

PROGRAMA NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO DOS RECURSOS
HÍDRICOS - PROÁGUA NACIONAL
Acordo de Empréstimo N° 7420-BR
Banco Mundial

**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.**



**Relatório Final - RF
Volume II
Geologia e Geofísica**

República Federativa do Brasil

Luiz Inácio Lula da Silva

Presidente

Ministério do Meio Ambiente

Izabella Mônica Vieira Teixeira

Ministra

Agência Nacional de Águas

Diretoria Colegiada

Vicente Andreu – Diretor-Presidente

Dalvino Troccoli Franca

João Gilberto Lotufo Conejo

Paulo Lopes Varella Neto

Paulo Rodrigues Vieira

Superintendência de Implementação e Programas e Projetos (Coordenação)

Ricardo Medeiros de Andrade

Humberto Cardoso Gonçalves

Superintendência de Outorga e Fiscalização

Francisco Lopes Viana

Flávia Gomes de Barros

Gerência de Águas Subterrâneas

Fernando Roberto de Oliveira

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso

Flávio Soares do Nascimento

Marco Vinicius Castro Gonçalves

Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização

Carlos Alberto Martins (SEMARH/RN)

Elmo Marinho de Figueiredo (SEMARH/RN)

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso (ANA)

Fernando Roberto de Oliveira (ANA)

Flávio Soares do Nascimento (ANA)

Hilda Renck Teixeira (ANA)

João Lucio Faria de Oliveira (COGERH/CE)

Liduína de Carvalho Costa (SRH/CE)

Luiz Amisterdan Alves de Oliveira (SRH/CE)

Marcelo Augusto de Queiróz (CAERN/RN)

Napoleão Quesado Jr.(COGERH/CE)

Nelson César Fernandes Santos (IGARN/RN)

Nelson Paiva Raulino de Souza (FUNCEME/CE)

Paula Stein (SEMARH/RN)

Paulo Miranda Pereira (COGERH/CE)

Vera Maria Lucas Ribeiro (SEMARH/RN)

Victor Ygor Bonfim de Melo (SRH/CE)

Zulene Almada Teixeira (COGERH/CE)

Consórcio PROJETEC/TECHNE (Coordenação Geral)

João Guimarães Recena

Luiz Alberto Teixeira

Antonio Carlos de Almeida Vidon

Gerência do Contrato

Marcelo Casiuch

Membros da Equipe Técnica Executora

João Manoel Filho (Coordenador)

Admilson da Penha Pachêco

Benjamim Bley de Brito Neves

Carla Maria Salgado Vidal

Cristiana Coutinho Duarte

Edilton Carneiro Feitosa

Joaquim Mota

José do Patrocínio Tomáz Albuquerque

José Geilson Alves Demetrio

Maria Marlúcia Freitas Santiago

Marivaldo Gonçalves da Silva

Nelson da Franca Ribeiro dos Anjos

Nivaneide Alves de Melo

Paulo de Melo da Cunha Pedrosa

Roberto Kirchheim

Tiago Siqueira de Miranda

Carlos Danilo Câmara de Oliveira

Diogo Feitosa Setubal

Francisco Edjânio Rodrigues Ferreira

Pedro Vinícius de Souza

Rodrigo Holanda Ribeiro

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA

PROGRAMA NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS

**Acordo de Empréstimo N° 7420-BR
Banco Mundial**

**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.**

Volume II Geologia e Geofísica

Novembro 2010

Agência Nacional de Águas – ANA
Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Bloco B, L e M
CEP: 70610-200 , Brasília – DF
PABX: 2109-5400 / 2109-5252
Endereço eletrônico: <http://www.ana.gov.br>

Equipe:
Agência Nacional de Águas – ANA
Superintendência de Implementação de Programas e Projetos – SIP (Coordenação)
Superintendência de Outorga e Fiscalização - SOF

Elaboração e execução:
Consórcio PROJETEC-TECHNE

Todos os direitos reservados
É permitida a reprodução de dados e de informações, desde que citada a fonte.

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: ANA, SIP, 2010.

1. Recursos hídricos
2. Chapada do Apodi
 - I. Projeto Proágua Nacional
 - II. Agência Nacional de Águas
 - III. Consórcio PROJETEC-TECHNE.

SUMÁRIO

Apresentação	16
2 – LEVANTAMENTO E ANÁLISE DA GEOLOGIA ESTRUTURAL.....	18
2.1 – Bacia Potiguar – Uma Pequena Introdução à Geologia e Tectônica	19
2.2 – Arcabouço Estrutural	24
2.3 – Litoestratigrafia	26
2.4 – Geologia Local	30
2.4.1 - Mapeamento Geológico Estrutural	38
2.4.2- Acamamento	40
2.4.3 - Estruturas Rúpteis	44
2.4.3.1 - Formação Jandaíra (K2j).....	45
2.4.3.2 - Formação Açú (K12a)	49
2.4.4 - Falhas Distensionais da Cuesta da Chapada do Apodi.....	50
2.4.5 – Juntas Estilolíticas	53
2.5 – Evolução Tectônica e Estruturas Relacionadas à Área de Estudo	55
2.6 – Vazões Informadas Integradas à Geologia Estrutural	56
2.7 - Carstificação	58
2.7.1 - Cavernas	59
2.7.2 - Sumidouros	65
2.8 - Dolinas	68
3 – INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA	70
3.1 - Eletrorresistividade	71
3.1.1 - Serviços Realizados	71
3.1.2 - Interpretação das Medições Elétricas.....	73
3.1.2.1 - Discussão das (SEVs).....	74
3.1.2.2 – Discussão dos Perfis Laterais.....	76
3.1.3 - Produtos Obtidos	79
3.1.3.1 – Produtos das Sondagens Elétricas Verticais	79
3.1.3.1.1 - Mapa do Topo do Embasamento Cristalino	79
3.1.3.1.2 - Mapa de Isópacas da Formação Açú.....	84
3.1.3.1.3 – Mapa de Isópacas da Formação Jandaíra	86
3.1.3.1.4 - Mapa do Topo da Formação Jandaíra	89
3.1.3.1.5 - Mapa de Profundidade do Topo da Formação Açú.....	89
3.1.3.1.6 - Magnitude Elétrica dos Níveis da Formação Jandaíra ...	89
3.1.3.1.7 - Índice de Argilosidade da Formação Jandaíra Superior. 92	
3.1.3.1.8 - Perfis Geológicos	99

3.1.3.2 – Produtos dos Perfis Laterais.....	104
3.1.3.2.1 - Índice de Carstificação da Formação Jandaíra Superior	106
3.1.4 - Conclusões.....	113
3.2 – Estudos Gravimétricos.....	117
3.2.1 - Introdução.....	117
3.2.2 - Objetivos.....	117
3.2.3 – Materiais e Métodos.....	117
3.2.3.1 – Materiais - Instrumentação Utilizada.....	117
3.2.3.2 - Métodos.....	118
3.2.4 - Análise do Modelo 2D -Seção (A–A')	126
3.2.5 - Interpretação dos Dados Gravimétricos	129
3.2.5.1 - Mapa Gravimétrico Bouguer.....	129
3.2.5.2 - Mapa Gravimétrico Residual	132
3.2.5.3 - Mapa Gravimétrico Regional	132
3.2.6 - Modelagem Gravimétrica 3d da Topografia do Topo do Embasamento	136
3.2.7 – Modelagem gravimétrica 2D da Bacia do Apodi	136
3.2.8 – Descrição dos perfis modelados	140
3.2.8.1 - Perfil A-A':	140
3.2.8.2 - Perfil B-B':	140
3.2.8.3 - Perfil C-C':	141
3.2.8.4 - Perfil D-D':	142
3.2.8.5 - Perfil E – E':	143
3.2.8.6 - Perfil F-F':	143
3.2.8.7 - Perfil G – G'	144
3.2.8.8 - Perfil H-H':	145
3.2.8.9 - Perfil I – I'	146
3.2.9 - Integração dos perfis modelados 2D e sua correlação com o modelo 3D.....	147
3.2.10 – Análise e integração dos dados aeromagnéticos e gravimétricos	148
3.2.11 – Proposições para refinamento dos resultados obtidos.	150
3.2.12 - Conclusões	150
3.3 – Integração dos Estudos Geofísicos e Geologia Estrutural	151
3.4 – Perfilagem Geofísica.....	155
3.5 – Relatório da brazpoços – Perfilagem Ótica	159
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	162

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Cavernas visitadas na Formação Jandaíra nos Municípios de Baraúna e Jaguarana.....	62
Tabela 2.2 – Descrição dos sumidouros da Formação Jandaíra visitados na área de estudo.	66
Tabela 3.1 – Horizontes Elétricos.	74
Tabela 3.2 – SEVs Antigas Utilizadas.....	80
Tabela 3.3 – Poços Utilizados (SAD69).....	81
Tabela 3.4 – Valores das Coordenadas das Estações Gravimétricas*.....	121
Tabela 3.5 – Dados brutos do levantamento gravimétrico.	122
Tabela 3.6 – Amostras com valores de densidade (g/cm ³) das unidades litoestratigráficas presentes na área de estudo coletadas pelo LGA (Laboratório de Geofísica Aplicada – Dep. Geologia-UFPE).....	125
Tabela 3.7 - Localização dos Poços da PETROBRAS usados no perfil (A-A').	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mapa de localização da área de estudo dentro do contexto da Bacia Potiguar.	20
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.	21
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 <i>et al.</i> 2002).	24
Figura 2.4 – Compartimentação estrutural da Bacia Potiguar (modificado de Feitosa & Melo, 1998).	25
Figura 2.5 – Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar (Pessoa Neto <i>et al.</i> 2007).	28
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 <i>et al.</i> 2007).	29
Figura 2.7 – Mapa geológico da área de estudo com afloramentos visitados.	31
Figura 2.8 - Mapa geológico-estrutural da área de estudo.	39

Figura 2.9 – Diagrama da distribuição dos pólos das atitudes na Formação Jandaíra, produzidos com auxílio do software Stereonet® (n= número total de atitudes).	40
Figura 2.10 - Diagrama da distribuição dos pólos das atitudes na Formação Açú, produzidos com auxílio do software Stereonet® (n= número total de atitudes).	43
Figura 2.11 – Diagramas de roseta para fraturas extensivas. a) Direções do fraturamento principal. b) Direções do fraturamento secundário (n= número de medidas).....	45
Figura 2.12 – Diagrama de roseta com as direções das fraturas na Formação Açú (n= número de medidas).	49
Figura 2.13 – 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).	54
Figura 2.14 – Modelo de campo de tensões e estruturas (Neocomiano ao Neógeno) da Bacia Potiguar (modificado de Medeiros <i>et al.</i> 2001).	55
Figura 2.15 – Distribuição espacial das vazões informadas na área de estudo, sobre o mapa geológico estrutural.	57
Figura 2.16 – Mapa geológico-estrutural da área de estudo com feições cársticas.	60
Figura 3.1 – Correlação Resistência Transversal dos Resistivos x Espessura da Formação Jandaíra	73
Figura 3.2 – Corte geológico ao longo do maior comprimento da Delmonte, Município de Quixeré/CE (adaptado de Feitosa, 2000).....	77
Figura 3.3 – Localização dos perfis realizados na área de estudo.	78
Figura 3.4 – Mapa do topo do embasamento cristalino incluindo a compartimentação estrutural da área do projeto.	82
Figura 3.5 – Potenciometria da Região de Mossoró (Modificado de Feitosa, 1996).	83
Figura 3.6 – Isópacas da Formação Açú.....	85
Figura 3.7 – Isópacas da Formação Jandaíra	87
Figura 3.8 – Corte geológico genérico e esquemático transversal à Falha de Tiradentes	88
Figura 3.9 – Profundidade do topo da Formação Jandaíra	90
Figura 3.10 – Profundidade do topo da Formação Açú	91

Figura 3.11 – Mapa de resistências transversais do calcário inferior (calcário 2).....	93
Figura 3.12 – Zoneamento da maior magnitude dos calcários basais (calcário 2).....	94
Figura 3.13 – Mapa de condutâncias longitudinais da porção média da Formação Jandaíra (folhelhos e/ou margas).....	95
Figura 3.14 – Zoneamento da maior magnitude da porção média da Formação Jandaíra (folhelhos e/ou margas).....	96
Figura 3.15 – Mapa de resistências transversais do calcário superior (calcário 1).....	97
Figura 3.16 – Maior magnitude dos calcários superiores (calcário 1).....	98
Figura 3.17 – Mapa do índice de argilosidade da formação Jandaíra superior.	100
Figura 3.18 - Perfil Quixeré – SEV 40 (Perfil AA')	101
Figura 3.19 - Perfil SEV 100 BP – SEV 36 AA (Perfil BB')	102
Figura 3.20 - Perfil Poço 1-REC-1-RN – SEV 36 AA'(Perfil CC').....	103
Figura 3.21 - Mapa de resistividade aparente do calcário Jandaíra.	105
Figura 3.22 – Perfil de Resistividades Aparentes Vertentes – Borda da Bacia	108
Figura 3.23 – Perfil de Resistividades Aparentes ao longo da estrada Jucuri – Borda da Bacia.....	109
Figura 3.24 – Zoneamento do Índice de Carstificação IC.....	111
Figura 3.25 – Zoneamento do Índice de Carstificação IC2.....	112
Figura 3.26 – Mapa geológico com estações gravimétricas e de amostragem para densidade das rochas.	120
Figura 3.27 – Mapa Bouguer da Bacia Potiguar modificado de Milani & Latgé (1987), em detalhe a área de estudo.	126
Figura 3.28 – Localização do perfil A-A' no diagrama esquemático (Seção Geológica A) executado pela PETROBRAS dos poços MOP – 25 - RN e SMO – 1 – RN.	127
Figura 3.29 – Perfil A-A' modelado em 2D para calibração das densidades do embasamento (2,8 g/cm ³), Formação Jandaíra (2,58 g/cm ³) e Formação Açú (2,20 g/cm ³).	128

Figura 3.30 - Mapa de isolinhas de anomalias Bouguer sobreposto a área estudada, onde as grandes estruturas estão preservadas. Os sinais + e – indicam a presença de blocos positivos e negativos. Modificado de Milani & Latgé (1987).....	130
Figura 3.31 - Mapa de Anomalia Bouguer mostrando o ajuste entre as principais anomalias gravimétricas.....	132
Figura 3.32 – Mapa Gravimétrico Residual destacando anomalias de curto comprimento de onda.....	133
Figura 3.33 – Mapa Gravimétrico Regional mostrando as estruturas de caráter profundo e regionais.....	134
Figura 3.34 – Mapa de profundidade do topo do embasamento – (Modelo 3D) mostrando o contorno basal topográfico.	137
Figura 3.35 - Mapa de Anomalia Bouguer mostrando a localização dos perfis estudados.....	138
Figura 3.36 - Perfil A-A' (exagero de escala vertical 2,5)	139
Figura 3.37 - Perfil B-B'(exagero de escala vertical 2,5)	140
Figura 3.38 - Perfil C-C'(exagero de escala vertical 2,5).....	141
Figura 3.39 - Perfil D-D'(exagero de escala vertical 2,5).....	141
Figura 3.40 - Perfil E-E'(exagero de escala vertical 2,5)	142
Figura 3.41 - Perfil F-F'(exagero de escala vertical 2,5).....	143
Figura 3.42 - Perfil G-G'(exagero de escala vertical 2,5).....	144
Figura 3.43 - Perfil H-H'(exagero de escala vertical 2,5).....	145
Figura 3.44 - Perfil I-I'(exagero de escala vertical 2,5)	145
Figura 3.45 – Mapa aeromagnético de campo total da área de estudo.....	148
Figura 3.46 – Compartimentação estrutural mostrando o Depocentro de Baraúna.....	152
Figura 3.47 – Perfis gerados no P3 através da ferramenta multifunção.....	154
Figura 3.48 – Perfil de indução no poço PO3-VSC – ANA 1439.	155
Figura 3.49 - Perfil Sônico no poço PO3-VSC – ANA1439.	156
Figura 3.50 - Perfil Cáliper no PO3-VSC – ANA 1439.....	156
Figura 3.51 - Perfil de desvio no poço PO3.-VSC – ANA 1439.	157

Figura 3.52- Vista em planta da projeção dos desvios no poço PO3-VSC – ANA 1439.....	157
---	-----

ÍNDICE 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).	32
Foto 2.2 – Quartzito Orós, Serrote dos Porcos, alinhado NE-SW. (ANA-24; 649847, 9453300).	33
Foto 2.3 – Granitóide com enclave diorítico orientado segundo a foliação de fluxo magmático. (ANA-32; 606279, 9433374).....	33
Foto 2.4 – Inselbergs de Quixeré, granitóides como testemunhos do embasamento na borda sudoeste da Chapada do Apodi (ANA-32: 606279, 9433374).	34
Foto 2.5 – Arenito Açú médio a grosso de matriz predominantemente argilosa com estratificação cruzada de pequeno porte. (ANA-11; 611032, 9437982). ..	34
Foto 2.6 – Argilitos avermelhados, folhelhos e arenitos finos caulínicos da Formação Quebradas na cuesta da Chapada do Apodi. (ANA-92: 618248,9441849)	35
Foto 2.7 – Calcário Jandaíra carstificado e erodido, Lajedo Escada, Baraúna - RN (ANA-31; 641018, 9428612).	36
Foto 2.8 – Arenitos finos a argilitos avermelhados com níveis conglomeráticos, Formação Barreiras. (ANA-14:679371,9433592).....	37
Foto 2.9 – Arenito fino a médio, silicificado, da Formação Barreiras, Serra Mossoró (ANA-03; 670914, 9438294).....	37
Foto 2.10 – Aluvião do rio Jaguaribe, (BR-116; 593232, 9431181).....	38
Foto 2.11 – Camadas inclinadas da Formação Jandaíra (160Az/20°/NE), borda noroeste da Chapada do Apodi, Lajedo Largo em Jaguaruana - CE (ANA-52; 641339, 9456841).	41
Foto 2.12 – Juntas de alívio de pressão dispostas horizontalmente e paralelas ao acamamento (315 Az/horizontal) no calcário Jandaíra, Sítio Formigueiro – Jaguaruana/CE (ANA-61; 638136, 9441433).....	42
Foto 2.13 – Juntas de alívio de pressão cortadas por fraturas extensivas ortogonalmente formando mullions de interseção, calcário Jandaíra. Pedreira Bonsucesso (ANA-61; 638136, 9441433).	42

Foto 2.14 – Arenito Açú, plano de acamamento com direção 54 Az mergulhando 11° para sudeste (ANA-56; 633531, 9453594).....	43
Foto 2.15 – Furna dos Ossos, Lajedo Escada (ANA-31; 641018, 9428612). Feição desenvolvida segundo a direção do fraturamento principal, 310 Az.....	46
Foto 2.16 – Fraturas extensivas principais (NW-SE) conectadas ortogonalmente às secundárias, Calcário Jandaíra, Lajedo Mato Alto (ANA-46; 638700, 9436100).	47
Foto 2.17 – Calcário Jandaíra com veios de calcita preenchendo fraturas de direção N-S (ANA-29; 656414, 9443643).....	47
Foto 2.18 – Caverna do lajedo Largo, desenvolvida a partir da fratura, direção 295 Az (ANA-52; 641339,9456841).	48
Foto 2.19 – Fratura de direção 165 Az, com exibição do nível estático da água no aquífero Jandaíra (ANA-07; 626791, 9422768).....	48
Foto 2.20 – Fraturas no arenito da Formação Açú, preenchidas por material carbonático, direção 38 Az (ANA-11;611985,9436144).	49
Foto 2.21 – Escarpa sudoeste da Chapada do Apodi, arenitos finos intercalados com argilitos e folhelhos (Formação Quebradas), camadas com direção 130 Az mergulhando 10° para nordeste (ANA-85A; 605152, 9426601).	51
Foto 2.22 – 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).....	51
Foto 2.23 – Falha oblíqua com estrutura em roll-over, borda sudoeste da Chapada do Apodi (ANA-85: 605152, 9426601).	52
Foto 2.24 – Falha Vertente-Santa Cruz, evidencia da tectônica distensional durante o Neógeno (ANA-10: 613985,9436144).....	53
Foto 2.25 – Ocorrência de estilolito na Formação Jandaíra. Em destaque as setas vermelhas mostrando o posicionamento das juntas na horizontal. Serra do Vieira – Jaguaruana/CE (ANA-59: 631085,9448787).....	54
Foto 2.26 – Fissura alargada pela movimentação da água gerando sumidouro na Formação Jandaíra. Estrutura alinhada 310 Az. (ANA-40:654676,9429858)	58
Foto 2.27 – Galeria com abóboda em forma de arco na Caverna do Letreiro, localizada na Área de Reserva Legal, Baraúna – RN (ANA-19; 662069, 9441784).	61
Foto 2.28 – Estalactite em destaque na Caverna Pinga-Pinga localizada na Área de Reserva Legal, Baraúna – RN (ANA-18; 661907, 9441425).	63

Foto 2.29 – Pinturas rupestres grafadas no calcário Jandaíra, Abrigo do Letreiro, Área de Reserva Legal (ANA-19; 662069; 9441784).....	64
Foto 2.30 – Boca de entrada da caverna Furna Feia (ANA 01; 659759; 9443129).....	64
Foto 2.31 – Espeleotemas no salão da caverna Furna Feia (ANA 01; 659759; 9443129).....	65
Foto 2.32 – Sumidouro intermitente no Calcário Jandaíra, Sítio Ubaia (ANA-73; 632863, 9432853).....	67
Foto 2.33 – Sumidouro elíptico com eixo maior alinhando a 5 Az, Sítio Velame I, Baraúna (PO-24; 649043, 9438647).....	67
Foto 2.34 – Dolina formada por dissolução no Calcário Jandaíra, totalmente preenchida por água durante as chuvas (ANA-39; 618855, 9426829).....	68
Foto 2.35 – Dolina formada por colapso ou abatimento do Calcário Jandaíra. Localizada na região do Mato Alto, Baraúna – RN (ANA-44; 623652, 9445421).....	69

Apresentação

Neste segundo volume do Relatório Final, são descritos os estudos geológicos e geofísicos previstos nos Termos de Referência. Os referidos serviços incluem:

- ✓ **Levantamento e interpretação da geologia estrutural:** trata, no **capítulo 2**, dos trabalhos de levantamento de campo focados na geologia estrutural, com descrição da natureza litológica dos afloramentos, direção e mergulho das camadas, lineamentos, juntas e fraturas, assim como do desenvolvimento das formas cársticas, representadas por cavernas, sumidouros e dolinas.
- ✓ **Investigação geofísica:** descreve, no **capítulo 3**, os levantamentos de superfície e as condições de realização das sondagens elétricas verticais, dos perfis laterais de resistividade e das estações gravimétricas previstas. Apresenta a interpretação dos resultados materializada sob a forma de mapas de contorno estrutural e de espessura dos aquíferos Jandaíra e Açú e de mapa de contorno estrutural do topo do embasamento cristalino. Trata ainda das perfilagens geofísicas realizadas no poço exploratório da Formação Açú em Vertentes Santa Cruz a sudeste de Quixeré e das perfilagens óticas realizadas nos 2 (dois) poços de pesquisa (exploratórios) construídos na Formação Jandaíra em Furna de Pedra e Sítio Formigueiro.

2 – LEVANTAMENTO E ANÁLISE DA GEOLOGIA ESTRUTURAL

2.1 – 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

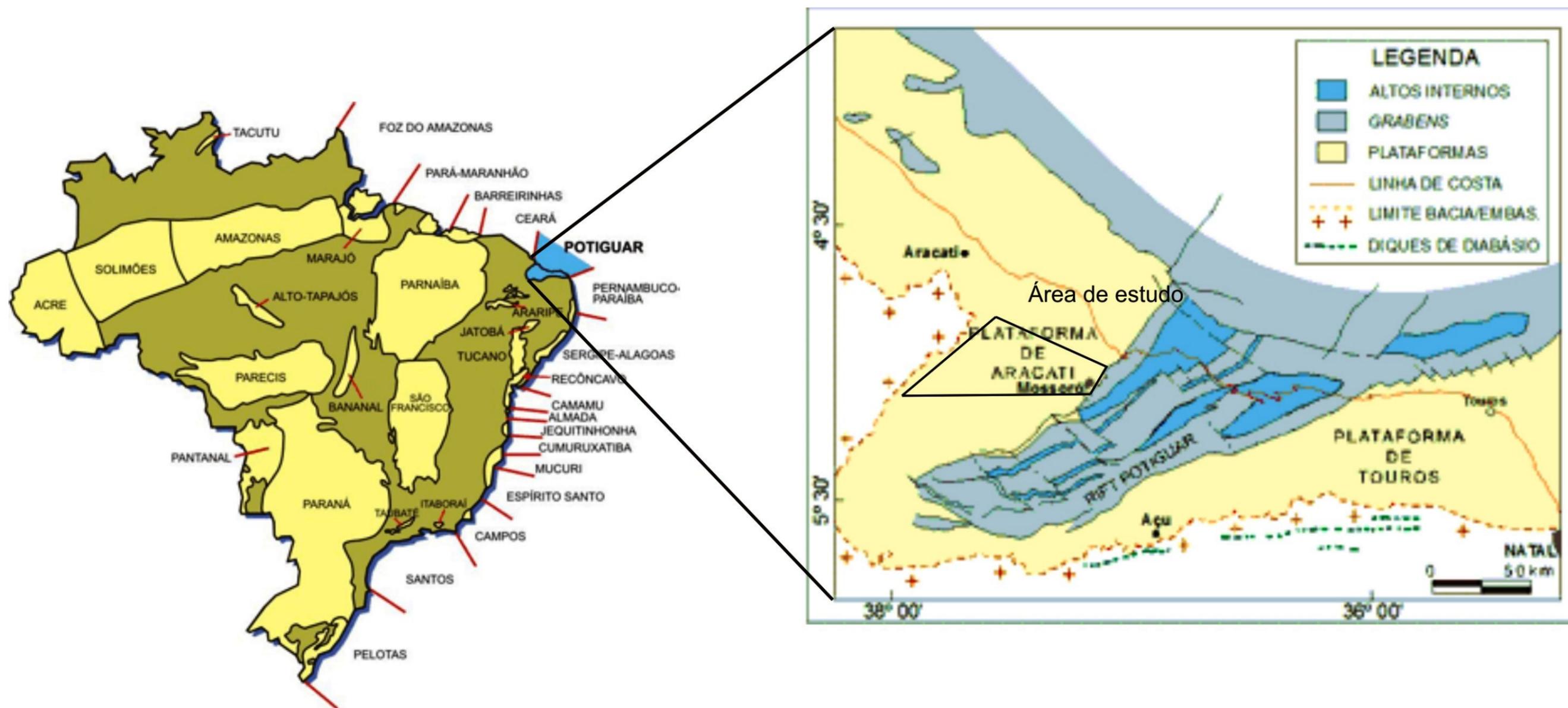


Figura 2.1 – Mapa de localização da área de estudo dentro do contexto da Bacia Potiguar.

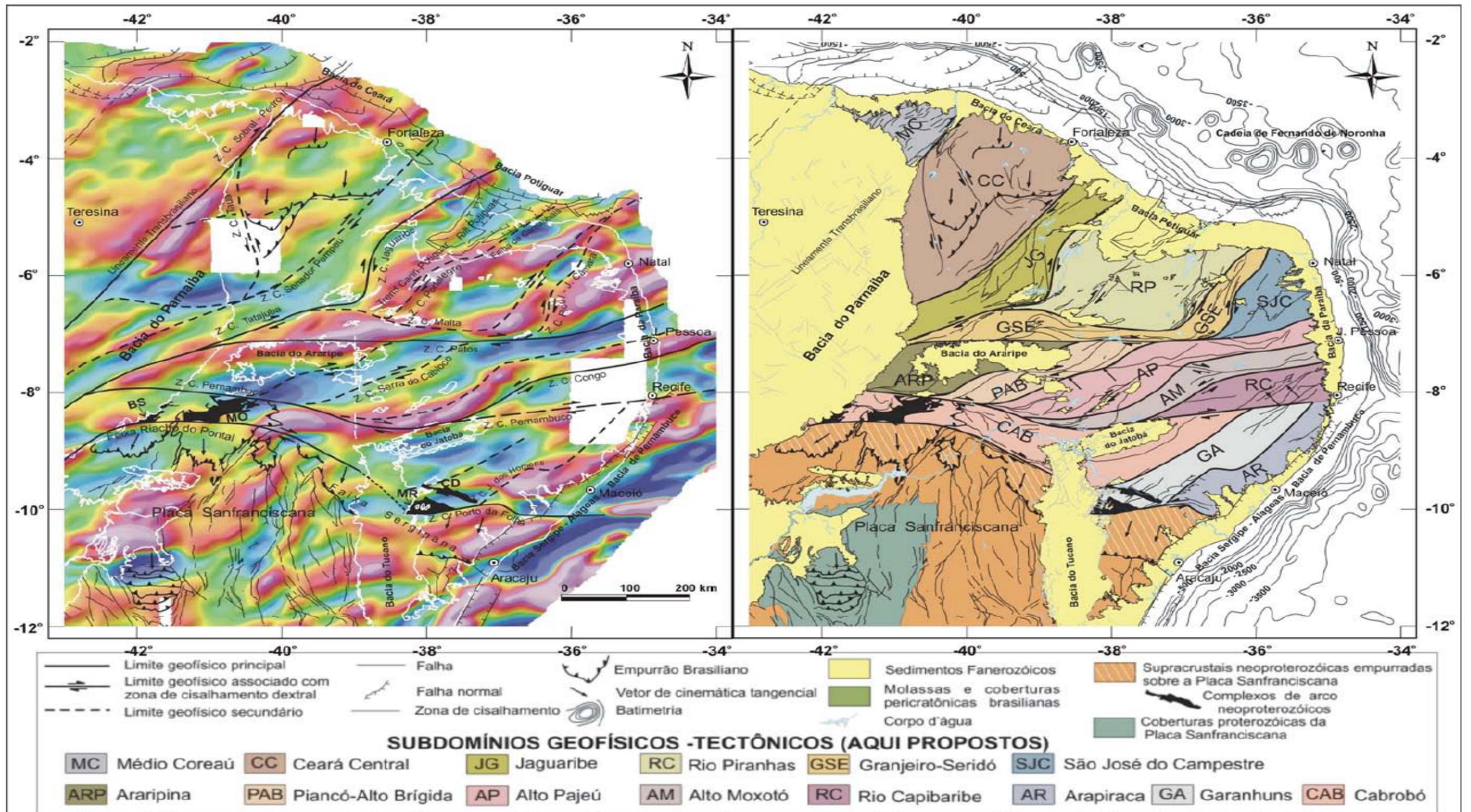


Figura 2.2 – Comparação da interpretação dos subdomínios geofísicos-TECTÔNICOS da Província Borborema com o mapa de componente regional do campo magnético total reduzido ao pólo magnético. Fonte: Oliveira, 2008.

continentais para sedimentos marinhos; 3) A sequência **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 2.3). O contexto *on shore*, continental, emerso é predominantemente marcado pela sequência 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 agradação) do terciário mais superior.

O conhecimento da bacia Potiguar pode ser considerado como muito bom a excelente, face aos trabalhos de geologia da PETROBRAS (sucendendo a SUDENE e outras empresas) desde a década de 60, mais precisamente 1965, quando a CONESP/SUDENE encontrou os primeiros shows de óleo no poço de Mossoró. Os mapeamentos geológicos de superfície, os levantamentos geofísicos diversos (no continente e no mar), os perfis de poços exploratórios (estratigráficos) e produtores etc. somam um arsenal invejável de conhecimento, que pode ser colocado por referência em escala de detalhe (1:25.000), sem problemas. Este acervo colossal de dados, em grande parte inédito, está de certa forma bem sintetizado nos trabalhos de Bertani *et al.* (1990) e Pessoa Neto *et al.* (2007), que são referências obrigatórias, por trazerem sínteses de vários trabalhos e até mesmo de teses de doutoramento. Mapas geológicos 1:100.000 (CPRM, PETROBRAS) e 1:50.000 (PETROBRAS, Curso de Geologia da UFRN) são francamente disponíveis, devendo ser citados aqui como referências para a análise de conjunto os mapas 1:500.000 realizados pela CPRM –Serviço Geológico do Brasil, para os estados do Ceará (Cavalcante *et al.* 2003) e do Rio Grande do Norte (Angelim *et al.* 2007).

De certa forma, para cobrir os interesses de cunho hidrogeológico, e os mapas de gravimetria e eletro-resistividade, e os estudos de cunho regional, o acervo acima citado se prestou sem apresentar maiores problemas. Localmente, no levantamento de campo, algumas observações adicionais e correções foram gradativamente sendo feitas, enriquecendo o conhecimento geral. Isto é absolutamente válido para o contexto/registro litoestratigráfico de interesse imediato, da sequência marinha drifte inferior (Açu-Quebradas-Jandaíra) e o topo da regressiva (Barreiras-Tibau), habitat do problema hidrogeológico.

Ao lado dos dados hidrogeológicos (porosidade, permeabilidade, transmissividade) a serem dissertados para estas unidades de interesse imediato do projeto, é necessário fazer uma disgressão no contexto litoestrutural observado, com a adição de componentes de permeabilidade certamente auferidas no desenvolvimento dos falhamentos cretácicos e terciários, e mais ainda diante dos processos de evolução fisiográfica da região de análise. Isto é dito e lembrando os processos de reativação das discontinuidades estruturais do embasamento, acima já mencionados.

Ao olhar o mapa geológico da Bacia Potiguar, mesmo em escala de reconhecimento (e.g. 1:500.000 (Angelim *et al.* 2007)) verifica-se um interessante conjunto de falhas cortando os sedimentos expostos da bacia: direções NNE-SSW (e.g. Bonsucesso, Forquilha, Macau, Jandaíra, etc), NE-

SW (e. g. Mossoró-RN 015, Afonso Bezerra, norte da Serra do Mel etc.). Outro conjunto que pode ser destacado é aquele de falhas Ca. E-W (Apodi, Felipe guerra, lineamento Ceará Mirim etc.). Quando se faz histogramas das fraturas abertas (distensionais) observadas no campo (vide tópico 2.4.2), são reiteradas estas direções estruturais como marcantes no quadro de distensão (no máximo, a partir do Campaniano superior). Verificamos no campo, que algumas destas direções foram reiteradas em movimentos rupturais no final do Neógeno (caso de Portoalegre, por exemplo). Uma análise estrutural, definindo tempo e ações destas fraturas é desejável, mas é uma tarefa para ser completada em muitos mais anos de observações.

Para isto, é necessário estreitar a malha de observações e definir contextos específicos. Várias tentativas têm sido feitas por alunos e professores das escolas de geologia do Ceará e do Rio Grande do Norte. Pode ser destacada, por exemplo, a análise feita por Sousa (2002, tese de doutoramento e trabalho publicado com seu orientador, 2008), onde conseguiu distinguir quatro etapas sucessivas (do Neoproterozóico ao Pleistoceno) (**figura 2.3**) de evolução de fraturas, chegando a um esquema final semelhante a este acima apontado. É preciso acrescentar que os movimentos tectônicos são ainda hoje frequentes na bacia como um todo, com ocorrências de sismos, e estes fenômenos e processos são e estão de acompanhamento diuturno por equipes especializadas (convênio PETROBRAS-UFRN).

Do ponto de vista geomórfico, a Bacia Potiguar tem sido tradicionalmente considerada como a chapada típica da superfície Velhas (rebaixada) ou Sertaneja dos clássicos compêndios e “papers” da geomorfologia. Há dois aspectos adicionais a acrescentar, que têm escapado dos pesquisadores e são de importância, inclusive no tema hidrogeologia que é o nosso propósito básico.

Em primeiro lugar, é preciso exaltar o fato que a sequência transgressiva inundou um relevo previamente aplainado, mas com *inselbergs* de vultos (graníticos, milonitos etc.). Na região mais ocidental da bacia há várias ocorrências de notórios *inselbergs* do embasamento afogados pela sequência transgressiva (Quixeré e adjacências) (vide tópico 2.3). Esta superfície inundada (e aplainada com maior ou menor intensidade) deve corresponder à Superfície *Post-Gondwana* (pós-Pangea) proposta por Lester King. Este é um fato notório que merece posterior reexame e ampla divulgação.

Em segundo lugar, é preciso enfatizar que o aplainamento da chapada é enganoso. O uso do GPS mostra claramente que a chapada tem ondulações e oscilações de cotas notáveis (extremos de 30 a 210 m), estando muito longe de ser uma superfície plana e inclinada para o mar, como muitos tem simplisticamente assumido. Estas oscilações de cotas têm a ver com linhas de falhas, baixos e altos, de processos rupturais cortando a sequência drifte inferior (Açu + Jandaíra), numa feição já dissertada outrora como de tectônica de teclas. Além disto, os processos erosivos da superfície da chapada foram notáveis (centenas de metros foram exumados, com variações para mais e para menos). Esta exumação causou esforços de alívio notáveis (σ_1 na vertical), não contabilizados por vários autores anteriores. Estes processos de alívios são responsáveis por notáveis juntas horizontais a subhorizontais, de até 5-10 cm de possança, que passam a compor com as estruturas rúpteis

subverticais (estruturando *mullions* de intersecção acima assinaladas e passam a incrementar substancialmente a permeabilidade (e a fomentar processos de carstificação), principalmente no caso do Jandaíra.

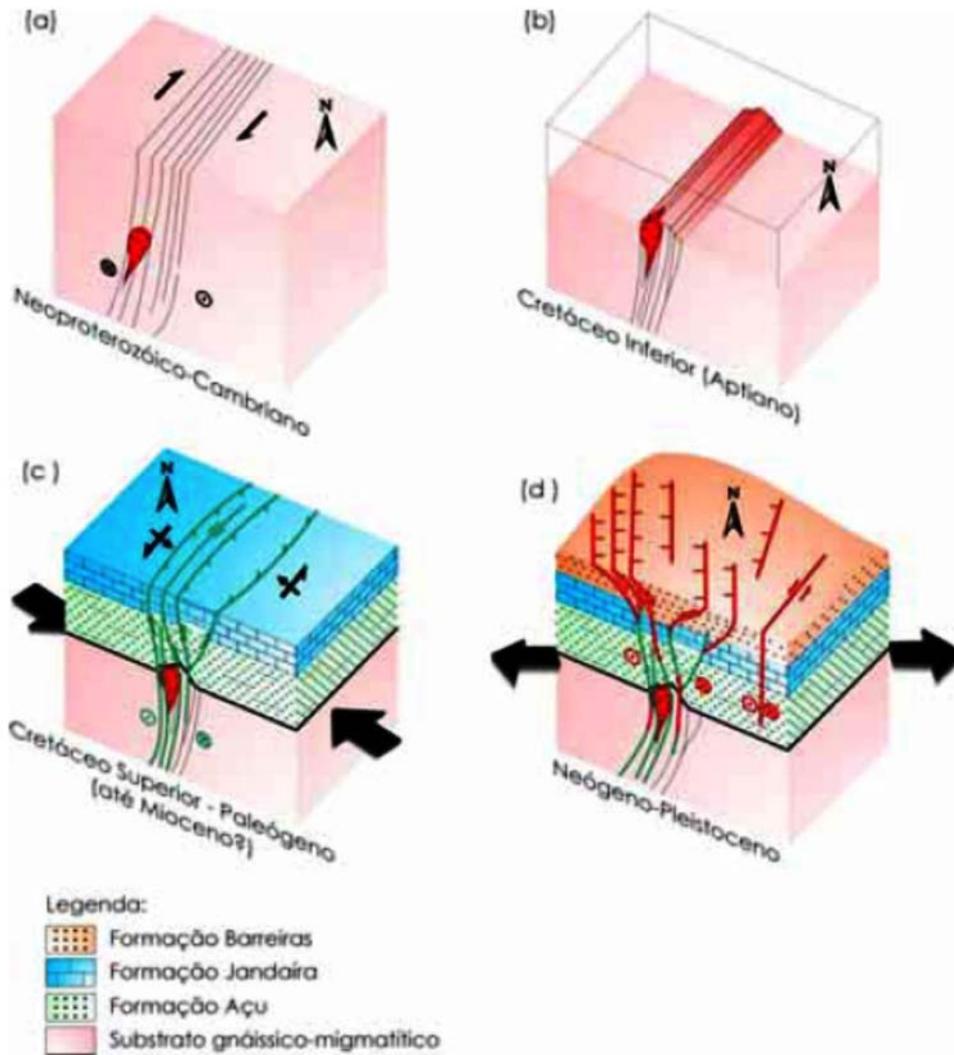


Figura 2.3 – Modelo de evolução tectônica da Bacia Potiguar ilustrando a variação do campo de tensões e eixos cinemáticos do Neoproterozóico ao Pleistoceno (Fonte: Sousa *et al.* 2002).

2.2 – Arcabouço Estrutural

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**.

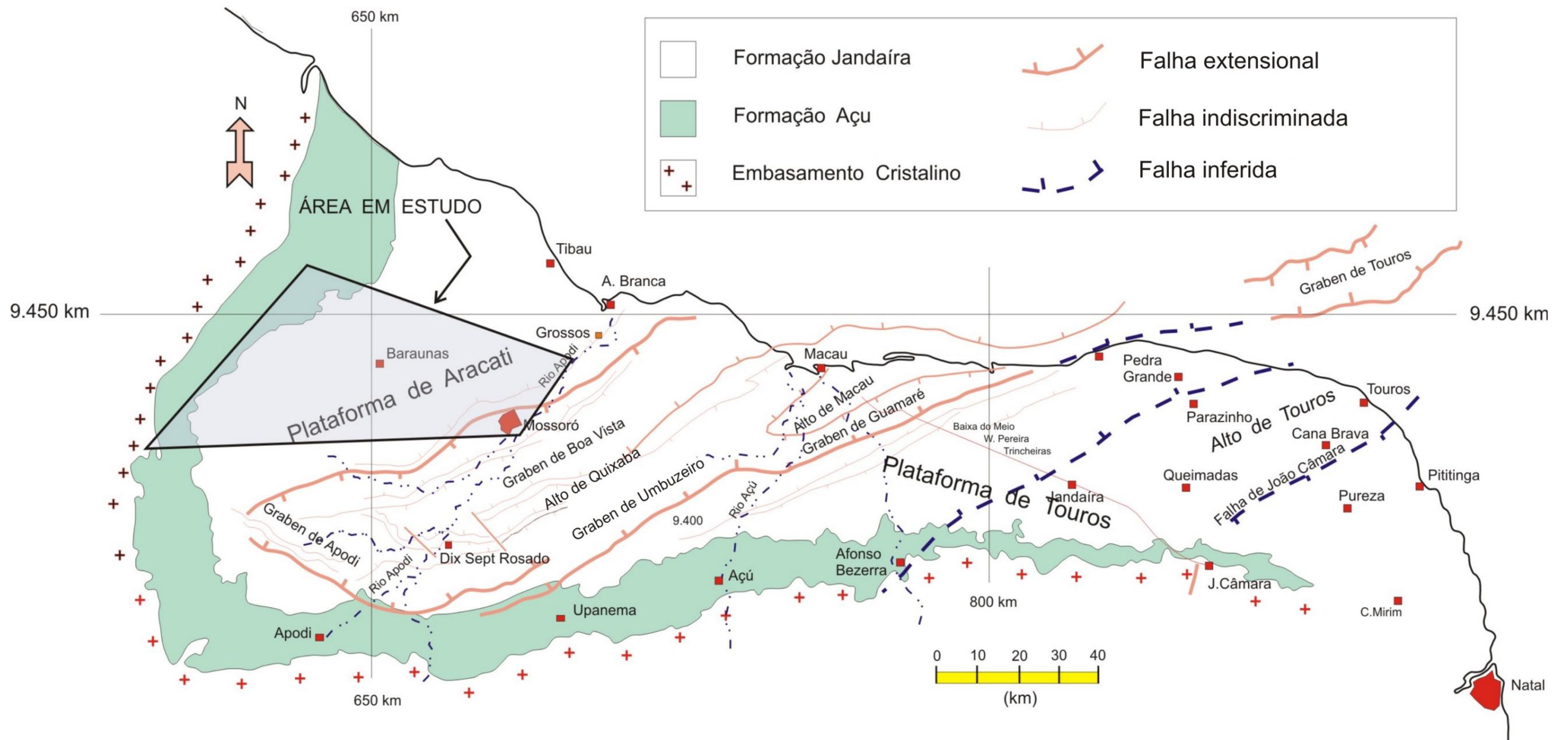


Figura 2.4 – Compartimentação estrutural da Bacia Potiguar (modificado de Feitosa & Melo, 1998).

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 Rifte 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 Rifte Potiguar.

2.3 – Litoestratigrafia

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 Rifte

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-Rifte

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 Açú, 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.

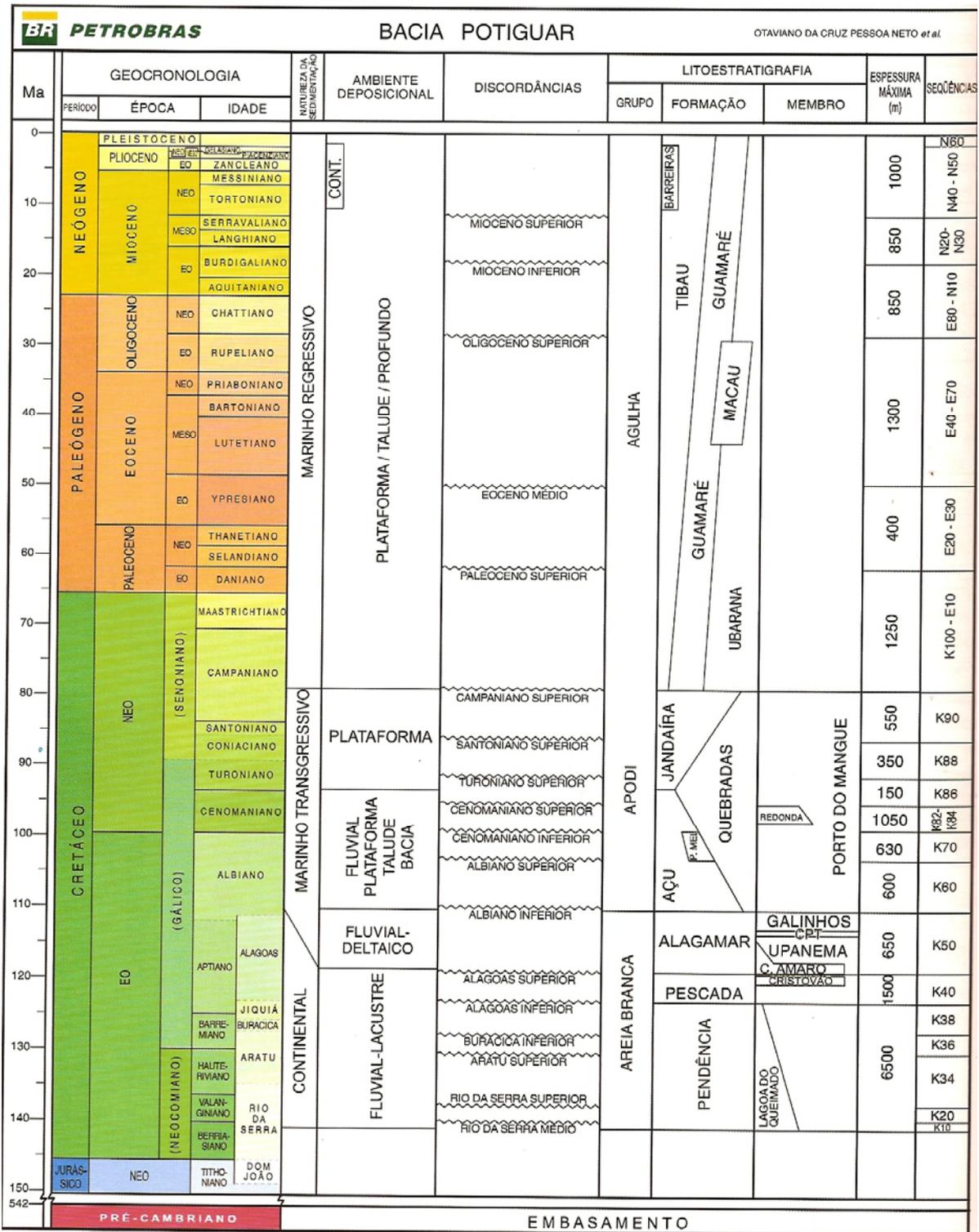


Figura 2.5 – Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar (Pessoa Neto *et al.* 2007).

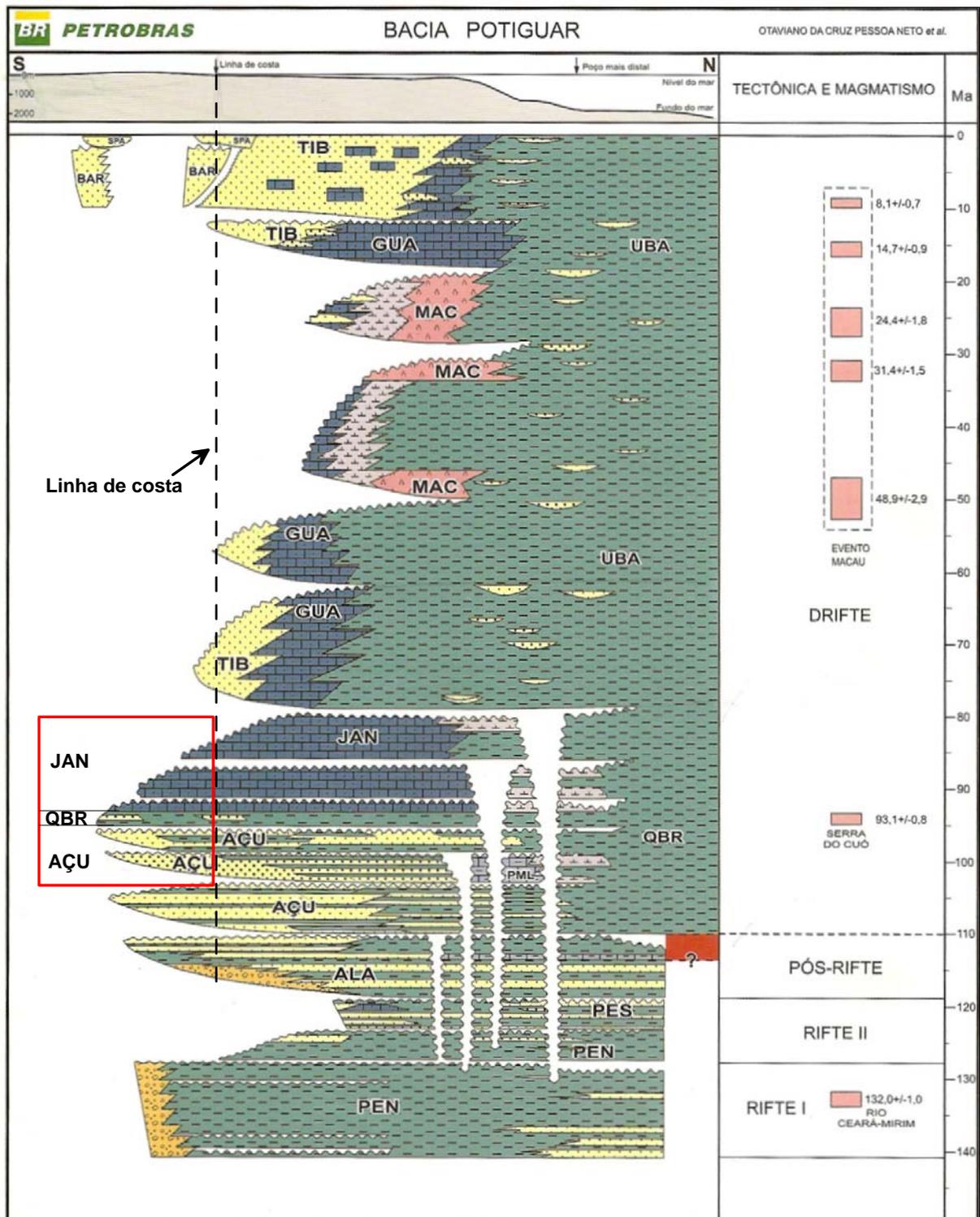


Figura 2.6 - Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar com destaque da linha de costa (traço preto interrompido) e do Grupo Apodi (retângulo vermelho) (modificado de Pessoa Neto et al. 2007).

2.4 – 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. Essas planícies contêm depósitos aluviais que formam aquíferos livres cuja potencialidade está intrinsecamente ligada às interações com os respectivos rios.

Durante a etapa de campo foram visitados 156 afloramentos, dentre os quais 108, denominados como “ANA”, são afloramentos com informações geológicas (lajedos, escarpas, furnas, cavernas) e 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 ocorre a Formação Barreiras, onde o relevo é plano, dissecado e erodido dificultando a ocorrência de afloramentos dessa Formação.

A descrição dos afloramentos com a localização geográfica, cota do terreno, litologia, formação geológica, atitudes de camadas e *trends* estruturais é mostrada no **anexo A2.1**.

O mapa geológico da região foi confeccionado e interpretado 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**). A caracterização geológica segue descrita pela seguinte sequência:

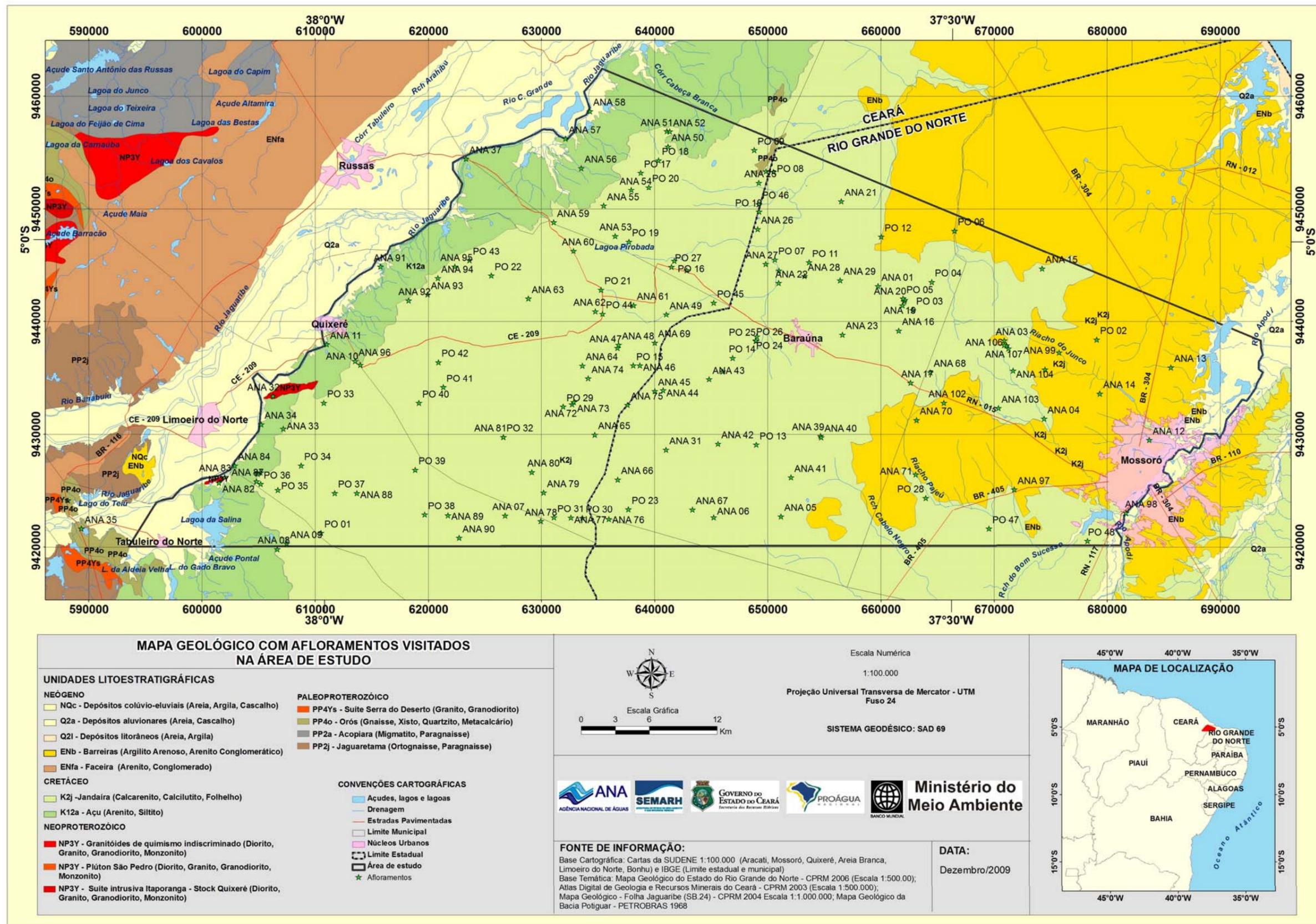


Figura 2.7 – Mapa geológico da área de estudo com afloramentos visitados.

➤ **Embasamento Paleoproterozóico a Proterozóico**

Na Plataforma de Aracati, o lineamento estrutural NE 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 que condicionou vários altos do embasamento, cuja expressão geomorfológica em superfície pode ser observada em duas unidades proeminentes que afloram dentro da área de estudo e estão evidenciadas a norte pelos quartzitos do Grupo Orós (Serra Dantas e Serrote dos Porcos) e a sudoeste pelos granitóides de Quixeré.

a) Paleoproterozóico: Grupo Orós (PPOq)

As rochas do Grupo Orós são do Estateriano e compostas por metacalcários, xistos, gnaisses e quartzitos. Na área de estudo essas rochas afloram no extremo norte, ocorrem como blocos rolados de quartzitos (**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. Infelizmente não foi possível obter a relação de contato desta unidade com a Formação Jandaíra, devido à ausência de afloramentos.



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).



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

b) Granitóides Neoproterozóicos (NP3Y2it45)

As rochas do Ediacarano afloram no extremo oeste da área, tratam-se de granitos cálcioalcalinos de alto potássio, são mesocráticos e porfíricos com megacristais 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* de Quixeré pode ser reconhecido como *Inselberg* (**foto 2.4**), alto estrutural na

borda oeste da Bacia Potiguar. Estes morros testemunhos ocorrem na zona de afloramento da Formação Açú.



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

➤ **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 no presente projeto. A seguir as formações serão descritas da base para o topo:

a) na parte inferior, a **Formação Açú (K12a)**, aquífero de interesse ao projeto, aflora em toda borda oeste da área, do sopé da escarpa da Chapada do Apodi até o contato com o 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. Nesta área o arenito Açú aflora 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 projeto. 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 pelas rochas siliciclásticas da Formação Barreiras. 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 A2.1** em muitos afloramentos o calcário Jandaíra ocorre como extensos lajedos com espetaculares formas cársticas controladas por fraturas extensivas (vide tópico 2.4), em especial no Complexo Espeleológico da Furna Feia (vide tópico 2.6). 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).

➤ ***Depósitos do Mioceno ao Plioceno:***

A Formação Barreiras (**ENb**) é composta na região estudada por conglomerados e arenitos ferruginosos friáveis com intercalações de siltitos e argilitos de coloração avermelhada a esbranquiçada com matriz argilosa e abundantes nódulos lateríticos (**foto 2.8**). Representam depósitos de sistemas aluviais, fluviais e costeiros. Ocorre na área de estudo capeando de forma concordante o calcário Jandaíra, abrange em grande maioria o município de Mossoró, porção ENE da área. A Serra Mossoró é o ponto de mais alta cota dentro área e também é testemunho da Formação Barreiras, com topo na cota de 260 m, porém o contato com a Formação Jandaíra é feito na cota 215 m, representando no máximo uma espessura de 45 m da Formação Barreiras. 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**).

Esta formação por ser muito delgada na região não é aproveitada como aquífero, mas é conspícua a infiltração das águas das chuvas.



Foto 2.8 – Arenitos finos a argilitos avermelhados com níveis conglomeráticos, Formação Barreiras. (ANA-14:679371,9433592).



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

- **Depósitos Pleistocênicos:** 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 a leste e Jaguaribe a oeste (**foto 2.10**).



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

2.4.1 - 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. O mapeamento geológico estrutural 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), diferenciadas pela frequência de ocorrência, penetratividade, abertura e conectividade. 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 2.8**).

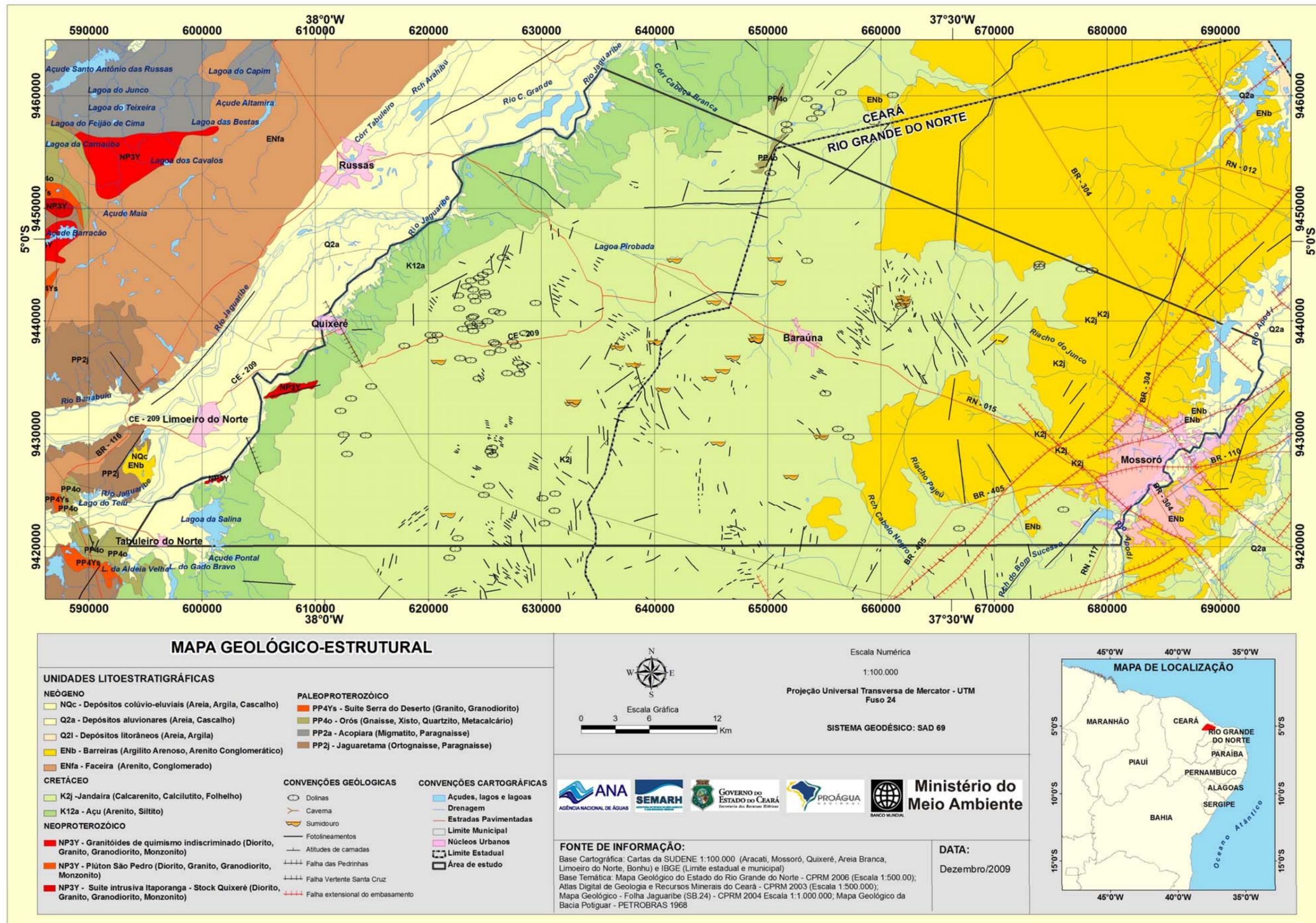


Figura 2.8 - Mapa geológico-estrutural da área de estudo.

2.4.2 - 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 clinofórmulas 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. Já 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:

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 2.9**.

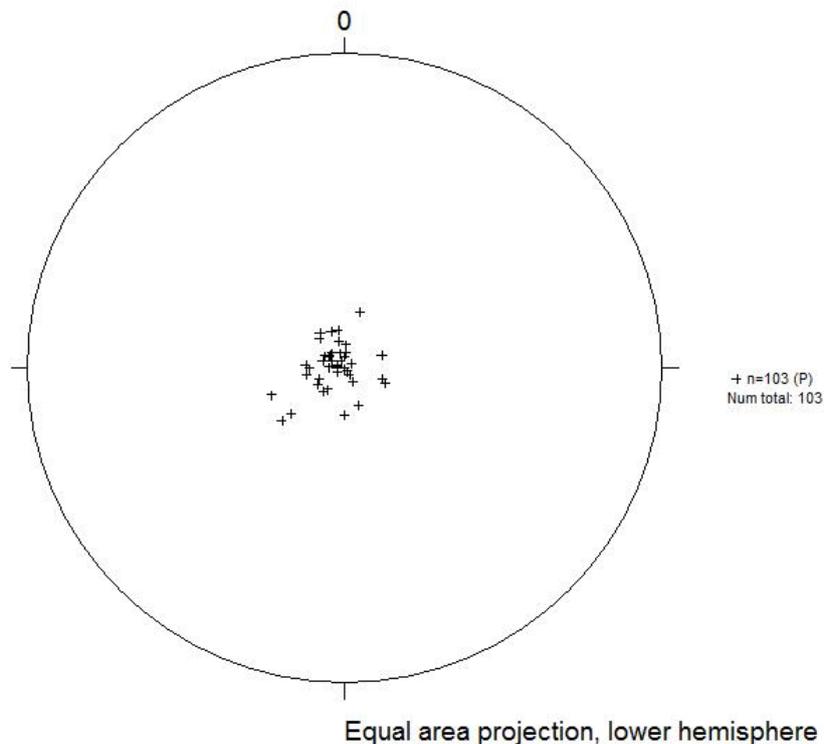


Figura 2.9 – Diagrama da distribuição dos pólos das atitudes na Formação Jandaíra, produzidos com auxílio do software Stereonet® (n= número total de atitudes).

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 2.11**). Regionalmente os mergulhos das camadas são fracos, resultando em camadas subhorizontais.



Foto 2.11 – 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 2.12**). 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 desenvolvidas em formas belíssimas e ligadas ortogonalmente com as fraturas extensivas formando *mullions* de interseção (**foto 2.13**). As juntas resultam na superfície em exuberantes 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 Bonsucesso (ANA-61) e Formigueiro (ANA-108). Já em subsuperfície essas estruturas foram observadas, através da perfilagem ótica e pressentidas até mesmo durante a perfuração dos poços de pesquisa no aquífero Jandaíra (ANA-1434, 1435 e 1436).



Foto 2.12 – Juntas de alívio de pressão dispostas horizontalmente e paralelas ao acamamento (315 Az/horizontal) no calcário Jandaíra, Sítio Formigueiro – Jaguaruana/CE (ANA-61; 638136, 9441433).



Foto 2.13 – Juntas de alívio de pressão cortadas por fraturas extensivas ortogonalmente formando mullions de interseção, calcário Jandaíra. Pedreira Bonsucesso (ANA-61; 638136, 9441433).

Formação Açú: O diagrama sucinto da **figura 2.10** mostra o padrão sistemático das camadas da Formação Açú.

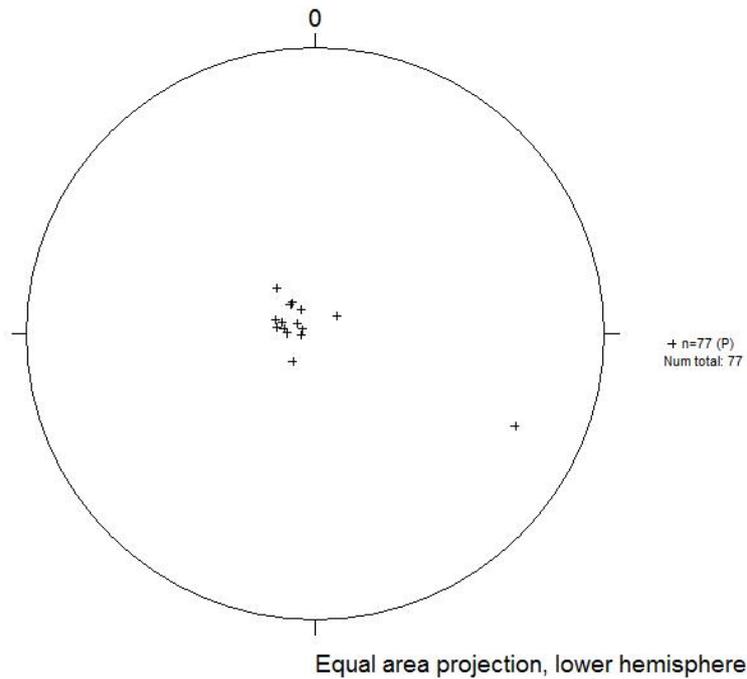


Figura 2.10 - Diagrama da distribuição dos pólos das atitudes na Formação Açú, produzidos com auxílio do software Stereonet® (n= número total de atitudes).

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 2.14**).



Foto 2.14 – 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 do projeto, sempre imaginada como importante zona de recarga do Aquífero Açú, na região de Quixeré exibe litótipos argilosos que sugerem comportamento hidrogeológico de um *aquitard*, ou seja, pode conter quantidades apreciáveis de água, mas a transmitem muito lentamente.

2.4.3- Estruturas Rúpteis

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. Apesar de sua ubiquidade, estas estruturas são as menos úteis na interpretação de eventos deformacionais. Isto decorre de vários fatores:

- ✓ não é possível estabelecer uma relação de idade entre juntas formadas em dois episódios de deformação diferentes, como no caso das falhas, devido à ausência de deslocamentos;
- ✓ fraturas de extensão podem ser reativadas em diferentes eventos por serem uma superfície de fraqueza;
- ✓ juntas podem se formar por vários mecanismos diferentes, sendo comumente impossível distinguir entre as várias possibilidades.

O estudo das fraturas tem, portanto, 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 à determinação da orientação dos esforços tectônicos principais (vide tópico 2.5).

Na borda WSW da Chapada do Apodi foram mapeadas falhas de distensão. Em geral são falhas normais oblíquas, chegando a ter desenvolvimento de estrutura *roll-over*. A magnitude da distensão associada às falhas normais é forte, foi observado rotação de blocos com significativo basculamento das camadas contra as falhas.

As **juntas estilolíticas** foram mapeadas num pequeno número de afloramentos. É um tipo particular de juntas cuja superfície é caracterizada pela presença de picos e depressões com forma de cone, que, embora assim chamadas, não são resultantes de fraturamento, mas do mecanismo de dissolução por pressão. Estas estruturas se originam quando compressão provoca dissolução de alguns minerais, como quartzo ou **calcita** e, portanto, um enriquecimento relativo em minerais menos solúveis, que normalmente têm coloração escura, como micas, anfibólio, óxidos, etc. A ocorrência das juntas estilolíticas está descrita no tópico 2.4.5.

Também na área de afloramento das formações Jandaíra e Açú foram mapeados vários fotolineamentos retilíneos que correspondem em grande maioria a fraturas, diáclases, juntas e falhas. Ocorrem em maior proporção as estruturas de direção NW e NE e secundariamente existem estruturas com *trend* N-S e E-W.

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

2.4.3.1 - 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 2.11** (a, b), onde são mostrados os diagramas sinópticos produzidos a partir das medidas das fraturas extensivas observadas em afloramentos. Estas foram classificadas como principais e secundárias. Sendo diferenciadas pela frequência que ocorrem e pela penetratividade, abertura e conectividade.

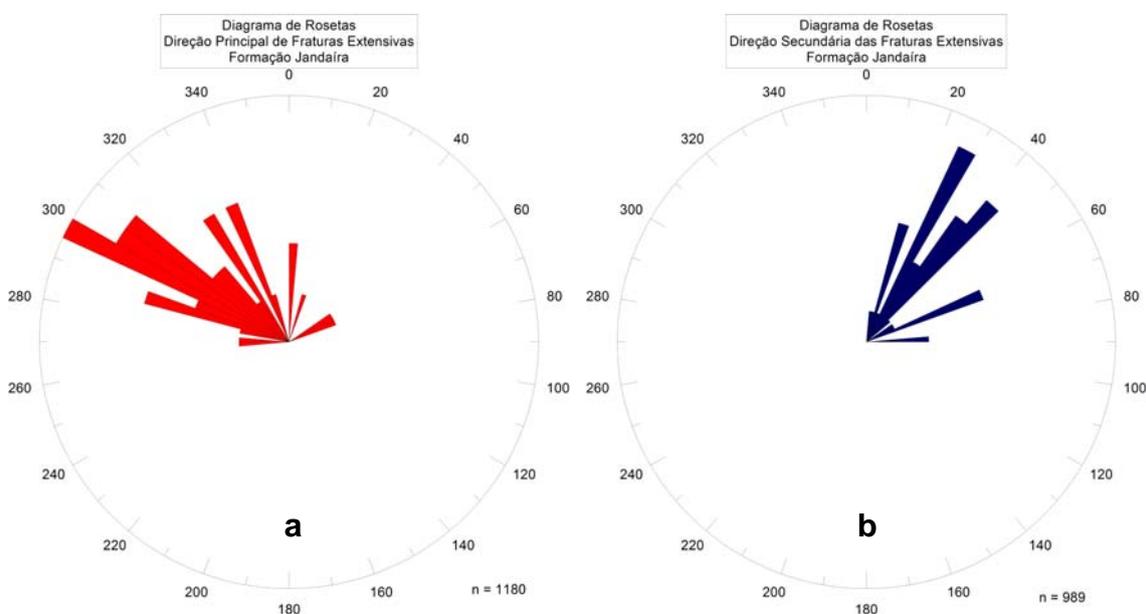


Figura 2.11 – Diagramas de roseta para fraturas extensivas. a) Direções do fraturamento principal. b) Direções do fraturamento secundário (n= número de medidas).

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 2.15**). Possui *trend* principal de alinhamento WNW, variando de 280 Az a 340 Az com frequência máxima em 300 Az.



Foto 2.15 – 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 2.16**). Ocorrem preferencialmente na direção NE-SW, com maior frequência em 30 Az (**figura 2.11b**). 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 2.17**).



Foto 2.16 – Fraturas extensivas principais (NW-SE) conectadas ortogonalmente às secundárias, Calcário Jandaíra, Lajedo Mato Alto (ANA-46; 638700, 9436100).



Foto 2.17 – 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. Condicionam claramente o desenvolvimento de fenômenos cársticos na região (foto 2.18).



Foto 2.18 – Caverna do lajedo Largo, desenvolvida a partir da fratura, direção 295 Az (ANA-52; 641339,9456841).

Durante o período chuvoso na Chapada do Apodi algumas das fissuras abertas exibem o nível estático da água, no aquífero Jandaíra (**foto 2.19**).



Foto 2.19 – Fratura de direção 165 Az, com exibição do nível estático da água no aquífero Jandaíra (ANA-07; 626791, 9422768).

2.4.3.2 - Formação Açú (K12a)

As fraturas presentes nesta unidade são fechadas, parcialmente preenchidas por material carbonático, possivelmente durante a deposição dos calcários da Formação Jandaíra. (foto 2.20). O diagrama de roseta da **figura 2.12** exibe um padrão de distribuição aleatório das fraturas nos arenitos da Formação Açú. Porém as estruturas ocorrem em maior frequência nas seguintes direções: W-E, NW e NE.

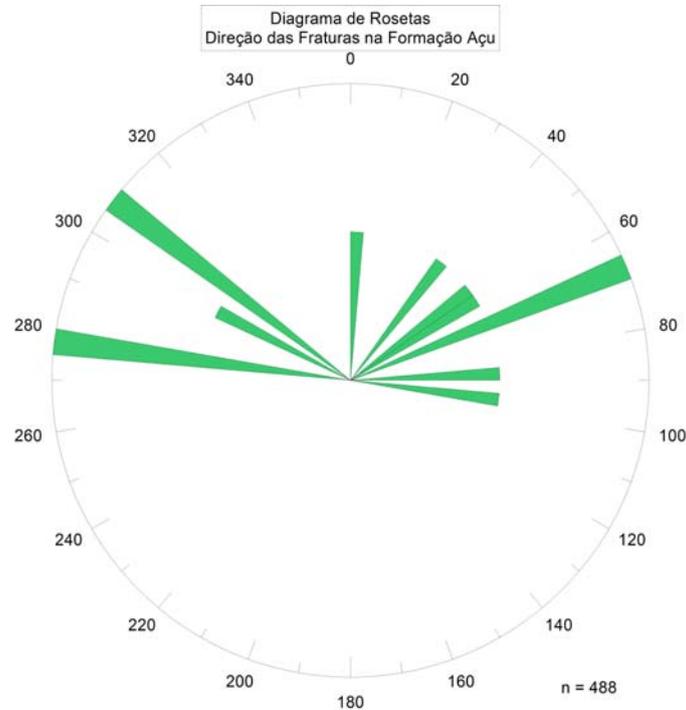


Figura 2.12 – Diagrama de roseta com as direções das fraturas na Formação Açú (n= número de medidas).



Foto 2.20 – Fraturas no arenito da Formação Açú, preenchidas por material carbonático, direção 38 Az (ANA-11;611985,9436144).

2.4.4 - Falhas Distensionais da Cuesta da Chapada do Apodi

As feições estruturais 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 a oblíquas com desenvolvimento de estrutura *roll-over*, onde o acamamento encontra-se basculado em ângulos de 20° a 60°, ou mesmo verticalizado. Este padrão deformacional pode ser explicado por distensão E-W/WNW, formado por um evento compatível com o campo de tensões do Neógeno (**figura 2.14**).

Esta forte deformação que ocorreu na borda da Chapada do Apodi também 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 EW/WNW. Pode ser integrada a um sistema de transcorrências com *trend* NE e cinemática sinistral. Este sistema vem sendo interpretado como contemporâneo ao Vulcanismo Macau e à subsequente deposição da Formação Barreiras, durante o Neógeno, no contexto evolutivo transformante da Margem Equatorial.

A seguir estão descritas as estruturas mapeadas na área de estudo, 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 e a última por estar localizada em sítio homônimo.

Falha das Pedrinhas

Uma evidência das reativações tectônicas na Bacia Potiguar durante o 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 foram subverticalizadas (**fotos 2.21 e 2.22**). A verticalização ocorre na direção NE-SW com mergulhos fortes variando de 65° a 70° para sudeste.

Esta tectônica distensional 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 2.21 – Escarpa sudoeste da Chapada do Apodi, arenitos finos intercalados com argilitos e folhelhos (Formação Quebradas), camadas com direção 130 Az mergulhando 10° para nordeste (ANA-85A; 605152, 9426601).



Foto 2.22 – 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).

Estruturas *roll-over* foram identificadas no mesmo afloramento (ANA-85), agora em falhas normais de 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 2.23**).

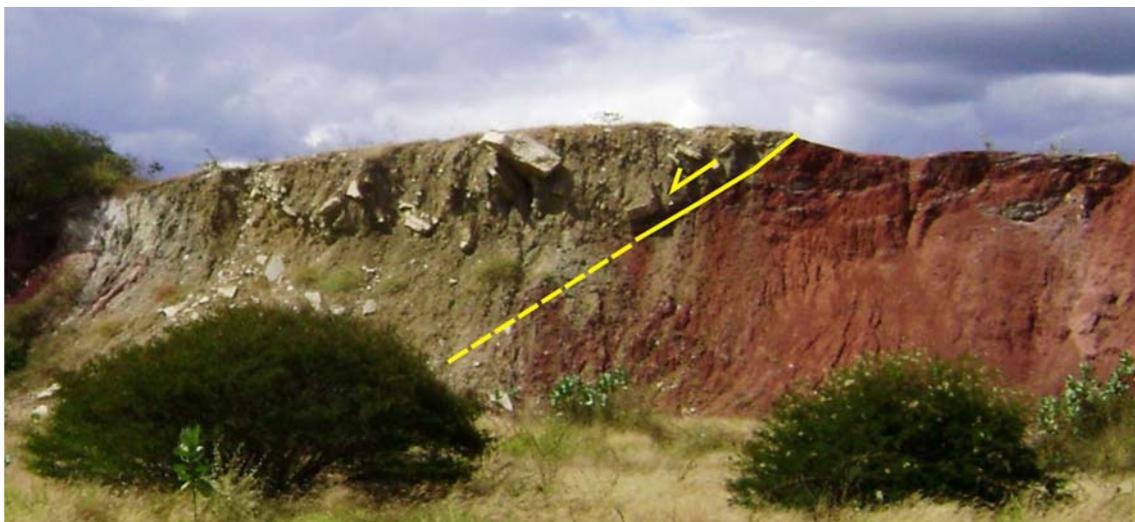


Foto 2.23 – Falha oblíqua com estrutura em *roll-over*, borda sudoeste da Chapada do Apodi (ANA-85: 605152, 9426601).

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 de alto ângulo, falha normal oblíqua. É possível observar as camadas dos calcarenitos margosos da Formação Jandaíra basculados com *trend* NW mergulhando até 50° para sudoeste (**foto 2.24**). *Gouges* foram formados no plano de falha devido ao quebramento durante a tectônica distensional. No destaque em azul da **foto 2.24** é evidenciada uma discordância belíssima intraestratal. Neste afloramento ocorrem também estratificações cruzadas a plano-paralelas. Vale ressaltar o grande conteúdo fossilífero nesta porção da escarpa da Chapada.



Foto 2.24 – Falha Vertente-Santa Cruz, evidencia da tectônica distensional durante o Neógeno (ANA-10: 613985,9436144).

2.4.5 – Juntas Estilolíticas

Na Formação Jandaíra os estilolitos 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 estilolito é evidenciado pela presença de picos e depressões com forma de cone. Estas estruturas se originaram no 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 com grande 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 e ANA-74 estão dispostas na horizontal (**foto 2.25**), já as fraturas de distensão estão na vertical (como visto no tópico 2.4.3.1). 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 2.13** ilustra a formação dessas estruturas em ambiente de extensão.

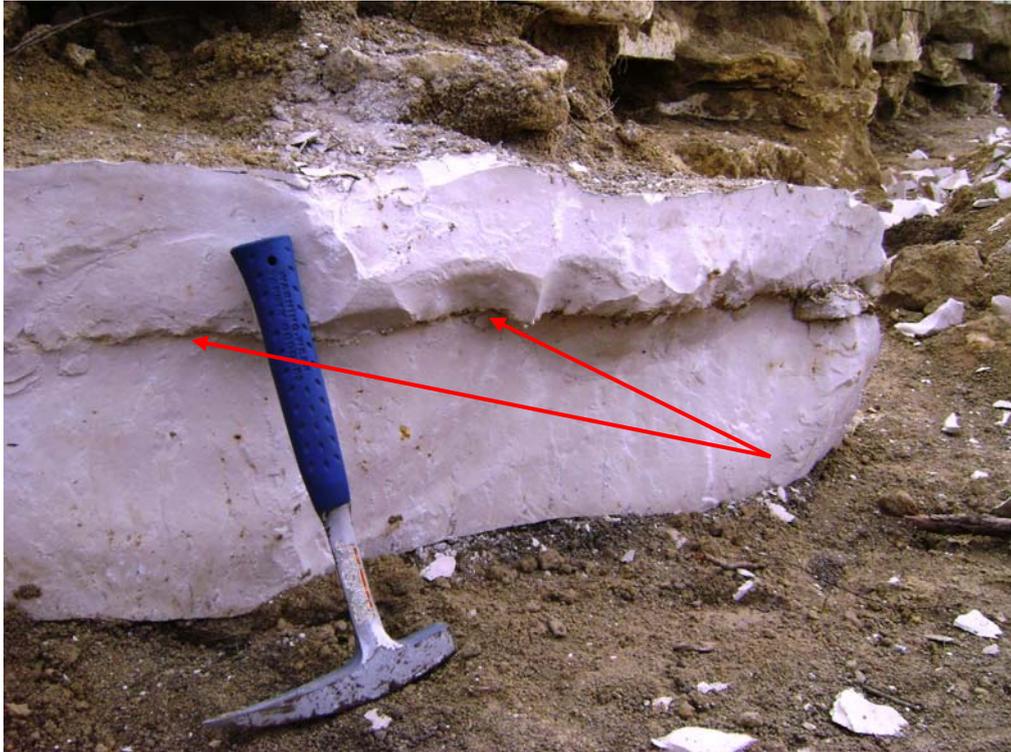


Foto 2.25 – Ocorrência de estiolito na Formação Jandaíra. Em destaque as setas vermelhas mostrando o posicionamento das juntas na horizontal. Serra do Vieira – Jaguaruana/CE (ANA-59: 631085,9448787).

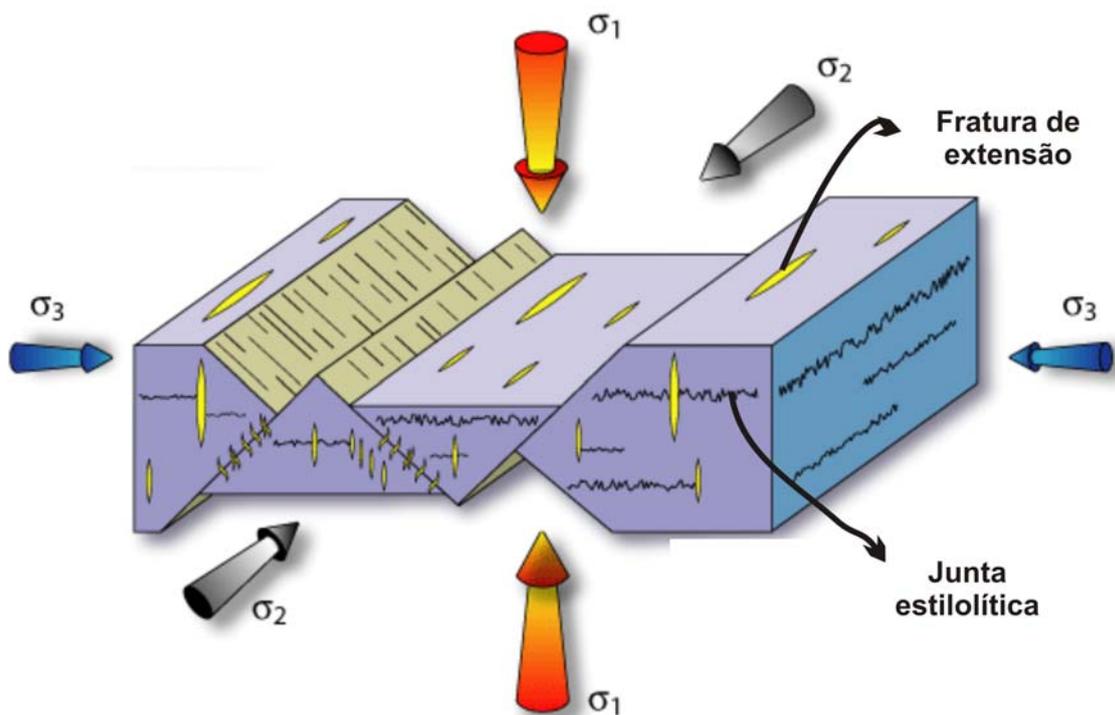


Figura 2.13 – Bloco diagrama dos campos de esforços em ambiente extensional ao qual está relacionada a área de estudo. Destaque para juntas estilolíticas (horizontal) e as fraturas de extensão (vertical).

2.5 – 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, 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 2.14**.

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/obíquas NW, são as estruturas resultantes deste sistema de esforços (**figura 2.14A**). Um estágio inicial com distensão N-S a NNW parece estar refletido no enxames 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 Açú e Jandaíra), estimado uma idade máxima variando de pós-Santoniana a Terciária inferior, para as estruturas deste período de evolução. Neste regime foram formadas falhas transcorrentes dexas E-W (principais), WNW (R) e WSW (P); transcorrentes antitéticas, sinistras, NNW a N-S (R'); falhas normais ou fraturas de distensão NW (**figura 2.14B**). Esta última como mencionado no item 2.4.3 é a estrutura com maior número de ocorrência na área de estudo principalmente na formação carbonática (Jandaíra) cujo *trend* principal NW é corroborado em campo.

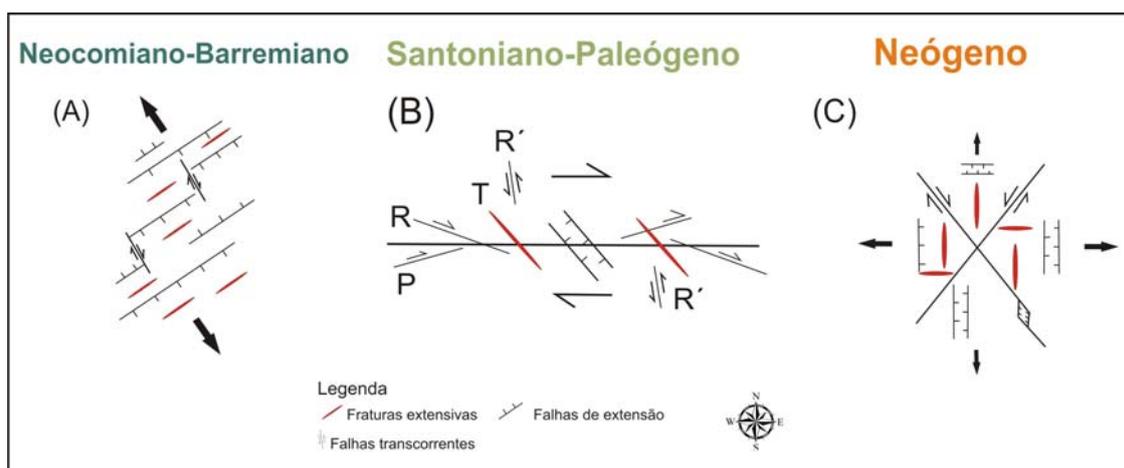


Figura 2.14 – Modelo de campo de tensões e estruturas (Neocomiano ao Neógeno) da Bacia Potiguar (modificado de Medeiros *et al.* 2001).

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 2.14C**). 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 segundo Sousa, 2002), falhas normais e juntas de distensão N-S (e subordinadamente, E-W). As estruturas presentes neste regime estão refletidas nas falhas distensionais das Pedrinhas e Vertente-Santa Cruz cujo *trend* principal é NW e estão mapeadas na borda oeste e sudoeste da Chapada do Apodi, dentro da área de estudo.

2.6 – Vazões Informadas do Aquífero Jandaíra Integradas 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. 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 2.15** apresentam uma distribuição em faixas transversais à área do projeto. Essas faixas apresentam **direção geral SW-NE**.

- ✓ A primeira faixa, no setor oeste, fica no Estado do Ceará e se desenvolve nas proximidades da borda da Chapada do Apodi, no bloco alto da falha de Tiradentes, 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, no bloco baixo da falha de Tiradentes, 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 4^a 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 SW-NE 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 2.15**) revelou-se melhor, na interpretação dos resultados, do que a representação através de isolinhas, construídas usando métodos de interpolação.

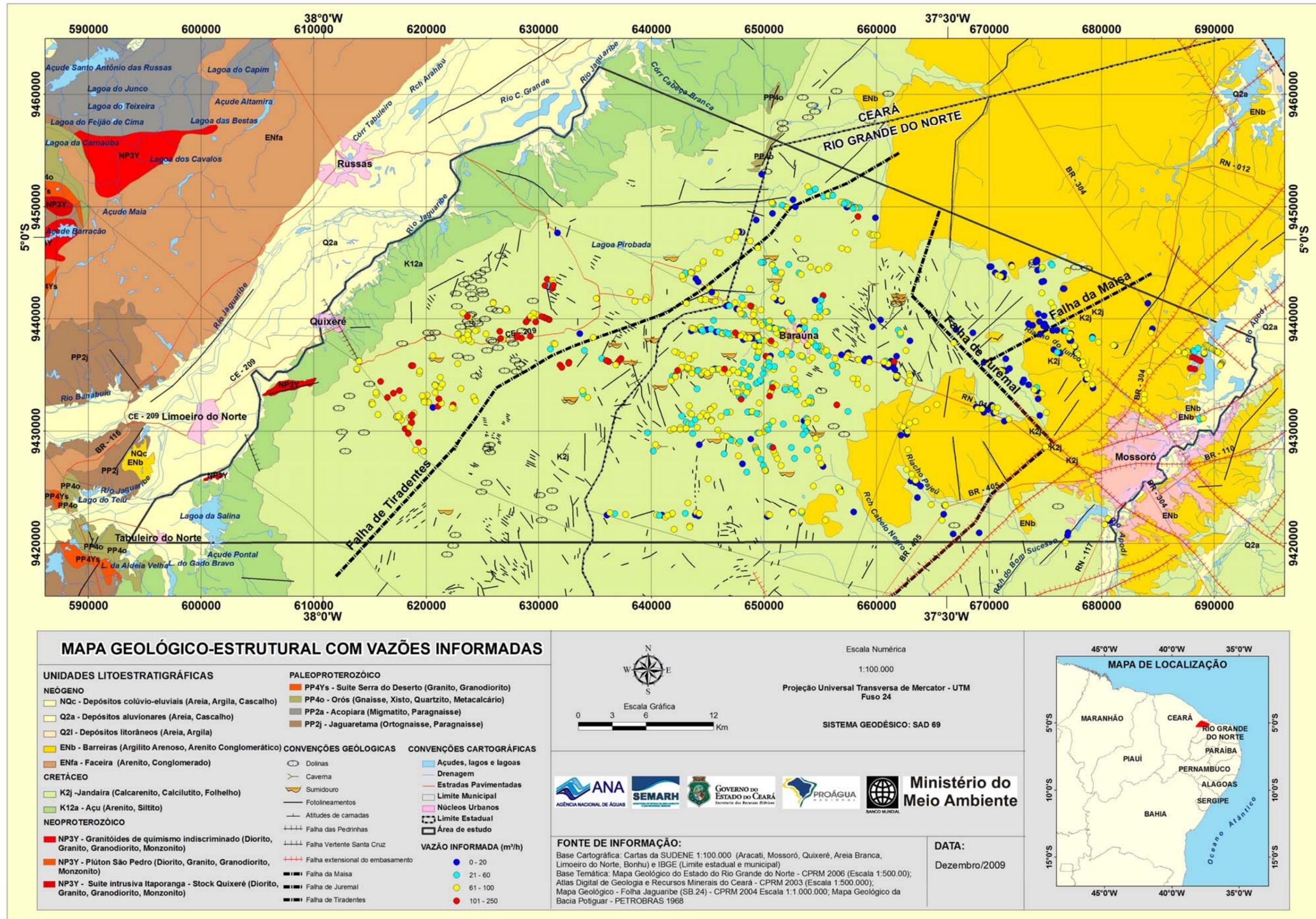


Figura 2.15 – Distribuição espacial das vazões informadas na área de estudo, sobre o mapa geológico estrutural.

2.7 - 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 a 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 discontinuidades presentes no calcário tornam-se zonas que favorecem a percolação de água, formando caminhos preferenciais para o processo de hidratação e dissolução (**foto 2.26**).



Foto 2.26 – 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 ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) 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.

Na Formação Jandaíra foram investigadas e estudadas as diferentes e especiais formas de relevo cárstico:

- ✓ exocársticas – relevos superficiais do carste desenvolvidos nas zonas de absorção das águas (poljes, uvalas e dolinas);
- ✓ endocársticas – formas subterrâneas, entre as quais se destacam as cavernas.

As feições cársticas identificadas nos trabalhos de campo, são apresentadas no mapa da **figura 2.16**.

2.7.1 - 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 ruiforme, 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 2.27**).

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 2.1**.

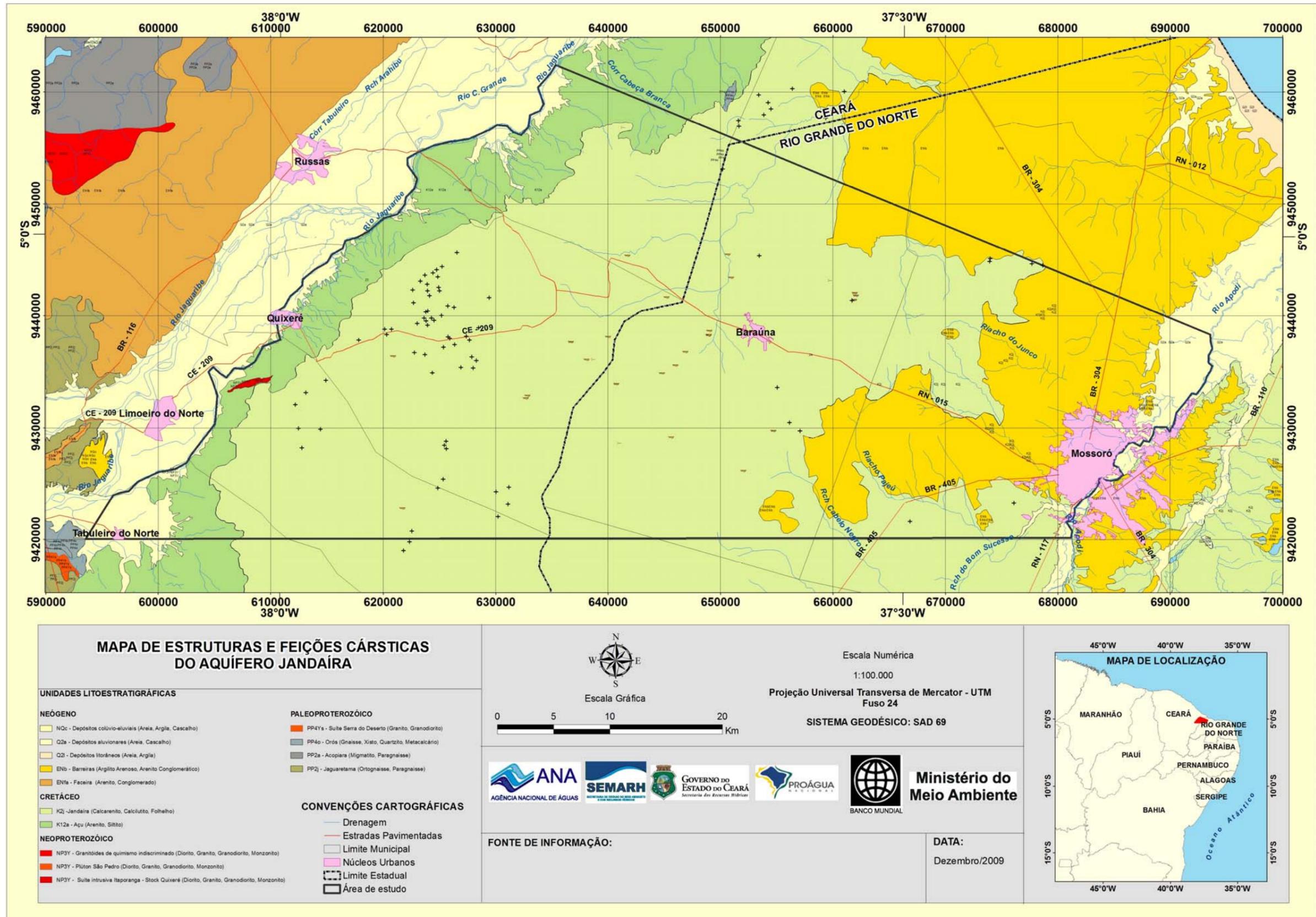


Figura 2.16 – Mapa geológico-estrutural da área de estudo com feições cársticas.



Foto 2.27 – Galeria com abóboda em forma de arco na Caverna do Letreiro, localizada na Área de Reserva Legal, Baraúna – RN (ANA-19; 662069, 9441784).

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 2.28)**, 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;

Tabela 2.1 – Cavernas visitadas na Formação Jandaíra nos Municípios de Baraúna e Jaguaruana.

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 como água pingando, origem do nome. Dificil 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 m ² .

- ✓ o **Abrigo do Letreiro (foto 2.29)**, destaca-se pelos diversos painéis de pintura rupestre existentes nas suas paredes. Embora este seja o único registro arqueológico conhecido na área do projeto, a região possui um alto potencial arqueológico.
- ✓ e a **Furna Feia (fotos 2.30 e 2.31)**, 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 e a publicação do decreto 6.640/2008.



Foto 2.28 – Estalactite em destaque na Caverna Pinga-Pinga localizada na Área de Reserva Legal, Baraúna – RN (ANA-18; 661907, 9441425).



Foto 2.29 – Pinturas rupestres grafadas no calcário Jandaíra, Abrigo do Letreiro, Área de Reserva Legal (ANA-19; 662069; 9441784).



Foto 2.30 – Boca de entrada da caverna Furna Feia (ANA 01; 659759; 9443129).



Foto 2.31 – Espeleotemas no salão da caverna Furna Feia (ANA 01; 659759; 9443129).

2.7.2 – 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:

Embora a origem dos principais sumidouros identificados na área ocorra 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.

As descrições detalhadas das observações de campo sobre as ocorrências de sumidouros são apresentadas na **tabela 2.2**.

Referências e descrições relativas a essas estruturas cársticas já foram feitas **Volume I**.

Tabela 2.2 – 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 carreados 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 Recicol 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 2.32**); b) de forma circular a elíptica (**foto 2.33**) e c) parcialmente preenchidos por sedimentos carregados pela água da chuva.



Foto 2.32 – Sumidouro intermitente no Calcário Jandaíra, Sítio Ubaia (ANA-73; 632863, 9432853).



Foto 2.33 – Sumidouro elíptico com eixo maior alinhando a 5 Az, Sítio Velame I, Baraúna (PO-24; 649043, 9438647).

2.8 - 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 2.34)**;
- ✓ **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 2.35)**.



Foto 2.34 – Dolina formada por dissolução no Calcário Jandaíra, totalmente preenchida por água durante as chuvas (ANA-39; 618855, 9426829).



Foto 2.35 – Dolina formada por colapso ou abatimento do Calcário Jandaíra. Localizada na região do Mato Alto, Baraúna – RN (ANA-44; 623652, 9445421).

3. – INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA

3.1 - Eletorresistividade

3.1.1 - Serviços Realizados

A abordagem geofísica envolveu a utilização do método de eletorresistividade, tendo sido aplicadas as técnicas de exploração vertical ou Sondagem Elétrica Vertical, comumente designada de SEV e de exploração horizontal ou perfil lateral de resistividade, também conhecida como caminhamento elétrico.

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

O método de eletorresistividade 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. Para a obtenção da resistividade aparente, 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 expressão abaixo:

$$\rho_a = K \cdot \Delta V / i$$

onde:

- ρ_a = Resistividade aparente em ohm.m
- K = Constante adimensional dependente do arranjo geométrico AMNB
- 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.

Na **técnica da sondagem elétrica vertical** mantém-se 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. 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 do sub-solo.

Foram realizadas 50 sondagens elétricas verticais com comprimento de linha AB de envio de corrente variando entre 600 e 8400 metros¹, em função da profundidade do embasamento cristalino. Na borda oeste da bacia e em particular sobre a Formação Açú aflorante, foram requeridas menores linhas AB.

Os serviços de campo demandaram 98 dias de trabalho em duas etapas que foram as seguintes:

Etapas de 24/03 a 08/05/2009 (45 dias)

Etapas de 11/06 a 02/08/2009 (52 dias)

Algumas paralisações ocorreram em ambas as etapas por motivos diversos tais como reparos na viatura de campo e folga da equipe. Essas paralisações, entretanto, totalizaram apenas 12 dias. Dessa forma, verifica-se que as 50 SEVs foram realizadas em 86 dias, o que nos dá uma produção de apenas 0,58 SEVs por dia. Essa produção, para os comprimentos de linha AB que foram utilizados, pode ser considerada como muito baixa. A explicação para essa fraca produção reside, sem dúvidas, no período chuvoso em que o serviço foi realizado. Muitos dias de trabalho, com efeito, foram perdidos devido a fortes chuvas e, em muitas ocasiões, a SEV em execução foi interrompida pela chegada súbita de um temporal. Cumpre acrescer que o péssimo estado das estradas em muito contribuiu para o comprometimento da produção, dificultando e, em muitos casos, inviabilizando o acesso ao local da SEV.

Além do comprometimento da produção, ocorreu também, em várias SEVs o fenômeno denominado de fuga de corrente, favorecido pela grande umidade do ar e, em especial, pelo terreno encharcado. Nesses casos o surgimento de potenciais espúrios tendeu a reduzir a precisão das medições nas SEVs, não acarretando entretanto seu comprometimento. Apenas em alguns poucos casos, as SEVs não puderam ser utilizadas.

A **técnica da exploração horizontal, ou perfil de resistividade**, consiste em efetuar medições de resistividade aparente ao longo de um perfil, deslocando-se o quadripolo como um todo, a cada nova medição. Como o comprimento da linha AB permanece sempre constante, este procedimento permite investigar o sub-solo lateralmente a uma profundidade constante.

Foram realizados 336 km de perfis laterais na área de interesse, tendo sido adotado, como dispositivo de medição das resistividades aparentes, o quadripolo linear simétrico AMNB de Schlumberger. O comprimento de linha AB de envio de corrente foi igual a 200 metros e o comprimento de linha MN foi igual a 20 metros, conforme acima discutido. O equipamento utilizado foi um resistímetro PER-80 e seus acessórios, como fios, bobinas e eletrodos.

¹ 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.

3.1.2 - Interpretação das Medições Elétricas

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 de resistividade aparente, contínuas, para posterior resolução².

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.

Desde que a resistividade verdadeira dos calcários varia dentro de amplos limites, como demonstrado na **figura 3.1.**, julgou-se preferível adotar valores os menores 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.

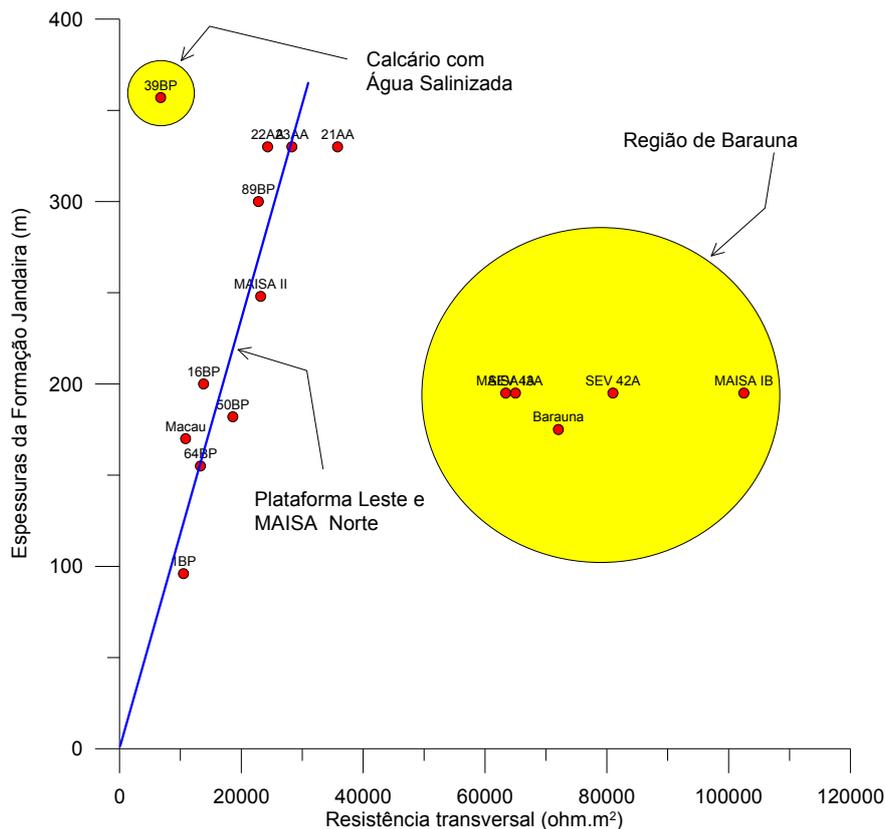


Figura 3.1 - Correlação Resistência Transversal dos Resistivos x Espessura da Formação Jandaíra.

² Entenda-se aqui por “resolver” o ato de ajustar uma curva teórica à curva de campo, definindo-se assim um corte geoeletrico. Este corte constitui uma dentre inúmeras soluções possíveis para a curva de campo em questão.

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.

3.1.2.1 - Discussão das (SEVs)

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 experiência de estudos anteriores na região, é possível correlacionar esses horizontes à sequência litológica, conforme mostrado na **tabela 3.1** a seguir:

Tabela 3.1 – 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.

Obs: ρ_v = Resistividade Verdadeira

A correlação entre os horizontes elétricos e a sequência litológica, acima indicada, 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 da Formação Barreiras.
- ✓ 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. É sempre requerida, entretanto, sua introdução na resolução das curvas em computador, não apenas na área estudada, mas em toda a Bacia Potiguar. Um exame minucioso de todos os perfis litológicos disponíveis no âmbito da bacia, realizado na década de 1980, permitiu associá-lo a um nível de folhelhos escuros mal caracterizados nas amostragens. Este nível aparenta notável continuidade lateral e pode ser associado a uma provável regressão abortada. Hoje, entretanto, a perfuração do Poço Exploratório P1-FP, 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). Existem, entretanto, evidências de que os mesmos são interdigitados localmente com o calcário 1. A **figura 3.2**, abaixo, tenta ilustrar essas duas situações.
- ✓ 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 Açú ou, em outras palavras, constitui o Aquífero Açú propriamente dito. Este horizonte 6 é perceptível visualmente nas SEVs realizadas sobre a zona de afloramento da Formação Açú 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 + Açú Superior) e os arenitos do Açú 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.

3.1.2.2 – Discussão dos Perfis Laterais

A **figura 3.3**, mostra a distribuição dos 336 km de perfis realizados. A grande concentração de medições, que se observa na região da Delmonte, representa perfis anteriormente existentes, realizados em estudos para essa multinacional e para outros particulares, e que foram aqui incluídos como dados adicionais, para enriquecer o conjunto de informações disponível.

Para controle da precisão das medições, foram obtidos no campo três pares de medições (diferença de potencial entre os eletrodos M e N; e intensidade de corrente i entre os eletrodos A e B), em cada estação de medição. As planilhas Excel mostradas no **anexo A3.1** são programadas para fazer automaticamente, a partir desses pares e da constante geométrica K do quadripolo utilizado, o cálculo da resistividade aparente e da média das duas medições.

Quando a precisão se revela inferior a 10% faz-se uma quarta e, às vezes uma quinta medição. Quando apenas uma quarta medição é suficiente, a planilha fica com duas células vazias na linha da quarta medição. A quarta medição é então repetida nessas duas células para que o cálculo automatizado não resulte em uma média falsa. Para indicar esse procedimento, essas células são mostradas em cinza e azul no corpo da planilha e o texto “repetido para média” é mostrado no campo de observações.

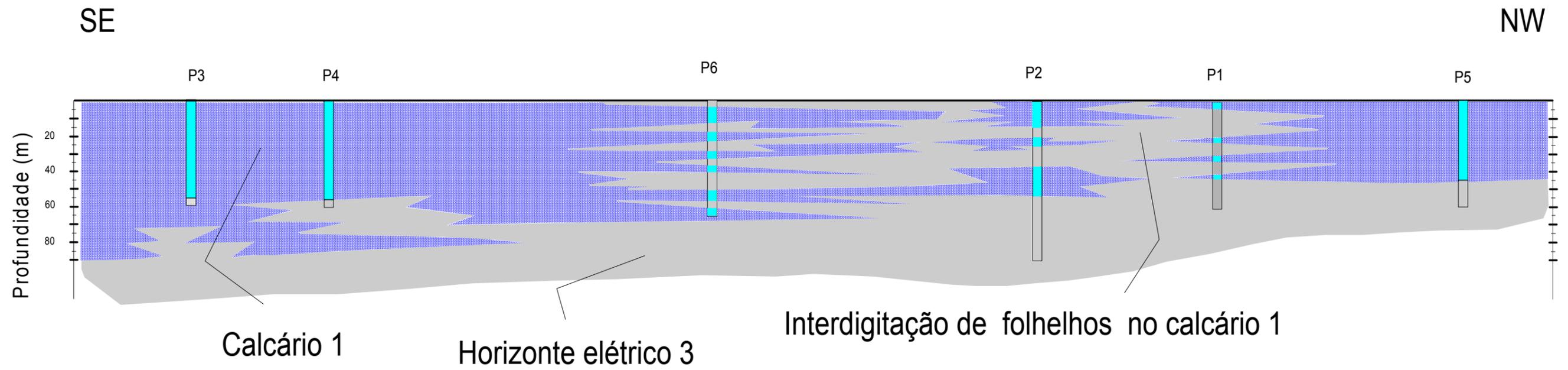


Figura 3.2– Corte geológico ao longo do maior comprimento da Delmonte, Município de Quixeré/CE (adaptado de Feitosa, 2000).

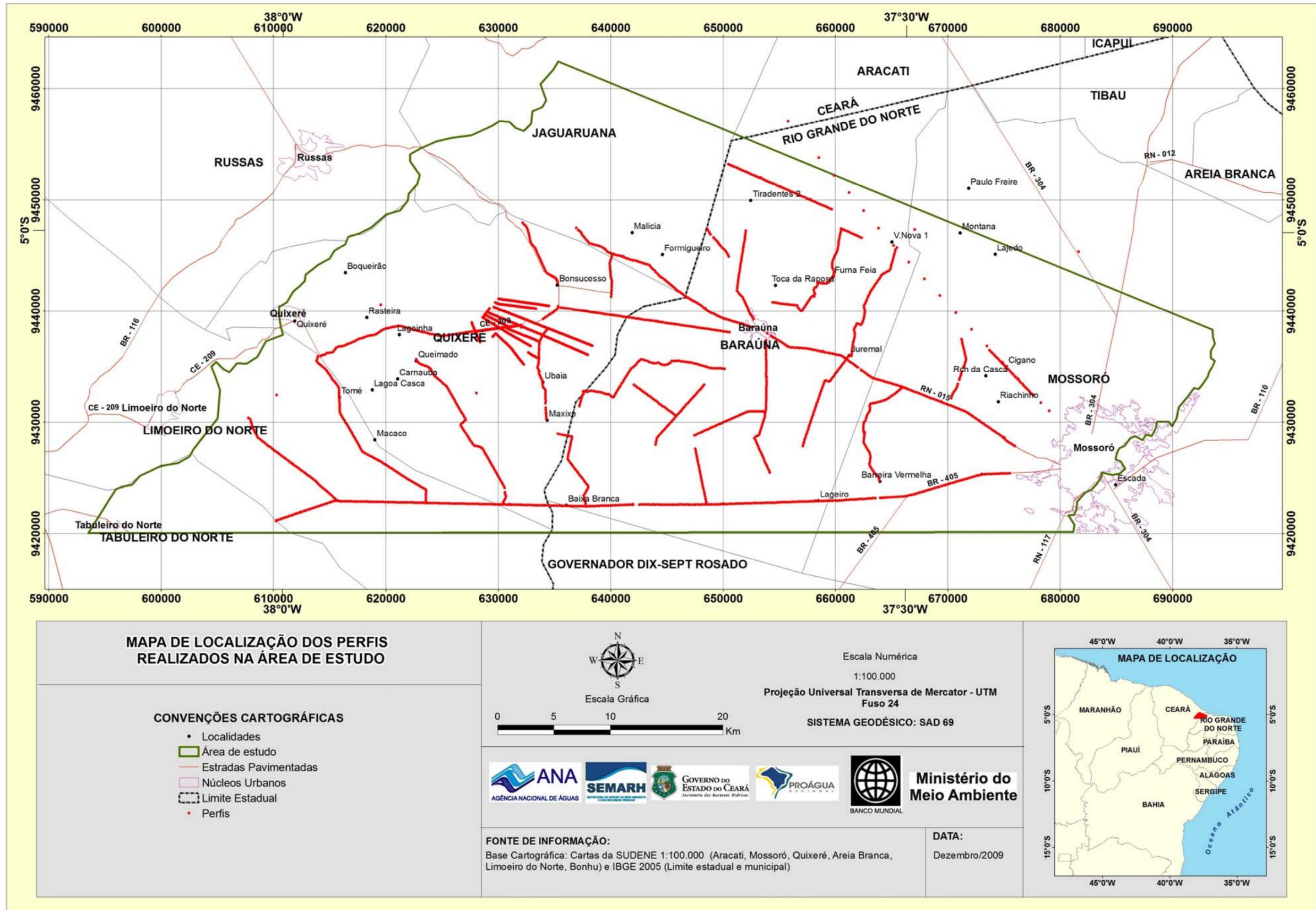


Figura 3.3 – Localização dos perfis realizados na área de estudo.

3.1.3 - Produtos Obtidos

3.1.3.1 – Produtos das Sondagens Elétricas Verticais

A interpretação das sondagens elétricas levou à elaboração dos 9 mapas a seguir indicados:

- ✓ Mapa do topo do embasamento cristalino
- ✓ Mapa de Isópacas da Formação Açú
- ✓ Mapa de Isópacas da Formação Jandaíra
- ✓ Mapa de Profundidade do topo da Formação Açú
- ✓ Mapa de Resistências Transversais do Calcário Superior (Calcário 1)
- ✓ Mapa de Resistências Transversais do Calcário Inferior (Calcário 2).
- ✓ Mapa de Condutâncias Longitudinais dos Folhelhos da Porção Média da Formação Jandaíra.
- ✓ Mapa do Índice de Argilosidade
- ✓ Mapa do Índice de Carstificação.

Foram também elaborados três perfis geológicos, cujas posições são mostradas na **Figura 3.4**. As cotas topográficas desses perfis foram obtidas a partir de uma imagem SRTM. Os perfis foram os seguintes:

- ✓ Perfil AA', Quixeré – Baraúna – SEV 40, de direção aproximada W-E.
- ✓ Perfil BB', SEV 100 BP – SEV 36 AA, de direção NW – SE.
- ✓ Perfil CC', poço 1-REC-1-RN - SEV 36 AA

Na elaboração dos mapas e perfis, acima indicados, foram consideradas não apenas as SEVs realizadas no âmbito do presente estudo, mas também 23 SEVs realizadas no âmbito de estudos anteriores (**tabela 3.2**), nas quais as formações Jandaíra, Açú e o embasamento cristalino se manifestam eletricamente de forma conspícua.

3.1.3.1.1 - Mapa do Topo do Embasamento Cristalino

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 (Demetrio, 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.

Inicialmente, as profundidades do embasamento cristalino foram obtidas com o auxílio de um gráfico Correlação Profundidade do Embasamento x Resistividade Aparente em AB 10.000 m (Feitosa, 1991).

Tabela 3.2 – 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, 1974	10.000
33 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	10.000
34 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	10.000
35 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	10.000
36 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	10.000
37 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	10.000
38 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	10.000
39 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	10.000
40 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	10.000
41 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	12.000
42 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	10.000
43 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	10.000
44 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	6.000
45 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	6.000
46 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	4.000
47 PA	Projeto Apodi – SUDENE/UFPE, 1974	4.000
03 DELM	Delmonte Fresh do Brasil, 1999	2.000

Verificou-se, entretanto, que, embora satisfatória para o conjunto da Bacia Potiguar, a precisão desse procedimento não o é para as menores dimensões da área estudada e, nela, para a faixa de profundidades do cristalino. Foi considerado preferível, assim, utilizar as profundidades obtidas como o somatório das espessuras dos horizontes elétricos, nas SEVs resolvidas.

Foram também utilizados os dados dos seguintes poços existentes, mostrados na **Tabela 3.3** a seguir:

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 3.4**).

Tabela 3.3 – Poços Utilizados (SAD69).

Poço	Proprietário	UTM leste	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

O embasamento cristalino exibe uma compartimentação estrutural caracterizada, de oeste para leste, por uma sequência de quatro patamares de cotas sucessivamente decrescentes, conforme indicado na **Figura 3.4**. 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 e bordejando a escarpa dos calcários. 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 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. Lembramos, a propósito, a ocorrência de arenitos e argilitos NE-SW com mergulho de 65° a 70° para sudeste, registrados pela geologia de campo na descida para a Barragem das Pedrinhas, no município de Limoeiro do Norte. Convém ainda registrar que a Serra Dantas, que representa um grande afloramento do embasamento em pleno domínio da bacia, situa-se neste alto. As cotas, no Alto de Lagoinha, variam geralmente entre -250 metros e -300 metros.

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, de forma muito nítida,

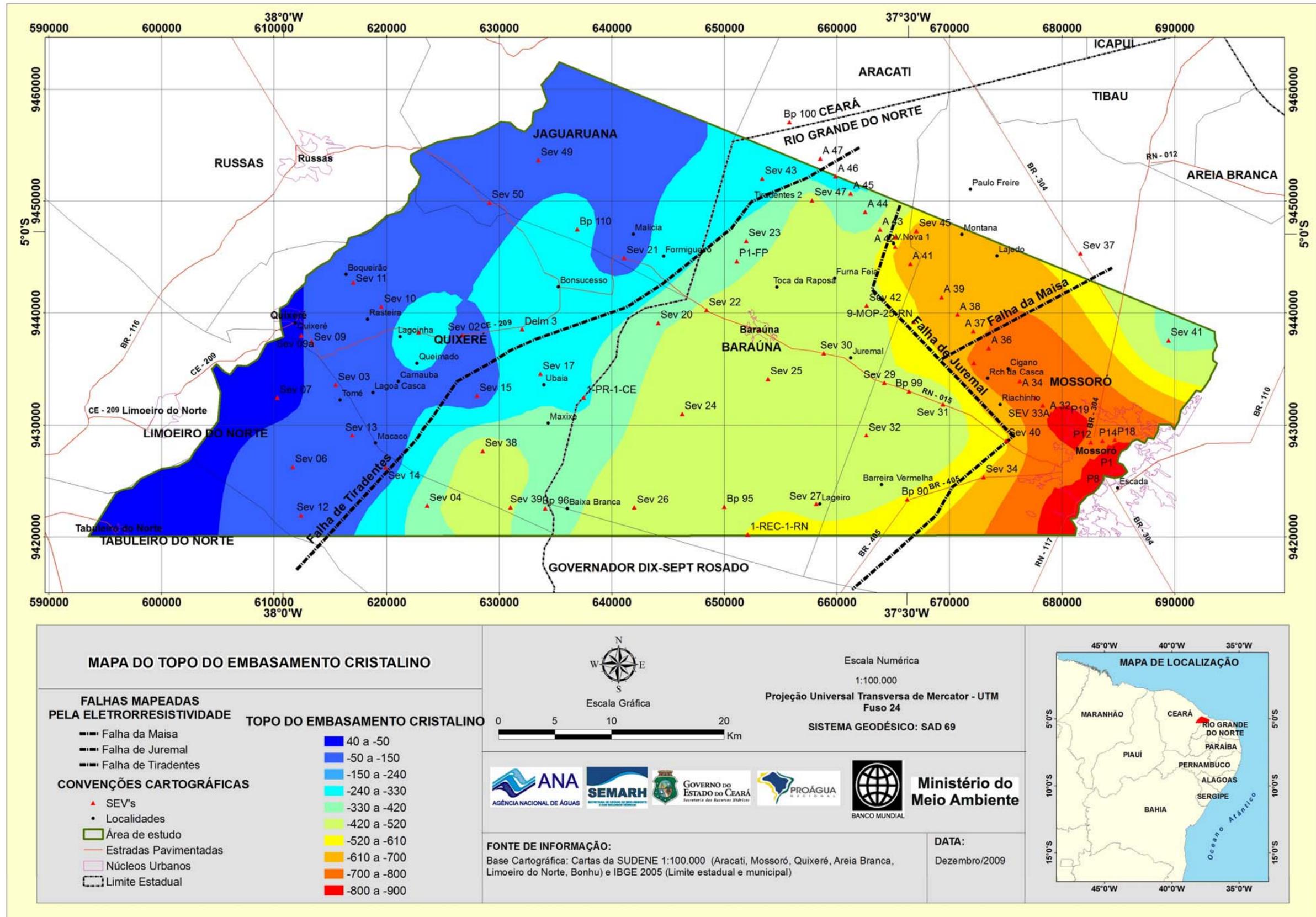


Figura 3.4 – Mapa do topo do embasamento cristalino incluindo a compartimentação estrutural da área do projeto.

abrupta mesmo, com o Baixo da MAISA e o Graben de Boa Vista³ por um provável sistema de falhamentos ou flexuras pronunciadas (Falha de Juremal), indicados na **Figura 3.4**. 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. Em 1996, com efeito, a potenciometria do Aquífero Açú na região de Mossoró, elaborada com base em cerca de 60 poços (Feitosa, 1996) esbarra em nítidas discontinuidades a oeste e a sul, conforme mostrado na **Figura 3.5**.

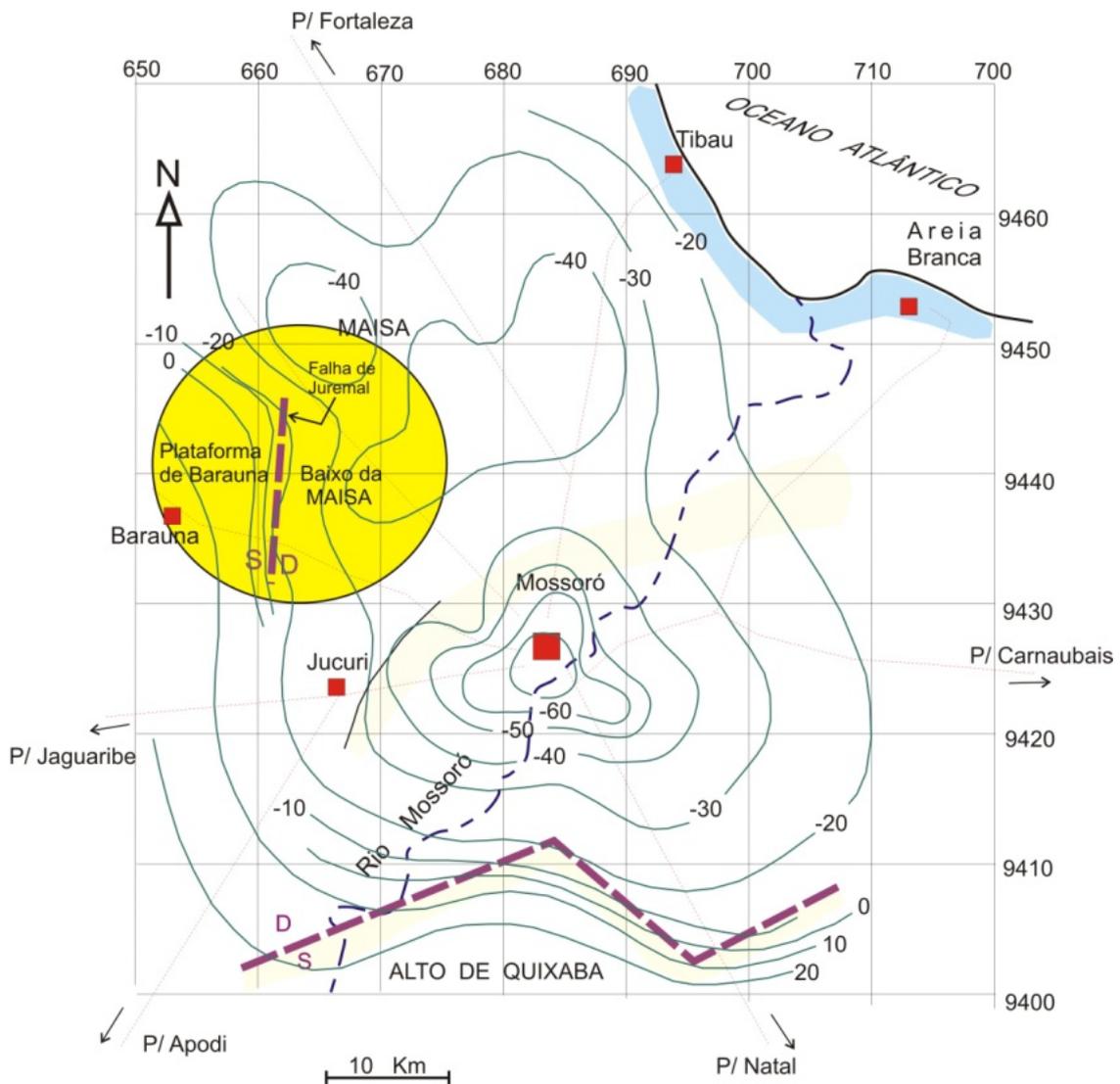


Figura 3.5 – Potenciometria da Região de Mossoró (Modificado de Feitosa, 1996).

As evidências elétricas agora obtidas concordam significativamente com as antigas evidências hidráulicas acima mostradas, tornando verossímil o falhamento/flexura aqui mapeado.

As cotas mais baixas no Baixo da MAISA chegam a -650 metros.

³ Designação original da PETROBRAS

Graben de Boa Vista – Essa estrutura, que ocupa o extremo leste da área, integra já o chamado Graben Central da Bacia Potiguar. As cotas mais baixas aqui mapeadas chegam a -800 metros.

3.1.3.1.2 – Mapa de Isópacas da Formação Açú.

As espessuras da Formação Açú foram obtidas, inicialmente, com o auxílio do gráfico Correlação Espessuras do Conjunto Açú/Pendências x Condutores Longitudinais (Feitosa, 1991). Aqui também a precisão das estimativas não foi boa, pelos mesmos motivos indicados no item 3.1.4.1.1. Não poderia, aliás, ser diferente, uma vez que ambas as correlações se baseiam essencialmente em valores da condutância longitudinal do condutivo basal.

Assim sendo, as espessuras da Formação Açú efetivamente utilizadas na elaboração do mapa de isópacas, foram obtidas a partir das SEVs resolvidas, isto é, SEVs interpretadas quantitativamente. Este mapa é apresentado na **Figura 3.6**.

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

- ✓ O evento Açú 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 Açú exhibe espessuras superiores a 390 metros, chegando a 590 metros.
- ✓ O Alto de Lagoinha, limitado a leste pela Falha de Tiradentes, parece não ter desempenhado qualquer papel no condicionamento do assoreamento Açú. Observa-se aí, inclusive, uma zona de espessuras acima de 290 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 Açú. Este fato leva a admitir uma movimentação tectônica pós-Açú e pré-Jandaíra que teria gerado a chamada falha de Tiradentes. Esta falha seria, assim, bem mais recente que o sistema de falhamentos que estamos chamando de falha de Juremal. A sedimentação Açú, a oeste dessa falha, teria assoreado uma paleosuperfície de topografia relativamente monótona, diferenciada posteriormente pela Falha de Tiradentes. Voltaremos a esse tema no item seguinte, quando tratarmos do mapa de isópacas da Formação Jandaíra.
- ✓ As menores espessuras da Formação Açú, inferiores a 190 metros, são registradas na porção sudeste da Plataforma de Baraúna, entre as localidades de Juremal, Riacho Grande e Barreira Vermelha; e sobre o Alto de Lagoinha, em torno da localidade denominada de Macaco.

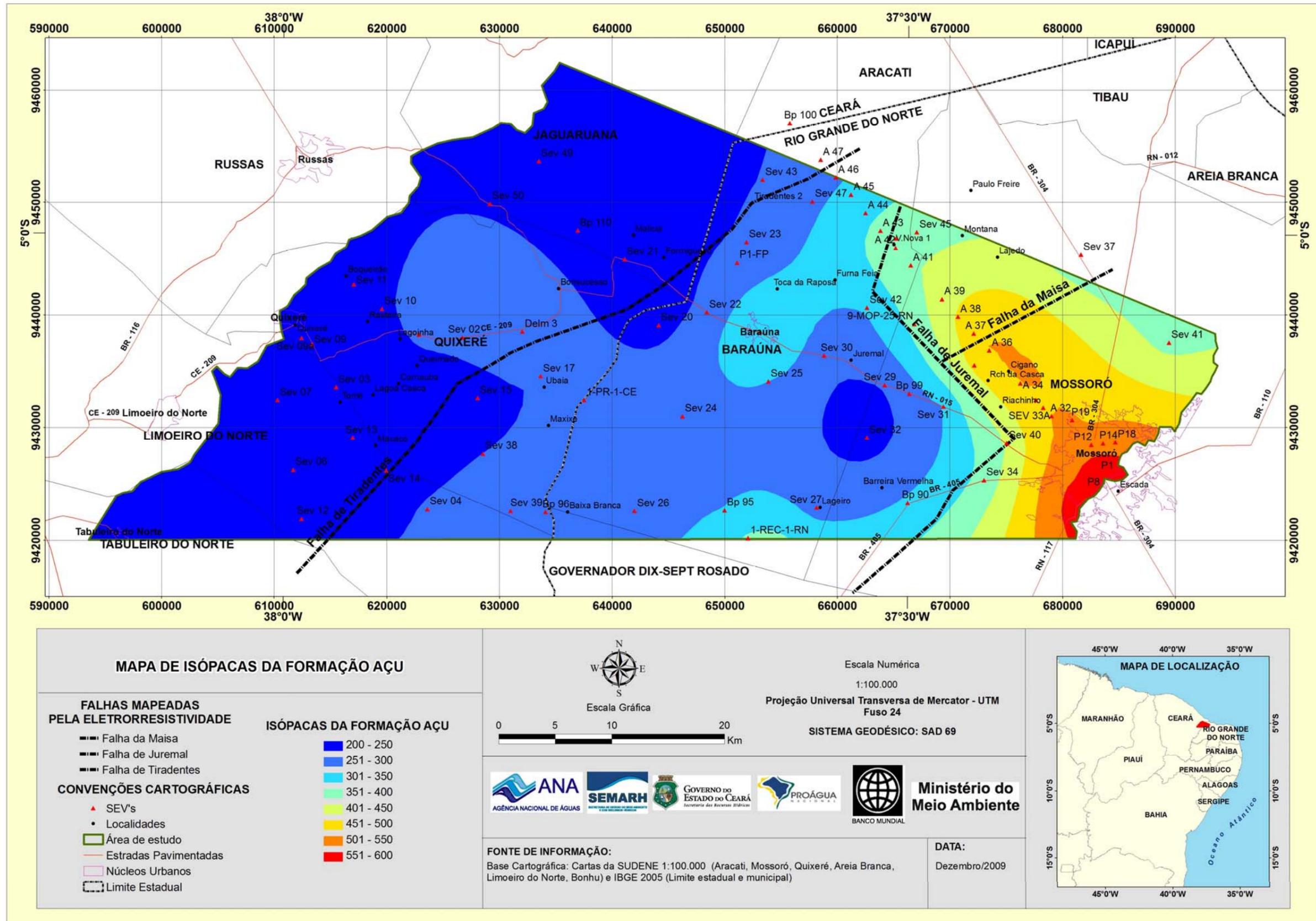


Figura 3.6 – Isópacas da Formação Açú.

3.1.3.1.3 – Mapa de Isópacas da Formação Jandaíra

As espessuras da Formação Jandaíra foram obtidas preliminarmente, numa primeira tentativa, por diferença entre as profundidades do embasamento e as isópacas da Formação Açú, ambas avaliadas a partir dos gráficos de correlação acima citados. Os resultados obtidos indicaram espessuras irreais, muito pequenas, pelos seguintes motivos:

- ✓ As resistividades aparentes tomadas no ramo terminal das SEVs dependem essencialmente das espessuras do condutivo basal (Formação Açú). A correlação profundidade do embasamento x resistividade aparente em AB 10.000 metros se apoia, assim, na premissa de que as variações de espessura da formação Jandaíra são proporcionais às variações de espessura da Formação Açú. Essa premissa é aceitável regionalmente, em termos de Bacia Potiguar, mas pode, localmente, introduzir erros significativos, como aconteceu no caso presente.
- ✓ As espessuras da Formação Açú, avaliadas pelo gráfico de correlação, são superestimadas para a faixa de espessuras que ocorre na área (trecho do gráfico compreendido entre 50 e 75 Mho (Feitosa, 1991).

As espessuras da Formação Jandaíra, obtidas preliminarmente por diferença, foram, portanto, descartadas. Foram utilizadas, assim, as espessuras obtidas dos cortes geoeletricos que resultaram da resolução das SEVs. Nunca é demais lembrar que essas espessuras, pelas 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.

O Mapa de Isópacas da Formação Jandaíra é apresentado na **Figura 3.7** a seguir.

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

- ✓ O evento Jandaíra, que representa a culminação da transgressão cretácica da Bacia Potiguar, recobriu uma paleosuperfície suavizada pelo assoreamento continental da formação Açú. 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 320 e 470 metros. As maiores espessuras, que podem atingir 520 metros, são registradas num arco de concavidade voltada para leste, que se desenvolve entre as localidades de Lajedo e Montana, a nordeste, e a localidade de Barreira Vermelha a sul.

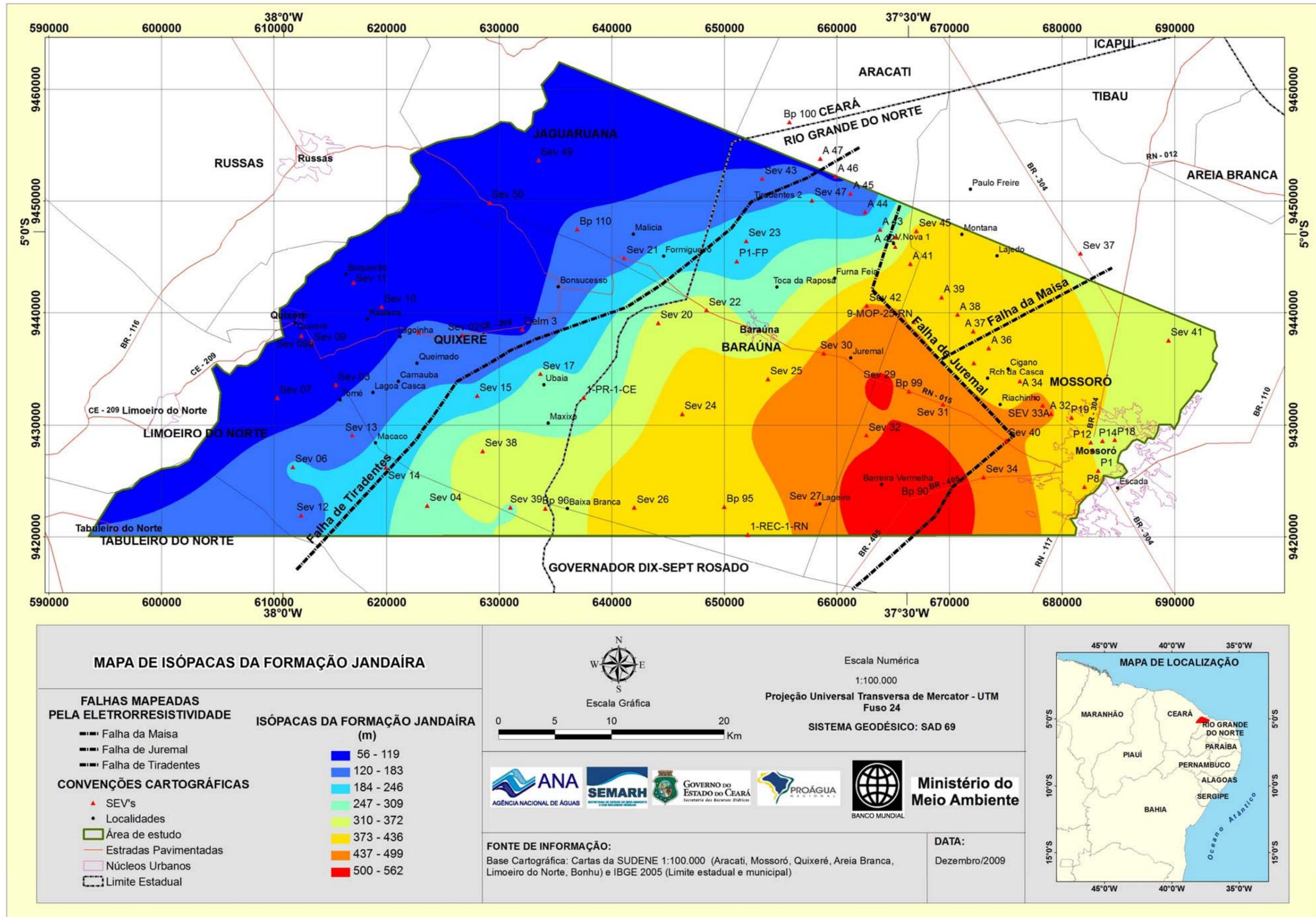


Figura 3.7 – Isópacas da Formação Jandaíra.

- ✓ Existe a possibilidade de que, nessa zona disposta em arco, 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 sedimentos carbonatados ignorou os grandes falhamentos da área, 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 barreira ao avanço dos carbonatos para noroeste. Dessa forma, a Formação Jandaíra exhibe espessuras reduzidas sobre este alto, geralmente inferiores a 170 metros e, mesmo, inferiores a 120 metros nas proximidades da escarpa dessa formação. A Falha de Tiradentes deve ter sido originada numa fase tectônica posterior à deposição da Formação Açú, tendo rebaixado essa formação, mas mantendo suas espessuras sem alterações significativas. A **Figura 3.8**, a seguir, esquemática e qualitativa, procura ilustrar essa concepção.

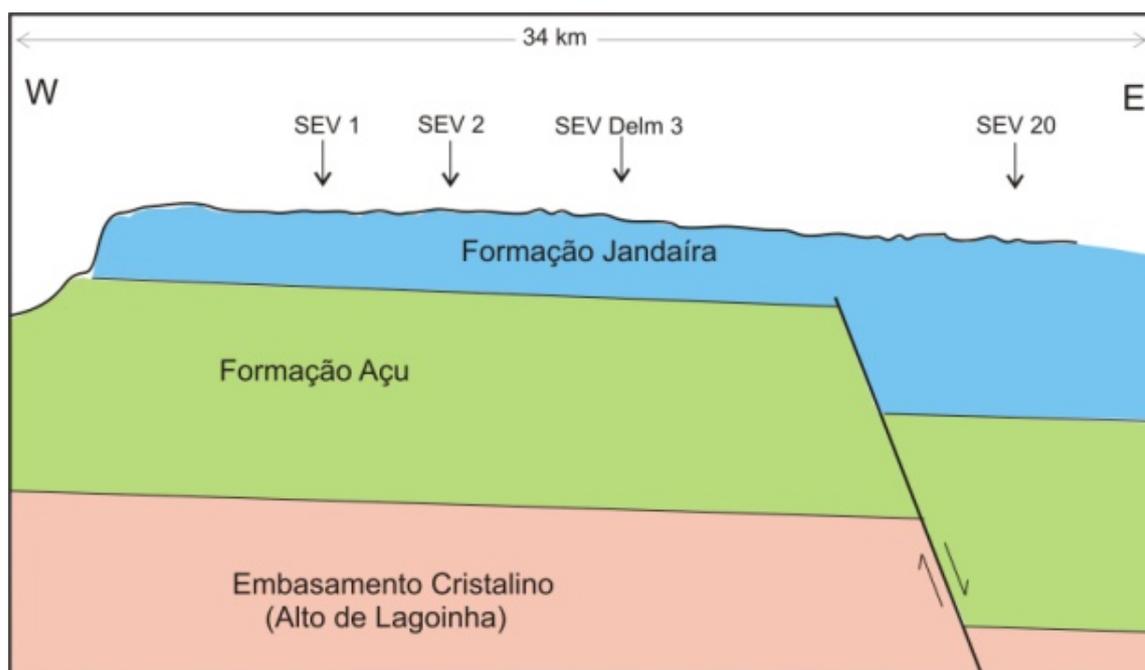


Figura 3.8 – Corte geológico genérico e esquemático transversal à Falha de Tiradentes.

- ✓ Como a interpretação quantitativa das SEVs tendeu a superestimar as espessuras da Formação Jandaíra em grande parte das SEVs, observam-se anomalias de espessura nos locais dos poços PETROBRAS 1-PR-1-CE, 9-BA-1-RN e 9-MOC-1-RN. Essas anomalias se caracterizam por espessuras localmente mais reduzidas, as quais, em realidade são espessuras reais. Foi feita uma correlação espessuras calculadas a partir das SEVs x espessuras reais obtidas dos poços (oito poços), como uma tentativa de corrigir as espessuras superestimadas. Essa tentativa não obteve

sucesso porque as espessuras calculadas não foram obtidas a partir de SEVs de aferimento, mas, sim, a partir de valores obtidos do mapa de isópacas. Esses aferimentos, que seriam muito desejáveis, não puderam ser realizados, devido à grande dificuldade de acesso aos poços, no período chuvoso em que o trabalho de campo foi realizado.

3.1.3.1.4 - Mapa do Topo da Formação Jandaíra

A Formação Jandaíra aflora em cerca de 80% da área estudada. Nos cerca de 20% mapeados como Formação Barreiras, essa formação aparenta ser muito delgada. Além disso, nas 10 SEVs disponíveis nas áreas mapeadas como Barreiras, não se nota diferenciação elétrica significativamente diferente em relação às SEVs disponíveis nas zonas de afloramento do Jandaíra. Por esse motivo (como mostra a **Figura 3.9**), o topo da Formação Jandaíra, pode ser considerado, para todos os fins práticos, como coincidente com a superfície topográfica.

3.1.3.1.5 - Mapa de Profundidade do Topo da Formação Açú

Pelos mesmos motivos acima indicados, o mapa de isópacas da Formação Jandaíra coincide com o mapa das profundidades do topo da Formação Açú. Este último é apresentado na **Figura 3.10**.

3.1.3.1.6 - Magnitude Elétrica dos Níveis da Formação Jandaíra

Chamamos aqui de mapas de magnitude elétrica, mapas qualitativos dos parâmetros de Dar Zarrouk, resistência transversal e condutância longitudinal. A resistência transversal de uma dada camada elétrica é definida como o produto da sua espessura pela sua resistividade verdadeira. A condutância longitudinal de uma dada camada elétrica, por sua vez, é definida como a razão da sua espessura pela sua resistividade verdadeira.

Verifica-se, pelas definições acima, que o termo magnitude envolve espessura e resistividade. Assim, um calcário com grande magnitude elétrica é muito espesso ou muito resistivo ou ambos. Uma camada condutiva, por sua vez, tendo grande magnitude elétrica, é muito espessa ou muito condutiva ou ambos.

Foram três os mapas elaborados:

- ✓ Mapa de resistências transversais do calcário inferior (calcário 2)
- ✓ Mapa de condutâncias longitudinais da porção média da Formação Jandaíra (folhelhos e/ou margas)
- ✓ Mapa de resistências transversais do calcário superior (calcário 1)

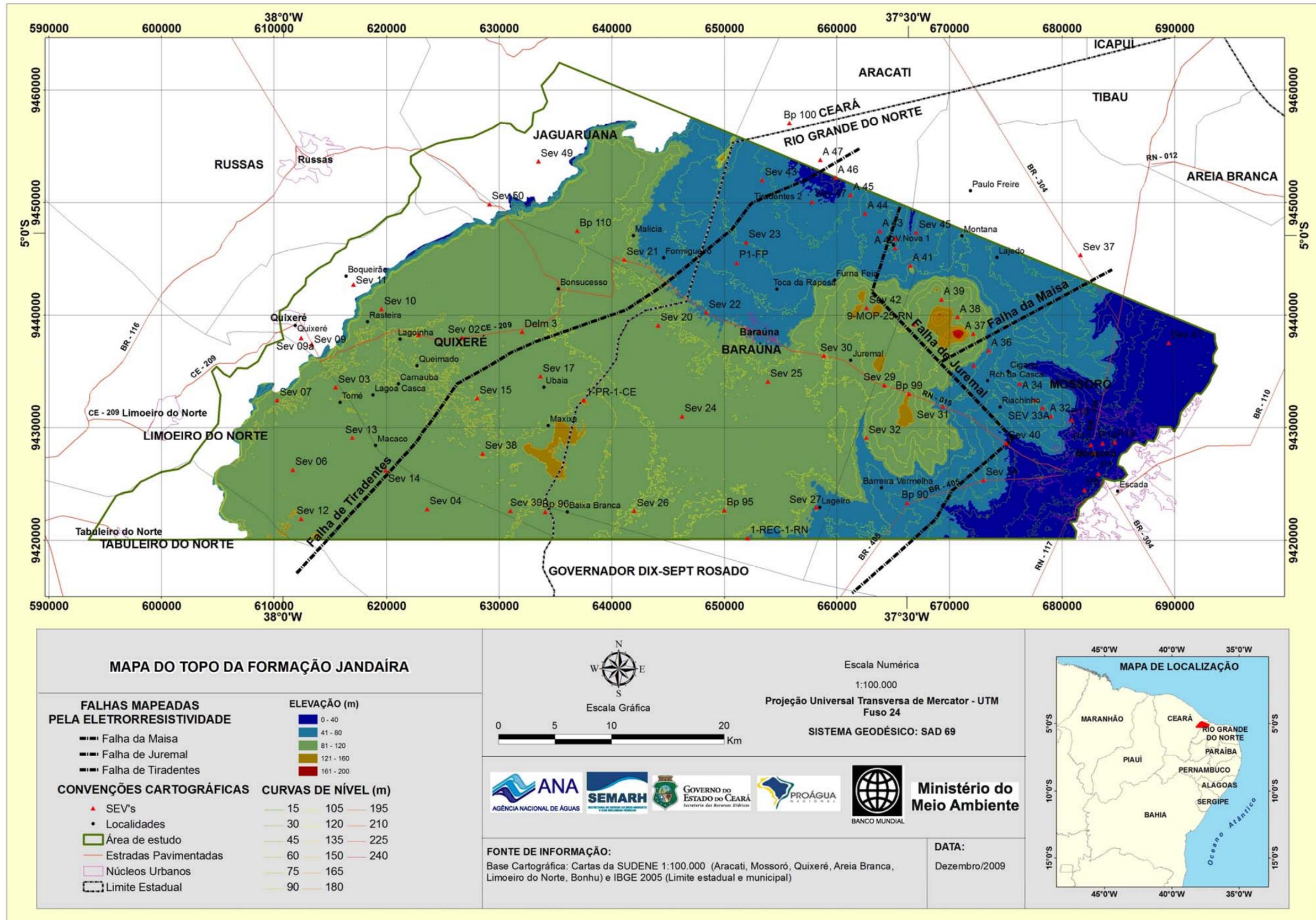


Figura 3.9 – Profundidade do topo da Formação Jandaíra.

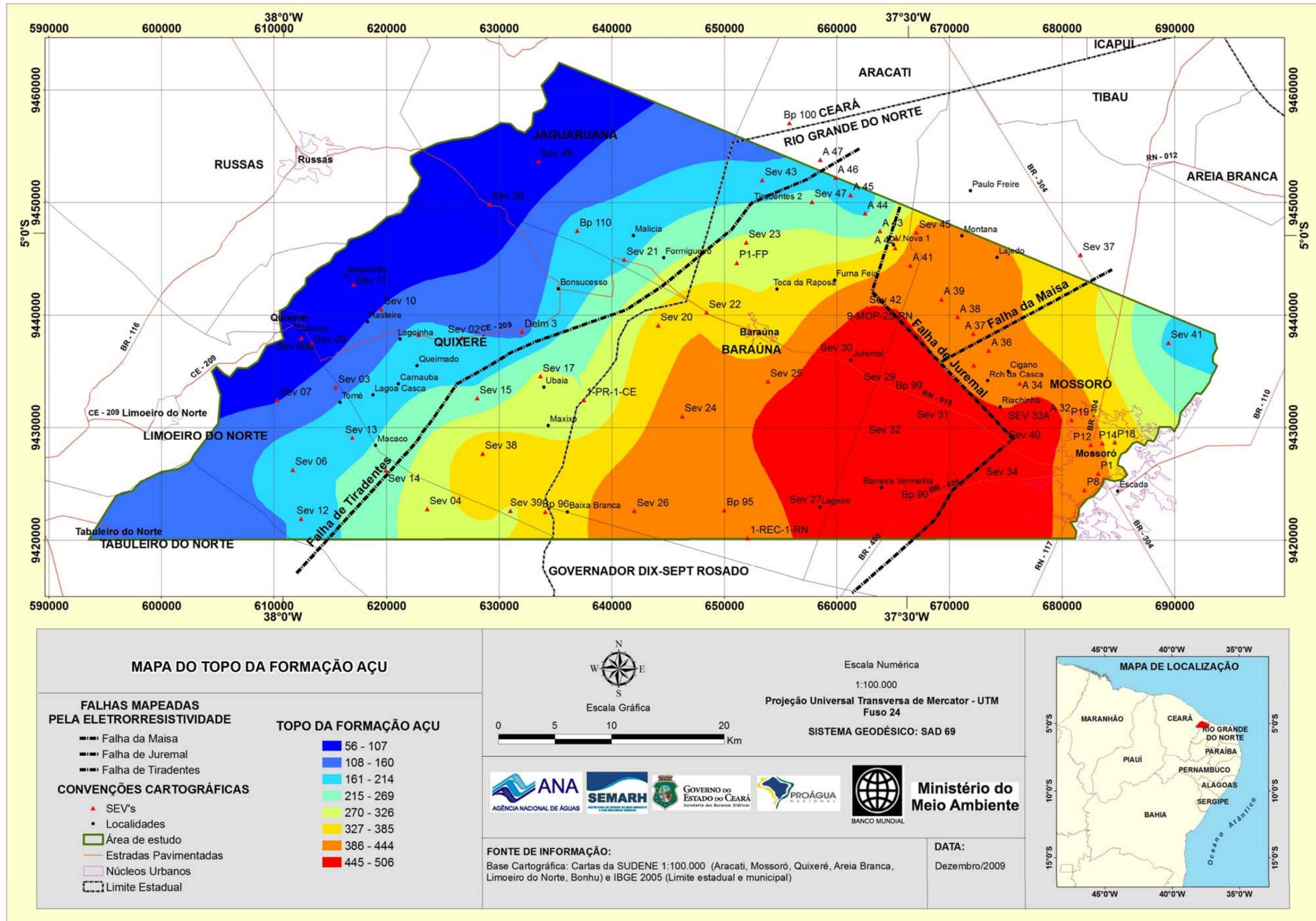


Figura 3.10 – Profundidade do topo da Formação Açú.

No primeiro desses mapas (**Figura 3.11**) mostra-se, em gradações do azul ao vermelho, a distribuição das resistências transversais dos calcários basais (calcário 2). A **Figura 3.12**, por sua vez, mostra a zona onde ocorrem as maiores resistências transversais desses calcários, que coincide com a zona onde essa rocha exibe as maiores espessuras.

No segundo mapa (**Figura 3.13**) mostra-se, em gradações também do azul ao vermelho, a distribuição das condutâncias longitudinais do horizonte condutivo 3 (**ver Tabela 3.1**), que representa a porção média da Formação Jandaíra. A **Figura 3.14**, por sua vez, enfatiza as zonas onde ocorrem as maiores condutâncias longitudinais desse horizonte condutivo. 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 estão associadas a espessas intercalações de folhelhos, enquanto que as menores magnitudes, ocorrendo no restante da área (sem cor, na **Figura 3.14**), podem ser condicionadas pelo nível carstificado regional.

No terceiro mapa (**Figura 3.15**) mostra-se, em gradações do espectro (azul-vermelho), a distribuição das resistências transversais dos calcários superiores (calcário 1). A **Figura 3.16**, por sua vez, destaca a zona onde essas resistências transversais são maiores. Dois aspectos interessantes devem ser assinalados. Em primeiro lugar, verifica-se que a faixa de maior deposição dos carbonatos desloca-se, ao longo do tempo, para oeste, em relação aos carbonatos basais mais antigos. Em segundo lugar, a maior intensidade de deposição dos carbonatos superiores aparenta ter ficado restrita ao bloco rebaixado da Falha de Tiradentes. Esse comportamento fica compatível com um avanço da transgressão cretácica, localmente, de leste para oeste, com a falha de Tiradentes funcionando como barreira.

3.1.3.1.7 - Índice de Argilosidade da Formação Jandaíra Superior

Chamamos aqui de Jandaíra Superior o conjunto dos horizontes elétricos 2 e 3 (**ver Tabela 3.1**). Para nossos objetivos específicos, é possível definir um índice de argilosidade envolvendo esses dois horizontes, como abaixo indicado:

$$I_a = \frac{CL}{RT} \times 1000 = \frac{h_2}{h_1} \times \frac{1}{\rho_1 \cdot \rho_2} \times 1000 \quad (ohm.m)^{-2} \quad \text{em que}$$

CL = Condutância longitudinal do horizonte 3

RT = Resistência transversal do horizonte 2

h_1 e ρ_1 = Espessura e resistividade verdadeira do horizonte 2
(calcário superior)

h_2 e ρ_2 = Espessura e resistividade verdadeira do horizonte 3

As espessuras e resistividades verdadeiras são obtidas das SEVs resolvidas.

A expressão acima nos mostra que o **índice de argilosidade**, assim definido, será tanto maior quanto menores forem as resistividades ρ_1 e ρ_2 e será tanto maior quanto maior for a espessura h_2 e quanto menor for a espessura h_1 .

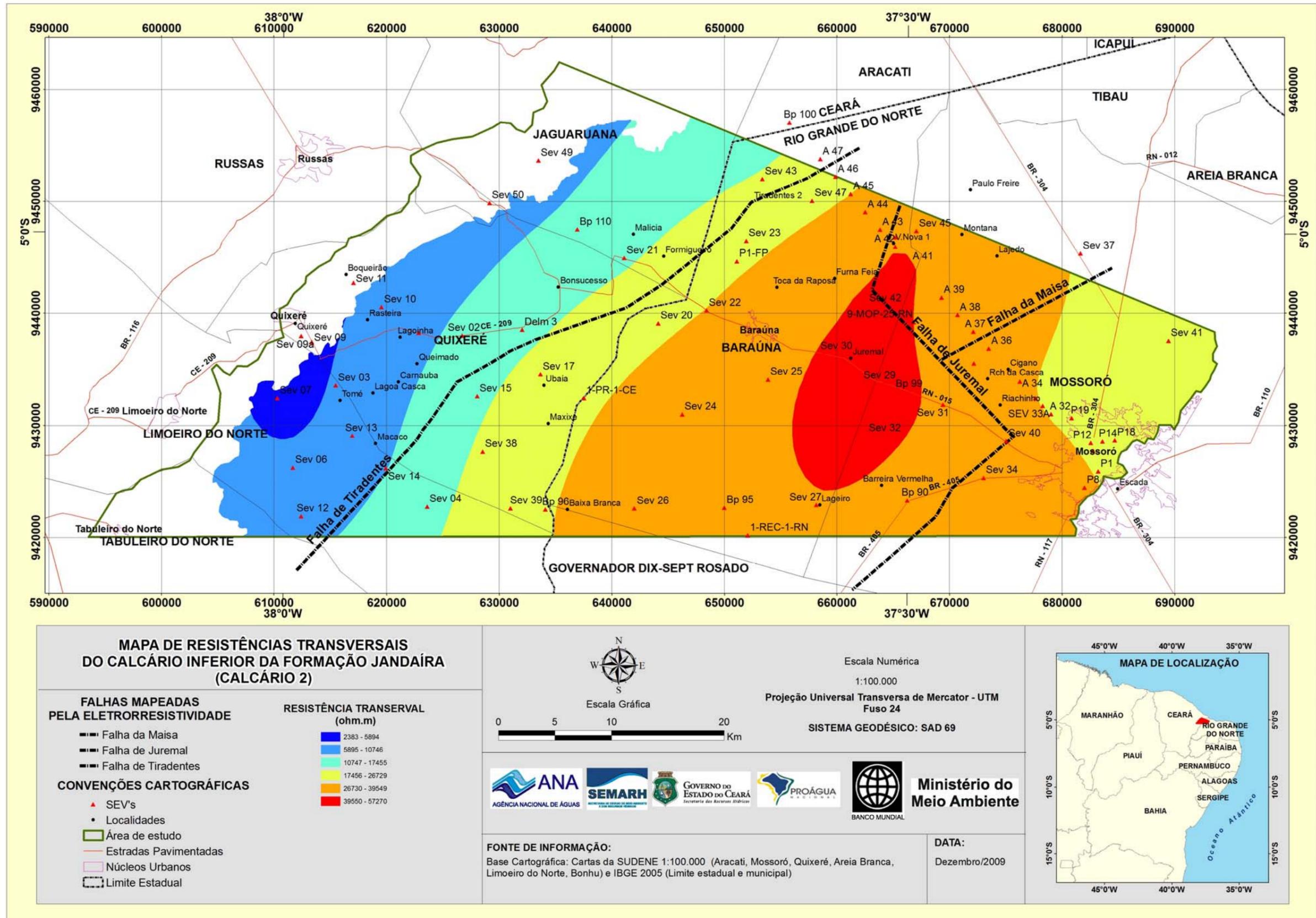


Figura 3.11 – Mapa de resistências transversais do calcário inferior (calcário 2).

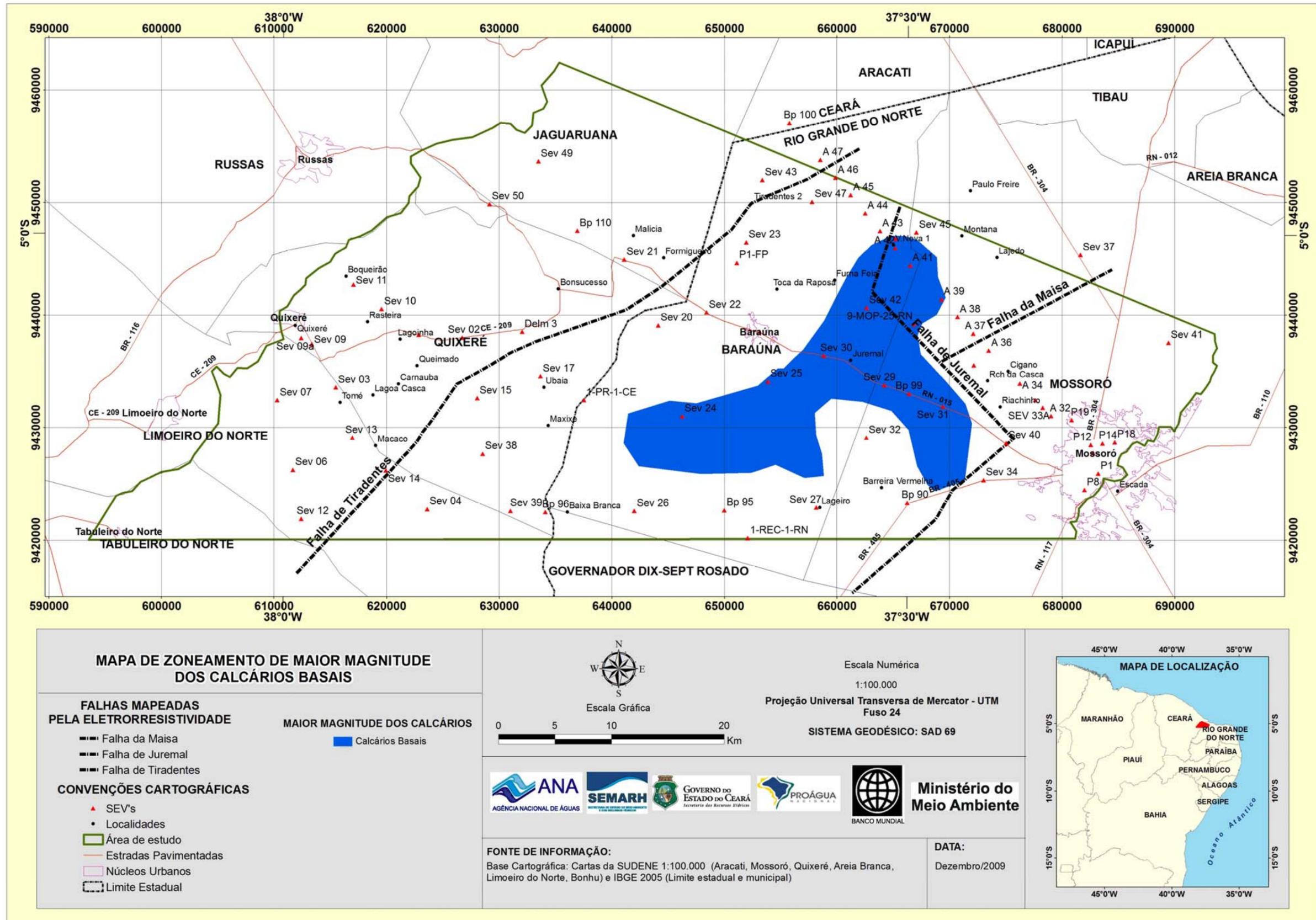


Figura 3.12 – Zoneamento da maior magnitude dos calcários basais (calcário 2).

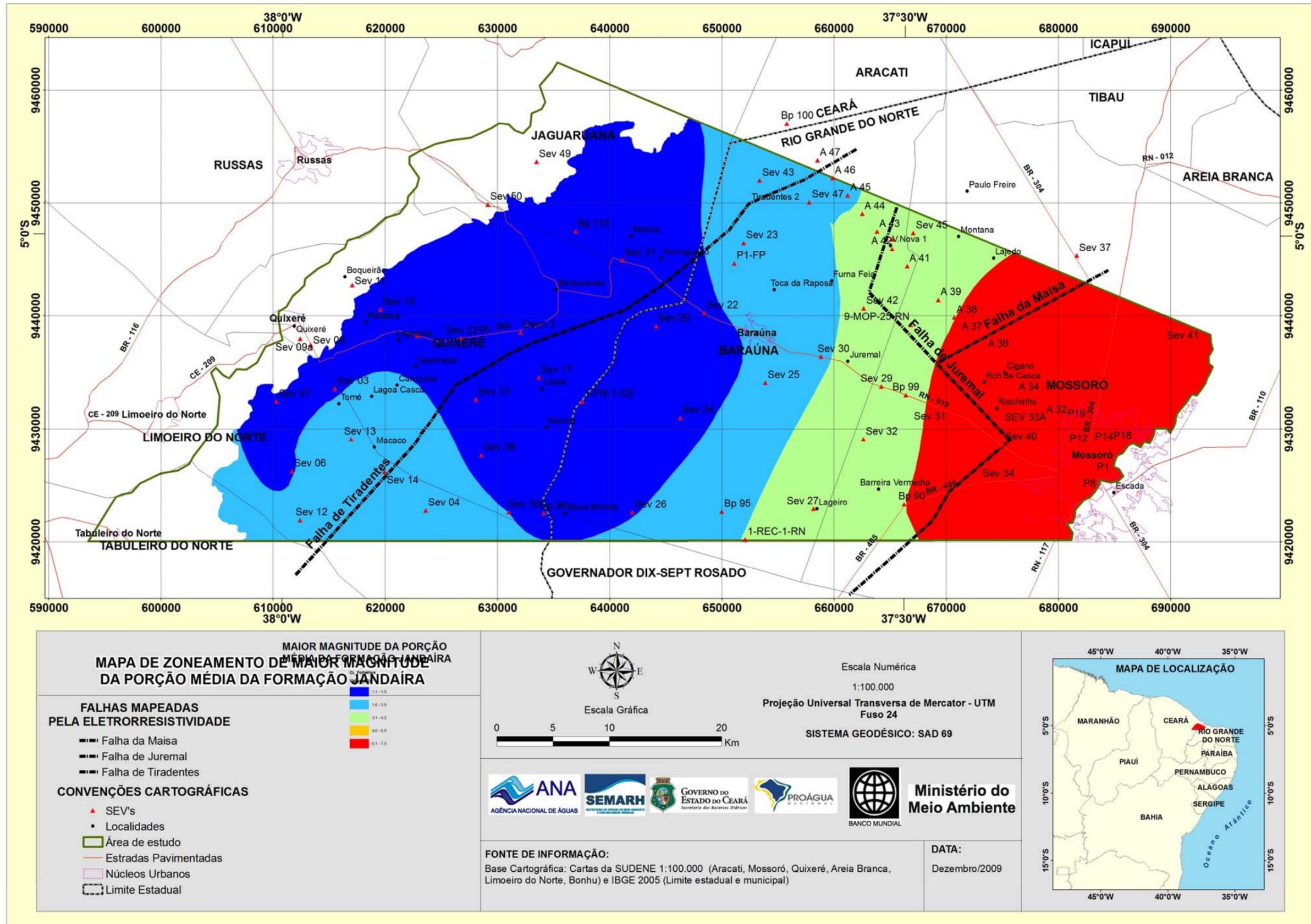


Figura 3.13 – Mapa de condutâncias longitudinais da porção média da Formação Jandaíra (folhelhos e/ou margas).

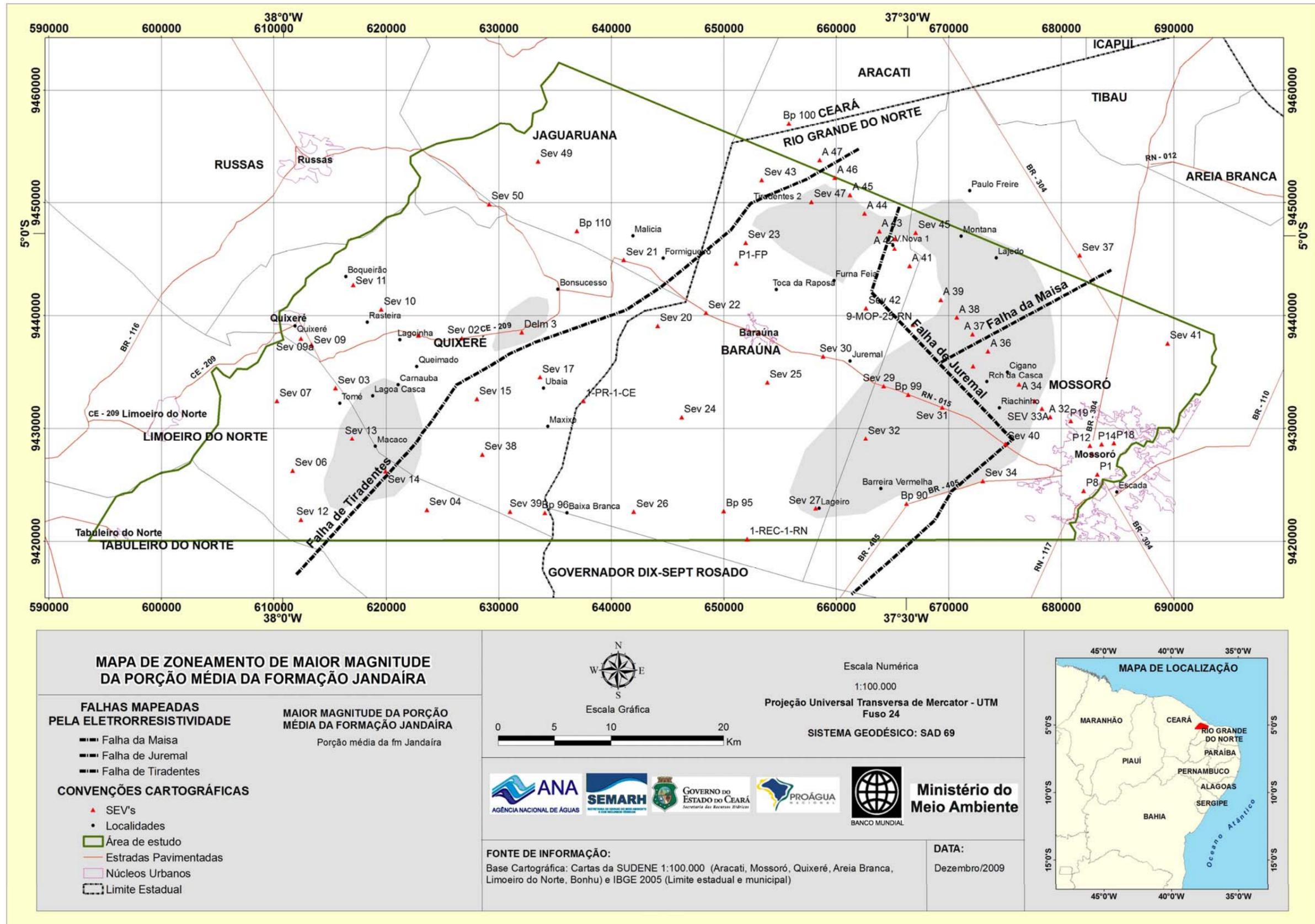


Figura 3.14 – Zoneamento da maior magnitude da porção média da Formação Jandaíra (folhelhos e/ou margas).

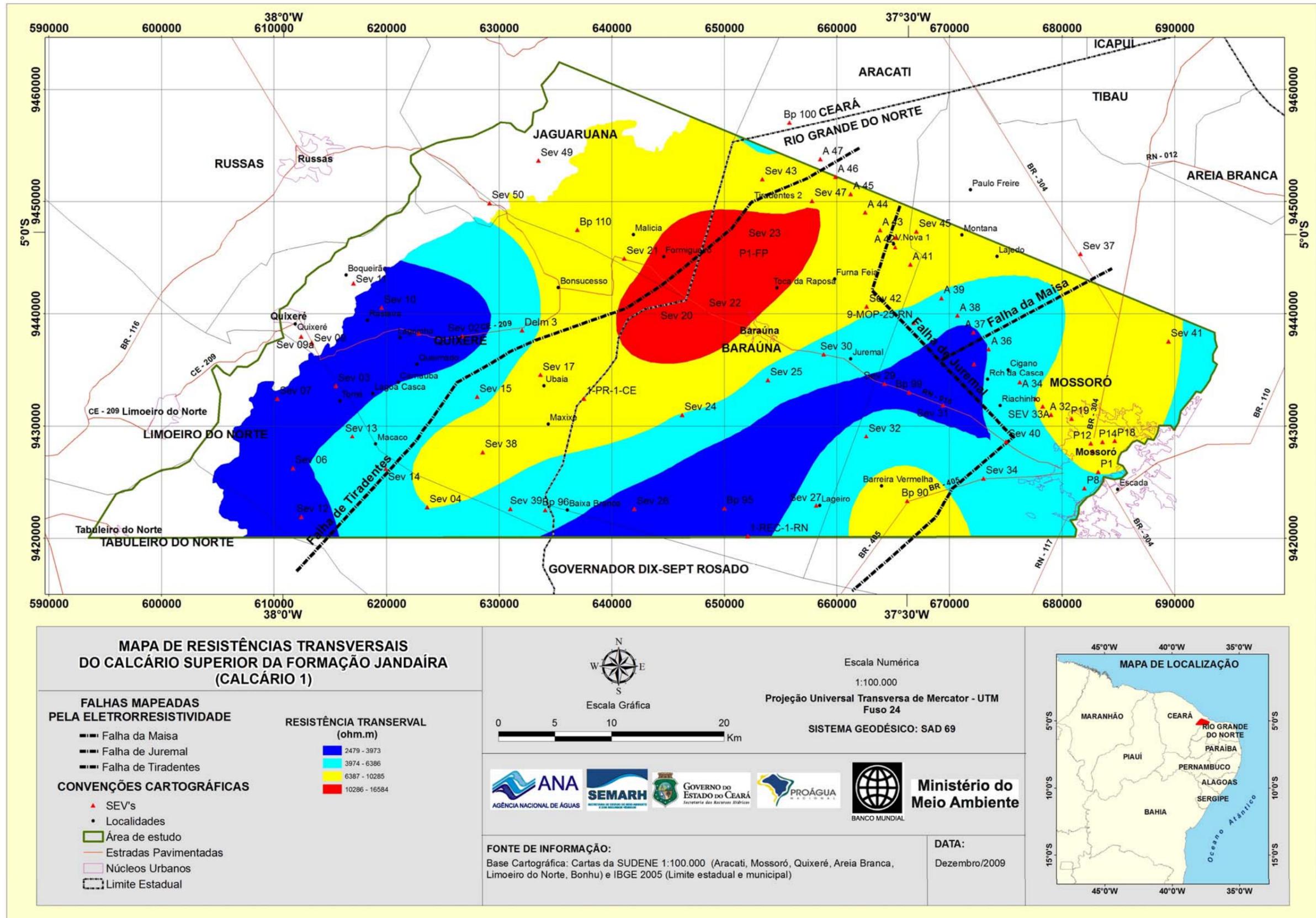


Figura 3.15 – Mapa de resistências transversais do calcário superior (calcário 1).

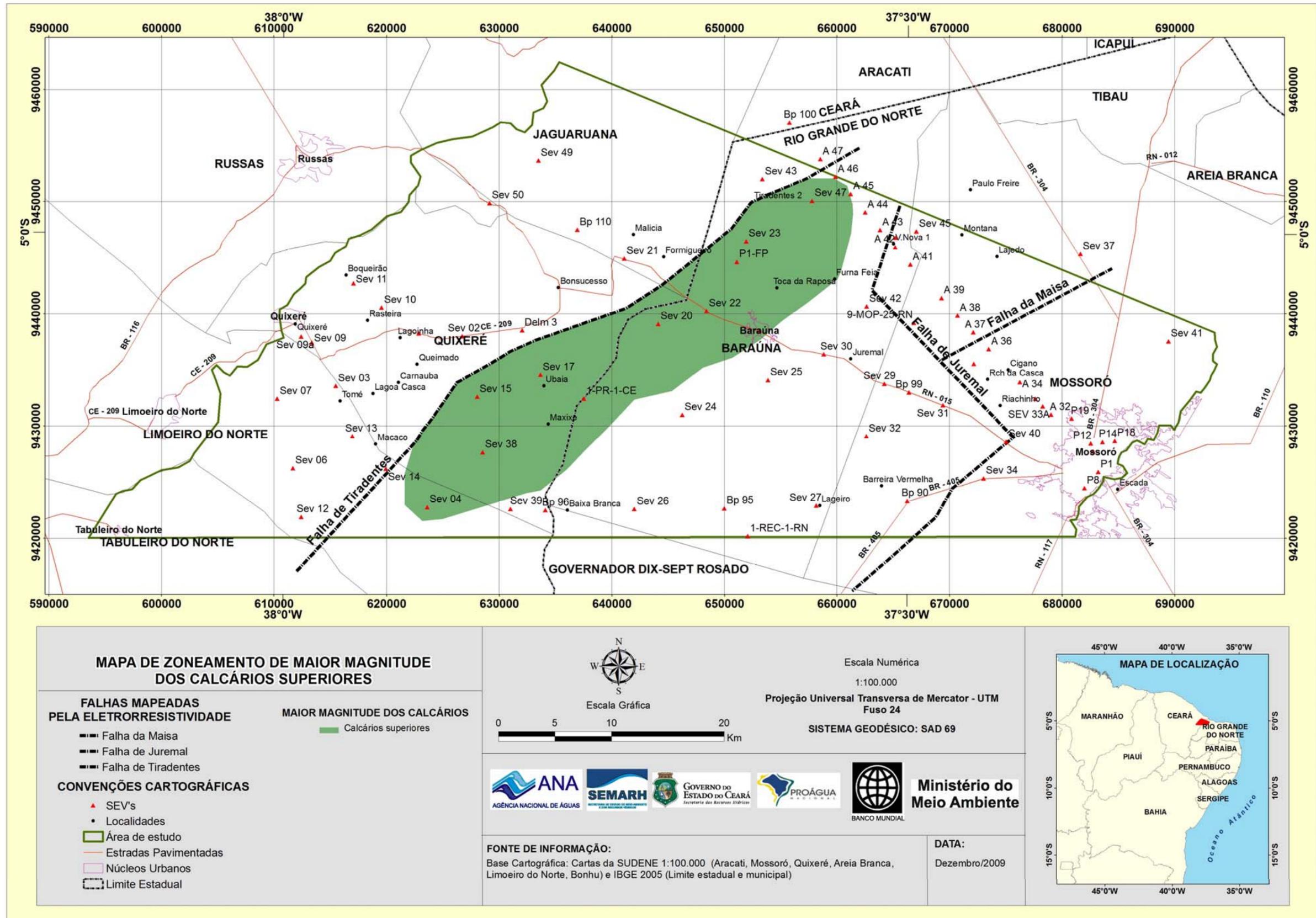


Figura 3.16 – Maior magnitude dos calcários superiores (calcário 1).

Em termos litológicos, esse índice será tanto maior quanto maior for o teor argiloso do pacote e será tanto menor quanto menor for esse teor argiloso, mantida razoavelmente constante a salinidade da água.

O zoneamento desse índice é apresentado no mapa da **Figura 3.17**.

A **Figura 3.17** mostra que os menores índices de argilosidade (< 0,8, na cor azul) ocorrem segundo uma faixa alongada NE-SW, na Plataforma de Baraúna e bordejando a Falha de Tiradentes. Nessa faixa os calcários superiores (calcário 1) são mais espessos e têm menos intercalações de folhelhos. Por outro lado, essa faixa inclui a zona de maior **índice de carstificação**, conforme mostrado na **Figura 3.16**. Não é, portanto por acaso, que a maior concentração de poços, servindo à fruticultura irrigada no Rio Grande do Norte, ocorra nessa faixa.

Os maiores índices de argilosidade (entre 0,8 e 3,0, na cor cinza) ocorrem de ambos os lados da faixa de menor argilosidade. Esses valores podem significar menores espessuras do calcário sobre espessuras significativas dos folhelhos do horizonte 3, ou podem significar variação lateral do calcário 1 para esses folhelhos, como mostrado na **Figura 3.2** do **item 3.1.2.1**.

3.1.3.1.8 - Perfis Geológicos

As **figuras 3.18, 3.19 e 3.20** mostram os perfis geológicos elaborados com base na interpretação das SEVs. Eles representam, em outras palavras, a interpretação geológica e correlação dos cortes geoeletricos obtidos com a resolução das SEVs.

Desde que existem evidências elétricas, procurou-se mostrar a interdigitação dos folhelhos (Formação Quebradas) com os calcários, particularmente com os calcários superiores. No que diz respeito à interdigitação da Formação Quebradas com a Formação Açú, defendida pela PETROBRAS, a eletrorresistividade não pôde mostrá-la. Os folhelhos Quebradas, com efeito, devem ter resistividade elétrica muito próxima da resistividade dos folhelhos da Formação Açú Superior. Nessas condições, a variação lateral do Açú para o Quebradas não acarretaria qualquer diferenciação elétrica, não sendo, portanto, percebida. Por esse motivo, as eventuais interdigitações Açú/Quebradas, não são mostradas nos perfis.

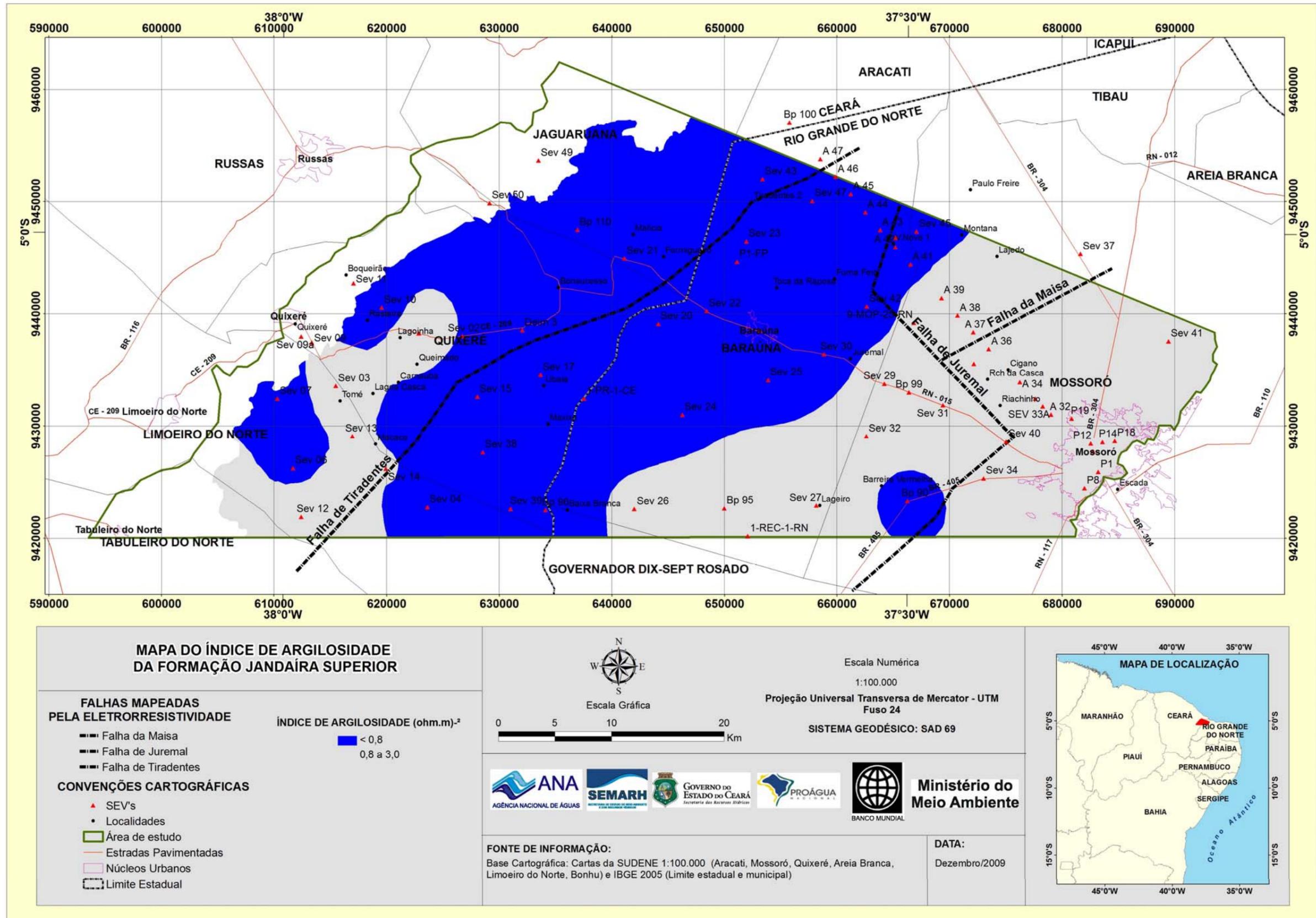


Figura 3.17 – Mapa do índice de argilosidade da formação Jandaíra superior.

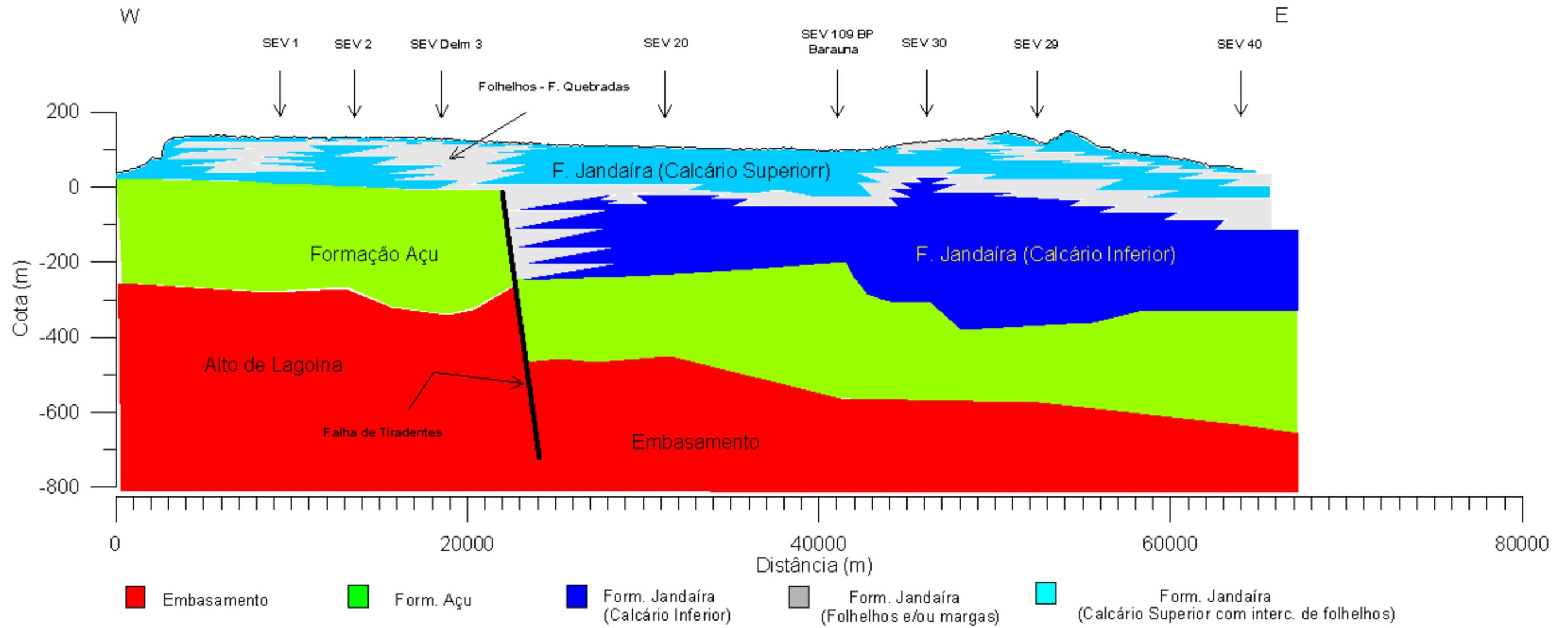


Figura 3.18 - Perfil Quixeré – SEV 40 (Perfil AA').

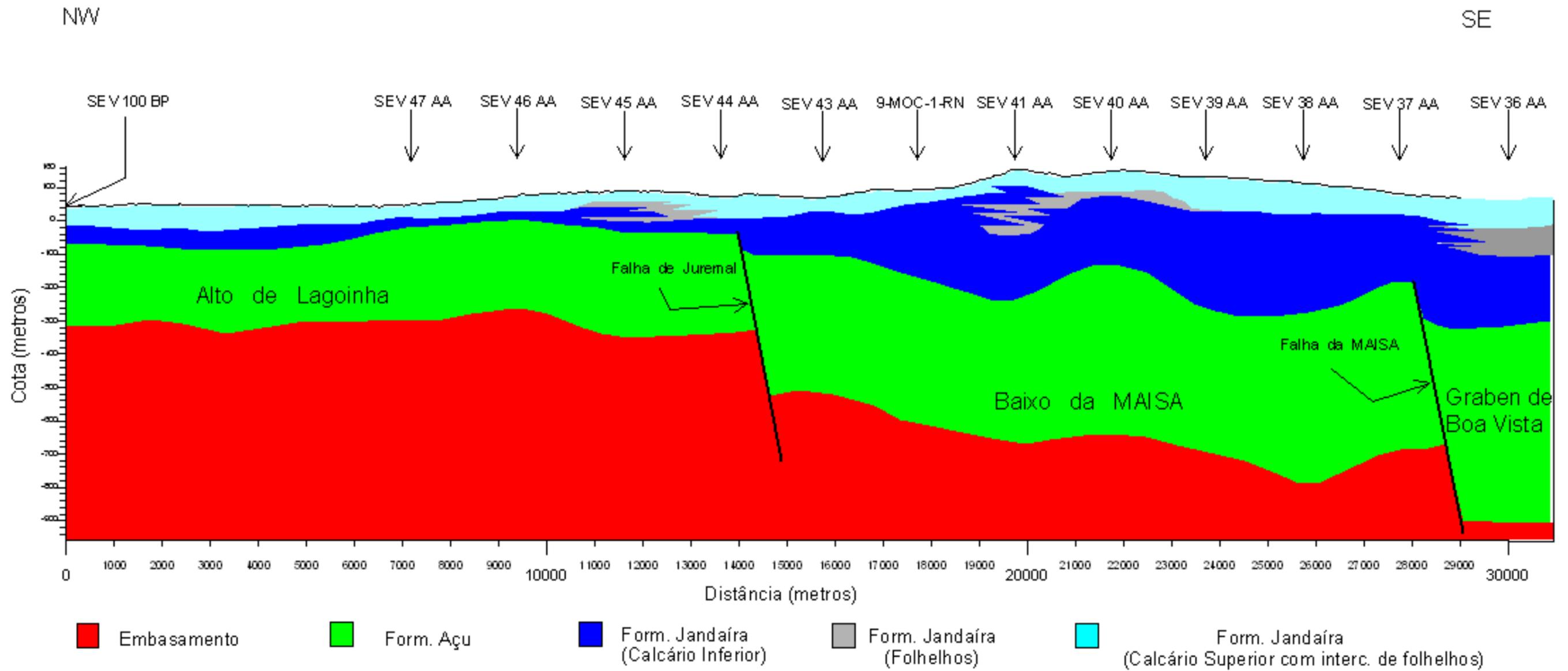


Figura 3.19 - Perfil SEV 100 BP – SEV 36 AA (Perfil BB').

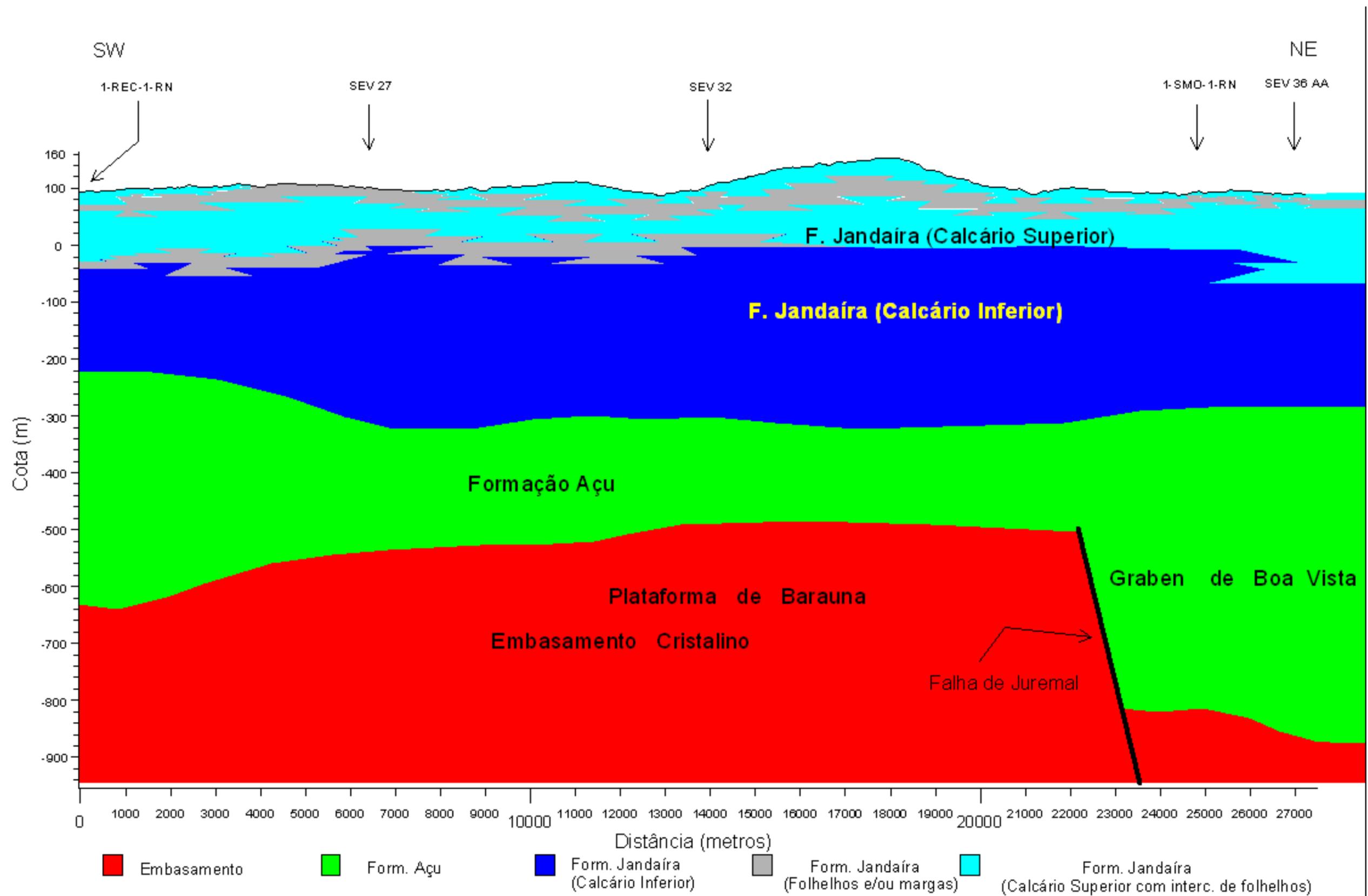


Figura 3.20 - Perfil Poço 1-REC-1-RN – SEV 36 AA'(Perfil CC').

3.1.3.2 – Produtos dos Perfis Laterais

Os perfis realizados permitiram a elaboração de um mapa de resistividades aparentes, mostrado na **figura 3.21** a seguir.

As resistividades aparentes medidas com a linha AB adotada dizem respeito aos calcários superiores (calcário 1) da Formação Jandaíra.

As resistividades aparentes inferiores a 90 ohm.m correspondem a litologias em que ocorrem intercalações de folhelhos escuros com importantes bancos calcários.

- ✓ Na medida em que as resistividades caem para valores menores que 50 ohm.m, a frequência dos bancos calcários diminui, havendo mesmo locais onde a sequência litológica pode ser quase que totalmente pelítica até, pelo menos, 80 metros de profundidade. Consideram-se, portanto, como pouco produtivas ou, mesmo, estéreis, as zonas da Formação Jandaíra onde prevalecem resistividades inferiores a 50 ohm.m
- ✓ As resistividades aparentes superiores a 170 ohm.m correspondem a litologias em que predominam calcários nos quais devem ocorrer apenas esporadicamente intercalações dos folhelhos escuros acima citados. Esses calcários exibem comumente importantes estruturas cársticas saturadas, sendo portanto considerados, na área estudada, como bons corpos produtivos de água subterrânea.
- ✓ As resistividades aparentes superiores a 90 ohm.m e inferiores a 170 ohm.m correspondem a uma gradação entre as duas situações extremas acima descritas. Essa gradação se caracteriza por uma interdigitação calcário/folhelho em que maiores resistividades traduzem uma maior ocorrência de termos calcários e, vice-versa, menores resistividades indicam uma maior ocorrência de folhelhos. As áreas onde ocorrem essas resistividades compreendidas entre 90 e 170 ohm.m parecem ser muito heterogêneas em termos de armazenamento e produção de água subterrânea. Existem, com efeito, setores muito produtivos ao lado de setores que apresentam fracos desempenhos, como demonstrado pelos poços existentes. As razões desse comportamento parecem residir, de um lado, em caprichosas concentrações de folhelho que podem se apresentar localmente e, de outro lado, na distribuição irregular das estruturas cársticas. Acredita-se que a otimização das descargas dos poços nas áreas aqui discutidas deva requerer estudos detalhados localizados.

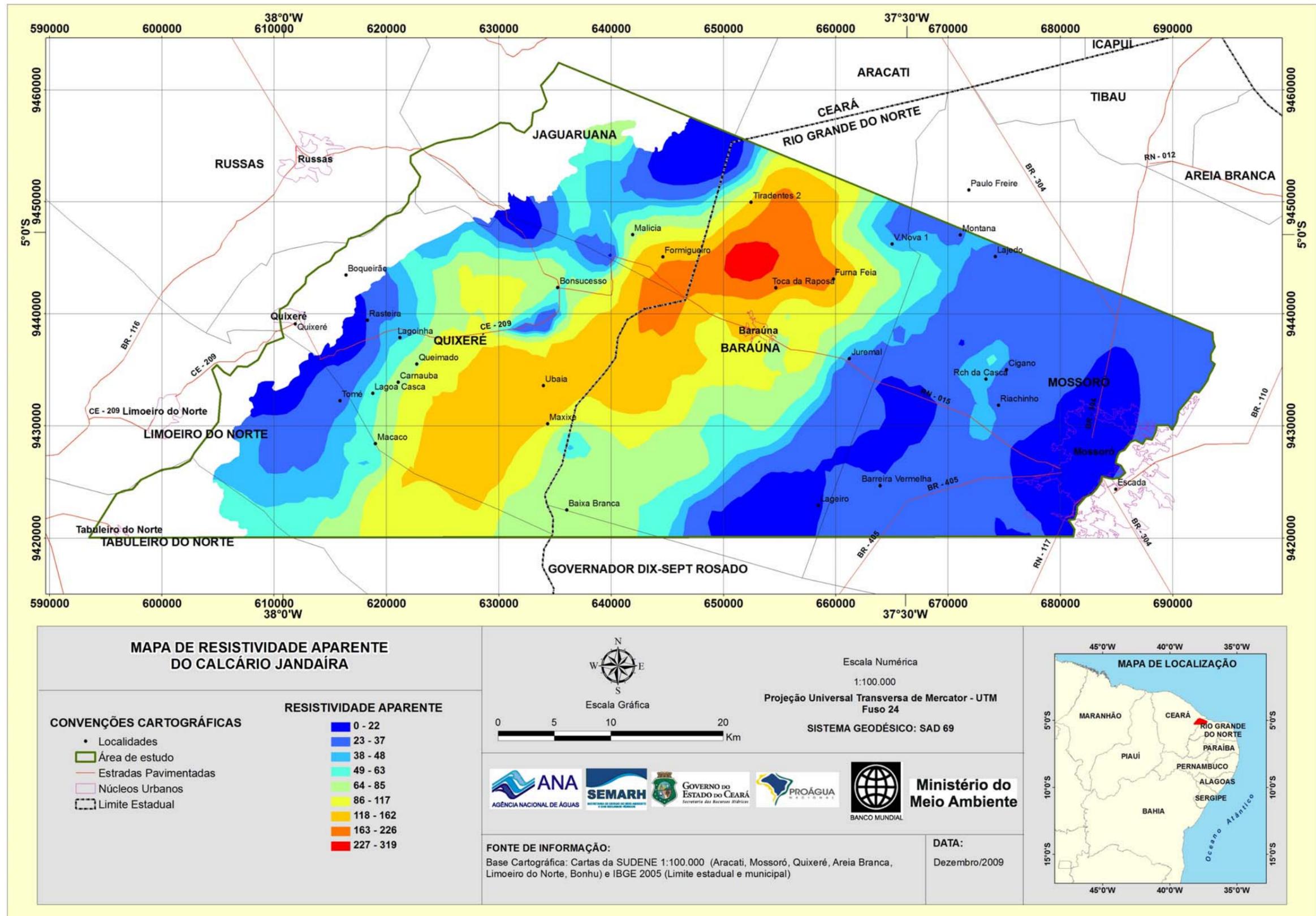


Figura 3.21 - Mapa de resistividade aparente do calcário Jandaíra.

O presente mapa de resistividades aparentes (**figura 3.21**) exibe com bastante nitidez, uma concentração de calcários aquíferos eletricamente resistivos, num claro alinhamento NE-SW, bordejando a Falha de Tiradentes pelo seu lado rebaixado. No bloco alçado dessa falha, ou seja, no Alto de Lagoinha, predominam resistividades inferiores a 50 ohm.m, indicativas de litologias predominantemente pelíticas. Assim sendo, a Formação Jandaíra, como classicamente conhecida, não chega aparentemente até a borda da escarpa.

Como acontece no Alto de Lagoinha, toda a grande região a leste de Juremal é ocupada por litologias pelíticas até profundidades da ordem de 40 a 60 metros. Nas vizinhanças da margem esquerda do Rio Apodi, entretanto, os calcários superiores são salinizados por infiltração lateral a partir desse rio. Nessas condições, as resistividades são também muito baixas, não se podendo, aí, atribuí-las a litologias argilosas.

Neste ponto da nossa exposição, remetemos o leitor ao zoneamento do **índice de argilosidade** (**figura 3.17**). Esse índice, tal como definido nas sondagens elétricas, faz realçar os calcários superiores de caráter mais puro, destituídos de frações argilosas significativas.

Dessa forma, a faixa de calcários aquíferos, alinhada NE-SW, esboçada anteriormente pelo índice de argilosidade, fica agora ratificada e descrita com maior rigor, graças ao detalhamento provido pelos perfis laterais de resistividade (**figura 3.3**).

3.1.3.2.1 - Índice de Carstificação da Formação Jandaíra Superior

A experiência adquirida com a utilização da eletrorresistividade na locação de poços na Formação Jandaíra, vem levando a admitir que heterogeneidades elétricas, em perfis laterais, podem estar associadas a heterogeneidades físicas dos calcários, decorrentes de uma grande intensidade de carstificação. Essas heterogeneidades, que podem ser vistas nas **figuras 3.22 e 3.23**, são caracterizadas por variações abruptas de grande intensidade e em curtos espaços, conferindo à curva do perfil lateral um aspecto serrilhado. Essa observação levou à concepção de um índice elétrico que denominamos de Índice de Carstificação (IC) Esse índice é calculado da seguinte forma (Feitosa, 2004):

$$IC_i = \left(\sum_{j=i+1}^n |r_i - r_j| \right) \frac{r_i}{n} \quad (3.1)$$

Os elementos da expressão acima têm os seguintes significados:

- ✓ IC_i = índice de carstificação no ponto i.
- ✓ r_i = resistividade aparente no ponto i (estação de medição), no qual se deseja calcular o índice de carstificação.
- ✓ r_j = resistividade aparente em um ponto situado a uma distância d, menor que um certo valor fixado. Para o problema em foco, considerou-se uma distância d menor que 250 metros, porque o espaçamento entre as estações de medição (passo), nos perfis, foi de 200 metros.
- ✓ n = número total de diferenças $|r_i - r_j|$.

O índice de carstificação, tal como definido, expressa simplesmente uma variabilidade elétrica média, dada pelo termo $|r_i - r_j|/n$ na **equação 3.1**. Temendo-se que variações nas zonas condutivas pudessem eventualmente suplantar as variações esperadas nas zonas resistivas, introduzindo anomalias indesejáveis, decidiu-se multiplicar o termo $|r_i - r_j|/n$ pela resistividade aparente r_i do ponto considerado, o que resulta na unidade $\text{ohm}^2 \cdot \text{m}^2$ para esse índice. Ficaram, assim, assegurados valores baixos do índice de carstificação nas zonas de predominância de folhelhos, onde não se esperam incidências significativas de carstificações.

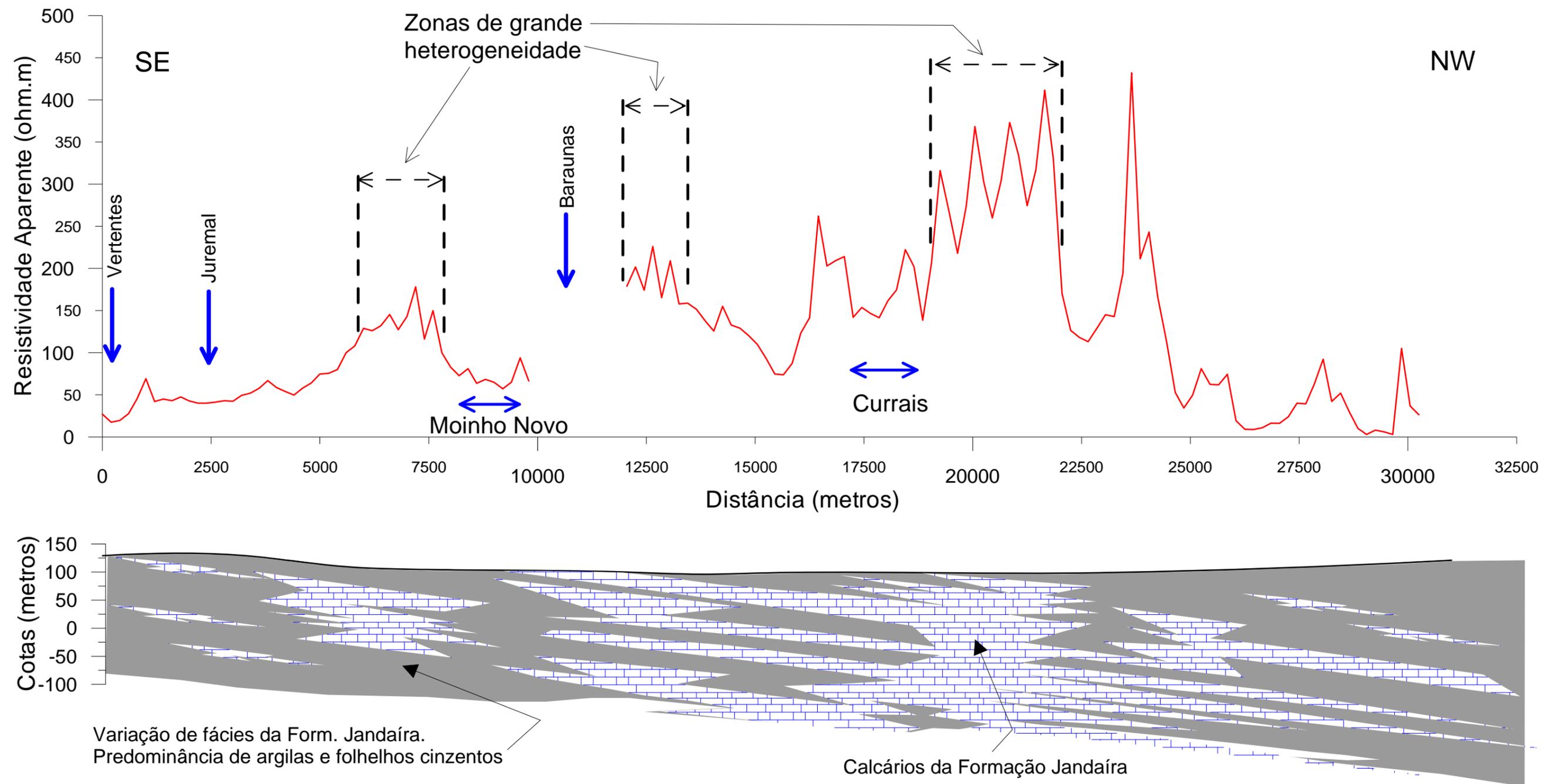


Figura 3.22 – Perfil de Resistividades Aparentes Vertentes – Borda da Bacia.

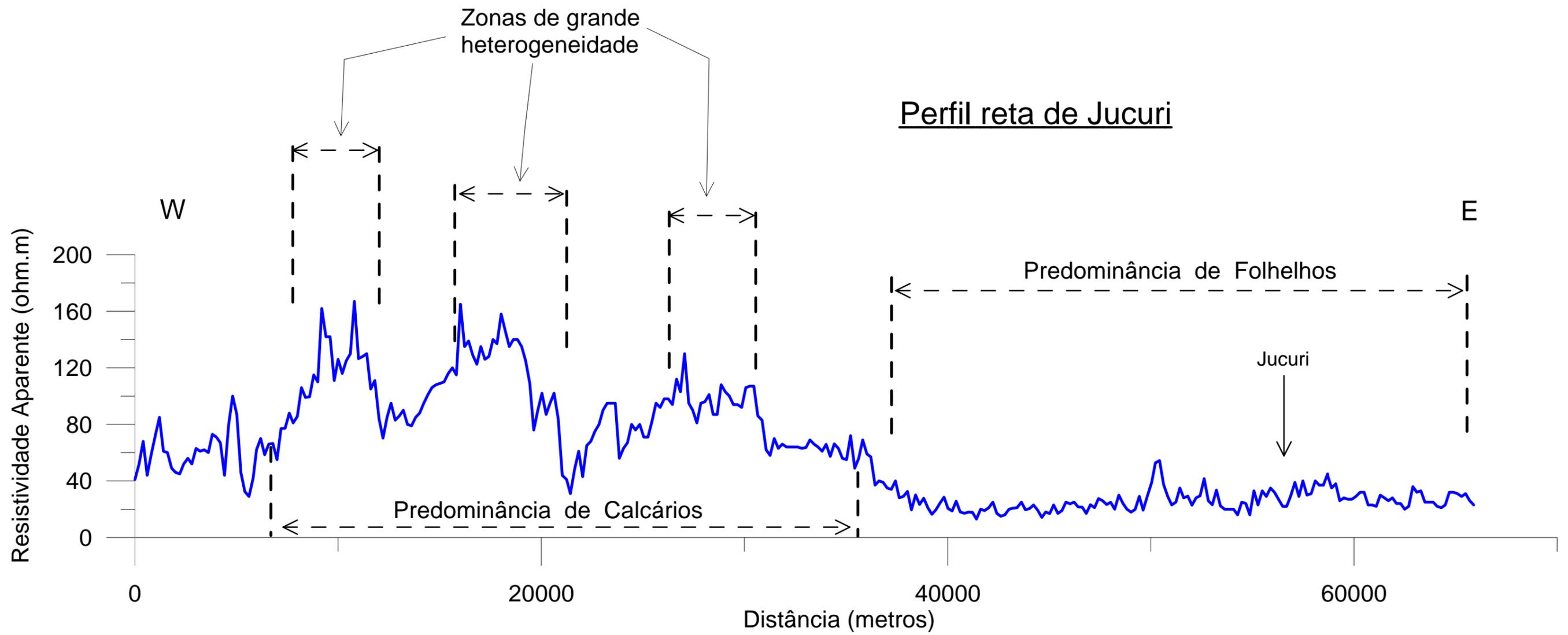


Figura 3.23 – Perfil de Resistividades Aparentes ao longo da estrada Jucuri – Borda da Bacia.

Como se dispõe das coordenadas UTM de todas as estações de medição, em todos os perfis, o cálculo do índice IC foi viabilizado através de um pequeno programa, na linguagem Turbo Basic, da Borland.

Foi elaborado um mapa desse índice, o qual é mostrado na **figura 3.24**.

Pela sua própria definição, admite-se que o índice de carstificação seja tanto maior quanto mais intensa for a carstificação dos calcários. Considerando essa propriedade do IC, a análise do zoneamento do índice de carstificação admite os seguintes comentários:

- ✓ Valores acima de 20 $\text{ohm}^2.\text{m}^2$ caracterizam a zona de predominância de calcários mostrada no mapa de resistividades aparentes (**figura 3.21**).
- ✓ Valores abaixo de 20 $\text{ohm}^2.\text{m}^2$ caracterizam a zona de predominância de folhelhos, também mostrada na **figura 3.21**.
- ✓ Duas anomalias se destacam, em tons verde e azul, na região de Baraúna, com valores do IC superiores a 120 $\text{ohm}^2.\text{m}^2$. Essas anomalias correspondem às zonas onde o calcário 1 é mais resistivo, de acordo com o mapa de resistividades aparentes (**figura 3.21**). Nessas zonas foram localizados os dois poços de pesquisa no Jandaíra (um no Rio Grande do Norte, o outro no Ceará) que revelaram uma grande incidência de cavernas e produziram descargas substanciais.

O fato de os mais altos índices de carstificação corresponderem exatamente às zonas eletricamente mais resistivas, nos calcários, leva naturalmente a questionar se a consideração da resistividade r_i , na **equação 3.1**, não estaria forçando essa coincidência.

Para esclarecer a dúvida, julgou-se conveniente definir um outro índice de carstificação, considerando-se agora apenas a variabilidade elétrica média $|r_i - r_j|/n$. O novo índice, portanto, que chamaremos de IC₂ e tendo como unidade o $\text{ohm}.\text{m}$, foi expresso como:

$$IC_2 = \left(\sum_{j=i+1}^n |r_i - r_j| \right) \frac{1}{n} \quad (3.2)$$

Os elementos do IC₂, na **equação 3.2**, bem como a metodologia de cálculo desse novo índice, são os mesmos já explicados para o caso anterior.

Foi elaborado um mapa desse índice IC₂, o qual é mostrado na **figura 3.25** a seguir.

Verifica-se, no mapa da **figura 3.25**, que os valores mais baixos continuam caracterizando as zonas de predominância de folhelhos, enquanto que os valores mais altos coincidem em grande parte com os calcários resistivos. Além disso, as anomalias do IC₂, ou seja, zonas com valores superiores a 80 $\text{ohm}.\text{m}$, continuam coincidindo com as zonas onde o calcário superior, ou calcário 1, é mais resistivo. São duas essas zonas: (1) a zona ao norte da cidade de Baraúna, onde se situam as localidades de Toca da Raposa e Furna Feia; (2) a zona a oeste dessa cidade, onde se situam as localidades de Sumidouro, Formigueiro e o Posto Fiscal.

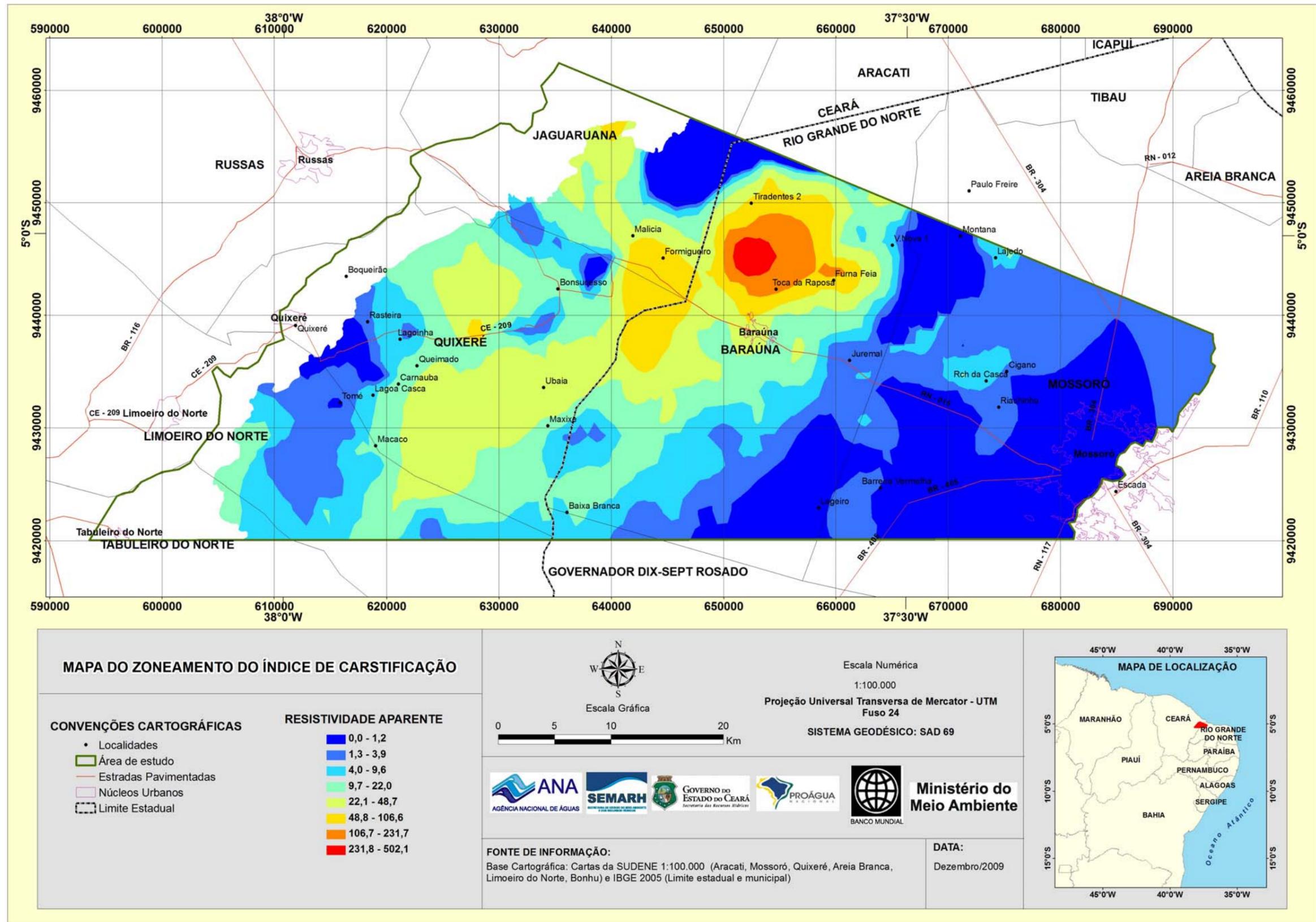


Figura 3.24 – Zoneamento do Índice de Carstificação IC.

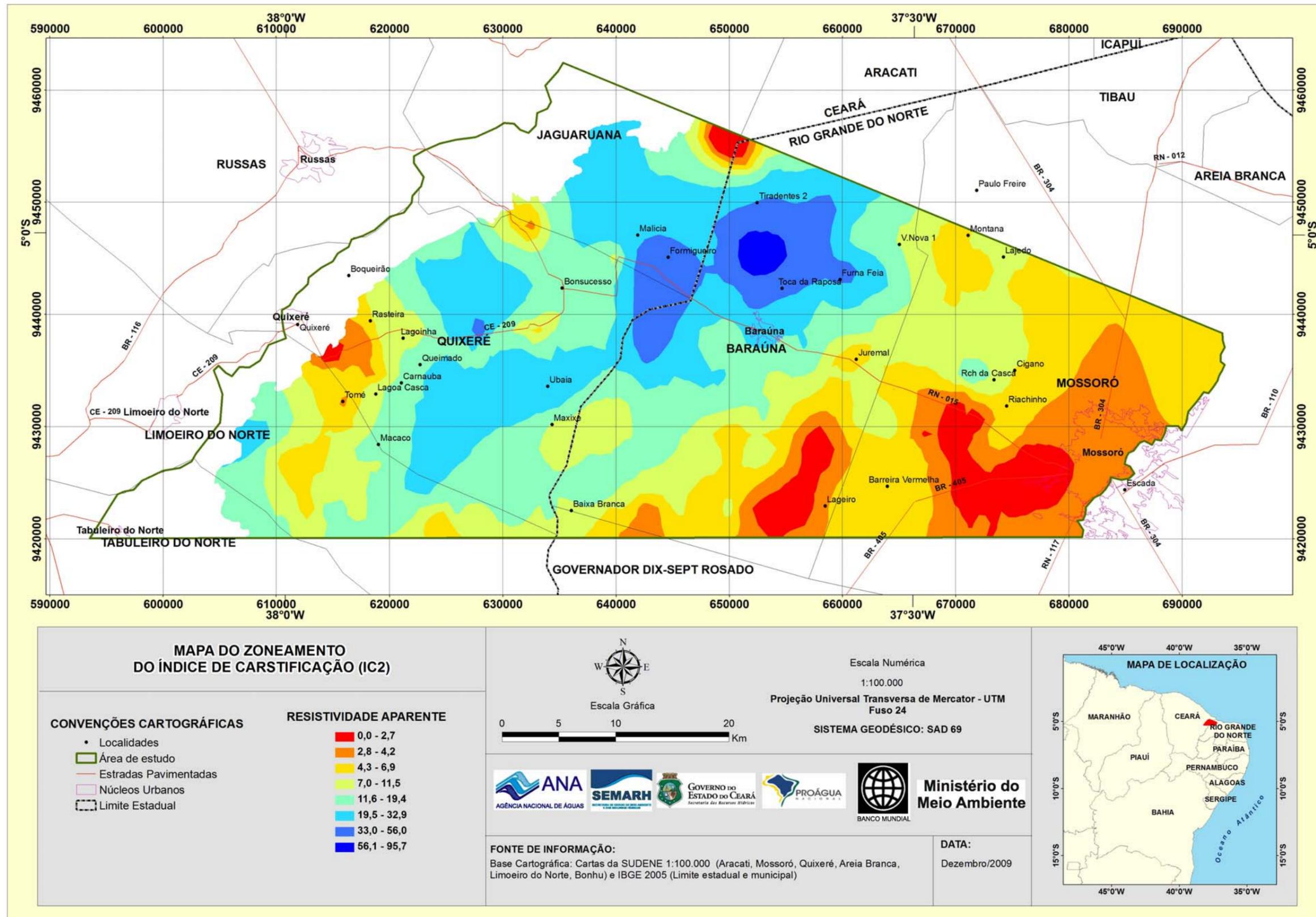


Figura 3.25 – Zoneamento do Índice de Carstificação IC2.

3.1.4 - Conclusões

As conclusões que puderam ser obtidas com a interpretação de **50 sondagens elétricas verticais** e com a análise de estudos anteriores foram as seguintes:

- ✓ 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 ou flexuras pronunciadas. Esses patamares, foram denominados de Alto de Lagoinha (cotas variando entre -300 e -250 metros), Plataforma de Baraúna (cotas variando de -400 a -550 metros), Baixo da MAISA (cotas atingem -650 metros) e Graben de Boa Vista (cotas atingem -800 metros). Essa compartimentação estrutural é mostrada na **figura 3.4**.
- ✓ 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, 390 e 590 metros. Sobre a chamada Plataforma de Baraúna e sobre o Alto de Lagoinha, a Formação Açú exibe espessuras bem mais reduzidas, entre 190 e 290 metros.
- ✓ O Alto de Lagoinha é uma feição estrutural que se individualizou após a sedimentação da Formação Açú. Em outras palavras, a Falha de Tiradentes pertence a uma fase tectônica posterior a essa formação, cuja sedimentação não foi, assim, influenciada por ela.
- ✓ 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. Existe uma unidade intermediária, condutiva, separando a unidade superior da inferior. Essa unidade admite hoje duas hipóteses de explicação, a seguir indicadas.
 - Hipótese 1 – Intercalação de folhelhos na porção mais superior da Formação Jandaíra. Esse comportamento é extensivo em toda a Bacia Potiguar, tendo sido percebido nas descrições litológicas de uma grande número de poços da antiga CDM/RN. Considera-se essa hipótese mais provável.
 - Hipótese 2 – Nível regional de ocorrência de carstificação saturada no seio dos calcários. Considera-se essa hipótese como menos provável. Não são de se esperar, com efeito, que estruturas de dissolução, relativamente estreitas no mais das vezes, estabeleçam uma continuidade lateral a ponto de se manifestarem como um horizonte condutivo regional nas SEVs.

- ✓ Considerando-se a hipótese 1 como verdadeira, existe, na Formação Jandaíra, um nível de 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. Existem locais, como em Bonsucesso e na região a leste de Juremal, onde os folhelhos chegam a predominar.
- ✓ O nível da Formação Jandaíra atualmente explotado para irrigação, no Rio Grande do Norte e no Ceará, são os calcários superiores (calcário 1). De acordo com informações do poço exploratório P1-FP – Sítio Furna de Pedra, a zona carstificada produtora situa-se entre profundidades variando entre 40 e 50 metros. Nas zonas onde os folhelhos ocuparam a posição do calcário 1, por interdigitação, o calcário 2 pode ser alcançado por perfurações a profundidades superiores a 60 metros. Não sabemos, entretanto, se houve aí desenvolvimento apreciável de carstificação. Por essa razão, mas principalmente, por questões econômicas, o chamado calcário 1 (calcários mais superiores) permanece prioritário para captação de água subterrânea.
- ✓ A sedimentação carbonática da Formação Jandaíra parece ter avançado de leste para oeste, tendo sido detida pela Falha de Tiradentes. As espessuras da Formação Jandaíra são bastante reduzidas sobre o Alto de Lagoinha.
- ✓ A zona mais favorável à captação de água subterrânea no calcário 1 é uma faixa alinhada NE-SW, bordejando a Falha de Tiradentes, no bloco baixo dessa falha, conforme mostrado na **Figura 3.15**. Nessa zona, com efeito, se somam características favoráveis, tais como, maior espessura dos calcários superiores, menor índice de argilidade e maiores índices de carstificação. Essa zona foi definida a partir da interpretação qualitativa das sondagens elétricas verticais, cujo espaçamento variou entre 4 e 10 km. Os perfis de resistividade, ora em fase de realização no campo, foram programados para investigar esses calcários superiores. Os resultados que serão obtidos com esses perfis permitirão refinar a delimitação da zona mais favorável mostrada na **Figura 3.15**.

Na área do projeto, as conclusões a que se chegou com a realização de **336 km de perfis laterais de resistividade** foram as seguintes:

O calcário superior (calcário 1) da Formação Jandaíra, na área estudada, é caracterizado por interdigitações com folhelho escuro.

Existe uma faixa de direção NE-SW, com largura média da ordem de 8 km onde predominam calcários aquíferos. Na direção dos seus flancos, isto é, para NW e para SE, aumenta a intensidade de intercalações de folhelhos, indo culminar, nos extremos NW e SE em zonas onde a litologia

predominante é de folhelhos escuros, até profundidades da ordem de 40 a 60 metros.

Ao nível atual de conhecimentos do problema, as áreas de maior intensidade de carstificação são duas, caracterizadas por altos valores do Índice de Carstificação (IC) e por altos valores de resistividade. Elas se apresentam, na **figura 3.21**, em tons variando do verde ao azul, e são as seguintes:

- ✓ Zona ao norte da cidade de Baraúna, onde se situam as localidades de Toca da Raposa, Furna de Pedra e Furna Feia. Essa zona aparenta ser alinhada grosseiramente W-E, se estendendo desde o poço de pesquisa P1-FP, no extremo W, até as imediações de uma conhecida caverna de grande porte denominada de Furna Feia.
- ✓ Zona a oeste da cidade de Baraúna, se estendendo das vizinhanças de Sumidouro e Mato Alto, grosseiramente para N, interceptando a Estrada do Melão no trecho entre o Posto Fiscal e a fronteira RN/CE e atingindo a localidade de Formigueiro no extremo norte.

Os calcários da faixa NE-SW acima citada e, em particular, aqueles das duas áreas acima indicadas, são rochas de maior competência que os calcários interdigitados com folhelhos. São, assim, rochas pouco deformáveis e muito quebradiças. Os esforços tectônicos que atuaram na região, portanto, tenderam a gerar nelas, preferencialmente, uma grande intensidade de fraturamento. Esses fraturamentos, por sua vez, favoreceram a circulação das águas meteóricas que geraram as estruturas cársticas. O caráter muito pouco argiloso desses calcários explica as altas resistividades, enquanto que a grande heterogeneidade física, decorrente da grande concentração de karsts, explica os altos valores do índice de carstificação.

O acréscimo de experiência decorrente do presente estudo leva a especular sobre a utilidade do zoneamento do índice elétrico de variabilidade que estamos chamando de índice de carstificação. Se as zonas de maior IC coincidem invariavelmente, no presente caso, com as zonas de maior resistividade aparente, por que não nos atermos apenas ao mapa de resistividade? A resposta a essa indagação, no presente momento, é que, teoricamente, um calcário muito resistivo mas destituído de heterogeneidades significativas, deve exibir baixos valores do IC. Por outro lado, a elaboração de um zoneamento desse índice não requer trabalhos de campo adicionais, mas, tão somente, uma rápida manipulação dos valores de resistividade aparente medidos. Assim, considera-se ainda válida a aplicação dessa abordagem em futuros estudos similares.

O mapeamento das variações laterais de fácies da Formação Jandaíra, apresentado no presente estudo, permitiu separar, no calcário superior, as zonas de predominância de calcários aquíferos daquelas outras, estéreis, onde predominam folhelhos impermeáveis. O conhecimento desse

zoneamento traz as seguintes contribuições para a gestão compartilhada do Aquífero Jandaíra:

- ✓ Locação de poços – Poderá ser evitada a locação de poços em zonas de predominância de folhelhos, nas quais as vazões são insignificantes ou nulas.
- ✓ Avaliação da recarga – As zonas de predominância de folhelhos devem ser consideradas como de fraca infiltração, ao passo que as zonas de predominância de calcários carstificados devem ser encaradas como de alto potencial de infiltração. O conhecimento da distribuição espacial dessas últimas, portanto, será de grande utilidade na avaliação da recarga natural.
- ✓ Fronteiras impermeáveis – as zonas de predominância de folhelhos, sendo zonas de muito baixa condutividade hidráulica, devem funcionar como fronteiras impermeáveis das zonas aquíferas constituídas pelos calcários. O conhecimento dessas fronteiras será útil na compreensão de rebaixamentos excessivos que possam ocorrer nos poços produtores, como, aliás, foi o caso em 2003.
- ✓ Modelagem – Na elaboração de modelos numéricos de fluxo é de grande importância o conhecimento das variações espaciais dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero a ser modelado. No presente caso, o conhecimento da distribuição espacial das zonas de predominância de folhelho e das zonas de predominância de calcário contribuirá decisivamente para a adoção de um zoneamento de condutividades hidráulicas que proverá uma base mais realista para o modelo numérico de fluxo do Aquífero Jandaíra.

Considerando a grande heterogeneidade do meio aquífero, uma eventual relocação de poços produtores existentes, visando maximizar as descargas e minimizar os rebaixamentos, passa necessariamente pela realização de estudos geofísicos de detalhe localizados.

Das duas áreas de maior potencial hidrogeológico, indicadas a partir do Índice de Carstificação, a área situada ao norte da cidade de Baraúna é ainda pouco explorada para irrigação, em função de solos pouco espessos. Essa área fica aqui sugerida como alternativa para futuras captações, de modo a minimizar a tendência hoje existente de uma excessiva concentração de poços na área a sudoeste da cidade de Baraúna.

3.2 – Estudos Gravimétricos

3.2.1 - Introdução

Estudos geofísicos gravimétricos apresentam-se como uma importante fonte de pesquisa, a qual fornece informações do contorno da superfície topográfica do embasamento, auxiliando na definição do modelo tridimensional do pacote sedimentar e possibilitando a identificação e localização de estruturas e alinhamentos estruturais presentes na área de estudo.

A identificação das estruturas (sistemas de horsts e grabens, afundamentos da superfície do embasamento, alinhamentos estruturais regionais, trends, etc) é importante para a compreensão do desenvolvimento da geomorfologia do ambiente cárstico-fissural em estudo (Aquífero Jandaíra). A ocorrência da dissolução no calcário está diretamente relacionada à antigas estruturas presentes no embasamento.

Dessa forma, a gravimetria contribui expressivamente para o estudo de detalhe do arcabouço estrutural da área estudada e também para a determinação da distribuição espacial dos aquíferos Açu e Jandaíra, tendo em vista relacionar o atual conhecimento da bacia (através da localização de horsts e grabens) com a movimentação tectônica das estruturas (falhas, alinhamentos), ocorridas ao longo de sua formação. Do estudo realizado na área, apesar do pequeno número de estações, foi possível obter importantes informações sobre estas estruturas.

3.2.2 - Objetivos

1 - Estudos gravimétricos associados à geologia foram desenvolvidos e consolidados neste trabalho, objetivando *determinar o contorno topográfico* do topo do embasamento recoberto pelas formações Jandaíra e Açu configurados como um sistema aquífero de grande importância na região.

2 - Trabalho realizado por Milani & Latgé (1987) nesta região, propôs um modelo onde mostra o aprofundamento do embasamento no sentido W – E com indícios de afinamento crustal a aquisição destes dados contribuirá de forma expressiva para *definição do modelo tridimensional do pacote sedimentar* e para a *identificação das estruturas e alinhamentos estruturais*.

O objetivo principal desses estudos é o aprimoramento do modelo estrutural da Chapada do Apodi, nos aquíferos acima citados. A aquisição destes dados contribuirá de forma expressiva para definição do modelo tridimensional do pacote sedimentar e para a identificação das estruturas e alinhamentos estruturais. Visa coligar a movimentação tectônica das estruturas, localizando os horsts e grabens.

3.2.3 – Materiais e Métodos

3.2.3.1 – Materiais - Instrumentação Utilizada

O levantamento gravimétrico foi executado utilizando-se o gravímetro da marca La Coste & Romberg, Modelo G-994, que tem precisão de 0,02 mgal. O posicionamento das estações foi obtido com o uso de equipamentos auxiliares, como o DGPS (ou GPS diferencial com portadora L1) e o GPS Map 76 com precisão de 10 a 20 cm nas coordenadas (x, y, z), cujos valores são apresentados na **tabela 3.4**.

3.2.3.2 - Métodos

Cinquenta e três estações gravimétricas foram estabelecidas em malha parcialmente regular, com espaçamento mínimo de 4km todas elas materializadas por piquetes de madeira e devidamente identificadas. Procurou-se coadunar os pontos correspondentes a essas estações com aqueles onde foram obtidas sondagens elétricas para uma melhor compreensão do arcabouço estrutural da bacia, bem como do contorno da mesma em profundidade. A distribuição espacial dos pontos é mostrada no mapa geológico (figura 3.26).

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 do mar (superfície do geóide – Teixeira *et al.* 2001) no valor da gravidade. 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 do mar, sendo conveniente conhecer sua densidade com a melhor exatidão possível (Teixeira *et al.* 2001).
- ✓ **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.

Os valores de anomalia Bouguer estão correlacionados à Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira com valores de exatidão da ordem de $\pm 0,02$ mgal. Abaixo temos a Fórmula Internacional de Gravidade de 1967 (Turcotte & Schubert, 1982), a qual foi adotada como referência para correções de latitude, considerando ainda o valor de $2,67 \text{ g/cm}^3$ para a densidade Bouguer.

$$G_0 = 9,78031846(1 + \text{sen}\Phi^2 + 0,000023462\text{sen}4\Phi).$$

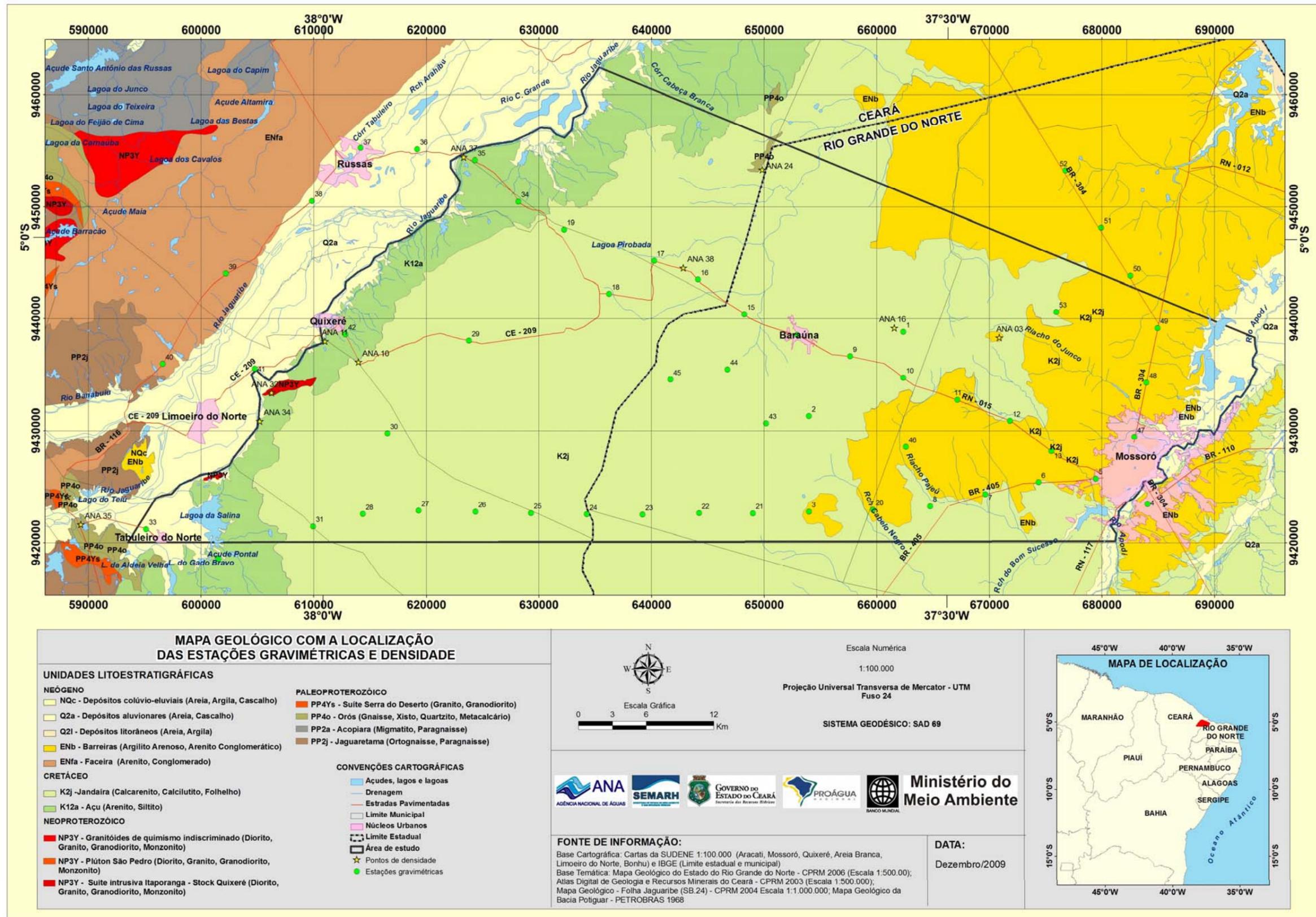


Figura 3.26 – Mapa geológico com estações gravimétricas e de amostragem para densidade das rochas.

Tabela 3.4 – Valores das Coordenadas das Estações Gravimétricas*.

ESTAÇÃO	UTM_E	UTM_N	COTA
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

ESTAÇÃO	UTM_E	UTM_N	COTA
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

*Coordenadas com precisão de 20cm

Os valores brutos do levantamento gravimétrico encontram-se na **tabela 3.5**. Como referência foi adotada a Fórmula Internacional de Gravidade de 1967 para correções de latitude, sendo também considerado o valor de $2,67 \text{ g/cm}^3$ para a densidade Bouguer.

Tabela 3.5 – Dados brutos do levantamento gravimétrico.

Estação	Data	Hora	Leitura	Longitude	Latitude	X	Y	Elevação	Terreno	EscalaG	Gravidade	ArLivre	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	978.169.787	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	648263.0	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	*

Tabela 3.5 (continuação)

Estação	Data	Hora	Leitura	Longitude	Latitude	X	Y	Elevação	Terreno	EscalaG	Gravidade	ArLivre	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

Tabela 3.5 (continuação)

Estação	Data	Hora	Leitura	Longitude	Latitude	X	Y	Elevação	Terreno	EscalaG	Gravidade	ArLivre	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	609849.0	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	978.179.250	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	*

O modelo gravimétrico 3D foi executado, utilizando-se valores de densidades obtidas a partir de 88 sub-amostras coletadas em campo (**tabela 3.6**), em afloramentos de interesse, buscando uma representatividade dos mesmos. As amostras foram todas coletadas atendendo as especificações adotadas empiricamente pelo LGA (Laboratório de Geofísica Aplicada) para realização das densidades.

Tabela 3.6 – Amostras com valores de densidade (g/cm^3) das unidades litoestratigráficas presentes na área de estudo coletadas pelo LGA (Laboratório de Geofísica Aplicada – Dep. Geologia-UFPE).

AMOSTRAS	DENSIDADE MÉDIA	MAIOR DENSIDADE	MENOR DENSIDADE	TOTAL AMOSTRAS
ANA - 37	2,195	2,264	2,165	6
ANA - 34B	2,195	2,232	2,142	6
ANA - 35	2,518	2,564	2,485	6
ANA - 03	2,263	2,317	2,212	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 - 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
AM - 01	2,599	2,657	2,564	7
AM - 02	2,706	2,715	2,69	7
ANA - 36	2,619	2,64	2,592	6
ANA - 38	2,45	2,549	2,377	6

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

Devido a pequena quantidade de pontos (53) com relação à extensão da área foi procedido a aquisição de dados levando em consideração áreas onde sondagens elétricas estavam projetadas com objetivo de melhor ajustar os dados dos dois métodos, simultaneamente.

O mapa Bouguer apresentado por Milani & Latgé (1987) (**figura 3.27**), apesar de ser executado em escala muito menor que o deste trabalho, mostra todas as grandes feições aqui mapeadas. Tal fato fornece consistência aos resultados atuais assim como corrobora as conclusões obtidas neste trabalho.

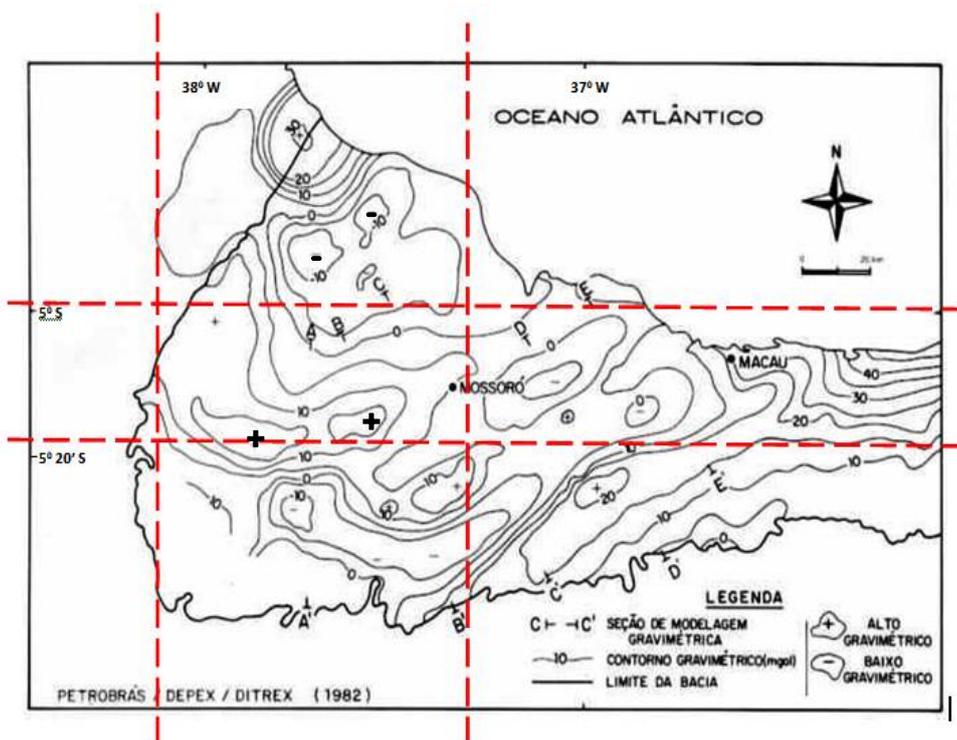


Figura 3.27 – Mapa Bouguer da Bacia Potiguar modificado de Milani & Latgé (1987), em detalhe a área de estudo.

3.2.4 - Análise do Modelo 2D - Seção (A–A')

Com objetivo de proceder a calibração dos valores de densidade, foi selecionado o perfil A-A' que corresponde à seção geológica (**figura 3.28**) executada pela PETROBRÁS, a qual está inserida no lineamento entre os poços MOP – 25 - RN e SMO – 1 – RN (**tabela 3.7**), todos com profundidade tocando no embasamento cristalino (**figura 3.29**).

Tabela 3.7 - Localização dos Poços da PETROBRÁS usados no perfil (A-A').

Poço	Utm_E	Utm_N	Prof (m)	Formação
1-PR-1-CE	637166	9432289	382	Jandaíra, Açú, Embasamento
9-BA-1-RN	653156	9438524	504	Jandaíra, Açú, Embasamento
9-MOP-25-RN	666848	9439192	513	Jandaíra, Açú, Embasamento*
1-SMO-1-RN	672183	9435527	800	Jandaíra, Açú, Embasamento
1-REC-1-RN	652093	9420185	614	Jandaíra, Açú, Embasamento
1-FV-1-RN	654574	9419826	504	Jandaíra, Açú, Embasamento
9-MOC-1-RN	665216	9446789	579	Barreiras, Jandaíra, Açú, Embasamento

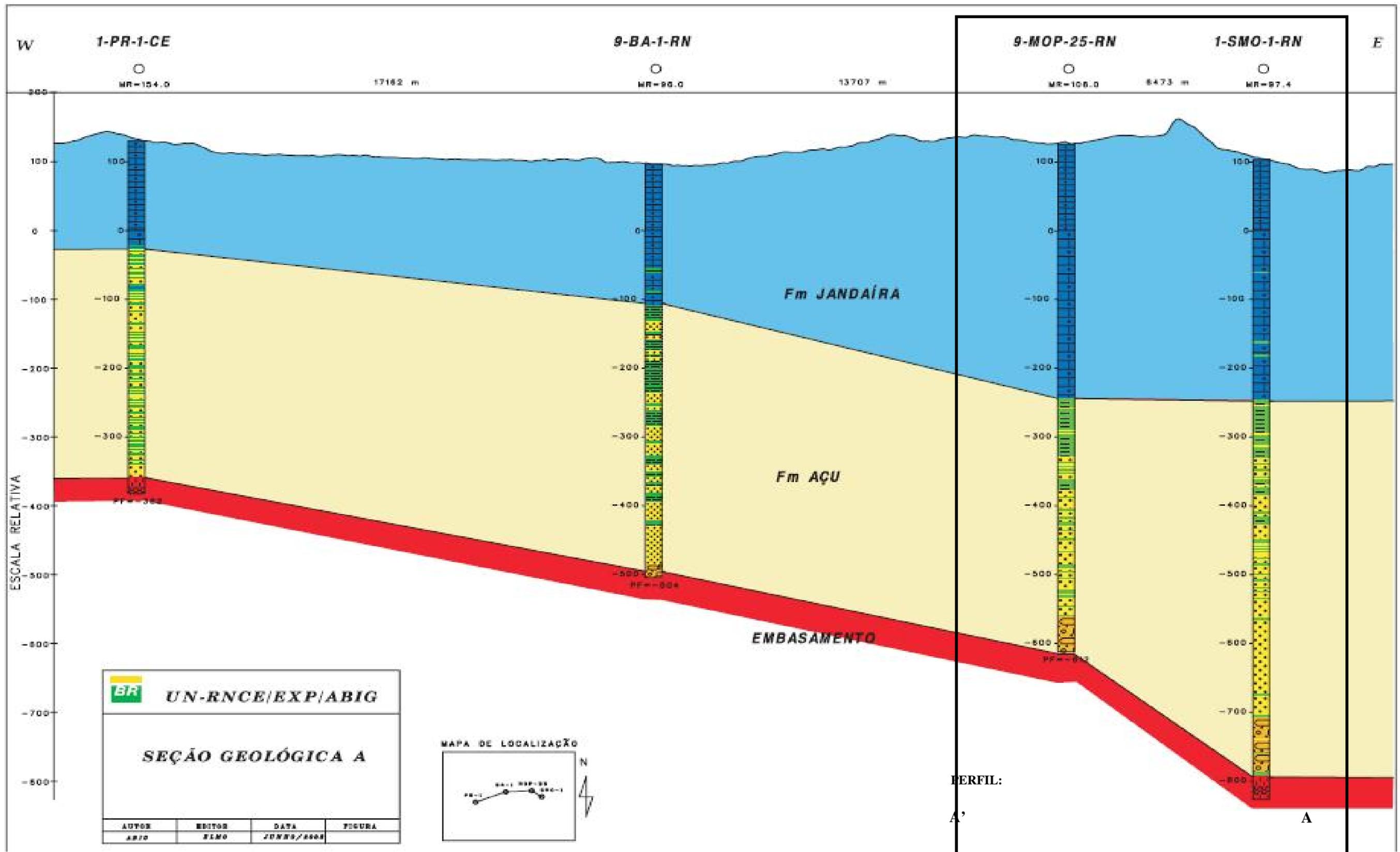


Figura 3.28 – Localização do perfil A-A' no diagrama esquemático (Seção Geológica A) executado pela PETROBRAS dos poços MOP – 25 - RN e SMO – 1 – RN.

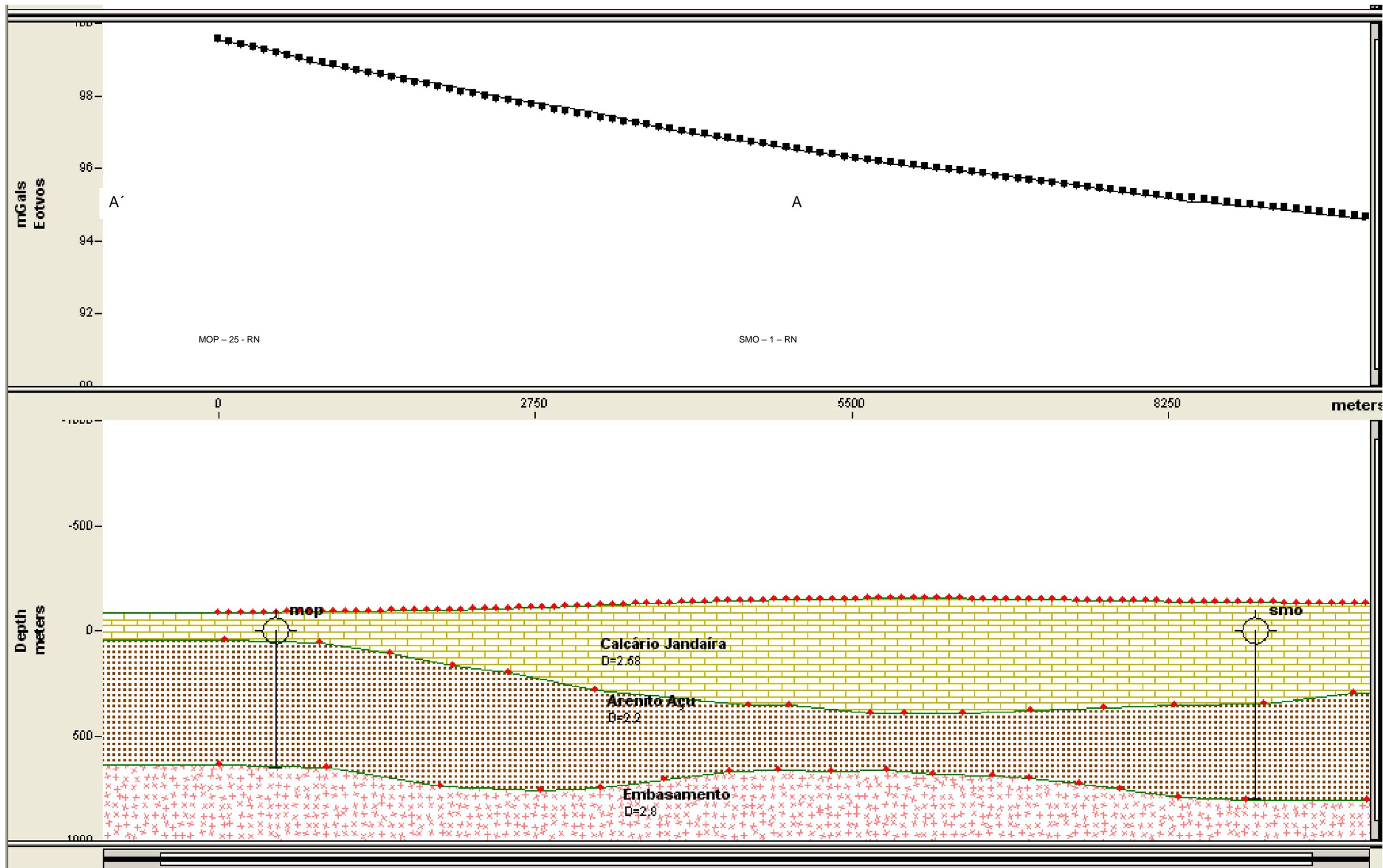


Figura 3.29 – Perfil A-A' modelado em 2D para calibração das densidades do embasamento (2,8 g/cm³), Formação Jandaíra (2,58 g/cm³) e Formação Açú (2,20 g/cm³).

Em complemento à determinação das densidades médias obtidas em amostras de campo, com uso dos métodos de determinação por imersão de água e/ ou mercúrio, foi ajustado um perfil geológico que satisfizesse a resposta gravimétrica. Os valores de densidades calculadas, 2,80 g/cm³ para o embasamento cristalino, 2,20 g/cm³ para o arenito Açú e 2,58 g/cm³ para o calcário Jandaíra, resultaram da média dos valores de um total de 88 sub-amostras coletadas em pontos representativos da área (**figura 3.27 e tabela 3.5**). Associados ao ajuste concomitante da resposta do modelo.

Considerando o valor de 300m para a espessura média do Calcário Jandaíra de acordo com os perfis litológicos dos poços, este valor foi inicialmente adotado como plano fixo, sendo posteriormente ajustado com o embasamento delimitado pelos valores de profundidade dos poços. Deste modo, o embasamento e a superfície topográfica foram considerados elementos restritivos e constantes, sendo variável apenas as densidades e o contato entre a Formação Jandaíra e Açú.

3.2.5 - Interpretação dos Dados Gravimétricos

Foi procedida uma análise comparativa entre as feições gravimétricas e estruturais presentes no Mapa Residual Gravimétrico para os Mapas Bouguer e Regional. Este procedimento visa posicionar as mesmas com relação aos outros mapas com comprimento de onda diferente. A pequena quantidade de pontos (53) para as proporções da área não permite um detalhamento maior das estruturas, uma vez que o espaçamento entre elas é relativamente grande. Mesmo assim, as estruturas observadas no Mapa Residual Gravimétrico, principalmente em áreas de maior quantidade de estações, devem ser vistas com margem de segurança satisfatória.

Os grandes alinhamentos estruturais definidos pelas grandes anomalias gravimétricas Bouguer e Regional estão bem delineadas (**figura 3.30**) e apresentam resposta gravimétrica satisfatória.

3.2.5.1 - Mapa Gravimétrico Bouguer

A primeira e grande feição se caracteriza por um mergulho suave do embasamento no sentido E com gradiente de 10 a 15% (**figura 3.31**). Este mergulho é obliterado na região de Quixeré (CE) pela reativação local na borda da bacia tendo havido um basculamento de blocos gravimetricamente positivos e negativos formando pequenos sistemas de horsts e grabens desenvolvendo janelas de sedimentação com variação brusca de espessura do sedimento.

No sentido E o embasamento se aprofunda até valores de 600 – 800m à NW de Baraúna. Essa feição muda de direção formando um depocentro com vergência para NE.

Na região centro-sul da área, os valores de gravidade sofrem aumentos anômalos não justificados (correspondendo a 220m de profundidade), em contrapartida aos valores de profundidade do poço 1-REC-1RN com profundidade de 614m e o poço 1-FV-1-RN (504m).

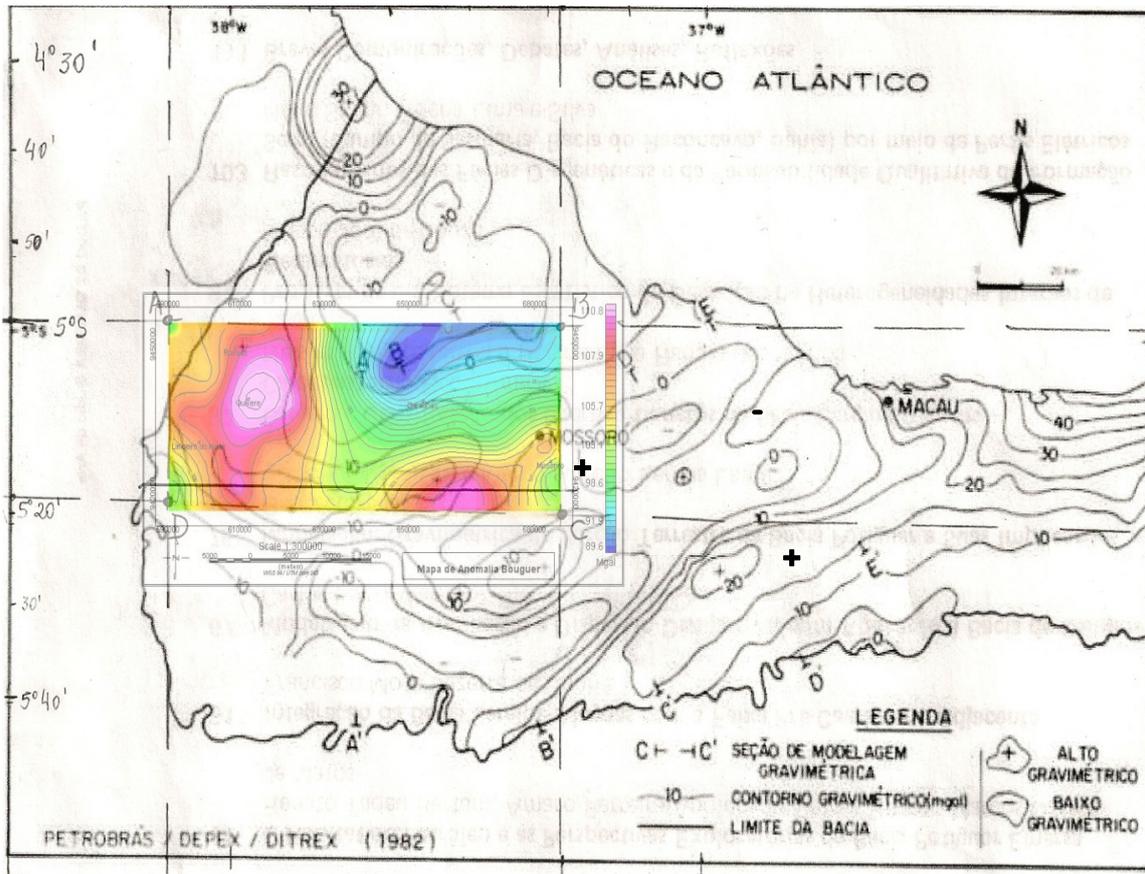


Figura 3.30 - Mapa de isolinhas de anomalias Bouguer sobreposto a área estudada, onde as grandes estruturas estão preservadas. Os sinais + e - indicam a presença de blocos positivos e negativos. Modificado de Milani & Latgé (1987).

Assim essa anomalia diz respeito à provável presença de algum corpo intrusivo 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, identificaram e modelaram feições semelhantes nas proximidades desta região, propondo a associação destas estruturas a presença de diques de diabásio em subsuperfície.

A profundidade máxima do embasamento encontrada na área é de 900m, já no domínio do Graben de Boa Vista, no limite leste da área.

Do ponto de vista técnico os locais mais favoráveis ao acúmulo de água, portanto, estão situados na região centro-norte, leste e centro-sul, considerando, neste último caso, a existência de corpos mais densos e que podem estar associados à presença de diques (W-E), cuja direção coincide com a anomalia positiva presente na área.

3.2.5.2 - Mapa Gravimétrico Residual

O Mapa Gravimétrico Residual (**figura. 3.32**) foi obtido através da filtragem do Mapa Bouguer, no domínio da frequência sendo aplicado o Método Gaussiano. Ele mostra com mais detalhes pontos onde se tem anomalias de curto comprimento de onda que estariam em superfícies mais superiores.

Principalmente em áreas de maior quantidade de estações, a análise destas anomalias deve ser vista com margem de segurança satisfatória.

Mesmo assim importantes estruturas não identificadas nos outros mapas podem ser analisadas aqui.

- A. A primeira e grande feição está localizada a oeste da área e forma um sistema de blocos positivos e negativos (1) alternados apontando para um basculamento de blocos com pequena intensidade formando pequenos horsts e grabens possivelmente causados por reativação da bacia nesta região.
- B. A segunda (2) corresponde a um conjunto de blocos mais negativos localizados na região Centro-Norte Nordeste, caracterizado por um baixo estrutural (centro-norte) e dois outros menores tendo sua parte mais profunda já fora da área (1200 m).
- C. A terceira estrutura (3) evidencia anomalia positiva com alinhamento E-W com vergência para NE e está associada a presença de diques de diabásio.

3.2.5.3 - Mapa Gravimétrico Regional

O Mapa Gravimétrico Regional (**figura 3.33**) exhibe o contorno basal mais profundo e mais suavizado de corpos próximos ao embasamento. Nele as grandes estruturas são melhor diferenciadas. Com comprimento de ondas maiores as anomalias de menor porte são extraídas, permanecendo aquelas basais. Neste mapa podemos melhor identificar as três grandes anomalias identificadas no Mapa Bouguer.

- ✓ Toda a área centro oeste, de caráter positivo, mostra um possível arqueamento do embasamento. De certa forma era de se esperar uma vez que esta região é caracterizada pela borda oeste da Bacia Potiguar existindo apenas pequenas regiões com sedimentação terrígena do Arenito Açú que já aflora nesta região. Neste local o embasamento já aflora a SW da Cidade de Quixeré (CE).
- ✓ 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 Centro-sul e sudeste a anomalia alongada de direção W-E, positiva corrobora a existência de corpos intrusivos mais básicos obliterando o verdadeiro plano de caimento do embasamento que existe na região. Em complemento a deflexão de valores mais negativos no extremo sudeste identifica a proximidade da linha de charneira de Areia Branca (Milani & Latgé, 1987).

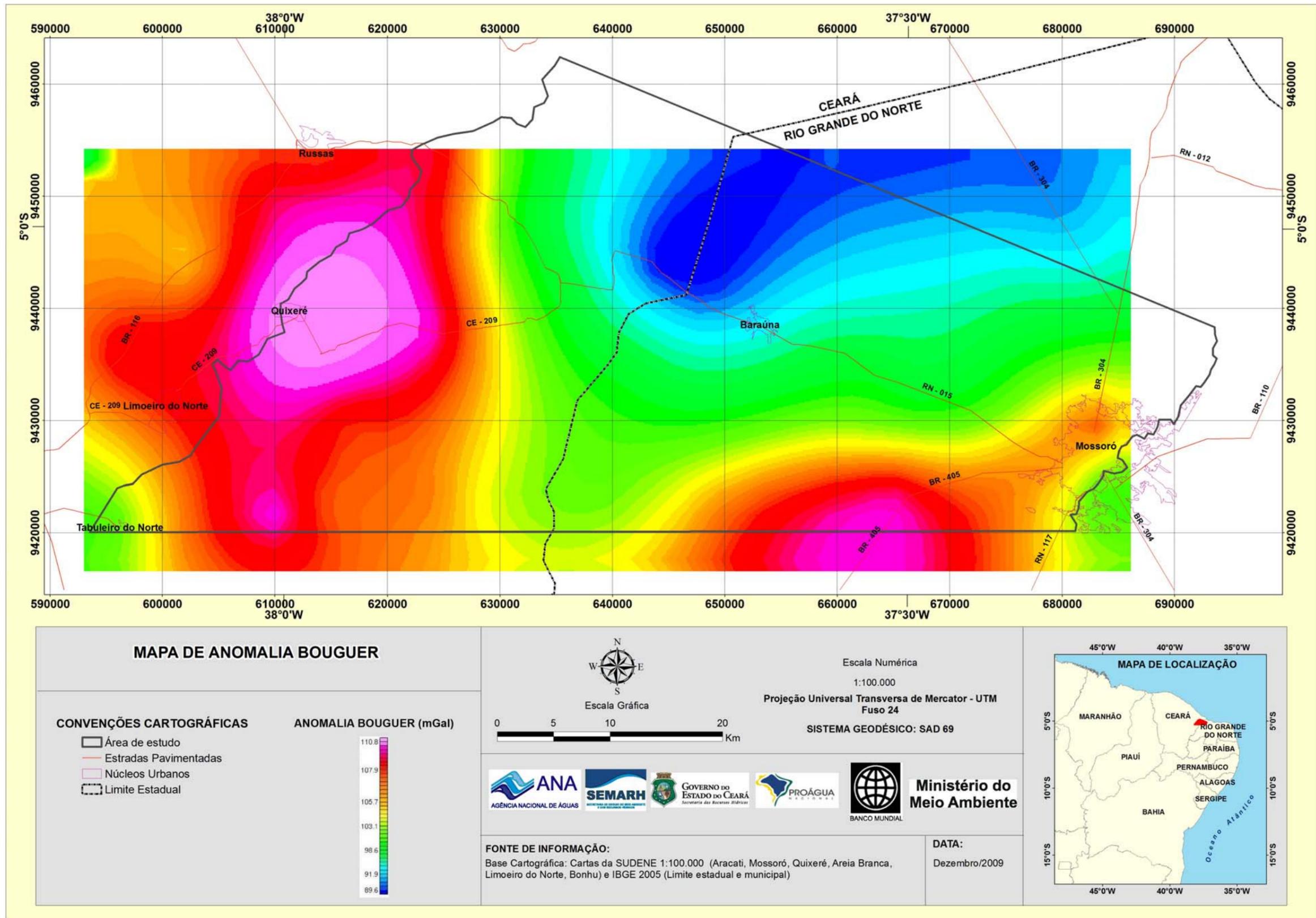


Figura 3.31 - Mapa de Anomalia Bouguer mostrando o ajuste entre as principais anomalias gravimétricas.

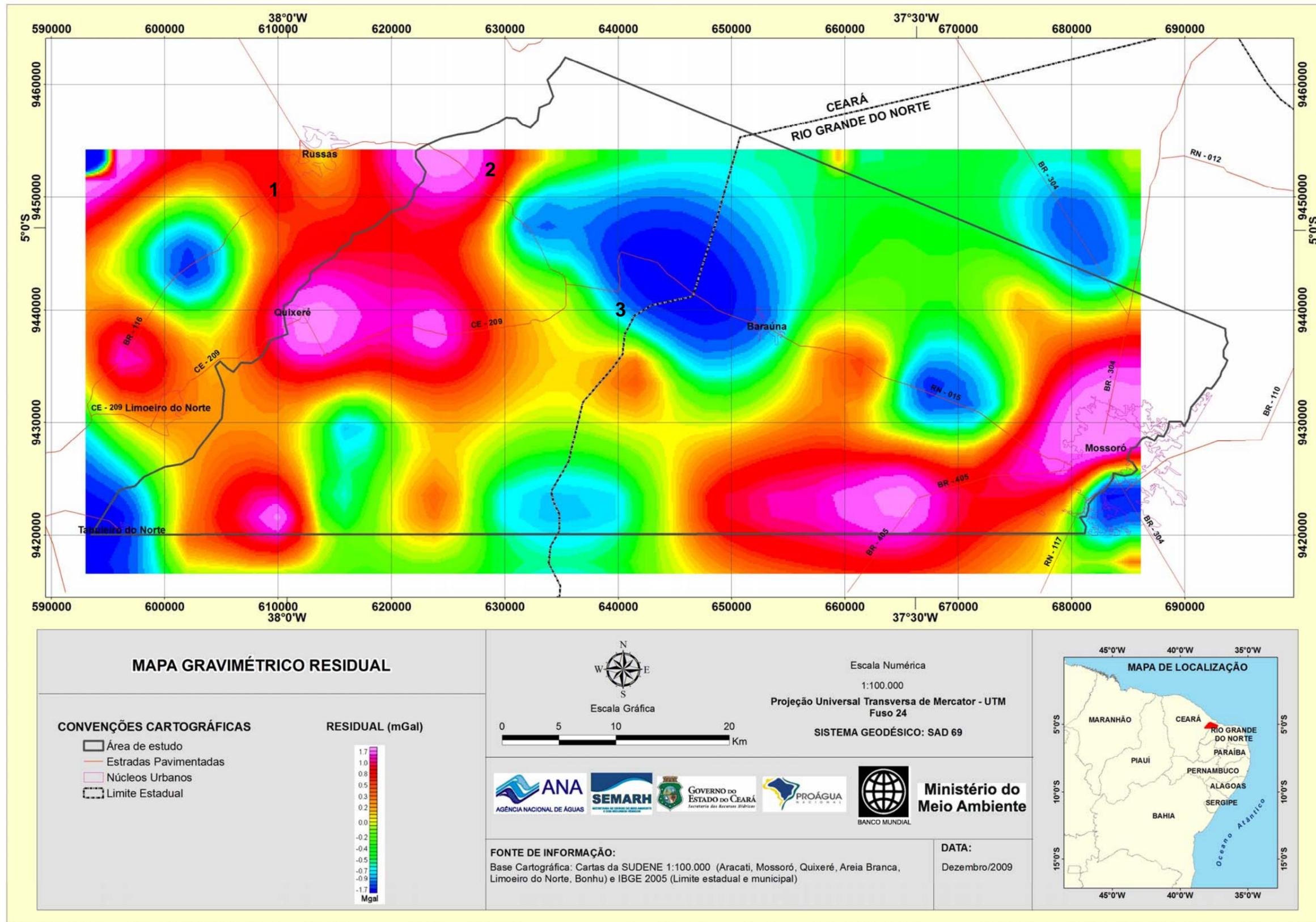


Figura 3.32 – Mapa Gravimétrico Residual destacando anomalias de curto comprimento de onda.

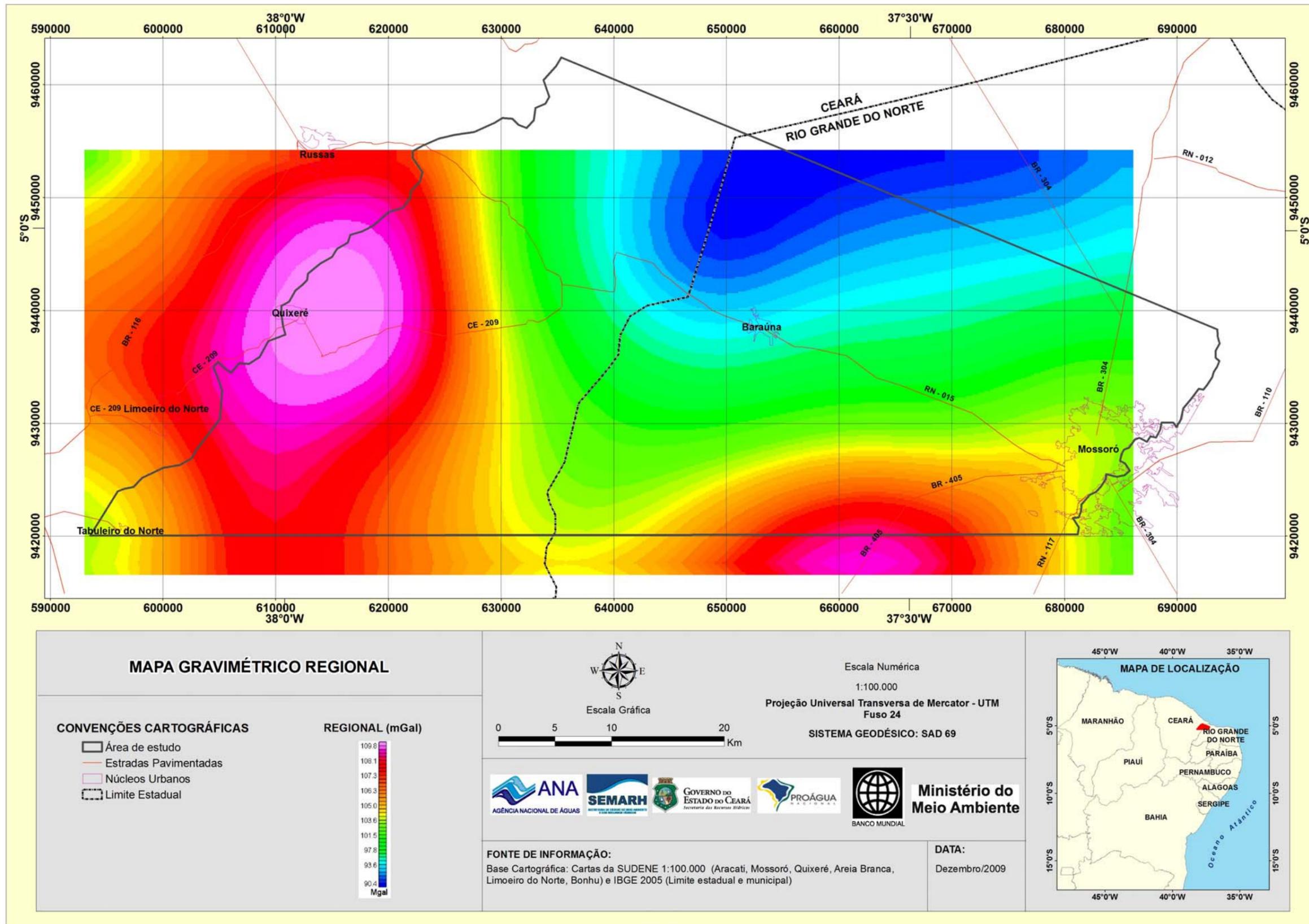


Figura 3.33 – Mapa Gravimétrico Regional mostrando as estruturas de caráter profundo e regionais.

3.2.6 - Modelagem Gravimétrica 3d da Topografia do Topo do Embasamento

O modelo 3D foi obtido através da inversão de um plano de referência locado inicialmente a uma profundidade de 500 m, com densidade calculada de 2.8 g/cm³. Limitado acima pela superfície topográfica e sobreposto pelo pacote sedimentar de densidade média 2,40 g/cm³ utilizando o sistema Oasis Montaj versão 7.1. O mapa Bouguer foi utilizado para a execução da inversão.

O mapa resultante (**figura 3.34**) mostra o contorno topográfico do embasamento e apresenta como feições principais três blocos:

- 1- Bloco a oeste caracteriza-se por menor profundidade representando o embasamento cristalino soerguido, nesta região o embasamento chega a aflorar formando alinhamentos de serras a sudoeste de Quixeré, note-se a vergência nordeste do bloco, concordante com os outros.
- 2- Na região Centro-Norte e Nordeste o bloco resultante do afundamento da bacia apresenta as maiores profundidades observadas e mostra-se em sua maior expressão caracterizando, de maneira inequívoca, a presença do grande bloco negativo formando o depocentro responsável possivelmente, pela região de maior interesse para água subterrânea.
- 3- A sudeste da área notam-se valores mais rasos, provenientes dos diques de diabásio com forte orientação W-E presentes no embasamento adjacente à borda sul da bacia Potiguar. Finalmente a Centro-sul e sudeste o corpo alongado de direção W-E, positiva corrobora a existência de corpos intrusivos mais básicos obliterando o verdadeiro plano de caimento do embasamento que existe na região. Em complemento, a deflexão de valores mais profundos no extremo sudeste identifica a proximidade da linha de charneira de Areia Branca (Milani & Latgé, 1987).

3.2.7 – Modelagem gravimétrica 2D da Bacia do Apodi

A modelagem em 2D foi executada em 10 perfis distribuídos na área levando em conta a distribuição das estações e principalmente seccionando estruturas geológicas transversalmente com o objetivo de detalhar as diferentes feições existentes.

Os perfis foram executados pelo método direto. Isto é: inicialmente é proposto um modelo básico onde o mesmo está condicionado a elementos restritivos e de conhecimento prévio. Nestes modelos são considerados como elementos restritivos, contatos geológicos e estruturais, 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.

Posteriormente, através de ajuste, o modelo será modificado em função da curva de valores observados. Como resposta gravimétrica do modelo proposto, a curva de valores calculados é ajustada ao de valores observados desde que não sejam desconsiderados os elementos restritivos anteriormente estabelecidos.

Devido à instabilidade do método, estas restrições são tanto melhores quando menor for o conjunto de soluções para o qual o modelo converge. A modelagem 2D ainda melhora o desempenho das soluções 3D uma vez que o conjunto de soluções, ou ajustes, são considerados com vetores variando em apenas duas direções.

Assim os perfis serão analisados individualmente e sempre correlacionados principalmente, com os perfis que interceptam e que são interceptados. Posteriormente eles serão analisados em seu conjunto e, quando pertinente, correlacionados com o modelo 3D.

O Mapa Bouguer (**figura 3.35**) mostra a distribuição dos perfis e sua localização espacial.

Os perfis possuem comprimentos de 15 a 32 km e estão corrigidos na vertical com exagero de escala da ordem de 2,5 a 3,0 vezes.

Assim foi executado tendo em vista que as estruturas encontram-se a uma pequena profundidade com relação a sua extensão. Assim, as ondulações, aclives, declives e estruturas geológicas estão deformadas e sua análise deve ser feita com certa reserva.

Procuraremos a seguir fazer uma análise de cada perfil, salientando as principais estruturas, sua relação com os outros perfis e com a área como um todo.

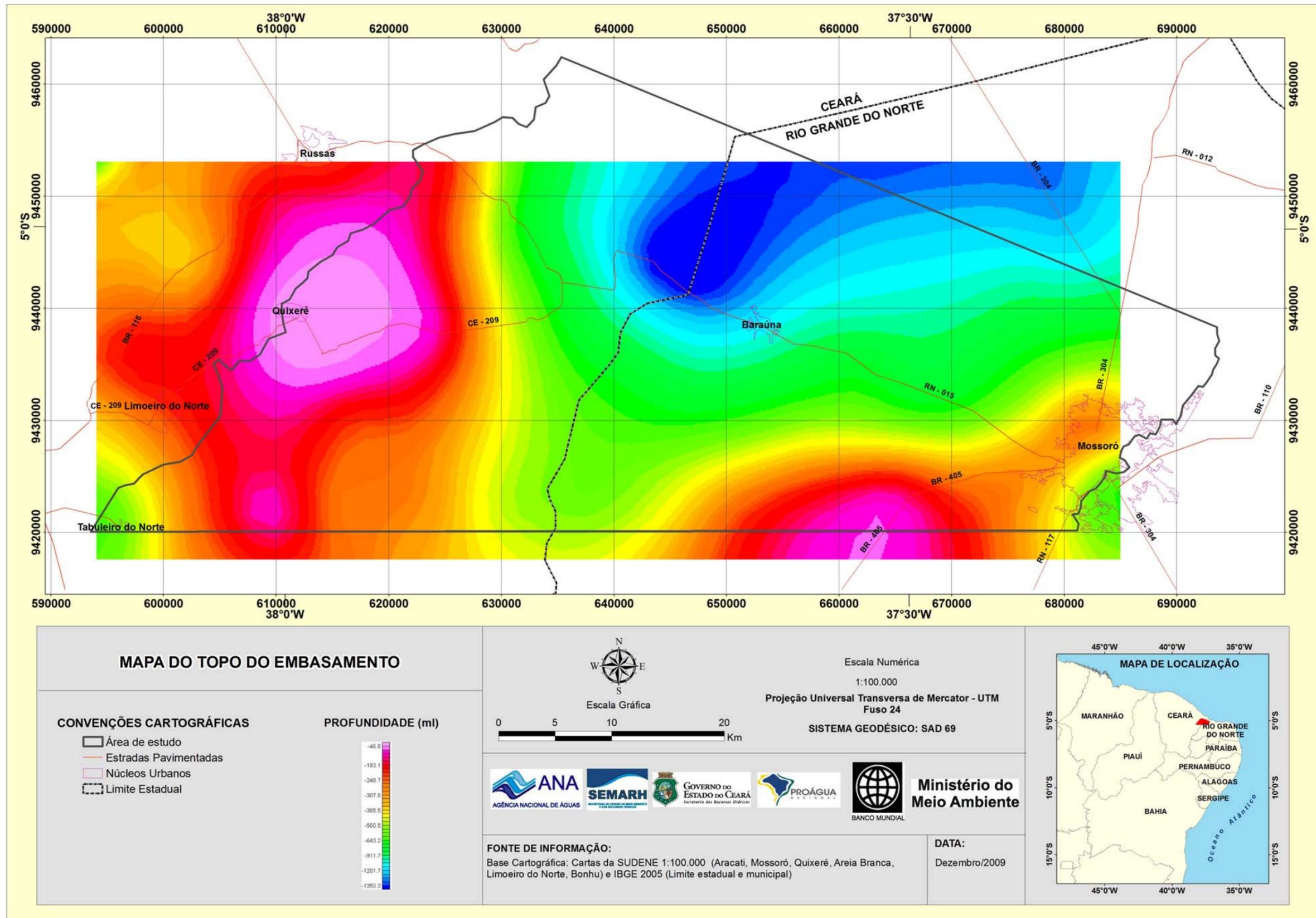


Figura 3.34 – Mapa de profundidade do topo do embasamento – (Modelo 3D) mostrando o contorno basal topográfico.

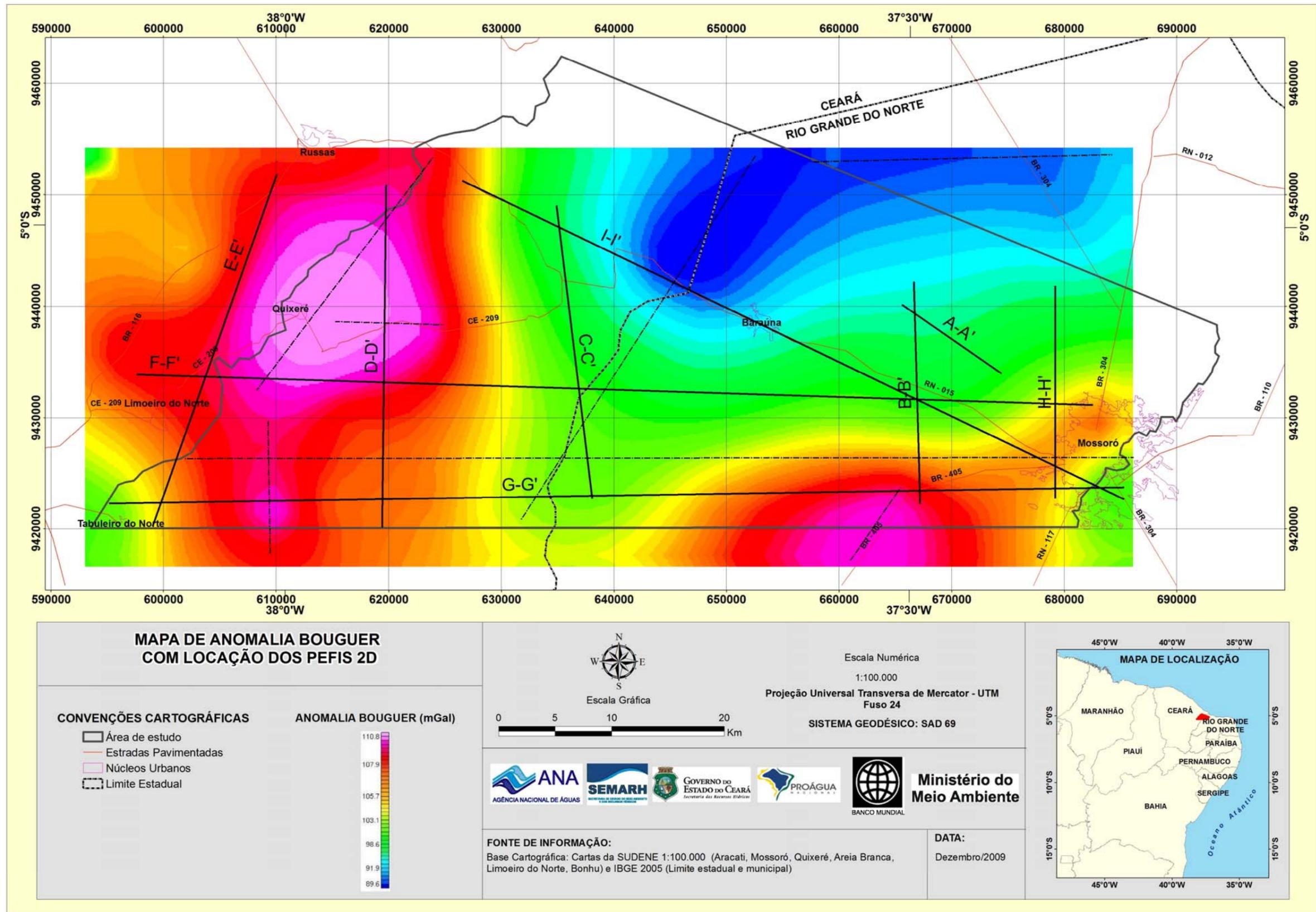


Figura 3.35 - Mapa de Anomalia Bouguer mostrando a localização dos perfis estudados.

3.2.8 – Descrição dos perfis modelados

3.2.8.1 - Perfil A-A':

Este perfil (**figura 3.36**) foi executado para servir de calibração no ajuste final das densidades. Ele está seccionado pelos poços 1SMO-1-RN e 9-MOP-25-RN perfurados pela PETROBRAS, atingindo o embasamento. Mantendo a profundidade dos poços como elemento restritivo fez-se variar as densidades para o ajuste das curvas observadas e calculadas.

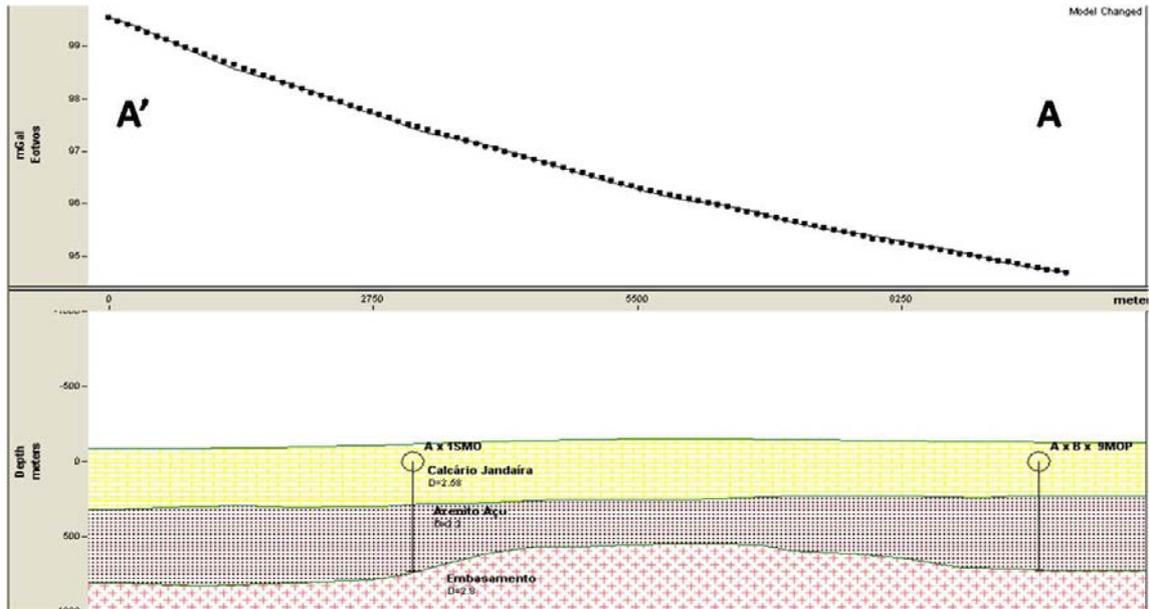


Figura 3.36 - Perfil A-A' (exagero de escala vertical 2,5).

Observa-se um leve arqueamento do embasamento em sua porção NW estando relacionado a pequenas variações de profundidades do embasamento e calcário Jandaíra. As profundidades de 500 e 800m obtidas nestes poços estão coerentes com aquelas fornecidas pelo modelo 3D. O melhor ajuste de curvas com as densidades propostas, através de determinação laboratorial, tornou possível selecioná-las com as mais aceitáveis: calcário da Formação Jandaíra $2,58\text{g/cm}^3$, arenito da Formação Açú $2,20\text{g/cm}^3$ e o embasamento com $2,80\text{g/cm}^3$.

3.2.8.2 - Perfil B-B':

O perfil B-B' (**figura 3.37**) apresenta direção S-N, localizado a leste da área de estudo. Este perfil possui 15 km de extensão e apresenta-se seccionado pelos perfis , F-F' E I-I', A-A' (onde se encontra o poço 9-mop-25-RN com 513m de profundidade).

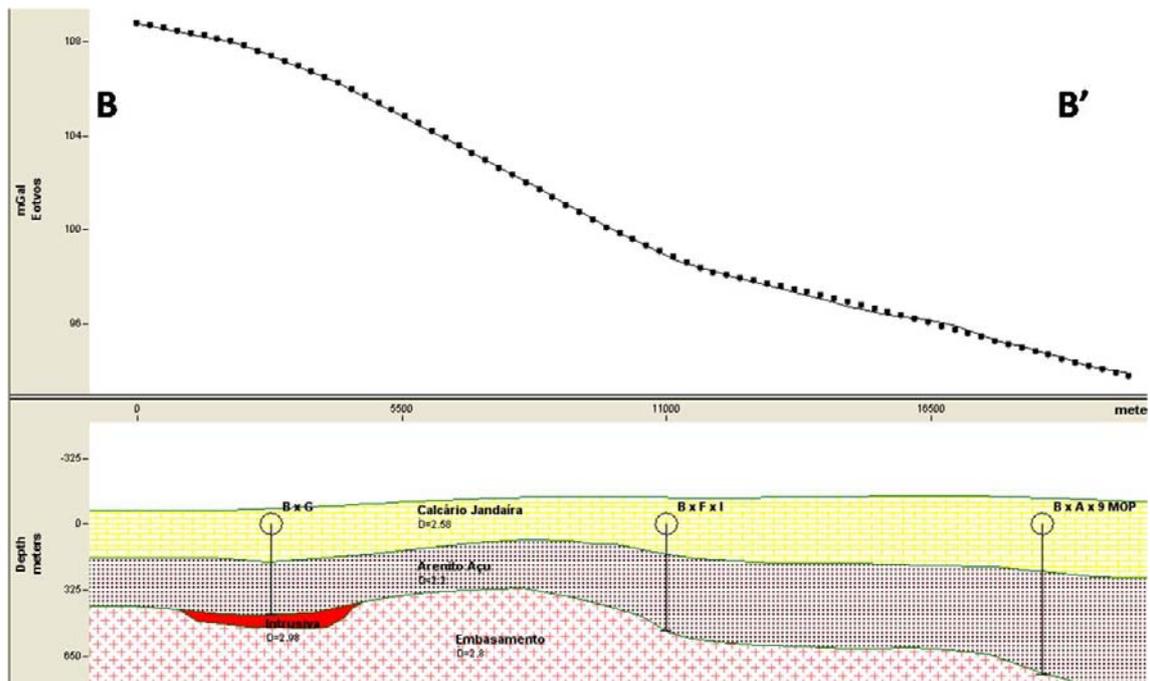


Figura 3.37 - Perfil B-B' (exagero de escala vertical 2,5).

Segundo o ajuste do modelo são notáveis variações no embasamento, onde caracteristicamente observamos um arqueamento na região central e a presença de rocha intrusiva ao sul, correspondente aos diques intrudidos na região.

O embasamento se mantém a profundidade média entre 400 a 600m apresentando progressivo abatimento no sentido S – N em direção a região do depocentro de Baraúna, a NW do perfil.

3.2.8.3 - Perfil C-C':

Este perfil (**figura 3.38**) tem 30km de extensão com direção geral S-N localizado na porção central da área. Perfil seccionado pelos perfis G-G', F-F' e I-I'. O poço 1-REC-RN (PETROBRAS), locado sobre o perfil de profundidade corrobora os valores obtidos por modelagem nesta região. O seu extremo sul ele se aproxima da região de ocorrência da intrusão sendo mantida a profundidade calculada do embasamento, considerando a retirada os valores positivos causados pela intrusiva.

O embasamento mergulha suavemente no sentido e direção do grande depocentro a noroeste de Baraúna, chegando a valores máximos de 700m no seu extremo norte.

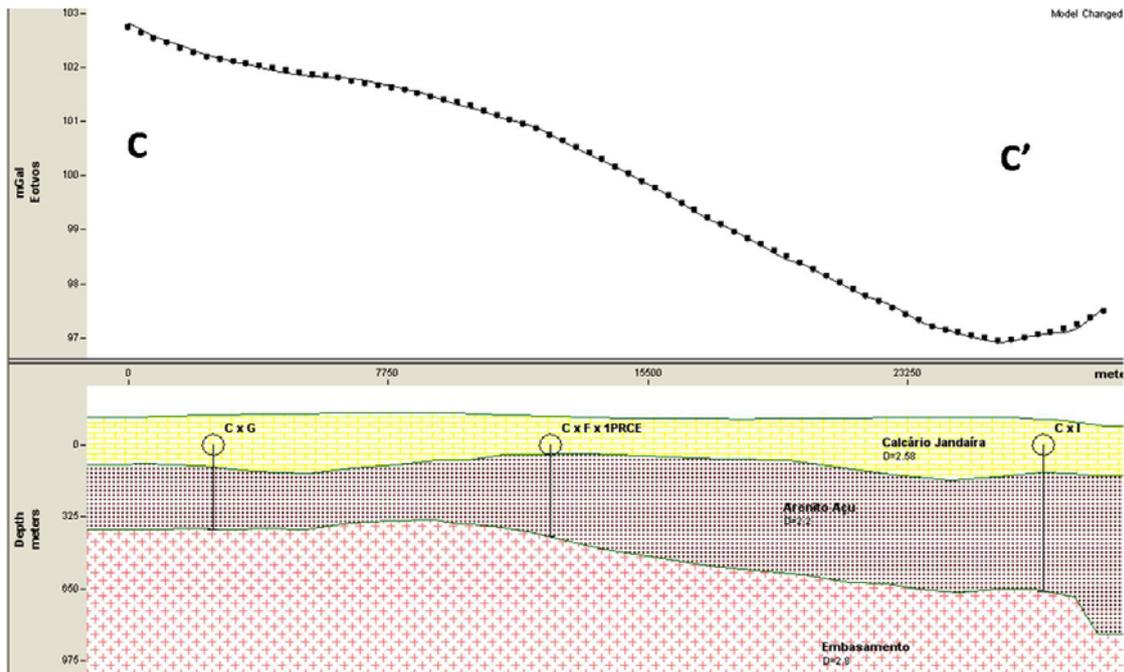


Figura 3.38 - Perfil C-C' (exagero de escala vertical 2,5).

3.2.8.4 - Perfil D-D':

Perfil com 30km de extensão com direção geral S-N localizado na porção centro oeste da área, seccionado pelos perfis G-G', F-F' e I-I' (figura 3.39).

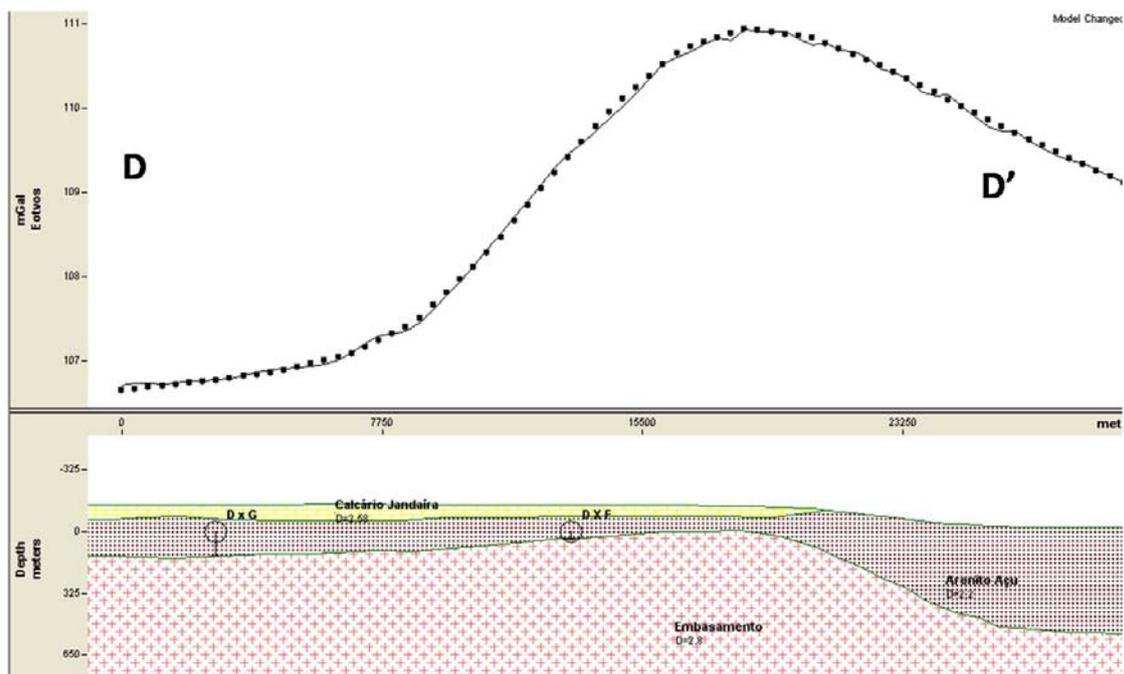


Figura 3.39 - Perfil D-D' (exagero de escala vertical 2,5).

Neste perfil na sua porção norte, o calcário da Formação Jandaíra não está presente. A partir deste ponto apenas o Arenito Açú aflora, marcando o limite oeste da Bacia Apodi. O embasamento sobre neste perfil apresenta profundidades de 140m (no km18) e valores máximos de profundidade de 550m (no km27).

3.2.8.5 - Perfil E – E´:

O perfil E-E' (**figura 3.40**) localiza-se a oeste da área, cortando a grande anomalia positiva atribuída a uma estrutura dômica situada na região centro-oeste. Apresenta em sua totalidade 17,4Km de extensão e tem direção NNE-SSW. Neste perfil observa-se um suave caimento do embasamento em direção ao norte, onde atinge a profundidade máxima de 650m. Este perfil é seccionado pelos perfis G-G' e F-F'. Note-se a ausência do calcário Jandaíra fato este devido ao termino da Bacia Apodi estar limitada ao leste do perfil, só aflorando o arenito da Formação Açú.

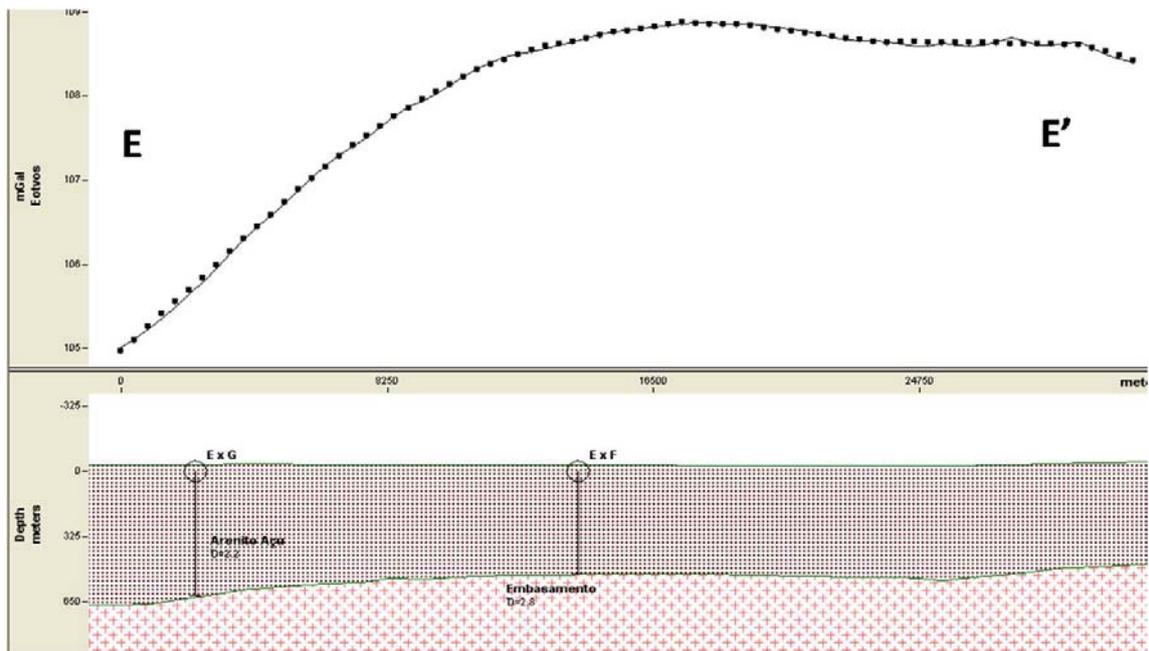


Figura 3.40 - Perfil E-E' (exagero de escala vertical 2,5).

3.2.8.6 - Perfil F-F´:

Perfil com 52km de extensão com direção geral W-E cortando longitudinalmente a área e seccionado pelos perfis E – E', D – D', B – B', H – H e o poço 1-PR-CE (**figura 3.41**).

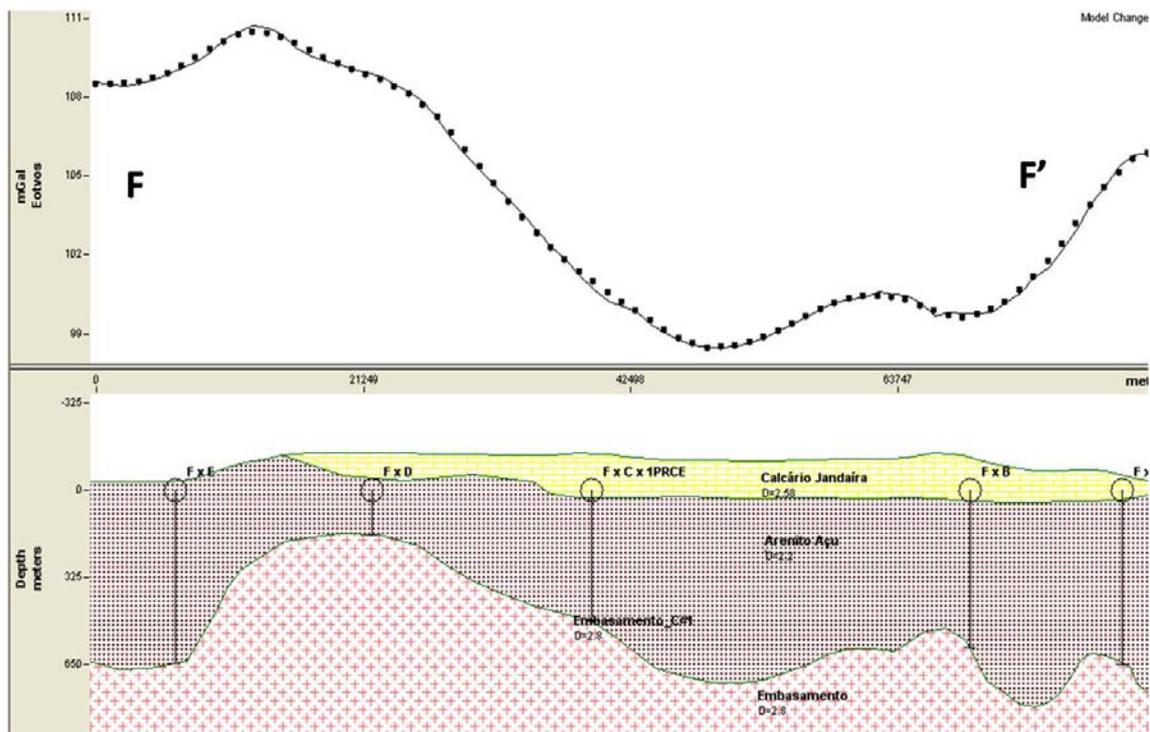


Figura 3.41 - Perfil F-F' (exagero de escala vertical 2,5).

O seu embasamento possui profundidades variáveis entre 700m no limite sul do depocentro a NW da Cidade de Baraúna e 150m oeste do perfil E - E'. Como controle de qualidade, o perfil foi locado sobre as estações gravimétricas sendo seccionado pelo poço 1-PR-CE com profundidade de 380, valor este igual ao modelo neste ponto.

A espessura da Formação Jandaíra tem média de 150m, enquanto que a Formação Açú possui valores médios de 650m no limite do depocentro de Baraúna.

No extremo oeste a Formação Jandaíra não mais aflora e apenas a Formação Açú está presente, marcando o limite oeste da Bacia.

A subida do embasamento no extremo leste pode estar associada a influência da presença de intrusivas básicas na região sul de Mossoró.

3.2.8.7 - Perfil G – G'

Este modelo (**figura 3.42**) possui 30 km de extensão, com direção W-E e localiza-se no extremo sul da área. Foi assim executado sobre 8 estações gravimétricas e recobertas por sondagens elétricas. Devido à maior quantidade de dados existente no mesmo, este perfil é de grande importância no contexto geológico e geofísico da área.

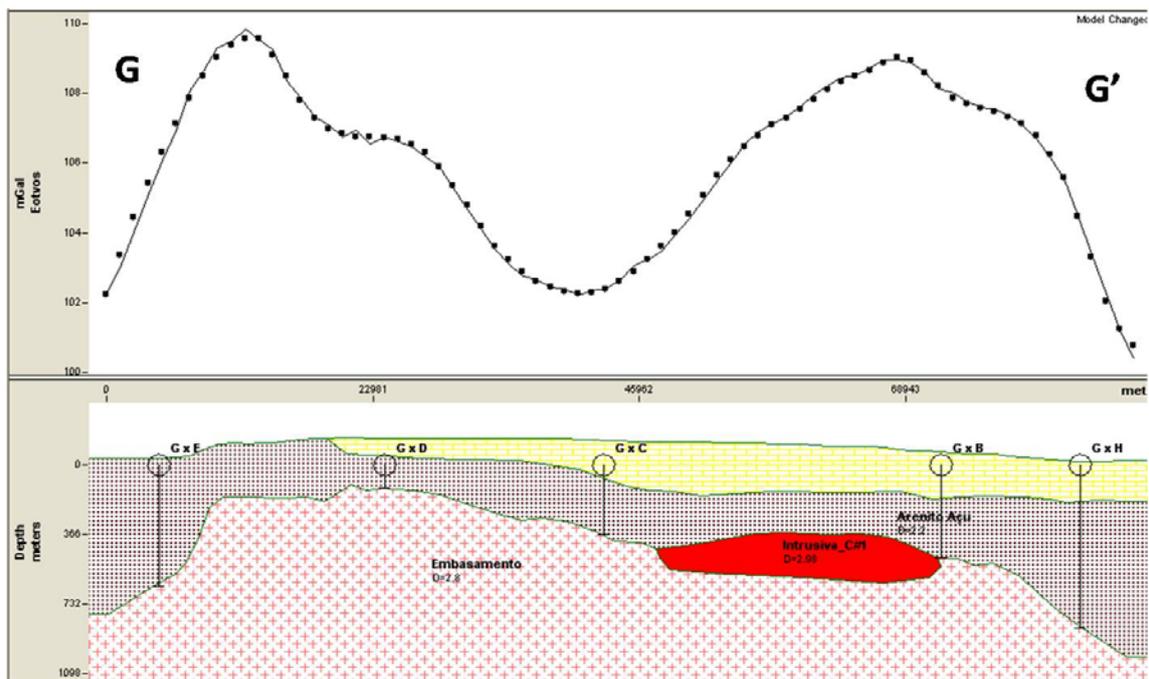


Figura 3.42- Perfil G-G' (exagero de escala vertical 2,5).

A primeira feição observada a oeste é o arqueamento do embasamento marcando o limite oeste da Bacia do Apodi. Neste intervalo os valores de 3D e 2D possuem muito boa concordância corroborado pela ocorrência de corpos mais básicos aflorando na região.

Suave caimento do embasamento é observado no sentido oeste-leste e se desenvolve até leste de Mossoró, já na Linha de Charneira de Areia Branca.

A presença de corpo intrusivo dá o ajuste necessário para as curvas de anomalia Bouguer. Estes diques modelados por Milani e Latgé (1987) e que ocorre em toda a parte sul, formam anomalias positivas de gravidade, obliterando a verdadeira forma da bacia.

As profundidades se mantém entre 500 e 600m, as quais são confirmadas por dois poços perfurados pela PETROBRAS (1-REC-1-RN E 1-FV-1-RN) os quais foram perfurados até o embasamento.

3.2.8.8 - Perfil H-H':

O perfil H-H' (**figura 3.43**) apresenta uma distância de 19,8 km; a profundidade média do embasamento é de 850m e da interface do arenito Açú com o calcário Jandaíra de 220m. A região central do perfil possui um arqueamento do embasamento.

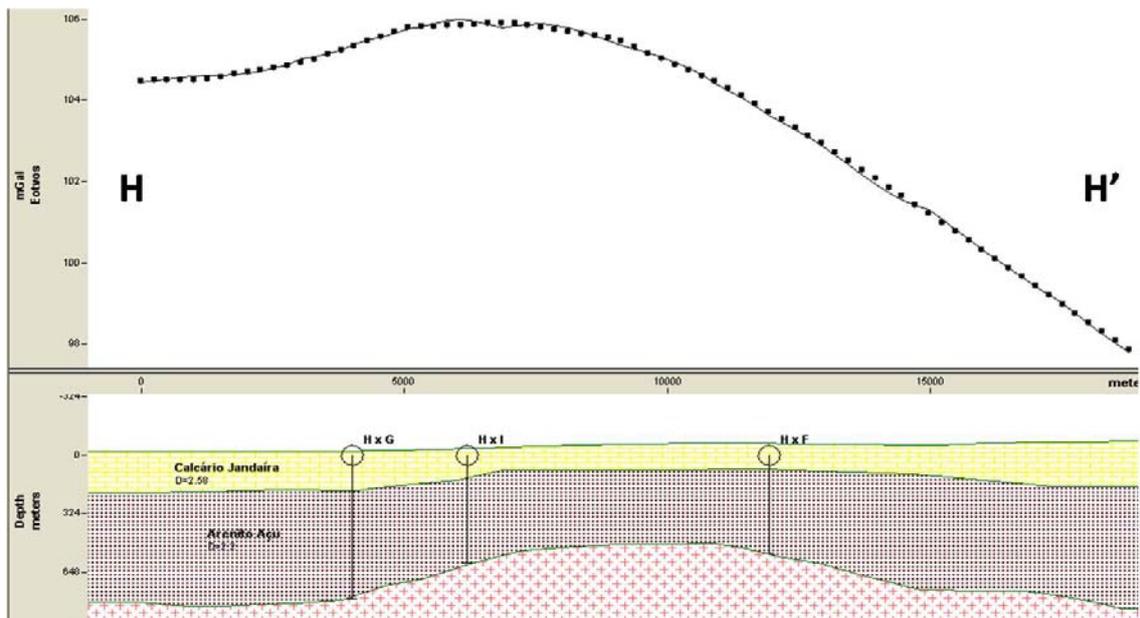


Figura 3.43 - Perfil H-H' (exagero de escala vertical 2,5).

O arqueamento do embasamento confere a curva de valores calculada e observada um ajuste considerado satisfatório.

O perfil é seccionado pelos perfis G – G', I – I' e F-F' sendo os valores de intersecção considerados dentro do permitido.

3.2.8.9 - Perfil I – I'

Perfil com 50 km de extensão com direção geral N60W cortando longitudinalmente a área e seccionado pelos perfis C–C', B–B' e H–H (figura 3.44). De grande importância para o estudo da área devido seu posicionamento e cobertura gravimétrica e de sondagem elétrica.

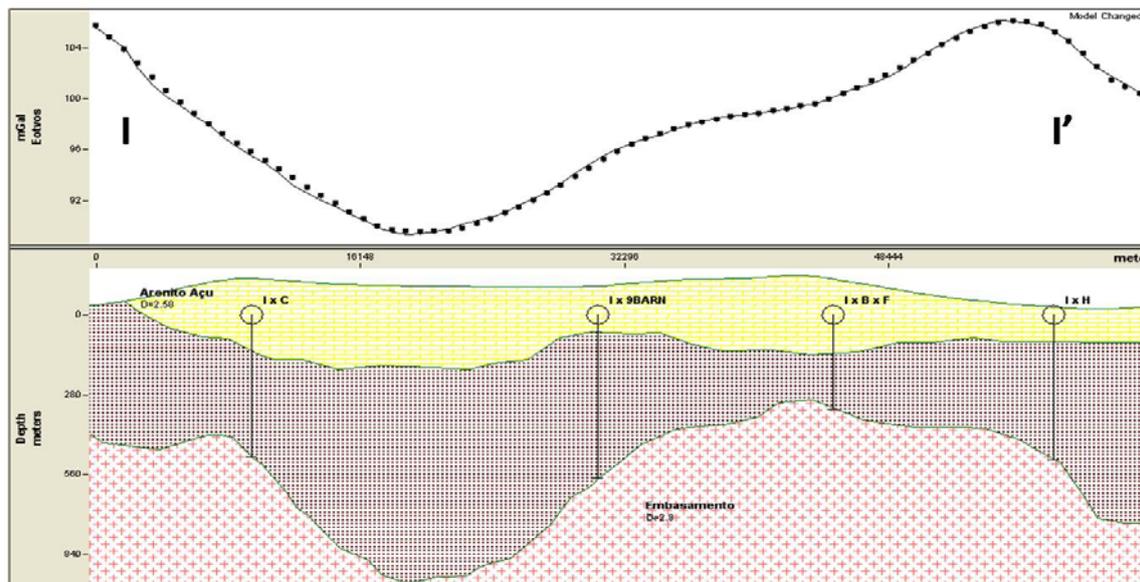


Figura 3.44- Perfil I-I' (exagero de escala vertical 2,5).

O seu embasamento possui profundidades variáveis entre 930m sobre o depocentro a NW da Cidade de Baraúna e 300m oeste do perfil B – B'. Como controle de qualidade, o perfil foi locado sobre as estações gravimétricas sendo seccionado pelo poço 9-BA-1-RN com profundidade de 504 m, valor este igual ao modelo neste ponto.

No extremo oeste a Formação Jandaíra não mais aflora e apenas a Formação Açú está presente, marcando o limite oeste da Bacia.

A subida do embasamento no extremo leste pode estar associada a influência da presença de intrusivas básica na região sul de Mossoró.

3.2.9 - Integração dos perfis modelados 2D e sua correlação com o modelo 3D.

A integração e análise dos perfis 2D e mapa de contorno 3D modelados tem como objetivo o melhor entendimento das feições estruturais e geológicas da área mostrando detalhes do contorno superior do embasamento, analisados no mapa 3D e melhor detalhado e/ou ajustado nos modelos 2D.

O contorno superior do embasamento mostrou uma tendência de mergulho suave no sentido noroeste, norte e nordeste com profundidades variando entre 0,0m, aflorando a sudoeste de Quixeré em forma de stocks alongados com direção geral W-E e profundidade máxima de 930m no depocentro a noroeste de Baraúna, mostrando tendência distensiva e de afinamento crustal nesta região de acordo com Milani & Latgé (1987).

A região oeste é caracterizada ora pelo arqueamento do embasamento, marcando o limite oeste da bacia, ora sofrendo um basculamento suave de blocos permitindo o desenvolvimento de horsts e graben de baixa profundidade com desenvolvimento de possíveis áreas de sedimentação restrita.

A Formação Açú depositada sobre o embasamento apresenta espessura máxima de 700m no centro do depocentro de Baraúna e mínima de 80m a Leste de Quixeré e sobre o perfil D-D'. O regime de remodelamento da superfície do embasamento foi ocasionado por um processo erosivo que culminou com o início da sedimentação do arenito Açú depositado, inicialmente, através de preenchimento de vales e posteriormente em regime de sedimentação contínua.

A Formação Jandaíra depositada sobre o arenito Açú apresenta espessura máxima de 280m no centro do depocentro de Baraúna e mínima de 100m a Leste de Quixeré e sobre o perfil D-D'. No perfil E-É não é notado mais a ocorrência da Formação Jandaíra, apenas o arenito Açú capeia o embasamento. Com a subsidência do pacote inferior a Formação Jandaíra iniciou o processo de sedimentação em regiões de menor energia permitindo a deposição do calcário. A reativação posterior bloqueou o processo de sedimentação do calcário marcando um novo estágio erosivo.

A ocorrência de corpos intrusivos básicos 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 é marcada pela presença destes stocks em áreas relativamente extensas onde tornou-se necessário o ajuste de profundidade do embasamento modelado com a profundidade dos poços 1-

REC-1-RN (614 m) e 1-FV-1-RN (504 m). Este ajuste só foi possível com a colocação destes corpos sendo o embasamento ajustado para valores próximos de 500m compatíveis com aqueles dos poços.

3.2.10 – Análise e integração dos dados aeromagnéticos e gravimétricos

O Mapa de Campo Total Aeromagnético ilustrado na **figura 3.45**, apresenta configuração onde são definidas pelo menos 3 grandes estruturas apresentando direção geral NE em uma sequencia de blocos altos e baixos alternados caracterizando movimentos verticais de blocos 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 3.35**). 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 Contorno do Topo do embasamento caracteriza numericamente estas estruturas e as posiciona no domínio tridimensional.

O sistema de fraturas apresentado na **figura 3.46** 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). Estes falhamentos estão registrados dos alinhamentos magnéticos mostrados no Mapa Magnético

Os alinhamentos magnéticos com direção geral N45E corroboram a hipótese de estarmos em uma área de movimentos tectônicos de distensão suave caracterizado pela presença de falhas normais com direções aproximadamente paralelas as estruturas magnéticas.

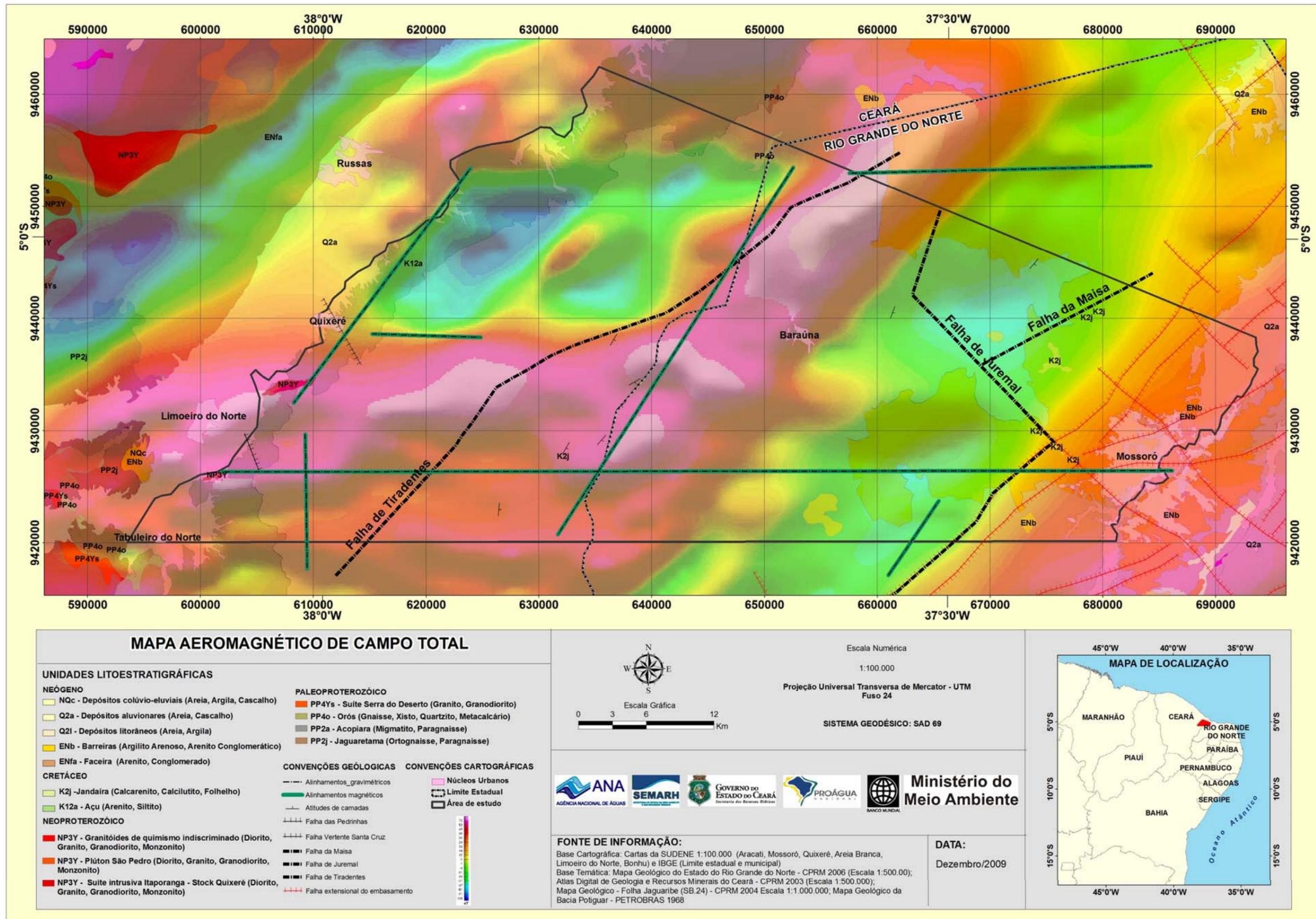


Figura 3.45 – Mapa aeromagnético de campo total da área de estudo.

3.2.11 – Proposições para refinamento dos resultados obtidos.

Do estudo realizado na área, apesar do pequeno número de estações, foi possível obter importantes informações sobre estas estruturas. No entanto estas informações estão discutidas em escala pequena em relação à extensão das cavernas de dissolução, sendo necessário um detalhamento maior com métodos gravimétricos associados ao magnético para assim termos informações mais precisas destas estruturas.

Como início a este detalhamento, será necessário selecionar uma área teste que possua bons conhecimentos geofísicos, geológicos e posicionamento espacial e executar um levantamento teste. A caverna “Furna Feia” locada no afloramento ANA 01 com coordenadas 659759 e 9443129, situada a nordeste da Cidade de Baraúna (RN), com 750m de extensão, por suas dimensões poderá ser o local proposto. Uma malha irregular mista com equidistância de 25 a 50m entre estações no total de 56 estações deverá ser acompanhada com nivelamento altimétrico com DGPS. Os resultados obtidos serão corrigidos, processados e analisados em escala compatível com o levantamento, resultando daí informações qualitativas e quantitativas no que diz respeito a posicionamento e forma das estruturas estudadas.

No contexto regional existe uma necessidade de adensamento das estações em toda a área, com objetivo de melhor caracterizar as estruturas mapeadas. Um levantamento adicional de 53 estações magnéticas se faz necessário para cobrir os pontos de gravimetria já estabelecidos. Em complemento, um levantamento de adensamento integrado de gravimetria e magnetometria com 50 estações, deverá ser procedido com objetivo de suprir de medidas as áreas não pontuadas no levantamento anterior.

Em etapa seguinte, proceder as correções e processamento de todos os dados, e todo o tratamento empregado no banco de dados inicial, com integração final dos métodos gravimétrico e magnético.

3.2.12 - Conclusões

- ✓ Os valores de profundidade do topo do embasamento mostraram-se satisfatórios na maioria dos pontos amostrados. As diferenças encontradas podem ser atribuídas a existências de corpo intrusivos em subsuperfície bem como ao basculamento de blocos da região oeste obliterando os resultados;
- ✓ A região centro-sul mostrou valores muito diferentes dos preditos devido a estas intrusões e constitui motivo para a realização de trabalhos mais detalhados envolvendo o uso do método magnético, de grande sensibilidade no estudo de corpo básicos;
- ✓ A possível reativação da Bacia pode ter sido a causa do basculamento dos blocos na porção oeste da área e responsável pela formação do sistema de horsts e grabens identificados por gravimetria;
- ✓ O depocentro que se desenvolve a norte e nordeste da área, alcançando áreas bem maiores que as estudadas, se caracteriza pela maior expressão geológica da região para a qual deve ser voltada a atenção

daqueles interessados no problema do gerenciamento da água da Chapada do Apodi.

- ✓ O modelo 3D permitiu a análise mais acurada dos contornos estruturais dos três maiores domínios presentes na área, mostrando sua eficácia na caracterização quantitativa de estruturas regionais. Estes resultados se coadunam com os objetivos inicialmente preconizados, sendo um deles a geração de um modelo regional do arcabouço da Bacia Potiguar, na área proposta.

3.3 – Integração dos Estudos Geofísicos e Geologia Estrutural

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 3.45**, 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 gravimétricos.

- ✓ O Alto de Lagoinha é uma feição estrutural alongada NE-SW, sendo gravimetricamente caracterizada pelo arqueamento do embasamento através de basculamentos de blocos de pequena extensão, 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 Alto de Lagoinha é limitado a leste pela Falha de Tiradentes de direção NE-SW. Essa falha ficou bem evidenciada no modelo 3D gravimétrico do topo do embasamento (**figura 3.34**).
- ✓ 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 variando de -400 a -610 metros. O Mapa Bouguer da gravimetria mostra, entretanto, uma anomalia positiva nessa plataforma, a 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 W-E, 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. Estes corpos ígneos também estão presentes no embasamento adjacente à borda sul da bacia Potiguar, 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, sendo 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 F-F' (**figura 3.41**) obtido por modelagem gravimétrica 2D, a Falha de Juremal é evidenciada por um movimento de blocos associado a atividades tectônicas. Assim como no perfil B-B' (**figura 3.37**) a ondulação do embasamento cristalino é indicativa de zona de falha, o que corrobora os resultados obtidos pela eletrorresistividade. A Falha de Juremal ocorre como prolongamento de falha extensional identificada no mapa geológico do Rio Grande do Norte (Angelim, 2007). Já a Falha da Maisa está evidenciada no perfil H-H' (**figura 3.43**) pela mudança de gradiente.

- ✓ 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 -800 metros. Gravimetricamente o graben está caracterizado por movimentos de blocos orientados NE-SW, compatíveis com a formação do rifte Potiguar, mostrando um gradativo afundamento do embasamento de W-E, evidenciado no perfil G-G' (**figura 3.42**), obtido por modelagem gravimétrica 2D. No mapa geológico-estrutural (**figura 2.8**) 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.

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, mostrada em traços aproximados na **figura 3.46**. Nas linhas a seguir vamos discutir essa divergência.

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 3.31**), caracteriza a presença do grande bloco negativo. O mapa de contorno estrutural do topo do embasamento (**figura 3.34**) mostra valores próximos de 900 m no ponto de intersecção com o perfil I – I' (**figura 3.44**). Tectonicamente essa feição seria decorrente de afinamento crustal ocasionado por movimentos distensivos no sentido NNE, 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 de uma serra de quartzitos (Serra Dantas) cingida por sedimentos da Formação Jandaíra, no extremo norte do Alto de Lagoinha. A grande concentração de quartzo nos quartzitos, com densidade menor que as demais rochas cristalinas, teria acarretado, na modelagem 2D, espessuras de sedimentos maiores que as espessuras reais.

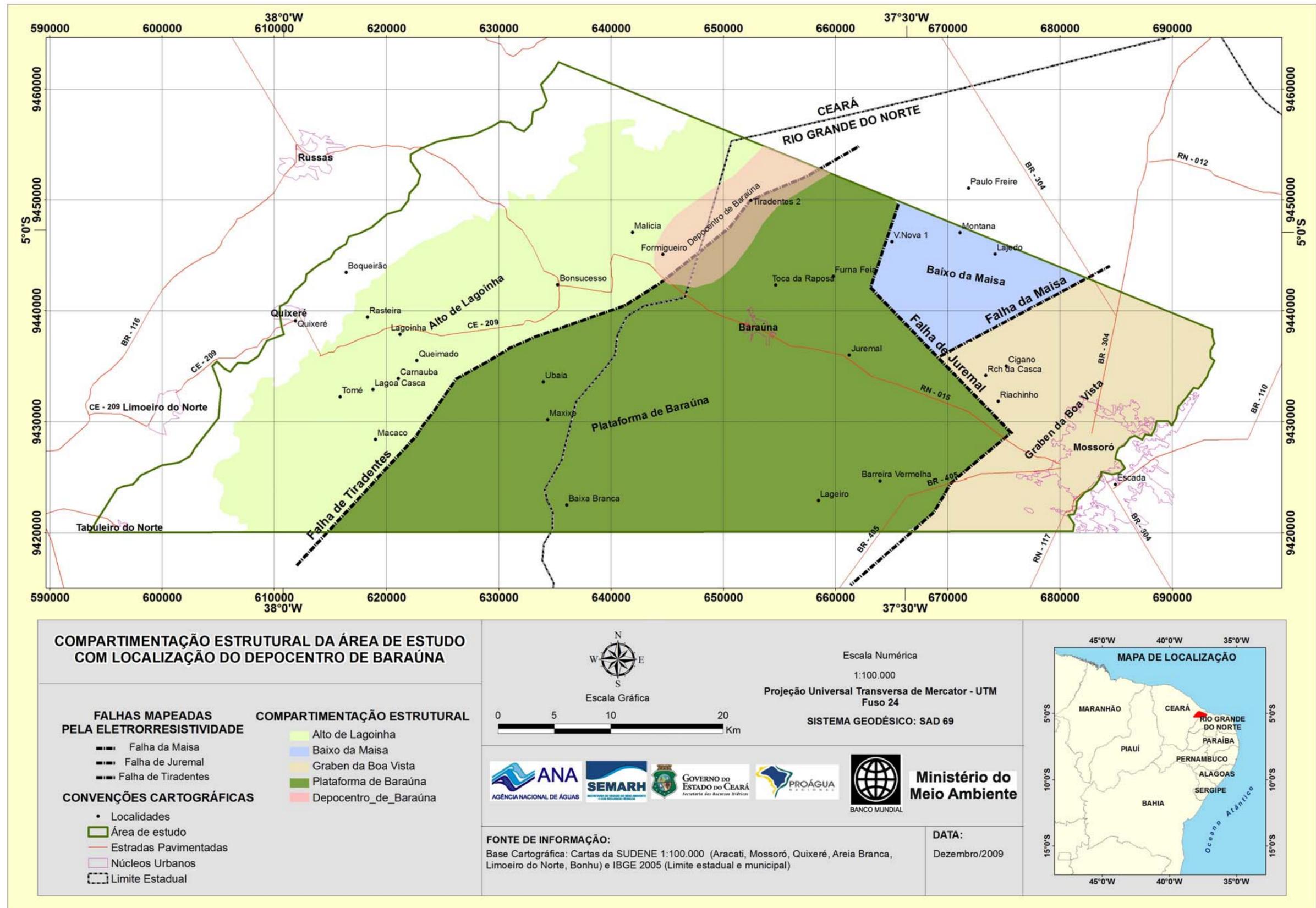


Figura 3.46 – Compartimentação estrutural mostrando o Depocentro de Baraúna.

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 proposto no relatório, motivo pelo qual a feição denominada de Depocentro de Baraúna foi mantida, em termos gravimétricos. No estágio atual de conhecimentos do problema, as seguintes considerações podem ser tecidas sobre a divergência entre os dois métodos quanto ao depocentro em foco.

Chama inicialmente a atenção, o fato de que a Falha de Tiradentes, mapeada pela resistividade, divide aproximadamente ao meio o Depocentro de Baraúna, tal com mapeado pela gravimetria (**figura 3.46**). 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, que constitui um grande afloramento de 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.

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 conseqüente 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.

3.4 – Perfílagem Geofísica

A perfílagem geofísica foi desenvolvida em apenas um poço exploratório, poço PO3-VSC na cidade de Quixeré, Estado do Ceará. O objetivo deste levantamento é fornecer informações sobre a estratificação do pacote de formações atravessados pelo poço no qual está sendo feita a perfílagem, bem como, sua porosidade. Foi realizada a perfílagem geofísica com uso de 4 (quatro) ferramentas com a finalidade de fornecer informações sobre a existência de regiões aquíferas e não aquíferas (raios gamas naturais ou potencial espontâneo), sobre a resistividade da formação e sua porosidade (resistividade e SP, perfil sônico). A seguir a descrição das ferramentas usadas e as curvas interpretadas dos perfis corridos no **PO3-VSC**:

- I. **Multifunção**: nesta ferramenta é realizada a leitura de raios gamas (argilosidade), potencial espontâneo (SP) (qualidade da água quanto a salinidade), resistividade (16" e 64") e *Sang* que fornece o desvio do poço. Notar que a curva do SP tem inflexão para a esquerda, o que significa arenito com água doce (**figura 3.47**).

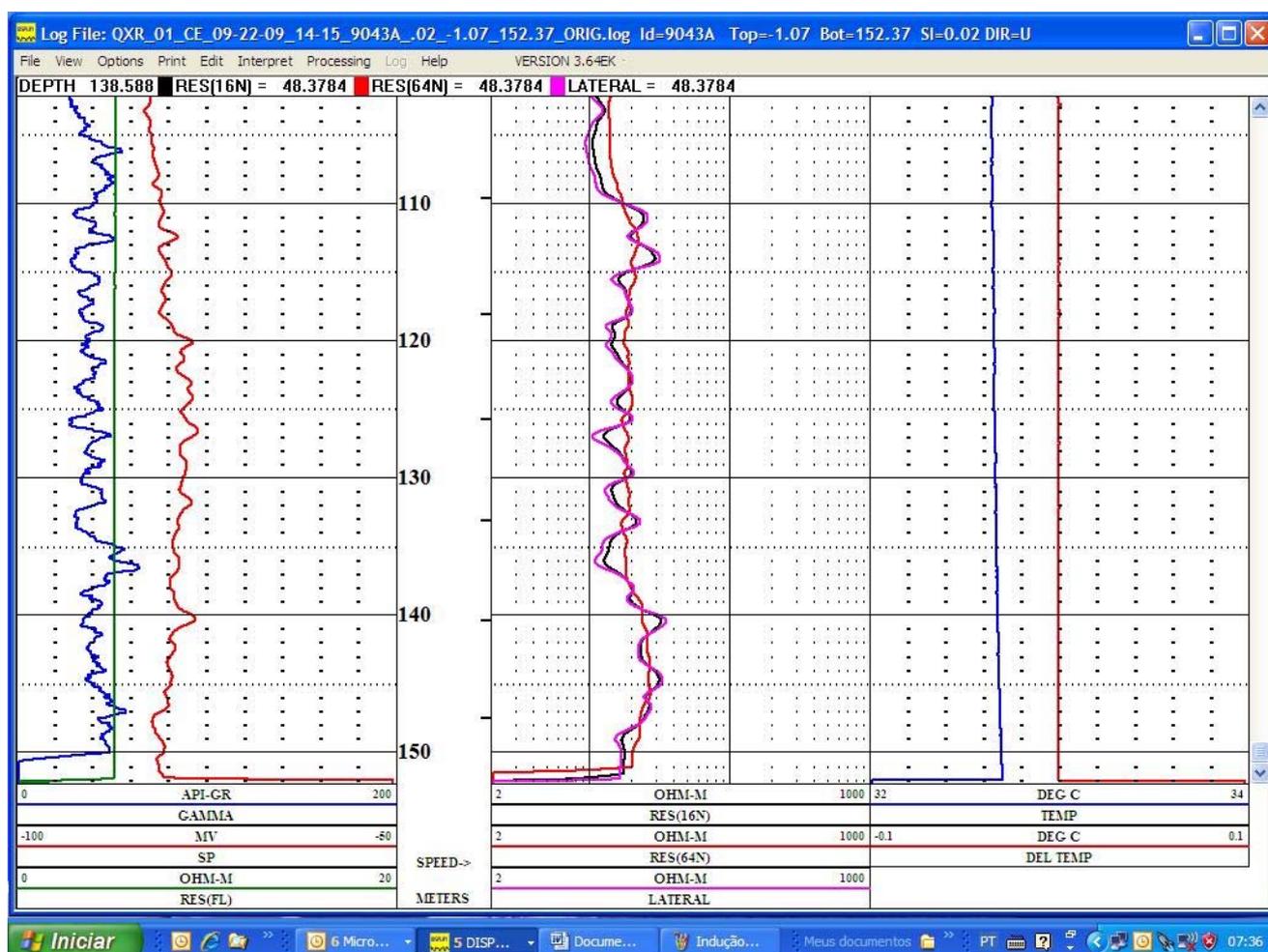


Figura 3.47– Perfis gerados no P3 através da ferramenta multifunção.

- II. **Indução**: Note na **figura 3.48** que em todo pacote a curva 64" é maior do que 10 ohm-m indicando que a água da formação é doce. No perfil de indução os valores acima de 10 ohm-m são os melhores intervalos a serem telados. Assim foram sugeridos os seguintes intervalos para colocação de filtros:

a) 110 a 114 m	c) 121 a 126 m	e) 132 a 134 m
b) 116 a 118 m	d) 128 a 130 m	f) 137 a 147 m.

A completação do poço PO3-VSC foi realizada tomando por base a perfilagem geofísica. Onde nota-se nos intervalos abaixo que o poço tem um comportamento geofísico distinto:

- ✓ até 110 metros as resistividades são baixas e não devem ser aproveitadas para colocação de filtros;

Dos 110 metros até 148 temos os melhores horizontes onde podem ser colocados filtros

A sugestão acima apresentada é corroborada pelas curvas de resistividade 16" e Lateral, esta última uma cópia fiel da indução com um valor pouco acima dos 10 ohm-m.

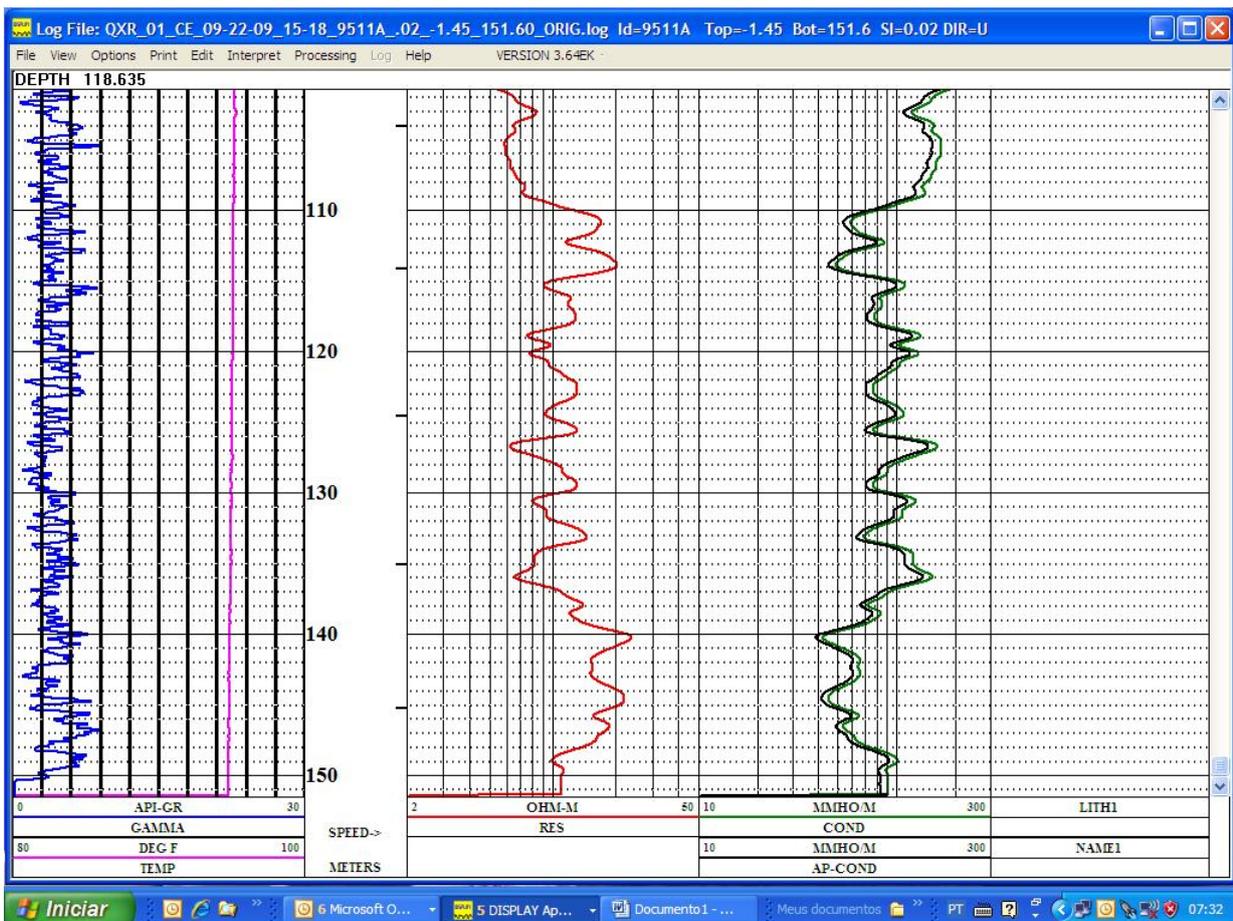


Figura 3.48 – Perfil de indução no poço PO3-VSC – ANA 1439.

III. **Sônico:** O perfil sônico (figura 3.49) representa um dos meios de se obter a **porosidade** dos aquíferos medindo o tempo de propagação, ou de trânsito, gasto por uma onda acústica para atravessar um determinado espaço de rocha. Na descrição das amostras de calha vemos que a parte basal do poço é constituída por um arenito arcoseano. Isto significa que o sensor de Raios Gama acusa valores mais elevados do que aqueles encontrados em arenitos limpos quartzosos. Isto muda o calculo do VSH, volume de folhelho, pois da um valor maior e consequentemente diminui a porosidade efetiva.

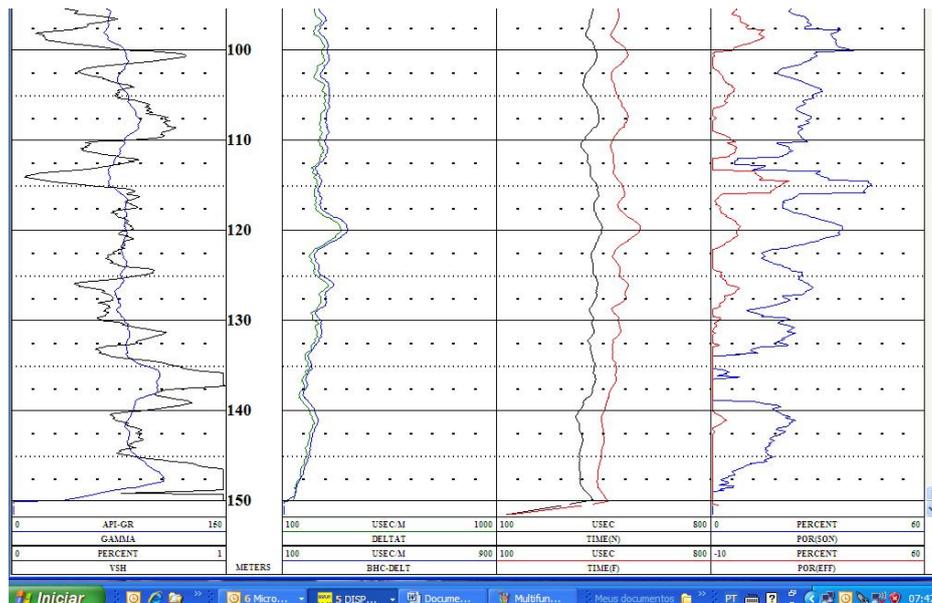


Figura 3.49 - Perfil Sônico no poço PO3-VSC – ANA1439.

IV – Cáliper: perfil usado para registrar o diâmetro do poço em relação ao diâmetro nominal da broca que o perfurou. No trecho em questão, ilustrado na **figura 3.50**, a variação é pequena, pois somente aos 120 há um alargamento maior do diâmetro do furo.

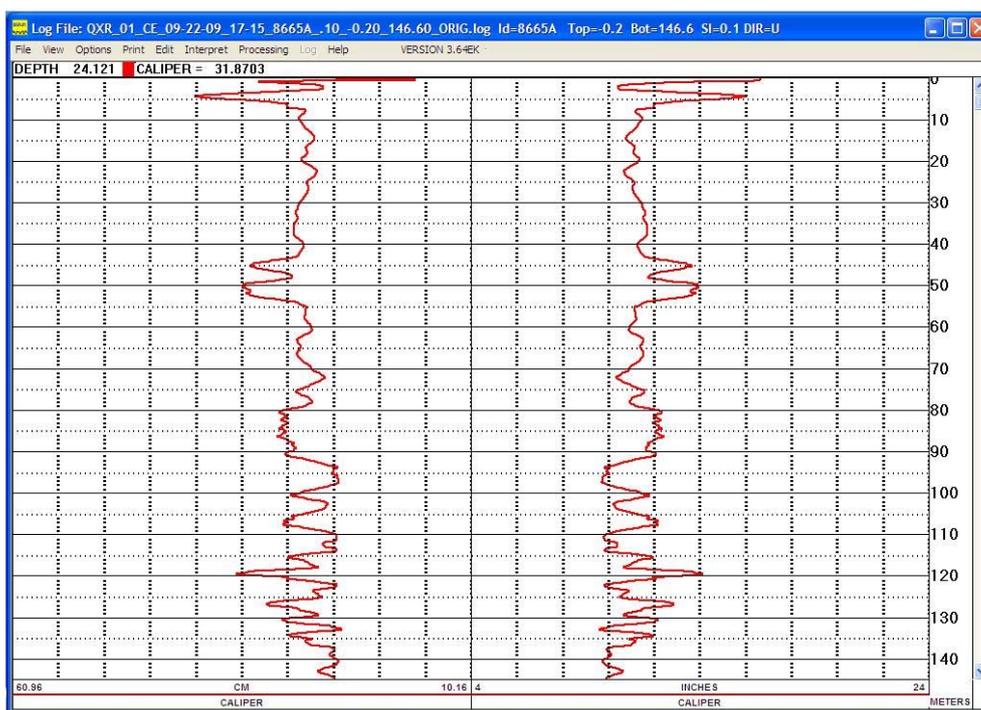


Figura 3.50 - Perfil Cáliper no PO3-VSC – ANA 1439.

Regra geral, os poços desviam-se mais ou menos da vertical, causando problemas desde o uso de algumas ferramentas de perfilagem, que necessitam estar bem centralizadas nos poços, até a instalação de revestimentos, filtros e equipamentos de bombeio. A **figura 3.51** mostra o perfil de desvio no poço PO3-VSC –ANA 1439, onde a curva vermelha à direita reflete um deslocamento de 0,6 m distante da boca do poço. Na **figura 3.52** é ilustrada a vista em planta da projeção dos desvios estando o fundo da perfuração no rumo SW.

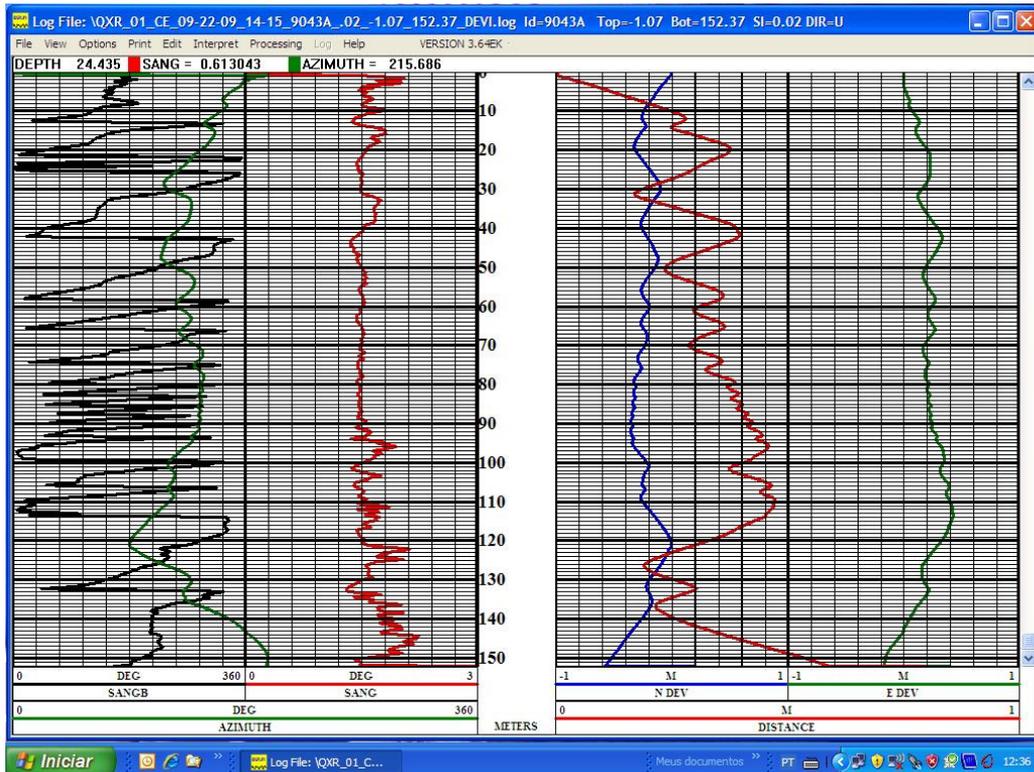


Figura 3.51 - Perfil de desvio no poço PO3.-VSC – ANA 1439.

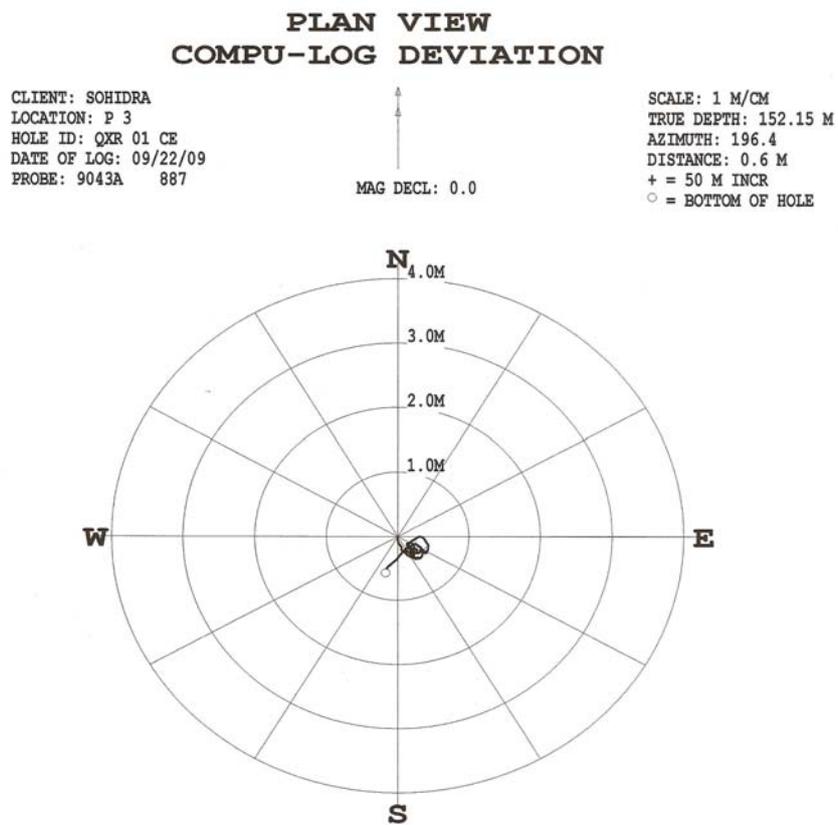


Figura 3.52- Vista em planta da projeção dos desvios no poço PO3-VSC – ANA 1439.

3.5 – Relatório da brazpoços – Perfilagem Ótica
RELATÓRIO FINAL DA PERFILAGEM ÓTICA DE POÇOS TUBULARES
ANA – SEMARH- COGERH-SRH CONSÓRCIO PROJETEC -TECHNE



POÇOS EXISTENTES NO SÍTIO FURNA DE PEDRA - BARAÚNA (RN)_E NO SÍTIO FORMIGUEIRO, - JAGUARUANA (CE)

Responsável Técnico: Adelbani Braz da Silva Geólogo CREA 3163/D

SETEMBRO / 2009

Rua Henrique Diniz, 660. Bairro Nova Cachoeirinha CEP 31.250-620 BH/MG – Tel: (31)3441.7054 Fax (31) 3441.7053 e-mail: brazpocos@brazpocos.com Site: www.brazpocos.com

1 - Introdução

Foram perfilados 03 (três) poços tubulares sendo 02 (dois), um poço exploratório e um poço de observação, no **Sítio Furna de Pedra** no município de Baraúna, no Rio Grande do Norte, e o terceiro no **Sítio Formigueiro** no município de Jaguaruana, no Ceará. Estes poços foram perfilados com câmera

de TV a cores, no dia 11/09/2009. Esta perfilagem foi realizada através de uma endoscopia do poço (filmagem interna do poço com câmera de TV em cores). Os poços foram perfurados recentemente e estavam revestidos na sua parte superior com tubos de PVC, tipo geomecânico, cravados em rocha sã.

A água que será explotada deste poço é proveniente do aquífero cárstico e fraturado. Em anexo seguem as cópias em DVD com as imagens das endoscopias realizadas onde são mostradas as cenas com destaque. Este DVD tem som gravado. A qualidade da filmagem ficou boa devido à perfeita transparência da água do poço em quase a totalidade do perfil.

FATOS RELEVANTES. Os principais fatos relevantes foram descritos nos perfis das endoscopias.

- ✓ POÇO ANA 1434: foi possível observar na filmagem que este poço está obstruído por uma pedra que caiu aos 60,00 metros. O poço ANA 1434 é revestido apenas até 2,20 metros.
- ✓ POÇO PIEZÔMETRO ANA 1435. Este poço contém gás natural na água na sua porção superior. Não foi possível observar de onde estava entrando este gás no poço. É possível que seja antes dos 15,00 metros de profundidade. O grau de fraturamento e de carstificação deste poço aparentemente é maior do que o poço ANA 1435. Uma provável fonte desse gás seria a partir de intercalações de folhelhos Quebradas existentes na Formação Jandaíra, que em geral são muito finas e nem sempre passíveis de recuperação na amostragem de calha.

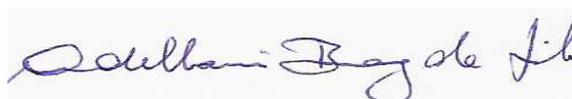
3 – RECOMENDAÇÕES.

O poço de Jaguaruana deve ser aprofundado. Aconselha-se cotejar as perfilagens realizadas com os dados e amostras coletadas durante a perfuração para se ter um diagnóstico completo destes poços.

Estes poços deverão ser submetidos a uma limpeza e um grande desenvolvido para retirar principalmente o material fino depositado. Ao final dos serviços deverá ser feita nova perfilagem ótica destes poços. Estes serviços servirão para melhorar a produtividade deste poço e conseqüentemente a sua vazão.

ADELBANI BRAZ DA SILVA.

Geólogo – PhD em Hidrogeologia CREA-MG 3163/D Tel 031 – 3441.7054; 031 – 9981.4000 e-mail: brazpocos@brazpocos.com site: www.brazpocos.com



Rua Henrique Diniz, 660. Bairro Nova
Cachoeirinha CEP 31.250-620 BH/MG – Tel:
(31)3441.7054 Fax (31) 3441.7053 e-mail:
brazpocos@brazpocos.com Site:

www.brazpocos.com

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, J.B. 1995 - Aplicabilidade do Método Geofísico de Eletroresistividade no Estudo Hidrogeológico de Bacias Sedimentares - O Exemplo da Bacia Potiguar. Dissertação de mestrado apresentada à UFPE e defendida em 12/05/95.
- Almeida, F. M. & Hasui, Y. 1984. O Pré-Cambriano do Brasil. Edgard Blucher, São Paulo, 378p.
- 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. 87pp.
- 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.
- Araripe, P. T. & Feijó, F. P. 1994. Bacia Potiguar. Boletim Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, **8** (1):127-141.
- Araújo Filho, J. C. 2000. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- 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.
- Bezerra, J. F. M. 2006. Solo: substrato da vida. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia.
- Brasil. RADAM. 1981. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. SECRETARIA-GERAL. PROJETO RADAMBRASIL. Folhas SB. 24/25 Jaguaribe/Natal; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro.
- Castro, D. L.; Medeiros, W. E.; Jardim de Sá, E. F. & Moreira, J. A. M. 1998. Gravity map of part of Northeast Brazil and adjacent continental margin and its interpretation based on the hypothesis of isostasy. Rev. Bras. Geof. vol.16 n.2-3 São Paulo.
- 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. 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.
- 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. & Karner, G. D. 1995. Soerguimento Termal e Erosão na Bacia Potiguar Subbersa e seu Relacionamento com a Evolução da Margem Continental Brasileira. In: Simpósio de Geologia do NE, 16, 1995, Recife. Anais... Recife: SBG/NE, 1995. V. 1.
- 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.
- EMBRAPA, 2005. Monitoramento por Satélite. Projeto Brasil em Relevo. In: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/>>
- 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 Eletrorresistividade da Área de Macau/Pendências na Bacia Potiguar/RN. Recife. CAERN/RN. Relatório Inédito.
- Feitosa, E.C. 1978 - Investigação Estrutural da Porção Ocidental da Bacia Potiguar/RN através de sondagens elétricas. IPT. São Paulo. Relatório inédito.
- Feitosa, E.C. 1991 - Aplicabilidade do Método Geofísico de Eletrorresistividade na Investigação Hidrogeológica de Bacias Costeiras Cretácicas. CNPq/UFPE, Recife. 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 Eletrorresistividade 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 Locação 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 Eletrorresistividade 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. & Simler, L. 1968 - Prospecção Électrique - Application de la Méthode et Notion Pratique d'Exploitation et de Présentation des Résultats. Bulletin du BRGM, deuxième série, Section III, n° 4. p. 45-50.
- 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 n° 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.
- Florenzano, T. C. 2002. Imagens de Satélite para Estudos Ambientais. São Paulo: Oficina de Textos.
- Florenzano, T. G. (org). 2008. Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. Oficina de Textos. São Paulo. 318 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.
- Guerra, A. J. T. & Botelho, R. G. M. 2003 -. Erosão dos solos. In: CUNHA, Sandra Batista & GUERRA, Antônio José Teixeira (org), *Geomorfologia do Brasil*. 3° ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p.107 – 143.
- 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.; Morais 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.
- Kunetz, G. 1966 - *Principles of Direct Current Resistivity Prospecting*. Geopublication Associates, Gebruder Borntraeger, Berlim.
- 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.
- 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-Apodí). 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.
- Novo, E. M. L. 2008. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 3. edição. São Paulo:Ed.Blucher,2008. Revista e ampliada.
- 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.

- Pereira, M. J. 1992. Considerações Sobre a Estratigrafia do Cenomaniano-Santoniano em Algumas Bacias Marginais Brasileiras e sua Implicação na História Tectônica e Sedimentar da Margem Continental. Rio de Janeiro, Bol. De Geoc. n° 6, PETROBRÁS. v. 3/4, p. 171-176.
- 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.
- 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.
- Teixeira, W.; Toledom, C. M.; Fairchild, T. R. & Taioli, F. 2001. Decifrando a terra. São Paulo, Oficina de Textos.
- Turcotte, D. L. & Schubert, G. 1982. Geodynamics applications of continuum physics to geological problems. Ed. John Wiley & Sons. New York.

