando a desenvolver janelas de sedimentação com até 650 m de espessura (**figura 4.10**). Então é provável que a região do Depocentro de Baraúna seja uma zona tectonicamente afetada, ao ponto de formar *horsts* (Serra Dantas e Serrote dos Porcos) e *grabens* (Depocentro de Baraúna).

Não obstante, a anomalia gravimétrica negativa indiscutivelmente existe e, em face das informações geológicas disponíveis, não admite no momento outra interpretação que não uma depressão do embasamento. O fato de essa interpretação divergir dos resultados da resistividade constitui uma dessas indeterminações tão frequentes na geofísica e que só podem ser levantadas com o auxílio de informações geológicas adicionais.

Nesse sentido, lembramos a inexistência de poços até o embasamento na área polêmica e em suas vizinhanças. O poço mais próximo, até o embasamento, com efeito, situa-se na cidade de Baraúna. O levantamento da indeterminação aqui discutida e o consequente avanço do conhecimento, portanto, passa pela perfuração de um poço até o embasamento, na área em questão, além de medições adicionais e detalhadas de resistividade e gravimetria.

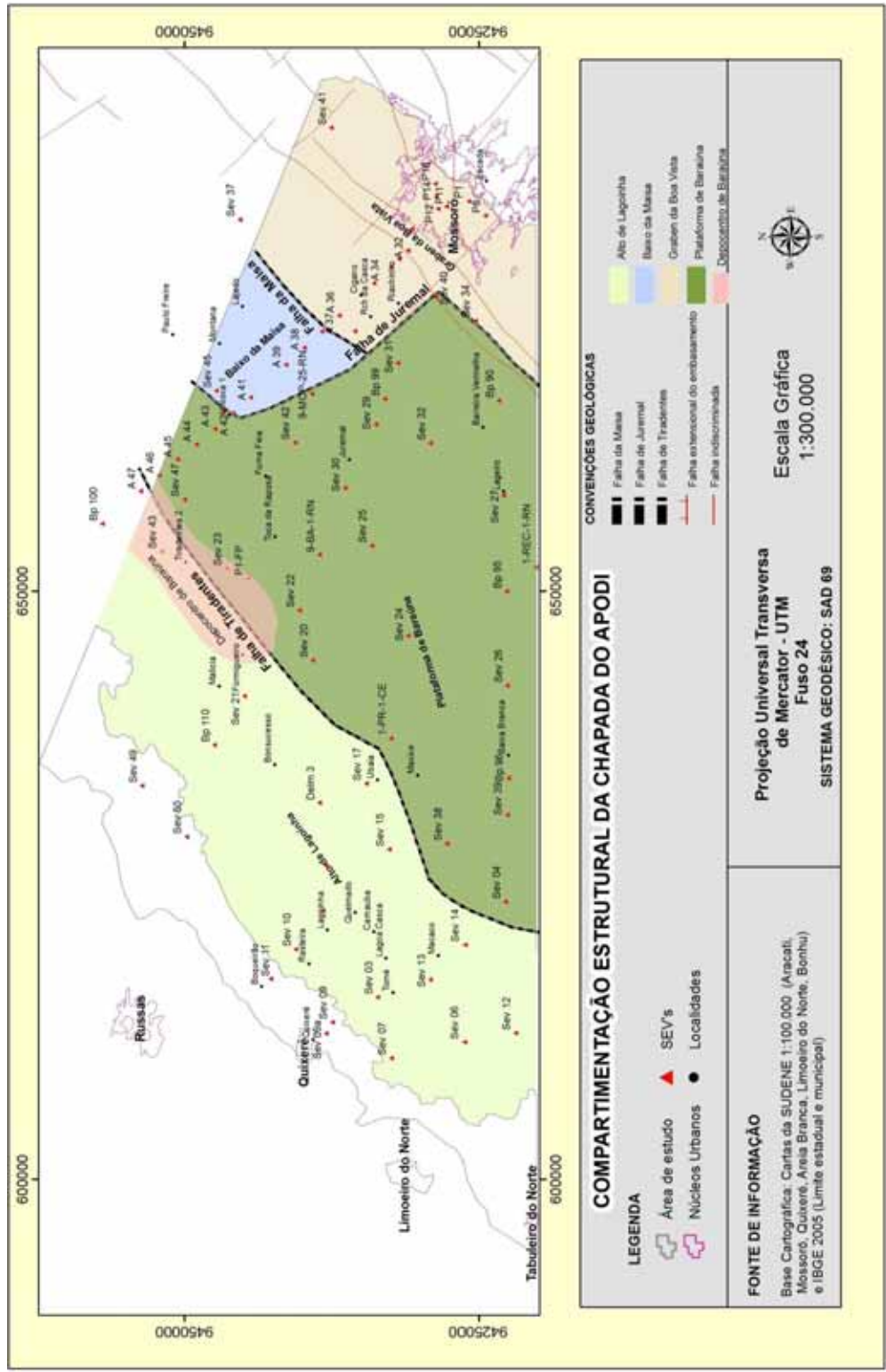


Figura 6.1 – Compartimentação estrutural da Chapada do Apodi mostrando o Depocentro de Baraúna.

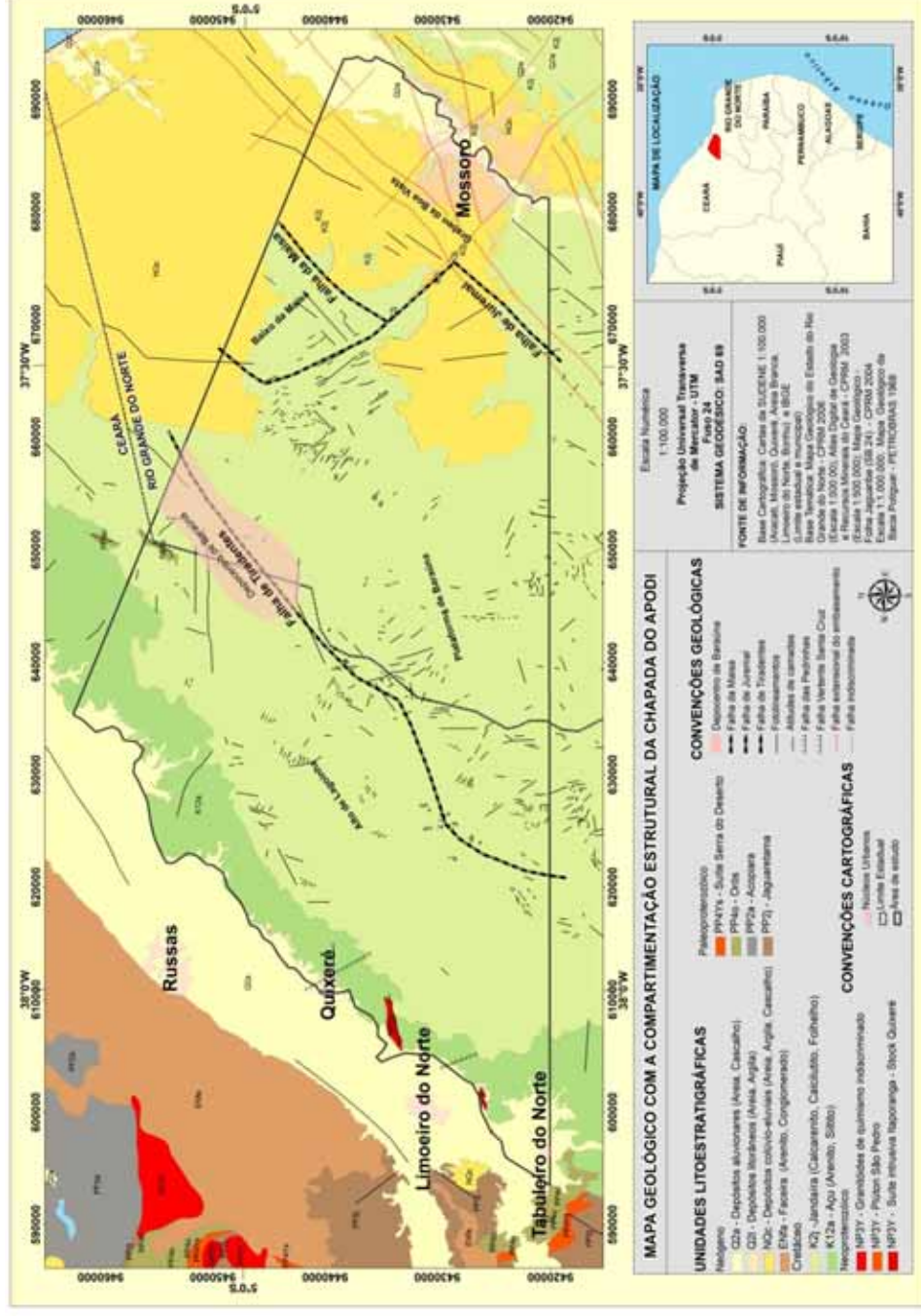


Figura 6.2 – Mapa geológico integrado com a compartimentação estrutural da Chapada do Apodi.

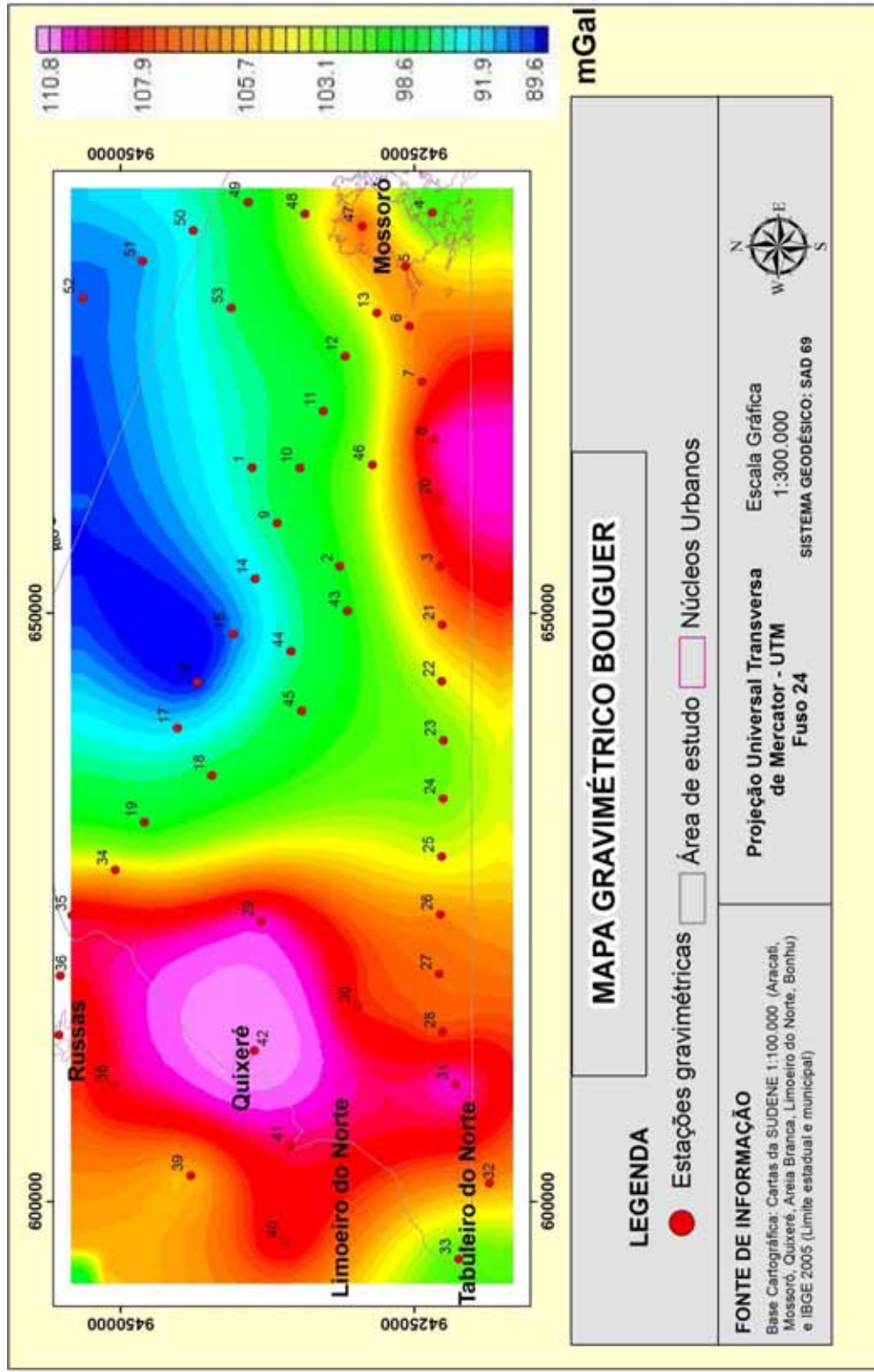


Figura 6.3 – Mapa Bouguer com localização das estações gravimétricas.

CAPÍTULO 7- CONCLUSÕES

Geologicamente a área de estudo não é apenas formada pela plataforma carbonática Jandaíra, arenito Açú, aluviões e colúvios, ocorrem também os altos do embasamento representados pela Serra Dantas, Serrote dos Porcos e o *Stock* Quixeré. O registro desses *inselbergs* foi importante para o entendimento da compartimentação tectônica da Chapada do Apodi.

No contexto hidrogeológico a área de estudo abrange o sistema aquífero Apodi, composto pelo aquífero livre cárstico-fissural Jandaíra, o aquitard Quebradas e o aquífero semi-confinado Açú.

Os estratos calcários da Formação Jandaíra condicionam a formação de juntas de alívio de pressão, que são importantes para o fluxo das águas subterrâneas no aquífero cárstico. As camadas da Formação Açú estão inclinadas para o interior da Bacia Potiguar, porém não funcionam como zona de recarga, devido aos litotipos argilosos terem comportamento de um aquitard.

As fraturas de extensão são as estruturas rúpteis que ocorrem com maior frequência no calcário Jandaíra. Estas estruturas possuem dois sistemas de fraturamento (NW-SE e NE-SW) que aumentam a permeabilidade do aquífero cárstico. Sugere-se que estas fraturas estão associadas à tectônica ocorrida na Bacia Potiguar durante o Neógeno.

As falhas distensionais das Pedrinhas e Vertente-Santa Cruz são importantes para o entendimento da reativação tectônica da Bacia Potiguar. Estas estruturas têm direção NNW (330 Az), com mergulhos de alto ângulo. A formação dessas falhas possivelmente ocorreu durante o evento deformacional do Santoniano ao Paleógeno inferior.

A análise integrada dos estilólitos e as fraturas de extensão permitiu a identificação do campo de esforço principal (σ_1) na vertical, característico de ambientes extensionais.

O desenvolvimento das feições cársticas (sumidouros, cavernas e dolinas) na Formação Jandaíra, está relacionado aos alinhamentos preferenciais das estruturas, ou seja, a carstificação segue os *trends* NW-SE e NE-SW das fraturas de extensão e do acamamento da Formação Jandaíra.

O estudo gravimétrico identificou três importantes anomalias nos mapas Bouguer, regional e residual. Estas feições são corroboradas pelas estruturas observadas no modelo gravimétrico 3D:

- ✓ No extremo oeste da área ocorrem sistemas de *horsts* e *grabens*, com desenvolvimento de janelas de sedimentação. Essa tectônica sugere uma possível reativação da borda da Bacia Potiguar.
- ✓ Na região norte, ocorre o chamado Depocentro de Baraúna, que se caracteriza pela maior expressão geológica da região para a qual deve ser voltada a atenção daqueles interessados no problema do gerenciamento da água na Chapada do Apodi;
- ✓ Na porção sul/sudeste da área, os valores de gravidade sofrem aumentos anômalos. Nesta região ocorre anomalia positiva de direção E-W, que diz respeito à presença de corpos rochosos mais densos (diques vulcânicos).

Através da modelagem gravimétrica 2D foi possível obter as espessuras médias das formações Jandaíra e Açú e a identificação das falhas extensionais associadas ao embasamento. A espessura da Formação Jandaíra tem em média 200 m, enquanto que a da Formação Açú possui valores médios de 400 m. Os perfis 2D ressaltaram na borda oeste da Chapada do Apodi e na região de Mossoró, a ocorrência de *horsts* e *grabens*, que são controlados por falhas normais chegando a formar janelas de sedimentação. Estas fossas tectônicas são importantes para o acúmulo de água subterrânea no

Aquífero Açú.

Com o método de eletrorresistividade foi visto que o embasamento cristalino exibe uma compartimentação estrutural caracterizada, de oeste para leste, por uma sequência de quatro patamares de cotas sucessivamente decrescentes, delimitados por falhamentos: Falha de Tiradentes, MAISA e Juremal.

A Formação Açú assoreou uma paleo-superfície do embasamento na qual já estavam configurados o Baixo da MAISA e o Graben de Boa Vista. Assim, as maiores espessuras dessa formação ocorrem nessas estruturas que abrigam, respectivamente, 400 e 550 metros. Sobre a chamada Plataforma de Baraúna e sobre o Alto de Lagoinha, a Formação Açú exibe espessuras bem mais reduzidas, entre 150 e 300 metros.

A Formação Jandaíra exibe três unidades elétricas. A unidade superior são calcários resistivos, geralmente de pequena espessura, enquanto que a unidade inferior são também calcários resistivos, mas, tendo espessura geralmente bem maior. A unidade intermediária é condutiva, separando a unidade superior da inferior. Este horizonte condutivo é representado pelas intercalações de folhelhos separando os calcários superiores (calcário 1) dos calcários inferiores (calcário 2). Esse nível de folhelhos ocorre, por vezes, interdigitado com o calcário 1. Assim, os calcários superiores podem gradar lateralmente para folhelhos.

A sedimentação carbonática da Formação Jandaíra parece ter avançado de leste para oeste, tendo sido parcialmente detida pela Falha de Tiradentes. As espessuras da Formação Jandaíra são bastante reduzidas sobre o Alto de Lagoinha.

Visando a problemática do gerenciamento das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra na Chapada Apodi, é recomendável que a zona mais favorável à captação de água é no calcário 1 na faixa alinhada NE-SW, bordejando a Falha de Tiradentes, no bloco baixo dessa falha.

De acordo com as informações obtidas neste trabalho foi possível observar que a estruturação tectônica da Chapada do Apodi foge de um “homoclinal” simples com mergulho suave para nordeste. O embasamento é desenhado por vales falhados e preenchidos por sedimentos cretáceos formadores do sistema aquífero Apodi.

Para complementar os estudos, sugerimos o uso de ferramentas de análise de paleotensões, que permitirão caracterizar com maior detalhe os campos de tensões. Também recomendamos o detalhamento dos estudos geofísicos, com adensamento da malha gravimétrica e de resistividade, visando, entre outros, o esclarecimento do Depocentro de Baraúna. É de suma importância a realização do estudo de magnetometria, que ajudará na interpretação dos diques vulcânicos associados ao embasamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral, C.A. 2000. Correlação entre o contexto morfoestrutural e sismicidade nas regiões de João Câmara e São Rafael (RN). Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil. 87p.
- ANA. 2010. Agência Nacional de Águas. Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Proposição de Modelo de Gestão Compartilhada para os Aquíferos da Chapada do Apodi, entre os Estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Vol. II – Geologia e Geofísica. Brasília, 167p.
- Angelim, L. A. A. (org.) 2007. Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte - Escala 1:500.000. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 119 p + 2 mapas.
- Bertani, R. T.; Costa, I. G. & Matos, R. M. D. 1990. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: Raja Gabaglia, G. P., Milani, E. J. (eds.) Origem e evolução de bacias sedimentares. Rio de Janeiro: PETROBRAS, p.291-310.
- Cavalcante, J. C. (org.) 2003. Atlas Digital de Geologia e Recursos Minerais do Ceará. Escala 1:500.00. Fortaleza: CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Córdoba, V. C. 2001. A evolução da plataforma carbonática jandaíra durante o Neocretáceo na Bacia Potiguar: análise paleoambiental, diagenética e estratigráfica. Curso de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Campos de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro (SP), Tese de doutorado, 239p.
- Correia, P. B. 1989. Levantamento geofísico na região de Itambé – PE e Pedras de Fogo- PB. Dissertação de Mestrado, UFPE - Recife. 152 p.
- Cremonini, O. A.; Goulart, J. P. M. & Soares, U. M. 1996. O Rifte Potiguar: novos dados e implicações tectônicas. In: UNEP, Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, 4, Rio Claro, Boletim..., p. 89-93.
- Cremonini, O. A.; Goulart, J. P. M. & Soares, U. M. 1998. Tectonic-Stratigraphic Evolution of Offshore Potiguar basin, Brazil. In: AAPG International Conference & Exhibition, Rio de Janeiro, Brasil. American Association of Petroleum Geologists, Extended Abstracts Volume, pp. 44-45.
- Cruz, J. B.; Bento, D. M.; Santos, D. J.; Freitas, J. I. M. & Campos, U. P. 2009. Complexo Espeleológico da Furna Feia (RN): Uma Proposta de Unidade de Conservação. Anais do XXX Congresso Brasileiro de Espeleologia (SBE). Montes Claros-MG. p. 29-35.
- Cypriano, J. L. & Nunes, A. B. 1968. Geologia da Bacia Potiguar. PETROBRAS. Região de Produção do Nordeste, Equipe TG-6. Mapeamento Geológico (escala 1:50.000).
- Demétrio, J.G.A. 2006 - Utilização de Imagens SRTM na Confecção de Mapas Potenciométricos. In: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Curitiba.
- Feitosa, E.C. & Demétrio J.G.A. 1999a - O Calcário Jandaíra na Área da Baixa do Felix - Região SW de Baraúna/RN: Parecer hidrogeológico. (Estudo geofísico por eletrorresistividade objetivando a detecção e mapeamento de estruturas cársticas para fins de locação de poços). LABHID-FADE-UFPE/Del Monte Fresh Produce Brasil Ltda. Recife.Relatório inédito.
- Feitosa, E.C. & Demétrio J.G.A. 1999b - O Calcário Jandaíra na Área da Baixa do Felix - Região SW de Baraúna/RN: Parecer Hidrogeológico Complementar (Estudo geofísico por eletrorresistividade objetivando a detecção e mapeamento de estruturas cársticas para fins de locação de poços). LABHID-FADE-UFPE/Del Monte Fresh Produce Brasil Ltda. Recife. Relatório inédito.
- Feitosa, E.C. & Melo, J. G. 1998– Caracterização Hidrogeológica dos Aquíferos do Rio Grande do Norte. PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS. SERHID-HIDROSERVICE-FADE-LABHID.

- Feitosa, E.C. 1972- Estudo Geofísico por Eletorresistividade da Área de Macau/Pendências na Bacia Potiguar/RN. Recife. CAERN/RN. Relatório Inédito.
- Feitosa, E.C. 1996 - A Exploração do Aquífero Açú na Região de Mossoró - Caracterização da Situação Atual e Perspectivas de Atendimento da Demanda Futura. CPRM, Série Hidrogeologia: Pesquisa e Desenvolvimento, Vol.1, 44 p. il, Brasília.
- Feitosa, E.C. 2000 - O Calcário Jandaíra na Área da Baixa do Felix - Região SW de Baraúna/RN: Parecer Hidrogeológico Complementar 2.(Varredura e Semi-detalhamento Geofísico por Eletorresistividade da Porção NW da Propriedade da Del Monte). LABHID-FADE-UFPE/Del Monte Fresh Produce Brasil Ltda. Recife. Relatório inédito.
- Feitosa, E.C. 2003a - O Problema do Rebaixamento Excessivo dos Níveis de Bombeamento do Aquífero Jandaíra na Região de Baraúna, Extremo Oeste da Bacia Potiguar: Sugestão de Abordagem. ANA/SIH, Natal. Relatório inédito, 12p.
- Feitosa, E.C. 2003b - O Calcário Jandaíra em Área da Baixa do Felix/CE (Propriedade no Km 14 da CE-377): Parecer Hidrogeológico e Localização de Poços, FADE/LABHID, Recife. Relatório inédito.
- Feitosa, E.C. 2004a - O Calcário Jandaíra na Área da Baixa do Felix - Município de Quixeré - Ceará: Estudo por Eletorresistividade da Área do Bessa. LABHID-FADE-UFPE/Del Monte Fresh Produce Brasil Ltda, Recife. Relatório inédito.
- Feitosa, E.C. 2004b - O Aquífero Jandaíra no Município de Baraúna/RN - Atualização dos Conhecimentos. ANA/PróÁgua Semiárido/SERHID RN - FADE/LABHID/UFPE. Recife. Relatório inédito.
- Feitosa, E.C.; Rijo, L. & Barros, J.G.C. 1967. Prospecção Geofísica da Bacia Potiguar - RN. In: Brasil, SUDENE - Bacia Potiguar: Estudo Hidrogeológico. Série Hidrogeologia nº 15, Recife.
- Feitosa, F. A. C.; Manoel Filho, J.; Feitosa, E. C. & Demetrio, J. G. A. 2008. (Coords). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3 ed. – Rio de Janeiro: CPRM. LABHID-UFPE. 812p.
- Ferreira, A. R. L.; Prous, X.; Silva, M.S. & Bernardi, L. F. O. 2008. Caracterização biológica de cavernas do Rio Grande do Norte. In: CRUZ, Jocy Brandão (Org.). Diagnóstico espeleológico do Rio Grande do Norte. Natal, ICMBIO, 78 p.
- Fortes, F. P. 1987. Mapa geológico da Bacia Potiguar (escala 1:100.000). A origem da bacia Mesozóica do Apodi em decorrência do ciclo orogênico Brasileiro. Natal. PETROBRAS/DEBA/DINTER, 116p. (Relatório Interno).
- Françolim, J. B. L. & Szatmari, P. 1987. Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira. Revista Brasileira de Geociências, 17 (2): 196-207.
- Fundação Phoenix. www.fundacaophoenix.com.br
- Hackspacher, P. C.; Corsino, A. R.; Srivastava, N. K. & Tiriba, V. F., 1985. A falha de Afonso Bezerra como evidência de significativo tectonismo frágil NW-SE, na Bacia Potiguar. Boletim do DG/UFRN, 10: 34-44.
- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas (CECAV). Base de dados.
- Jardim de Sá, E. F. 2000. Tectônica Cenozóica na Margem Equatorial da Província Borborema, Nordeste do Brasil (A contribuição da Geologia Estrutural no continente). Anais Simp. Nac. Est. Tectônicos: 25-28.
- Jardim de Sá, E. F.; Matos, R. M. D.; Moraes Neto, J. M.; Saadi, A. & Pessoa Neto, O. C. (1999).

- Epirogenia Cenozóica na Província Borborema: Síntese e discussão sobre os modelos de deformação associados. *Anais VII Simp. Est. Tectônicos*: 58-61
- Luiz, J. G., Costa e Silva, L. M. 2002. *Geofísica de Prospeção*. UFPA-CEJUP.
- Kellogg, O. D. *Foundations of Potential Theory*. New York: Dover, 1954, 384 p.
- Koeppen, W. 1936. *Das geographische System der Klimate* (Handbuch der Klimatologie, Bd. 1, Teil C). Apud. Beck, C.; Grieser, J.; Kottek, M.; Rubel, F.; Rudolf, B. 2006. *Characterizing Global Climate Change by Means of Köppen Climate Classification*.
- Manoel Filho, J. & Miranda, T. S. 2009. Formação Quebradas: Aquitard do Sistema Aquífero Apodi. *SBG Simp. Geol. Nordeste*. Fortaleza.
- Manoel Filho, J.; Demétrio, J. G. & Costa, W. D. 2003. Possibilidades de Ampliação da Exploração de Água Subterrânea na Zona Oeste da Bacia Potiguar, RN: Diagnóstico da Situação Atual. *FADE-LABHID-UFPE/FUNCATE*, Recife.
- MARA. 1992. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Normais Climatológicas (1961-1990). Sec. Nac. Irrigação. Brasília-DF.
- Matos, R. M. D. 1992. The Northeast Brazilian Rift System. *Tectonics*, v. 11, n. 4, p. 766-791.
- Medeiros, W. E.; Jardim de Sá, E. F.; Medeiros, V. C. & Lucena, L. R. F. 2001. Estrutura Geológica do Aquífero Açú na Borda Sul da Bacia Potiguar entre Apodi e Upanema, RN, Brasil (Faixa Upanema-Apodi). *Convênio: CAERN/FUNPEC/UFRN. Natal*. 29p.
- Milani, E. & Latgé, M. A. 1987. Modelagem gravimétrica da porção terrestre da Bacia Potiguar e suas implicações geotectônicas. *Boletim Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, v.1 (1) p.75-85.
- Motta, J. A. 1986. Reconhecimento Geofísico e Sedimentológico da Região de Cajá - Santa Rita - Paraíba. *Dissertação de Mestrado, UFPE - Recife*. 155 p.
- Orellana, E. 1972. *Prospeccion geoelectrica por campos viarables*. Paraninfo, Madrid, 523p.
- Oliveira, D. C. 1993. Contribuição ao estudo das estruturas rasas na Bacia Potiguar: análise estrutural do afloramento de Afonso Bezerra (RN) e adjacências. In. *SBG/Núcleo Minas, Simp. Nac. de Estudos Tectônicos*, 4, Belo Horizonte. p. 306-311.
- Pessoa Neto, O. C. 2007. Litoestratigrafia da Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, **15** (2) p.357-369.
- Schobbenhaus, C. (org). 2004. Programa Geologia do Brasil. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folha Jaguaribe. CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- Seeber, G. *Satellite Geodesy*. 1993. Walter de Gruyter & Co. Berlin – Germany. 531p.
- Sousa, D. C. 2002. Litoestratigrafia e deformação Cenozóica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar. Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- SUDENE. 1963. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Normais Climatológicas da Área da SUDENE. Serviço de Meteorologia do Ministério da Agricultura. Recife -PE.
- Teixeira, W.; Toledom, C. M.; Fairchild, T. R. & Taioli, F. 2001. *Decifrando a terra*. São Paulo, Oficina de Textos.
- Torge, W. 1991. *Geodesy*. Walter de Gruyter. 264p.

- Turcotte, D. L. & Schubert, G. 1982. Geodynamics applications of continuum physics to geological problems. Ed. John Wiley & Sons. New York.
- Ward, S. H. 1990. Resistivity and Induced Polarization Methods. USA. Investigations in Geophysics n° 5. Geotechnical and Environmental Geophysics. Editora Stanley H. Ward, v.I, p147-189.

ANEXO 1 - Tabela de Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litologia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dir)	Acamamento
ANA 01	659759	9443129	95	Furna Feia	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Calcarário crême microespáritico com textura ruíforme	25 Az 270 Az	Plano-paralelo
ANA 02	651004	9444513	83,3	Furna de Pedra	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Calcarário maciço, creme.		157/7°/NE
ANA 03	670914	9438294	262,2	Serra Mossoró	Mossoró	Arenito	Serra do Martins (?)	Arenito fino a médio bem selecionado com grãos de quartzo entre 01 e 02 mm. Coloração cinza com níveis interperizados (ferruginosos). Bem compactado, ocorre acamamento em alguns blocos.		310/28°/NE
ANA 04	674426	9431364	62,7	Riachinho	Mossoró	Calcário	Jandaíra	Várias feições circulares (raio de até 10 cm) oriundas da dissolução.	325 Az 75 Az	
ANA 05	651176	9422688	112,8	RN-14 Ass. St Clara	Mossoró	Calcário	Jandaíra	Fraturado, com níveis de dissolução. Compacto, coloração creme	10 Az	
ANA 06	645221	9422606	119,3	RN-14 Faz. Veneza	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Acamamento plano-paralelo. Vários poros (com até 2cm)	320 Az	74/4°/SE
ANA 07	626791	9422768	137,2	CE-266 Sítio Lagoa do Rocha	Tabuleiro do Norte	Calcário	Jandaíra	Maciço, coloração creme.	310 Az	
ANA 08	606648	9419791	90,1	CE-266	Tabuleiro do Norte	Arenito-Folhelho	Açu-Quebradas	Intercalação de arenitos e folhelhos. Arenitos finos, bem selecionado, matriz argilosa(caulínica), com estratificação plano-paralela e cruzada. Folhelho (argilito), coloração vermelho-escuro a verde.	95 Az	2/8°/E
ANA 09	607501	9420298	129,3	CE-266	Tabuleiro do Norte	Calcário	Jandaíra	Fraturado, preenchimento por material argiloso (coloração creme)	200 Az	55/11°/SE
ANA 10	613985	9436144	96,2	CE-495	Quixeré	Calcário	Jandaíra	Intemperizado, granulação fina, coloração creme.		
ANA 11	611032	9437982	25,8	Vale do rio Jaguaribe	Quixeré	Arenito	Açu	Arenito médio a grosso com níveis conglomeráticos, coloração cinza	38 Az 135 Az	20/12°/SE

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo (continuação)

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litologia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dir)	Acamamento
ANA 12	683732	9429483	9	Santa Helena	Mossoró	Solo areno-argiloso	Colúvio	Solo argiloso, drenagem (dir. 120 Az)		
ANA 13	685628	9435923	31,5	Estrada da Raiz	Mossoró	Solo areno-argiloso	Colúvio	Argilito arenoso, matriz argilosa de coloração marrom, grãos de qz grossos e angulosos.		
ANA 14	679371	9433592	54,9	Sítio Olítica	Mossoró	Solo areno-argiloso	Colúvio	Argilito-arenoso com níveis conglomeráticos, porções oxidadas. Zona basal, arenito grosso consolidado e matriz argilosa.	45 Az	
ANA 15	674245	9444689	69,3	Sítio Lajedo	Mossoró	Calcário	Jandaíra	Calcário maciço litográfico (esparítico), com cristais de calcita faneríticos	310 Az	
ANA 16	661596	9439172	149,5	Sítio Olítica - Pedreira	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Calcário maciço (micrítico), creme (superfície até 1,5 m). Calcário micrítico, acamamento plano-paralelo, creme esbranquiçado.	315 Az	93/4°S
ANA 17	662633	9434558	134,2	Caçimba Velha RN-015	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Calcário maciço, creme.		50/10°/140
ANA 18	661907	9441425	149,5	Reserva de área legal - Maisa	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Calcário maciço, cobertura cinza a creme		32/6°SE
ANA 19	662069	9441784	153,6	Reserva de área legal - Maisa	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Calcário maciço, micrítico, creme	22 Az	335/10°SW , 170/10°NE
ANA 20	662106	9441898	153,8	Reserva de área legal - Maisa	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Calcário maciço, micrítico, creme	55 Az	130/7°NE
ANA 21	656515	9450648	53	Pico Estreito	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Calcário maciço, micrítico, creme		
ANA 22	650969	9443397	89,1	Fuma de Pedra	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Calcário maciço, creme, esparítico	20 Az	
ANA 23	656604	9438813	107,8	Campestre - Ass. Santa	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Microesparito, coloração creme (esbranquiçado). Ocorrência de drusas calcíticas (dolomíticas) bem	125 Az 40 Az	55/2°NW

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo (continuação)

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litologia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dir)	Acamamento
ANA 24	649847	9453300	105,1	Serrote dos Porcos	Baraúna	Quartzito	Orós	Quartzito, blocos soltos		
ANA 25	649214	9452301	75,7	Pacatã	Baraúna	Calcário	Jandaira	Ooesparito, creme. Ocorrência de veios de calcita	65 Az	133/8°NE
ANA 26	649106	9448195	81,9	Lajedo do Ouro	Baraúna	Calcário	Jandaira	Microesparito, creme-esbranquiçado		165/subh
ANA 27	649837	9445095	82,3	Três Veredas	Baraúna	Calcário	Jandaira	Oomicrito, coloração creme.		
ANA 28	653245	9444007	78,1	Toca da Raposa	Baraúna	Calcário	Jandaira	Micrito, coloração creme. Maciço.		
ANA 29	656414	9443643	75,1	Toca da Raposa	Baraúna	Calcário	Jandaira	Esparito com recristalização de calcita. Maciço, coloração creme-esbranquiçado. Veios calcíticos ou dolomíticos preenchendo as fraturas.	0 Az	
ANA 30	646016	9435564	108,5	Sumidouro	Baraúna	Calcário	Jandaira	Sumidouro		
ANA 31	641018	9428612	128,8	Escada	Baraúna	Calcário	Jandaira	Ooesparito, creme.	310 Az 30 Az	15/10°NW
ANA 32	606279	9433374	38,5	Sítio Saquinho	Quixeré	Granito		Granito mesocrático, granulação grossa, com megacristais de K-f de até 2cm. Ocorrência de vários enclaves dioríticos alinhados segundo o fluxo magnético, 45Az		20/28°SE
ANA 33	607191	9430472	81,3	Escarpa da Chapada do Apodi	Limoeiro do Norte	Calcário	Jandaira	Calcarenito, fino, esbranquiçado		
ANA 34	605226	9430875	28,8	Vale do Rio Jaguaribe	Limoeiro do Norte	Arenito	Açu	Intercalação de arenitos médio a grosso (esverdeado) com argilitos arenosos (marrom).	300 Az 20 Az	320/8°SW (incipiente)
ANA 35	589331	9421618	50,8	Tabuleiro	Tabuleiro N	Ultramilonito		Protólito, quartzito. Foliação da alto ângulo. Possível centro da zona de cisalhamento.		16/65°SE

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo (continuação)

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litologia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dir)	Acamamento
ANA 36	588149	9424142	65,7	BR-116	Tabuleiro do Norte	Ortoznaisse		Ortoznaisse milonitizado, k-feldspato estirado, boudins.		330/51°NE
ANA 37	623349	9454421	12,5	Vale do Rio Jaguaribe	Russas	Arenito	Açu	Intercalação do arenito, argilito arenoso e folhelho. Rocha bem estratificada: cruzada e plano-paralela.	100 Az	50/11°SE
ANA 38	642843	9444536	101	Formigueiro	Jaguaruana	Calcário	Jandaíra	Intraespartito. Cratais de calcita recristalizado. Rocha de coloração creme. Maciço.		
ANA 39	654676	9429858	111,4	Rancho do Pereiro	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Dolina. Elipse, levemente alongada dir. N-S		
ANA 40	654728	9429731	111,7	Rancho do Pereiro	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Micrito, creme.	130 Az 330 Az	0/2°/90
ANA 41	652067	9426153	115	Boa Água - Faz. Paulista	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Micrito, creme.	20 Az	55/1°/NW
ANA 42	645622	9429148	116	Lajedo do Sebo	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Estratos plano-paralelos.	330 Az	
ANA 43	644821	9434874	111,6	Sumidouro	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Acamadamento plano-paralelo. Drusa de calcita	320 Az 210 Az	
ANA 44	640761	9433891	116	Mato Alto	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Calcário maciço recristalização de calcita, coloração creme (Dolomito ?)	90 Az	140/0
ANA 45	640013	9433814	127	Mato Alto	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Lajedo. Calcário maciço, creme. Relevô ruiforme (lapiás)	312 Az 35 Az	
ANA 46	638700	9436100	119	Sítio dos Macacos	Jaguaruana	Calcário	Jandaíra	Lajedo. Calcário maciço, creme. Relevô ruiforme (lapiás)	325 Az 70 Az	
ANA 47	636721	9437644	118	Sítio dos Macacos	Quixeré	Calcário	Jandaíra	Intraespartito. Maciço, creme. Estrutura plano-paralela.	110 Az	105/15°SW
ANA 48	636831	9437923	117	Baixa do Felix	Quixeré	Calcário	Jandaíra	Bioncrito. Calcário fossilífero, creme a branco. Estratificação cruzada e paralela.	105 Az	20/11°NW

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo (continuação)

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litologia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dlr)	Acamamento
ANA 49	641030	9440609	107	Lajedo do Mel	Quixeré	Calcário	Jandaira	Maciço, creme. Lajedo ruiforme.	300 Az	5/10°/SE
ANA 50	641187	9455499	111,7	Cabeço Branco	Jaguaruana	Calcário	Jandaira	Biosparito, maciço de coloração creme.	95 Az 200 Az	270/3°/S
ANA 51	641083	9456857	102	Lajedo Largo	Jaguaruana	Calcário	Jandaira	Biosparito, maciço creme	310 Az 20 Az	350/21°/NE
ANA 52	641339	9456841	96,2	Lajedo Largo	Jaguaruana	Calcário	Jandaira	Caverna do Lajedo Largo. Afloramento com estruturas cruzadas. Biosparito creme.	295 Az	160/20°/NE
ANA 53	636532	9447580	122,6	Peroaba	Jaguaruana	Calcário	Jandaira	Microsparito, creme com recristalização de calcita.		325/2°/SW
ANA 54	637954	9451659	128,6	Lagoa da Salsa	Jaguaruana	Calcário	Jandaira	Micrito		
ANA 55	635498	9450259	115,4	Escarpa da Chapada do Apodi	Jaguaruana	Calcário	Jandaira	Calcrete. Calcário maciço (intraesparito) no topo, na sequência basal (micrito) parte laminada (plano-paralela)		30/4°/SE
ANA 56	633531	9453594	26,7	Lagoa Vermelha	Jaguaruana	Arenito	Açu	Arenito fino bem selecionado, matriz argilosa de coloração rósea. Intercalado com arenito fino esverdeado, caulínico.		54/11°/SE
ANA 57	632120	9456202	10,8	Lagoa Vermelha	Jaguaruana	Arenito	Açu	Intercalação do arenito médio a fino com argilitos avermelhados (Quebradas). Arenito esverdeado, friável a consolidado.	280 Az	10/9°/100
ANA 58	634280	9458656	9,3	Corrego dos Macacos	Jaguaruana	Arenito	Açu	Arenito fino bem selecionado, coloração esverdeada a cinza. Níveis com intercalação de argilitos e folhelhos avermelhados		230/17°/SE
ANA 59	631085	9448787	104,4	Serra do Vieira	Russas	Arenito	Açu	Arenito fino bem selecionado, consolidado a friável. Coloração marrom a creme-cinza, micáceo. Lentes de argilito. Alguns níveis interdigitação de argilitos, folhelhos e arenitos.	0 Az 90 Az	355/4°/NE
ANA 60	632835	9446257	125,9	Serra do Vieira	Russas	Calcário	Jandaira	Micrito, maciço creme		160/10°/250

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo (continuação)

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litofia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dir)	Acamamento
ANA 61	638136	9441433	111	Bonsucesso	Quixeré	Calcário	Jandaira	Microsparito, maciço creme. Recristalização de calcita.	300 Az 20 Az	30/0
ANA 62	634760	9440901	123	Bonsucesso	Quixeré	Calcário	Jandaira	Micrito, creme a branco. Lajedo com laplãs e relevo ruiforme.	2 Az 45 Az	60/2°/SE
ANA 63	628838	9442034	129	Boa Esperança	Quixeré	Calcário	Jandaira	Ooesparito, creme.	60 Az	260/10°/SE
ANA 64	633626	9436076	125	Ubaia	Quixeré	Calcário	Jandaira	Calcário maciço, creme.		
ANA 65	634727	9429955	144	Pedras	Quixeré	Calcário	Jandaira	Esparito, branco. Vários níveis com recristalização de calcita		202/2°/SE
ANA 66	636748	9425969	146	Maxixe	Baraúna	Calcário	Jandaira	Microsparito, creme a branco. Recristalização de calcita	45 Az	220/5°/SE
ANA 67	643350	9423303	118,4	Fazenda Veneza	Baraúna	Calcário	Jandaira	Micrito, maciço	123 Az 165 Az	93/6°/183
ANA 68	664368	9435496	145,4	Vertentes	Baraúna	Calcário	Jandaira	Calcário maciço, creme. Micrito.		180/9°/E
ANA 69	640014	9438110	111,6	Lajedo do Boi	Baraúna	Calcário	Jandaira	Lajedo. Calcário maciço, creme, micrito. Relevo ruiforme com laplãs.	305 Az	10/horizontal
ANA 70	663167	9431246	116,5	São José	Baraúna	Solo areno-argiloso	Colúvio-Elúvio	Coloração creme a vermelho, com limonitas.		
ANA 71	663078	9426409	86,2	Nogueira	Mossoró	Solo arenoso/ Calcário	Colúvio/Jandaira	Contato do NQc e Jandaira. Calcário maciço, creme. Fraturas preenchidas por calcita	90 Az 0 Az	
ANA 72	632700	9432633	129	Fazenda Boa Sorte - Ubaia	Quixeré	Calcário	Jandaira	Calcário maciço, creme a branco.	340 Az 90 Az	37/5°/SE
ANA 73	632863	9432853	130	Ubaia	Quixeré	Calcário	Jandaira	Sumidouro.	20 Az	70/10/NW

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo (continuação)

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litologia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dip)	Acamamento
ANA 74	634137	9434951	124,8	Lajedo do Belinho	Quixeré	Calcário	Jandaira	Pedreira, garimpo. Microesparito, com recristalização de calcita. Creme a branco.	330 Az 245 Az	60/2°SE
ANA 75	637619	9432588	146	Maxixe	Quixeré	Calcário	Jandaira	Esparito, creme a branco.	250 Az 310 Az	15/2°SE
ANA 76	635956	9422470	131,5	Baixa Branca	Baraúna	Calcário	Jandaira	Oomicrito, coloração creme.		180/2°SE
ANA 77	632596	9422583	133,7	Lagoa do Rocha	Tabuleiro do Norte	Calcário	Jandaira	Ooesparito, creme a branco. Com recristalização de calcita.	300 Az	43/horizontal
ANA 78	629954	9422270	139	Lagoa do Rocha	Tabuleiro do Norte	Calcário	Jandaira	Micrito, maciço.	30 Az	185/4°SE
ANA 79	630194	9424815	139	Mato Alto	Quixeré	Calcário	Jandaira	Esparito, creme e maciço	35 Az 280 Az	60/4°NW
ANA 80	629167	9426633	136	Mato Alto	Quixeré	Calcário	Jandaira	Esparito, creme e maciço	300 Az 30 Az	
ANA 81	626631	9429758	135,8	Pedreira do Nonato	Quixeré	Calcário	Jandaira	Microesparito, branco.	290 Az	78/7°SE
ANA 82	601491	9425685	34,5		Limoeiro do Norte	Granito		Granito mesocrático, granulação grossa, com megacristais de K-f de até 2cm. Ocorrência de vários enclaves dioríticos alinhados segundo o fluxo magmático, 20Az		70/65°SE
ANA 83	601998	9426195	32,6		Limoeiro do Norte	Granito		Granito mesocrático, granulação grossa, com K-f de até 1cm. Ocorrência de vários enclaves dioríticos alinhados segundo o fluxo magmático, 20Az		
ANA 84	602889	9427208	25	Barragem das Pedrinhas	Limoeiro do Norte	Arenito	Açu/Quebradas/Jandaira	Arenito fino interdigitado com argilitos (Ritmito)		20/10°SE
ANA 85A	605152	9426601	103,2	Barragem das Pedrinhas	Limoeiro do Norte	Arenito	Açu/Quebradas/Jandaira	Arenito fino interdigitado com argilitos. Estratificação plano-paralela (paredeão E-W), camadas subhorizontais. Paredeão N-S, camadas verticalizadas.		130/10°NE

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo (continuação)

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litologia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dir)	Acamamento
ANA 85B	605152	9426601	103,2	Barragem das Pedrinhas	Limoeiro do Norte	Arenito	Açu/Quebradas/Jandaira	Ritmito, alternância de arenito finos caulínicos com argilitos amarronzados		25/65/NW
ANA 85C	604884	9426541	70,1	Barragem das Pedrinhas	Limoeiro do Norte	Arenito	Açu/Quebradas/Jandaira	Arenito fino com arenito argiloso (Ritmito)		200/4°/110
ANA 86	604922	9426472	73,2	Barragem das Pedrinhas	Limoeiro do Norte	Arenito	Açu/Quebradas/Jandaira	Arenito muito fino, bem selecionado de coloração branca. Intercalado com lentes argilosas de coloração cinza.	55/55°/NW	200/0
ANA 87	604834	9425810	105,8	Barragem das Pedrinhas	Limoeiro do Norte	Arenito	Açu/Quebradas/Jandaira	Calcário maciço no topo. Arenito fino a calcarenito e folhelho.	85	210/6°/SE
ANA 88	613687	9424779	143,6	Angico Grosso	Limoeiro do Norte	Calcário	Jandaira	Esparito, maciço creme.		310/8°/NE
ANA 89	621745	9422791	139,1	CE-266	Tabuleiro do Norte	Calcário	Jandaira	Microesparito, recristalização de calcita. Maciço, branco.	70 Az 110 Az	
ANA 90	622730	9420794	137,6	Sítio km 60	Tabuleiro do Norte	Calcário	Jandaira	Pedreira. Micrito branco, maciço.		60/0
ANA 91	615767	9444847	25,8	Alagoinha	Quixeré	Calcário	Jandaira	Aluvião do rio Jaguaribe		
ANA 92	618248	9441849	63,5	Alagoinha	Quixeré	Calcário/Argilito/Arenito	Jandaira/Quebradas/Açu	Interdigitação dos calcarenitos, argilitos e arenitos. Ocorrência de dobra inclinada fechada: 95/54°/E, 70/35°/SE). Calcarenito maciço com conteúdo fóssil.		250/10/SE
ANA 93	619939	9442383	127	Alagoinha	Quixeré	Calcário	Jandaira	Pedreira. Esparito, creme maciço. Recristalização de calcita	295 Az 30 Az	153/2°/NE
ANA 94	620853	9443835	118,5	Alagoinha	Quixeré	Calcário	Jandaira	Cachoeira. Estratificação cruzada, plano paralelo e variação faciológica da base para o topo.		250/0
ANA 95	622347	9444866	100	Escarpa da Chapada do Apodi	Quixeré	Calcário	Jandaira	Calcarenito, fino, esbranquiçado		320/18°/NE

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo (continuação)

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litologia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dir)	Acamamento
ANA 96	613546	9436467	56,2	Sítio Vertentes Santa Cruz	Quixeré	Calcário	Jandaira	Calcário intemperizado com surgência de água - Fonte		
ANA 97	671802	9425090	64,2	Pedra Branca	Mossoró	Calcário	Jandaira	Calcário maciço (esparrito) de coloração creme. Porção basal com marga. Acamamento horizontal		130/5°/SW
ANA 98	681671	9422991	12,6	Vale do Rio Apodi	Mossoró	Calcário	Jandaira	Calcário maciço (micrítico) creme. Bastante fraturado	310 Az	
ANA 99	675750	9437229	66,8	Cigano	Mossoró	Calcário	Jandaira	Calcário litográfico		
ANA 100	674523	9435736	71,2	Cigano	Mossoró	Calcário	Jandaira	Esparrito a biosparito. Ocorrência de vários fosséis.		0/4°/90
ANA 102	665570	9432769	151	Severo	Mossoró	Blocos do arenito soltos	NQc	Blocos de arenito médio bem consolidado, com níveis conglomeráticos		
ANA 103	670389	9432298	91	Severo	Mossoró	Calcário	Jandaira	Calcarenito, amarelo-claro com alta litogênese	330 Az	
ANA 104	671688	9435629	110	Serra Mossoró	Mossoró	Calcário	Jandaira	Calcário maciço de coloração creme		
ANA 105	671276	9437602	158	Serra Mossoró	Mossoró	Calcário	Jandaira	Calcário maciço amarelo-claro, bastante fraturado (Brecha de falha)	330 Az	
ANA 106	671105	9437861	195	Serra Mossoró	Mossoró	Calcário	Jandaira	Calcário - calcilito esbraquiçado		
ANA 107	670904	9437900	215	Serra Mossoró	Mossoró	Calcário/Arenito	Jandaira/Serra do Martins (?)	Contato presumido da fm Serra do Martins e Jandaira. Arenitos litificados imaturos		
ANA 108	640171	9443007	107,6	Formigueiro	Jaguaruana	Calcário	Jandaira	Calcário esparítico algalco, bem estratificado. Ocorrem juntas de alívio de pressão e estiolitos horizontais		315/suorh

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo (continuação)

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litologia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dir)	Acamamento
PO 01	610521	9421227	147,2	CE-266	Tabuleiro do Norte	Colúvio		Cava aberta, cobertura argilosa, capeando o calcário, blocos de calcário soltos. Ocorre nódulos de limonita.		
PO 02	679083	9438387	84,5	Esperança	Mossoró	Solo argiloso	Colúvio	Relevo plano, com algumas dolinas. Platações de cajoeiros		
PO 03	662826	9440996	138,2	Área de reserva legal - Meio	Baraúna	Calcário	Jandaira			
PO 04	664496	9443488	90	Área de reserva legal - Meio	Baraúna	Calcário	Jandaira			
PO 05	661965	9442031	148,5	Área de reserva legal - Maisa	Baraúna	Calcário	Jandaira		70 Az	
PO 06	666515	9448040	49,4	Maisa	Baraúna	Solo argiloso	Colúvio	Solo argilo-arenoso, marrom.		
PO 07	650649	9445464	81,3	Três Veredas	Baraúna	Calcário	Jandaira	Espárito		
PO 08	650520	9453265	76,5	Serrote dos Porcos	Baraúna	Calcário	Jandaira			
PO 09	648811	9455186	93,8	Pacatã	Baraúna	Calcário	Jandaira	Micrito, creme	280 Az	
PO 10	649238	9449729	79	Lajeiro	Baraúna	Calcário	Jandaira	Micrito, creme-esbranquiçado		
PO 11	653652	9445225	71	Toca da Raposa	Baraúna	Calcário	Jandaira	Maciço, Micrito.		
PO 12	660038	9447522	62	Vila Nova	Baraúna	Solo areno-argiloso		Coloração marrom		

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo (continuação)

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litologia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dir)	Acamamento
PO 13	648998	9429056	116,5	Assentamento Formosa	Baraúna	Calcário margoso	Jandaira	Crene		
PO 14	646905	9436762	102,4	Velame I	Baraúna	Calcário	Jandaira	Sumidouro		
PO 15	638107	9436089	122	Mato Alto	Baraúna	Calcário	Jandaira	Sumidouro		
PO 16	641748	9445354	102	Nossa Senhora de Fátima	Jaguaruana	Calcário	Jandaira	Sumidouro		
PO 17	638785	9453179	126	Lagoa da Salsa	Jaguaruana	Calcário	Jandaira	Brejo, pasto para gado, relevo plano		
PO 18	640357	9454289	127	Açude Velho	Jaguaruana	Calcário	Jandaira	Dolina		
PO 19	637726	9447072	123	Lagoa da Salsa	Jaguaruana	Calcário	Jandaira	Dolina		
PO 20	639495	9451895	129	Lagoa da Salsa	Jaguaruana	Calcário	Jandaira	Dolina		
PO 21	635272	9442799	124,6	Bonsucesso	Quixeré	Calcário	Jandaira	Dolina		
PO 22	625580	9444061	129,7	Serrado	Quixeré	Calcário	Jandaira	Dolina		
PO 23	637698	9423332	109	Baixa Branca	Baraúna	Calcário	Jandaira	Calcário, blocos soltos.		
PO 24	649043	9438647	103	Velame I	Baraúna	Calcário	Jandaira	Sumidouro		
PO 25	648959	9438247	104	Velame I	Baraúna	Calcário	Jandaira	Sumidouro		

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo (continuação)

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litologia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dir)	Acamamento
PO 26	648974	9438296	102	Velame I	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Sumidouro		
PO 27	641504	9444831	102,4	Fornigueiro	Jaguaruana	Calcário	Jandaíra	Pedreira Clandestina. Calcário maciço, algumas drusas de calcita. Blocos soltos.		
PO 28	663964	9424344	80,1	Escola Carmélia de Almeida	Mossoró			Drenagem. Solo argiloso com limonitas. Base: Marga.		
PO 29	631921	9432427	127,1	Ubaia	Quixeré	Calcário	Jandaíra	Blocos soltos. Maciço, creme a branco		
PO 30	633634	9422552	133	Baixa Branca	Baraúna	Calcário	Jandaíra	Caatinga.		
PO 31	631119	9422606	138	Lagoa do Rocha	Tabuleiro do Norte	Calcário	Jandaíra	Dolina		
PO 32	626631	9429758	135	Mato Alto	Quixeré	Calcário	Jandaíra	Micrito, branco. Dureza mais baixa, mais poroso.		
PO 33	610776	9432771	132	Tomé	Limoeiro do Norte	Calcário	Jandaíra	Blocos soltos. Valeta para água corrente, 45 Az.		
PO 34	608752	9427214	137	Cabeça Preta - Pivô Central	Limoeiro do Norte	Calcário	Jandaíra	Área de plantação de milho, feijão. Solo espesso, plano. Pivô Central		
PO 35	606717	9425045	143	Estação de Bombeamento	Limoeiro do Norte	Calcário	Jandaíra	Aduitor. Canais de irrigação, água do rio Jaguaribe. Estação de bombeamento		
PO 36	605172	9425577	142	Aduitor do Rio Jaguaribe	Limoeiro do Norte	Calcário	Jandaíra	Piscina da adutora do Rio Jaguaribe		
PO 37	611743	9424779	144	Área de Pesquisa-Frutal-DNOCS	Limoeiro do Norte	Calcário	Jandaíra	Área de pesquisa Frutal - DNOCS		
PO 38	619693	9422853	139	CE-266	Tabuleiro do Norte	Calcário	Jandaíra	Espirito. Blocos soltos		

Anexo 1 – Descrição dos Afloramentos Levantados em Campo (continuação)

Afl	UTM_E	UTM_N	Cota (m)	Localidade	Município	Litologia	Formação	Descrição de Campo	Fratura extensiva (dir)	Acamamento
PO 39	618855	9426829	145	Macava	Limoeiro do Norte			Cava aberta, cobertura argilosa, capeando o calcário. Ocorre nódulos de limonita. Solo espesso (2,5m)		
PO 40	619169	9432758	140,5	Lagoa da Casca	Quixeré			Solo argiloso, marrom. Limonitas com até 3 cm.		
PO 41	621324	9434156	136	Sítio Carnauba	Quixeré			Solo areno-argiloso		
PO 42	620894	9436386	133	Lagoinha	Quixeré	Calcário	Jandaira	Sumidouro.		
PO 43	623652	9445421	125	Serrado	Quixeré	Calcário	Jandaira	Dolina		
PO 44	635401	9440669	119,8	Bonsucesso		Calcário	Jandaira	Dolina em forma de elipse alinhada 225Az (maior eixo)		
PO 45	645235	9441654	102,8	Mato Alto		Calcário	Jandaira	Blocos de calcário, caatinga fechada		
PO 46	649225	9450398	75,3	Pacatânia	Baraúna	Calcário	Jandaira	Riacho alinhado, sem evidencia de falhamento		
PO 47	669558	9421617	58,3	Campo Pajeú	Mossoró	Calcário	Jandaira	Campo de Petróleo Pajeú - Solo residual calcário com limonitas		
PO 48	678281	9420522	28,1	Loteamento Cidade Oeste	Mossoró	Calcário	Jandaira	Solo residual do calcário Jandaira - Blocos soltos		

ANEXO 2 - Dados brutos do levantamento gravimétrico

Anexo 2 - Dados brutos do levantamento gravimétrico

Estação	Data	Hora	Leitura	Longitude	Latitude	X	Y	Elevação	Terreno	EscalaG	Gravidade	AtLive	Bouguer	Bouguer_C
Base	12/5/2009	11:07:00	1.697.100	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.416	978.147.053	15.121	9.638	*
1	12/5/2009	14:54:00	1.691.200	-37.32.07.02	-5.04.31.81	662369.0	9438806.0	135.525	0.055	1.736.335	978.140.920	110.487	95.322	95.376
Base	12/5/2009	17:30:00	1.697.193	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.578	978.147.053	15.121	9.638	*
Base	13/5/2009	07:17:00	1.697.170	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.621	978.147.053	15.121	9.638	*
2	13/5/2009	10:06:00	1.713.300	-37.25.35.71	-5.08.34.80	674403.0	9431314.0	58.378	0.042	1.759.131	978.163.555	108.235	101.703	101.744
3	13/5/2009	14:07:00	1.710.706	-37.36.37.49	-5.13.14.55	654004.0	9422769.0	108.350	0.015	1.756.362	978.160.774	119.615	107.491	107.506
Base	13/5/2009	19:20:00	1.697.244	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.640	978.147.053	15.121	9.638	*
Base	14/5/2009	07:44:00	1.697.275	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.713	978.147.053	15.121	9.638	*
4	14/5/2009	09:01:00	1.720.418	-37.20.21.65	-5.12.50.43	684055.0	9423437.0	19.464	0.032	1.766.481	978.170.952	102.473	100.296	100.328
5	14/5/2009	09:56:00	1.724.691	-37.22.50.66	-5.11.36.50	679472.0	9425720.0	24.107	0.036	1.770.856	978.175.338	108.627	105.929	105.966
6	14/5/2009	10:20:00	1.718.994	-37.25.35.85	-5.11.47.46	674384.0	9425396.0	55.454	0.034	1.764.993	978.169.481	112.393	106.188	106.221
7	14/5/2009	10:44:00	1.718.660	-37.28.09.24	-5.12.23.03	669658.0	9424315.0	61.339	0.036	1.764.638	978.169.131	113.699	106.835	106.871
8	14/5/2009	11:06:00	1.719.305	-37.30.48.38	-5.12.57.86	664755.0	9423257.0	71.665	0.027	1.765.290	978.169.767	117.384	109.365	109.391
Base	14/5/2009	12:37:00	1.697.205	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.537	978.147.053	15.121	9.638	*
9	14/5/2009	13:14:00	1.698.084	-37.34.40.05	-5.05.42.64	657651.0	9436641.0	108.179	0.028	1.743.426	978.147.942	108.757	96.652	96.680
10	14/5/2009	13:37:00	1.697.093	-37.32.06.95	-5.06.44.68	662362.0	9434725.0	126.952	0.040	1.742.401	978.146.917	113.250	99.045	99.084
11	14/5/2009	14:10:00	1.696.154	-37.29.30.39	-5.07.48.81	667179.0	9432744.0	129.555	0.053	1.741.429	978.145.946	112.797	98.300	98.353
12	14/5/2009	14:30:00	1.709.659	-37.26.58.77	-5.08.49.03	671844.0	9430883.0	73.243	0.043	1.755.302	978.159.818	109.022	100.827	100.870
13	14/5/2009	15:15:00	1.719.592	-37.24.58.57	-5.10.16.87	675539.0	9428176.0	43.811	0.040	1.765.509	978.170.025	109.753	104.850	104.890
14	14/5/2009	16:17:00	1.696.696	-37.37.12.60	-5.04.41.70	652957.0	9438523.0	95.213	0.019	1.742.000	978.146.517	103.600	92.946	92.965
15	14/5/2009	16:25:00	1.693.577	-37.39.45.13	-5.03.40.97	646263.0	9440398.0	95.999	0.017	1.738.799	978.143.316	100.909	90.167	90.184
16	14/5/2009	17:00:00	1.691.531	-37.41.59.30	-5.02.01.16	644137.0	9443472.0	98.755	0.018	1.736.710	978.141.227	100.108	89.058	89.076
Base	14/5/2009	17:46:00	1.697.119	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.465	978.147.053	15.121	9.638	*
Base	15/5/2009	07:36:00	1.697.193	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.604	978.147.053	15.121	9.638	*

Anexo 2 (continuação)

Estação	Data	Hora	Leitura	Longitude	Latitude	X	Y	Elevação	Terreno	EscalaG	Gravidade	ArtLivre	Bouguer	Bouguer C
18	15/5/2009	09:47:00	1.696.833	-37.46.15.79	-5.02.42.85	636235.0	9442207.0	115.383	0.024	1.742.242	978.146.815	110.645	97.734	97.758
17	15/5/2009	09:50:00	1.692.649	-37.44.05.94	-5.01.06.09	640240.0	9445171.0	106.337	0.024	1.737.944	978.142.517	103.979	92.080	92.104
19	15/5/2009	10:55:00	1.696.347	-37.48.25.10	-4.59.35.83	632263.0	9447958.0	120.647	0.088	1.741.729	978.146.309	112.579	99.080	99.167
Base	15/5/2009	12:12:00	1.697.062	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.433	978.147.053	15.121	9.638	*
Base	16/5/2009	06:43:00	1.697.028	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.387	978.147.053	15.121	9.638	*
20	16/5/2009	09:09:00	1.715.194	-37.33.32.94	-5.13.08.17	659687.0	9422952.0	87.914	0.017	1.761.092	978.165.930	118.494	108.657	108.673
21	16/5/2009	10:03:00	1.707.447	-37.39.19.34	-5.13.19.78	649020.0	9422619.0	115.069	0.013	1.753.142	978.157.995	118.887	106.011	106.024
22	16/5/2009	11:00:00	1.706.140	-37.41.55.01	-5.13.19.85	644227.0	9422627.0	110.560	0.012	1.751.800	978.156.669	116.169	103.797	103.809
23	16/5/2009	12:20:00	1.702.491	-37.44.38.04	-5.13.24.29	639207.0	9422501.0	122.051	0.014	1.748.036	978.152.927	115.953	102.295	102.310
24	16/5/2009	13:09:00	1.701.295	-37.47.19.07	-5.13.23.56	634249.0	9422533.0	129.103	0.015	1.746.790	978.151.695	116.900	102.454	102.469
25	16/5/2009	13:45:00	1.701.725	-37.49.59.23	-5.13.20.18	629318.0	9422646.0	133.296	0.014	1.747.218	978.152.133	118.648	103.732	103.746
26	16/5/2009	14:37:00	1.703.895	-37.52.39.62	-5.13.16.41	624380.0	9422771.0	134.836	0.015	1.749.428	978.154.357	121.364	106.276	106.292
27	16/5/2009	16:46:00	1.703.981	-37.55.23.46	-5.13.13.96	619336.0	9422855.0	136.658	0.019	1.749.487	978.154.452	122.032	106.740	106.759
28	16/5/2009	17:20:00	1.703.096	-37.58.04.19	-5.13.24.19	614387.0	9422549.0	142.005	0.028	1.748.577	978.153.552	122.735	106.846	106.873
Base	16/5/2009	20:45:00	1.697.169	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.534	978.147.053	15.121	9.638	*
Base	17/5/2009	06:09:00	1.696.049	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.741.352	978.147.053	15.121	9.638	*
29	17/5/2009	08:45:00	1.706.113	-37.52.59.10	-5.04.59.94	623807.0	9438019.0	129.145	0.032	1.751.728	978.156.739	124.213	109.762	109.794
30	17/5/2009	08:50:00	1.703.866	-37.56.54.03	-5.09.28.91	616559.0	9429771.0	134.696	0.029	1.749.422	978.154.431	122.421	107.349	107.378
31	17/5/2009	09:44:00	1.705.846	-38.00.28.22	-5.14.00.15	609951.0	9421452.0	142.810	0.049	1.751.477	978.156.474	125.743	109.763	109.812
32	17/5/2009	10:45:00	1.724.347	-38.05.01.19	-5.15.34.73	601543.0	9418560.0	30.765	0.000	1.770.503	978.175.486	109.747	106.305	106.305
33	17/5/2009	11:55:00	1.718.605	-38.08.29.89	-5.14.09.23	595122.0	9421195.0	33.384	0.026	1.764.612	978.169.580	105.039	101.303	101.329
34	17/5/2009	13:56:00	1.716.815	-37.50.37.45	-4.58.15.15	628191.0	9450443.0	40.541	0.055	1.762.750	978.167.690	109.590	105.053	105.108
35	17/5/2009	14:21:00	1.723.933	-37.52.43.34	-4.56.14.86	624320.0	9454144.0	18.820	0.026	1.770.054	978.174.988	110.703	108.597	108.623
36	17/5/2009	14:47:00	1.723.230	-37.55.29.52	-4.55.43.19	619203.0	9455125.0	18.448	0.020	1.769.321	978.174.249	109.985	107.921	107.940

Anexo 2 (continuação)

Estação	Data	Hora	Leitura	Longitude	Latitude	X	Y	Elevação	Terreno	EscalaG	Gravidade	Ad.Lvra	Bouguer	Bouguer C
37	17/5/2009	15:12:00	1.721.210	-37.58.12.93	-4.55.39.64	614170.0	9455242.0	19.686	0.034	1.767.235	978.172.157	108.290	106.088	106.122
38	17/5/2009	15:30:00	1.722.458	-38.00.32.98	-4.58.14.17	609949.0	9450503.0	29.332	0.049	1.768.509	978.173.428	111.873	108.591	108.640
39	17/5/2009	16:10:00	1.708.307	-38.04.40.78	-5.01.45.77	602208.0	9444016.0	90.430	0.036	1.753.954	978.158.864	115.244	105.125	105.161
40	17/5/2009	16:39:00	1.718.897	-38.07.42.70	-5.06.08.16	596595.0	9435966.0	58.208	0.022	1.764.825	978.169.727	115.008	108.495	108.516
41	17/5/2009	18:12:00	1.724.981	-38.03.16.86	-5.06.22.01	604780.0	9435529.0	27.989	0.035	1.771.058	978.175.940	111.833	108.702	108.737
42	17/5/2009	18:53:00	1.728.211	-37.58.55.53	-5.04.41.78	612832.0	9438595.0	30.366	0.078	1.774.378	978.179.260	116.321	112.923	113.001
Base	17/5/2009	20:45:00	1.696.968	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.307	978.147.053	15.121	9.638	*
Base	18/5/2009	06:50:00	1.696.927	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.242	978.147.053	15.121	9.638	*
43	18/5/2009	07:44:00	1.702.617	-37.38.42.26	-5.08.57.70	650179.0	9430666.0	104.522	0.013	1.748.089	978.152.867	111.684	99.989	100.002
44	18/5/2009	08:45:00	1.697.909	-37.40.33.51	-5.06.21.62	646763.0	9435467.0	102.142	0.014	1.743.270	978.148.047	106.826	95.397	95.411
45	18/5/2009	09:24:00	1.699.851	-37.43.18.12	-5.06.51.42	641692.0	9434562.0	109.822	0.016	1.745.282	978.150.058	111.075	98.786	98.802
46	18/5/2009	14:02:00	1.707.839	-37.31.58.63	-5.10.05.73	662604.0	9428549.0	96.075	0.029	1.753.555	978.158.331	114.237	103.487	103.516
47	18/5/2009	15:05:00	1.725.633	-37.20.59.99	-5.09.35.27	682890.0	9429435.0	20.870	0.044	1.771.813	978.176.589	109.424	107.088	107.132
48	18/5/2009	15:28:00	1.714.522	-37.20.25.56	-5.06.57.49	683963.0	9434279.0	55.743	0.050	1.760.387	978.165.162	109.463	103.226	103.276
49	18/5/2009	16:02:00	1.711.756	-37.20.48.95	-5.04.22.26	*	*	*	*	1.757.527	978.162.303	*	*	*
50	18/5/2009	16:22:00	1.703.670	-37.21.12.35	-5.01.47.04	682546.0	9443819.0	56.850	0.051	1.749.209	978.153.985	99.996	93.635	93.686
51	18/5/2009	16:58:00	1.702.448	-37.22.37.26	-4.59.27.20	679941.0	9448121.0	46.308	0.051	1.747.935	978.152.711	96.078	90.896	90.947
52	18/5/2009	17:36:00	1.702.367	-37.24.20.44	-4.56.41.03	676775.0	9453233.0	39.219	0.052	1.747.835	978.152.611	94.508	90.120	90.172
53	18/5/2009	18:28:00	1.702.811	-37.24.46.10	-5.03.32.37	675954.0	9440600.0	78.049	0.048	1.748.275	978.153.050	105.142	96.409	96.457
Base	18/5/2009	21:44:00	1.696.937	-35.06.59.00	-8.35.26.00	*	*	49.000	*	1.742.278	978.147.053	15.121	9.638	*

ANEXO 3 - Metodologia de densidade pelo método de mercúrio

Anexo 3 - METODOLOGIA DE DENSIDADE PELO MÉTODO DE MERCÚRIO

Para se obter a densidade da rocha a partir de mercúrio devemos seguir os passos seguintes:

- 1) Inicialmente deve-se pesar a plataforma de petri nº01(tara);
- 2) Enche totalmente o becker com o mercúrio;
- 3) Coloca-se sobre a plataforma de petri nº02 e passa a placa para extravasar o mercúrio (o qual é descartado), restando no becker a quantidade exata de mercúrio que preenche todo o recipiente, o qual deve ser colocado sobre a plataforma do petri 01;
- 4) Coloca-se a amostra dentro do recipiente, pressionando-se com a placa dentro até a sua submersão, recolhendo o material extravasado;
- 5) Pesa-se a plataforma de petri 01 com o mercúrio-Pm (peso do mercúrio extravasado)
- 6) Sabendo que a densidade do mercúrio é igual a 13,6 calcula-se a massa do mercúrio (Mm), dividindo-se o peso do mercúrio extravasado (PM) pela sua densidade (Dm):

$$Mm = Pm/Mn$$

- 7) Pesa-se a amostra (Pa)

- 8) Encontra-se finalmente a densidade da amostra (Da), dividindo seu peso (Pa) pela massa, onde sua massa (Ma) é igual a (Mn), já calculada;

Logo:

$$Da = Pa/Mn$$

OBSERVAÇÕES: A rocha da qual se quer saber a densidade, deve ser representada por no mínimo 7 (sete) amostras. A descrição acima é aplicada para cada amostra, fazendo-se o somatório das densidades e tirando a média, a qual represente a densidade da rocha.

ANEXO 4 – SEVs : Localização (UTM), curvas de campo e calculadas.

Anexo 4a – Coordenadas em UTM (SAD-69) das SEVs realizadas na área de estudo.

SEV	UTM E	UTM N	Cota (m)	SEV	UTM E	UTM N	Cota (m)
Sev 01	622858,05	9438240,00	135,808	Sev 26	642024,35	9422600,45	119,91
Sev 02	626718,91	9438001,04	133,806	Sev 27	658194,13	9422905,99	98,282
Sev 03	615495,94	9433571,19	144,436	Sev 28	666174,76	9423357,64	67,424
Sev 04	623634,08	9422757,77	138,341	Sev 29	664226,00	9433756,25	125,403
Sev 05	617672,13	9422875,12	145,015	Sev 30	658850,17	9436382,78	120,575
Sev 06	611700,98	9426239,41	142,87	Sev 31	669453,15	9431859,86	94,203
Sev 07	610305,56	9432420,34	132,416	Sev 32	662633,19	9429073,81	107,082
Sev 08	617749,77	9437514,01	136,047	Sev 33	675239,19	9434993,95	71,855
Sev 09	613368,02	9437447,53	39,772	SEV 33A	678313,31	9431759,58	83,632
Sev 09a	612421,47	9437966,79	32,956	Sev 34	673042,88	9425323,97	73,81
Sev 10	619575,80	9440551,84	129,17	Sev 35	680904,29	9437442,60	71,363
Sev 11	617077,84	9442710,56	33,647	Sev 36	685699,44	9442911,72	31,298
Sev 12	612436,47	9421897,66	146,79	Sev 37	681650,08	9445329,08	57,655
Sev 13	616971,62	9429072,29	138,678	Sev 38	628562,50	9427670,03	135,644
Sev 14	619950,33	9426193,34	140,683	Sev 39	631025,05	9422612,33	137,667
Sev 15	628074,25	9432600,20	134,18	Sev 40	675056,23	9428603,58	49,603
Sev 16	633716,75	9444857,04	128,926	Sev 41	689472,13	9437539,15	5,234
Sev 17	633677,28	9434555,13	126,933	Sev 42	662672,63	9440654,68	144,836
Sev 18	640384,90	9427822,34	130,234	Sev 43	653404,57	9452002,16	64,792
Sev 20	644144,14	9439098,35	109,308	Sev 44	685390,75	9435687,55	36,603
Sev 21	641115,47	9444927,09	105,779	Sev 45	667093,43	9447338,83	60,388
Sev 22	648431,61	9440244,73	99,538	Sev 46	659883,64	9452208,31	41,137
Sev 23	651969,03	9446463,37	74,577	Sev 47	657825,10	9450063,98	51,844
Sev 24	646270,38	9430990,85	111,796	Sev 49	633502,81	9453657,75	23,201
Sev 25	653907,36	9434087,94	109,379	Sev 50	629161,14	9449859,33	40,04

Anexo 4b – SEVs de campo e calculada.

