



**UNIVERSIDADE FEDERAL BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

**ESTUDOS GEOLÓGICOS-GEOFÍSICOS DA INTERFACE ÁGUA DOCE/ÁGUA
SALGADA EM AQUÍFEROS DA FORMAÇÃO BARREIRAS NO LITORAL DA
REGIÃO DE CAUCAIA-PECÉM/CE - R.M.F.**

Tese de Doutorado

Roberto Freitas Mota

PROFESSORES ORIENTADORES:

DR. GERALDO DA SILVA VILAS BOAS
PROF. ORIENTADOR/UFBA-BR

DR. MARCO ANTONIO BARSOTELLI BOTELHO
PROF. CO-ORIENTADOR-UFBA-BR

DR. ALBERTO CASAS PONSATÍ
PROF. ORIENTADOR/ASSOCIADO-UB-ES

Salvador-Bahia

ANO-2005



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA**



FACULTAT DE GEOLOGIA
Departament de Geoquímica,
Petrologia i Prospecció Geològica.

Tese apresentada no Departamento de Geologia e Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. Este estudo se enquadra no Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar e Costeira, para obtenção do Grau de Doutor, através de Doutorado Sanduíche no Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica de la Universidad de Barcelona, Espanha, dentro do programa de doutorado em **Geología Económica y Ambiental**, efetuado no biênio 2002 -2004.

Salvador, 29 de junho de 2005

Prof. Dr. Geraldo da Silva Vilas Boas
Orientador – UFBA
Prof. Dr. Marco Antonio Barsotelli Botelho
Co-orientador – UFBA
Prof. Dr. Alberto Casas Ponsatí
Orientador/Associado – UB-Espanha

Roberto Freitas Mota

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE SEDIMENTOLOGIA E GEOLOGIA COSTEIRA**

TESE DE DOUTORAMENTO

**ESTUDOS GEOLÓGICOS-GEOFÍSICOS DA INTERFACE ÁGUA DOCE/ ÁGUA
SALGADA EM AQUIFEROS DA FORMAÇÃO BARREIRAS NO LITORAL DA REGIÃO
DE CAUCAIA E PECÉM – R.M.F./CE**

ROBERTO FREITAS MOTA

**SALVADOR-BAHIA
- 2005 -**

**ESTUDOS GEOLÓGICOS-GEOFÍSICOS DA INTERFACE ÁGUA DOCE/ ÁGUA
SALGADA EM AQÜÍFEROS DA FORMAÇÃO BARREIRAS NO LITORAL DA REGIÃO
DE CAUCAIA E PECÉM – R.M.F. /CE.**

ROBERTO FREITAS MOTA

MARÇO 2005

**ESTUDOS GEOLÓGICOS-GEOFÍSICOS DA INTERFACE ÁGUA DOCE/ ÁGUA
SALGADA EM AQUÍFEROS DA FORMAÇÃO BARREIRAS NO LITORAL DOS
MUNICÍPIOS DE CAUCAIA E PECÉM – R.M.F./CE**

por

Roberto Freitas Mota

Geólogo (Universidade Federal de Pernambuco), 1970.

TESE DE DOUTORADO

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de

DOUTOR EM CIÊNCIAS
-GEOLOGIA-

à

Câmara de Ensino de Pesquisa e Pós-Graduação

Da

Universidade Federal da Bahia

COMISSÃO EXAMINADORA:

_____ Prof. Dr. Geraldo da Silva Vilas Boas - Orientador-

_____ Prof. Dr. Marco Antonio Brasotelli Botelho -Co-Orientador-

_____ Prof. Dr. Alberto Casas Ponsatí - Orientador/Associado/UB-

_____ Prof. Dr. Ari Medeiros Guerra - DEGEO/UFBA-

_____ Prof. Dr. Luis Parente Maia - LABOMAR/UFC –

Data de aprovação: ____/ ____/2005

Grau conferido em: ____/ ____/ 2006

DEDICATÓRIA

*Aos meus queridos e falecidos pais,
adoráveis filhas, filho, irmãos e irmãs.*

SUMÁRIO

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABELAS

1.	INTRODUÇÃO	
1.1	Introdução.....	1
1.2	Objetivos do Trabalho de Pesquisa da Tese.....	3
1.3	Justificativas e Relevância da Pesquisa.....	4
2.	CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	6
2.1	Localização e Acesso.....	6
2.2	Aspectos Fisiográficos.....	7
2.2.1	Clima.....	7
2.2.1.1	Regime Pluviométrico.....	9
2.2.1.2	Temperatura.....	11
2.2.1.3	Umidade Relativa do Ar e Evaporação.....	11
2.2.1.4	Ventos.....	11
2.2.2	Vegetação e Fauna.....	13
2.2.3	Solos.....	20
2.2.4	Aspectos Gerais dos Recursos Hídricos.....	22
2.3	Aspectos Sócio-Econômicos.....	25
3.	MARCO GEOLÓGICO E GEOMORFOLOGICO REGIONAL	27
3.1	Geologia Regional.....	27
3.1.1	Pré-Cambriano.....	27
3.1.2	Cenozóico.....	35
3.1.2.1	Terciário.....	35
3.1.2.2	Quaternário.....	35
3.2	RESUMO ESTRATIGRÁFICO ATUAL: Aspectos Geológicos.....	36

3.3	Geomorfologia Regional.....	43
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1	Trabalhos de Gabinete e Laboratório.....	47
4.2	Trabalhos de Campo.....	48
5.	MARCO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO LOCAL	53
5.1	Geologia da Região dos Municípios de Caucaia e Pecém-Ce.....	53
5.1.1	Precambriano-Cambriano.....	53
5.1.1.1	Domínio Petrográfico do Proterozóico Inferior.....	56
5.1.1.1.1	Subdomínio das Rochas Paraderivadas.....	56
5.1.1.1.2	Subdomínio das Rochas Ortoderivadas.....	57
5.1.1.2	Domínio Petrográfico do Proterozóico Superior.....	58
5.1.2	Cenozóico.....	58
5.1.2.1	Vulcanismo Alcalino do Terciário (Tλ).....	58
5.1.2.2	Tercio-Quaternário: Formação Barreiras (TQb).....	59
5.1.2.3	Depósito Colúvio-Eluvial (TQc).....	63
5.1.3	Quaternário.....	64
5.1.3.1	Depósitos Praiais e Sedimentos da Face de Praia.....	66
5.1.3.2	Depósitos Eólicos.....	67
5.1.3.2.1	Primeira geração de dunas.....	68
5.1.3.2.2	Segunda e terceira gerações de dunas.....	71
5.1.3.2.3	Quarta geração de dunas.....	73
5.1.3.2.4	Quinta geração de dunas.....	74
5.1.3.3	Depósitos Lacustres.....	75
5.1.3.4	Depósitos Flúvio-Aluvionares e de Mangues.....	76
5.2	Geomorfologia da Região de Caucaia-Pecém-Ce.....	78
5.3	Aspectos Tectono-Estruturais na Região de Caucaia e Pecém-Ce.....	88
6.	HIDROGEOLOGIA DA REGIÃO LITORÂNEA DE CAUCAIA-PECÉM-CE	92
6.1	Introdução: Sinopse do Aquífero Barreiras no Estado do Ceará.....	92
6.2	Estudos Hidrogeológicos da Região Costeira de Caucaia-Pecem-Ce.....	99
6.2.1	Parâmetros Hidrodinâmicos.....	107

6.2.2	Precipitação e Balanço Hídrico.....	110
6.3	Aspectos Preliminares Químico-Qualitativos dos Aqüíferos	116
6.3.1	Composição da Água Subterrânea: Relação Água doce-Água salgada.....	121
6.3.2	Cloretos (ou STD) na Água de aqüíferos e suas características físicas.....	124
6,4	Estado da Arte da Intrusão Salina em Aqüíferos Costeiros Locais.....	126
7.	METODOLOGIA GEOFÍSICA: CONTEXTO DA INTRUSÃO SALINA COSTEIRA	129
7.1	Introdução.....	129
7.1.1	Relação entre Parâmetros Geofísicos e Hidrogeológicos.....	130
7.2	Prospecção Elétrica.....	134
7.2.1	Introdução.....	134
7.2.2	Método de Resistividades.....	134
7.2.3	Dispositivos de Medida no Método de Resistividades.....	137
7.2.4	Sondagens Elétricas Verticais (SEV's) e Caminhamento Elétrico (CE).....	137
7.2.5	Equipamentos Utilizados.....	139
7.2.6	Limitações do Método.....	141
7.3	Prospecção Eletromagnética.....	142
7.3.1	Introdução.....	142
7.3.2	Prospecção Eletromagnética no Domínio das Freqüências.....	147
7.3.2.1	Princípios Gerais.....	147
7.3.2.2	Teoria Operacional sob Número de Indução.....	149
7.3.2.3	Condutímetro GEONICS Modelo EM34- 3XL.....	154
7.3.2.4	Resposta Instrumental em Função da Profundidade.....	158
7.3.2.5	Limitações do Método.....	160
8.	DELIMITAÇÃO GEOFÍSICA DA INTRUSAO SALINA NA REGIÃO LITORÂNEA DE CAUCAIA E PECÉM-CE	161
8.1	Introdução.....	161
8.2	Obtenção e Tratamento dos Dados da Região de Caucaia e Pecém-Ce.....	165
8.3	Discussão dos Resultados das Mahas 02 e 01.....	208
8.4	Justificativas do Método EM-34 e SEV.....	218
9.	CONCLUSÕES.....	219

Caracterização Geológica.....	219
Caracterização Geofísica.....	222

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	225
-------------------------------------	-----

ANEXOS:

1 MAPA GEOLÓGICO

1 MAPA DE PONTOS DE SONDAGEM - ÁREA - 1

AGRADECIMENTOS

AGRADECIMENTOS

Ao meu maior líder espiritual: Deus

-Ao Professor, Dr. Geraldo da Silva Vilas Boas do Departamento de Geologia e Geofísica da UFBA, meu Orientador, a quem devo todo apoio, por ser melhor amigo, sempre acreditar, incentivar, pela orientação, sugestões e compreensão durante os momentos difíceis dessa Tese.

-Ao Professor Dr. Alberto Casas Ponsatí, ilustre Catedrático em Geofísica do Departamento de Geoquímica, Petrologia y Prospección Geológica da Universidad de Barcelona, Espanha, meu Orientador/Associado no Doutorado Sanduíche, com destaque especial pela prestimosa colaboração bibliográfica, sugestões científicas, confiança e amizade familiar, disponibilidade e boa vontade em todos os momentos em que foi solicitado.

-Ao Professor, Dr. Prof. Dr. Marco Antonio Barsotelli Botelho do Departamento de Geologia e Geofísica da UFBA, meu Co-Orientador, pela amizade, crédito, sentido multi e interdisciplinar de orientação e a presente predisposição em ajudar.

-Aos Geólogos da Universidade de Barcelona, Espanha: Dr. Mahjoub Himi e Dr. Ricardo Lázaro Salinas da área de Prospecção Geológica e Geofísica pela grande e valiosa ajuda durante dos 2 anos e meio, que participei acompanhando alguns trabalhos de campo, durante o Doutorado Sanduíche na UB.

-Ao Professor Dr. Luis Parente Maia, Diretor do LABOMAR-UFC, pela grande confiança, amizade sincera e ajudas material e intelectual, pertinentes ao trabalho, mesmo à grande distância.

-Ao Professor Dr. Raimundo Mariano Castelo Branco, pela incontestável ajuda e amizade, fornecendo apoio logístico aos trabalhos de campo em geofísica, através do Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR) do DEGEO/UFC.

-Ao Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR) do DEGEO/UFC e as instituições PADCT / MCT, FBB, FINEP (CTPETRO-GEOAMB 2001-2004-01020012), CNPq (476398/2003-7) e FUNCAP/FCPC (1256-44), sem as quais não seria possível a realização desse trabalho.

-Ao Geólogo da CPRM: Francisco Edson Mendonça, com especial atenção, pela grande amizade e pela incansável ajuda uni presente no intercâmbio de idéias atualizadas sobre o assunto abordado nesse trabalho.

-Ao Geólogo Dr. Alexandre Medeiros de Carvalho, meu amigo, pelo constante companheirismo, com fornecimento de materiais e, sugestões nas discussões durante a realização dessa Tese.

-Aos professores do Departamento de Geologia do Centro de Ciências da UFC:

Dr. José Márcio Lins Marinho, Dr. David Lopes de Castro, Dr. George Satander Sá Freire, Dr. Afonso Rodrigues de Almeida e Michel Henry Arthaud, pelas indicações bibliográficas, sugestões, comentários construtivos e pela defesa institucional de minhas pretensões acadêmicas.

-Ao Professor Dr. Manoel Jerônimo Cruz do Departamento de Geoquímica da UFBA, com especial destaque pela amizade sincera, sua prestimosa ajuda viabilizando minha estadia material e intelectual na Cidade de Salvador.

-Ao Ilustre Secretário da Pós-graduação em Geologia da UFBA, Sr. Gilzélío Reis Nascimento, pela sua prestimosa e inesquecível atenção sempre acolhedora em nossa permanência no curso de doutorado.

Ao Técnico em Informática do laboratório de Geofísica da UFBA, Joaquim Bonfim Lago, pela boa amizade e atenção durante minha permanência no curso de pós-graduação.

-Aos Professores do Departamento de Geologia e Geofísica do Instituto de Geociências da UFBA: MS. Telésforo Martinez Marques, MS. Sérgio Augusto de M. Nascimento. Dr. João Batista Guimarães Teixeira, Dr. José Maria Landim Dominguez, Dr. Aroldo Misi e Dr. Johildo Salomão Figueiredo Barbosa, pela amizade constante, apoio e incentivo permanente.

-Aos Geólogos da CPRM: MS. José Carvalho Cavalcante, pela substancial colaboração, fornecimento de idéias, indicações bibliográficas e dicas geológicos regionais.

-À Fundação Cearense de Amparo à Pesquisa (FUNCAP), pelo incentivo à qualificação de pesquisadores, através do financiamento de intercâmbio cultural e transferência de tecnologias com a Universidade de Barcelona, no Doutorado Sanduíche.

-À CPRM/REFO-Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais/Residência de Fortaleza-Ce, DNPM/10^o D.S.– Departamento Nacional da produção Mineral-Ce e à FUNCEME-Fundação Cearense de Meteorologia–colaboradora deste trabalho.

RESUMO

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de estudos geológicos e geofísicos realizados em uma área de 7.348,5 km², localizada na Zona Litorânea Oeste do Estado do Ceará, a noroeste da Cidade de Fortaleza. Esta região abrange o litoral dos Municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante (Pecém), sendo limitada pelas coordenadas UTM 510.840,28 e 546.495,80 Leste; 9.612.762,59 e 9.591.716,76 Norte. A área de estudo fica situada na extremidade norte do Domínio Tectônico Setentrional da Província Borborema, limitando-se a NW pela Zona de Cisalhamento Sobral-Pedro II e a SE pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu. Encontra-se inserida nos Terrenos do Ceará Central, entre as unidades cratônicas São Francisco-Congo e São Luís-Oeste África. A configuração tectônica de seu embasamento cristalino é relacionada ao Ciclo Brasileiro, desencadeado no Proterozóico Superior.

Analisa o aquífero livre do sistema Dunas/Formação Barreiras na zona costeira de Caucaia e do Porto do Pecém, próximo às desembocaduras dos Rios Ceará, Juá e Cauípe. Trata-se de uma região litorânea com um grande fluxo turístico e uma intensa ocupação imobiliária. Os conglomerados urbanos e clubes balneários são abastecidos por água subterrânea, causando o desequilíbrio da interface e inviabilizando a captação de água potável. Nesses locais, existem focos de intrusão salina ainda não controlada e incidências de salinização do lençol freático. A superexploração de água em poços tubulares que atingem a cunha salina, aliada a outras de contaminações residuais, resultou em um grande número de poços abandonados.

Os parâmetros geológicos levantados nesta pesquisa forneceram subsídios para o entendimento dos sistemas hidrogeológicos e hidroquímicos da região em foco, concluindo-se que fatores como os princípios físicos que condicionam a intrusão salina costeira e as estruturas tectônicas de caráter regional, influem sobre o suprimento de água em aquíferos locais. A geomorfologia costeira foi também analisada de forma a contribuir para localização da interface água doce-água salgada. Quatro sistemas aquíferos foram observados: (i) as dunas/paleodunas; (ii) aluviões; (iii) sedimentos da Formação Barreiras; e (iiii) Embasamento Cristalino. Em função do relevo, proximidade e

vulnerabilidade, esses sistemas são contaminados com diferentes intensidades pela intrusão salina e pelos aerossóis marinhos.

Os levantamentos geofísicos com o Método Eletromagnético EM34-3XL e Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) forneceram valiosas informações sobre as condutividades aparentes, que foram traduzidas em dados de qualidade das águas, por meio do fator hidroquímico STD (Sais Totais Dissolvidos) e da condutividade elétrica de poços. Além disso, os mapas previsionais de isocondutividade aparente revelaram o comportamento da intrusão salina em relação a distância da interface e dos fluxos preferenciais.

Todos os dados obtidos, que incluem (i) análise de duas malhas de sondagens com leituras por meio de dipolos verticais e horizontais (1800 leituras); e (ii) a reinterpretação de dados geofísicos publicados anteriormente, foram integrados por meio de Sistemas de Informações Georeferenciadas (SIG).

Os resultados obtidos contribuíram para adequação de uma metodologia de modelagem hidrogeológica do aquífero. Este tipo de modelagem permite um monitoramento permanente, mesmo que aconteçam mudanças espaciais e temporais, quer seja ocasionada pelas intrusões salinas ou por lixiviados e dejetos provenientes de fontes ainda não controladas.

ABSTRACT

ABSTRACT

This research presents the results of geologic and geophysical studies carried out over an 7.348,5 km² area, located at the Western Coast of the Ceará State, to the northwest of Fortaleza. This region includes coastal areas of the Caucaia and Pecém, contained by a rectangle defined by the UTM coordinates 510.840,28 and 546.495,80 East; 9.612.762,59 and 9.591.716,76 North. The study area lies to the extreme north of the Northern Tectonic Domain of the Borborema Province, which is bounded to the NW by the Sobral-Pedro II shear zone, and to the SE by the Senador Pompeu shear zone, within the Central Ceará Domain, between the São Francisco-Congo and the São Luís-West African cratons. The geotectonic framework of its crystalline basement has been constructed in the Neoproterozoic Brasiliano Cycle.

The present study analyses the free aquifer of the Dunes/Barreiras Formation system, at the shoreline of Caucaia and Pecém, near to the estuaries of the Ceará, Juá and Cauípe rivers. This is a coastal district characterized by intense tourist influx besides a considerable real estate expansion. The urban communities and beach resorts are supplied by ground water, which causes disturbance on the water table and compromise the water supply. At this place, there are uncontrolled focus of salt-water intrusions, and incidences of salinization in saturated zone. Excessive water pumping from wells that go into the salt-water wedge, associated with other residual contaminations, resulted in a great number of abandoned wells.

The geological parameters established in this research have provided the necessary information for the understanding of the local hydrological and hydrochemical, and led us to the conclusion that the physical principles that control the salt-water intrusion and some tectonic structures of regional nature have an effect on the water availability from the local aquifers. The coastal geomorphology has also been analyzed in order to help in the location of the salt-water front. Four aquifer systems were recognized: (i) dunes/paleodunes; (ii) alluvia, and (iii) sediments of the Barreiras Formation; and (iiii) Barreiras / Crystalline. Based on topography, distance, and vulnerability, these systems are contaminated at different intensities by salt-water intrusion and marine spray.

The geophysical surveys (EM34-3XL and SEV) provided information about the apparent conductivity, which has been translated into water quality data, through the STD hydrochemical factor, obtained from electrical conductivities measured in wells. In addition, the isoconductivity predictive map reveals the behavior of the salt-water intrusion in respect of the distance from the salt-water front and of the preferential flow paths.

All the presently achieved data, including (i) analyses of geophysical data grids of vertical and horizontal dipoles measurements (1800 records), and (ii) reinterpretation of published geophysical data, have been integrated on a Georeferential Information System (GIS).

The obtained results have also contributed to the development of a methodology, which permits a precise aquifer modeling. The final model allows us a permanent monitoring, even do physical or sequential changes will be occurred, either provoked by the salt-water intrusion or by leakages and waste of not determined sources.

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.1	Modelo mostrando caminhos de fluxo da água subterrânea numa bacia litoral idealizada ao longo da Costa Atlântica.....	1
Figura 2.1	Mapa de Localização da Área de Estudo.....	8
Figura 2.2	Mostra a ZCIT - Zona de Convergência Intertropical com Banda de nuvens formadas devido a confluência dos ventos do	10
Figura 2.3	Observações na 1ª e 2ª quinzena de setembro de 1997 mostram a plenitude do período de seca, indicada pela	19
Figura 2.4	Mapa de solos da R.M.F. com vários tipos pedológicos existentes em função das litologias encontradas.....	23
Figura 2.5	Bacias Hidrográficas 2, 4 e 5 da Área. A Serra do Camará e o Alto de Fortaleza, servem como divisores das bacias.....	26
Figura 3.1	Posicionamento da Província da Borborema (1 + 2) no contexto dos sistemas de dobramentos neoproterozóicos.....	28
Figura 3.2	Província Borborema e seus domínios maiores	29
Figura 3.3	Principais unidades litoestratigráficas do DTS.....	31
Figura 3.4	Coluna Geológica Estratigráfica da Região Metropolitana de Fortaleza. Fonte Modificada e adaptada da CPRM.....	37
Figura 3.5	Mapa Geológico do Estado do Ceará. Modificado de Cavacante (1999).....	38
Foto 5.1	Complexo serrano do Camará, Serra da Conceição e Taquara...	54
Foto 5.2	Ocorrência de quartzito com mergulho para noroeste na área litorânea da Praia do Pecém.....	57
Foto 5.3	Na direção noroeste de Cauípe, mostrando ocorrência da ocorrência da Formação Barreiras com cobertura uma tênue.....	61
Foto 5.4	Entre as localidades Primavera e Pecém-Ce, ocorrências de Colúvio-Elúvio.....	62
Foto 5.5	Ocorrência de colúvios num corte na estrada CE-421 no sentido Pecém-Taíba.....	64
Figura 5.1	Esboço de uma evolução seqüencial dos tipos de dunas na região do Pecém.....	69
Figura 5.2	Imagem "Spot" mostrando delimitação das 5 gerações de dunas na zona litorânea entre o limite oeste da Cidade de	72

Foto 5.6	Região de dunas próxima à curva da Estrada Velha em direção zona do Porto do Pecém.	73
Figura 5.3	Coluna Estratigráfica da Região de Caucaia e Pecem, Estado do Ceará.....	77
Figura 5.4	Esboço Geomorfológico do Estrado do Ceará.....	79
Foto 5.7	Imagem TM – Landsat 7 – 345, mostra as zonas baixas do litoral, os cursos fluviais sujeitos às influências das marés.....	83
Figura 5.5	Domínios Morfoestruturais do Estado do Ceará.....	85
Figura 5.6	Controle Morfoestrutural da Drenagem - Estado do Ceará - Recolhida e Modificada de Claudino Sales, 2002.....	86
Figura 5.7	Domínios Morfológicos da Fachada Marítima. Recolhida e Modificada de Claudino Sales, 2004.....	87
Figura 5.8	Mapa de anomalias gravimétricas residuais associadas ao esboço geológico	90
Foto 6.1	Fontes formadas por aquitardos (ou aquíferos suspensos) nas camadas argilosas de sedimentos da Formação.....	94
Figura 6.1	Mapa da morfologia do topo do substrato cristalino, referenciada ao nível do mar.....	103
Figura 6.2	Mapa de linhas de isopotencial hidráulico com indicação de fluxo de água subterrânea.....	106
Figura 6.3	Balanço Hídrico Atualizado para o Período de 1974 e 1997. Extensivo às Regiões de Aracati, Fortaleza, Caucaia e Pecém-..	110
Figura 6.4	Localização das estações meteorológicas da parte oeste da Região Metropolitana de Fortaleza.....	112
Figura 6.5	Distribuição anual das médias mensais de temperatura na zona litorânea de Caucaia e Pecém-Ce.....	113
Figura 6.6	Gráfico mostrando a distribuição dos totais anuais de precipitação pluviométrica no período entre 1976 e 2000.....	114
Figura 6.7	Gráfico da distribuição anual da Precipitação (PPT), Evapotranspiração Potencial (ETP) e Evapotranspiração Real...	115
Figura 6.8	Histograma das razões rCl^-/rNa^+ das amostras coletadas (a) e (b).....	118
Figura 6.9	Histogramas das razões rMg^{++}/rCa^{++} das amostras coletadas em (a) setembro/98 e (b) junho/.....	119
Figura 6.8a	Diagrama de Piper das amostras d'água coletadas em setembro/98	120

Figura 6.10	Histograma das razões rCl^-/rNa^+ (aerossóis marinhos).....	121
Figura 6.8b	Diagrama de Piper de amostras d'água coletadas em junho/99 .	122
Figura 7.1	Esquema de fluxo no solo.....	130
Figura 7.2	Curvas de porosidade total de uma formação aquífera saturada não argilosa em função do fator de formação.....	131
Figura 7.3	Linhas equipotenciais e linhas de fluxo: (a) plano vertical dos	136
Figura 7.4	Dispositivo tetraeletródico tipo Schlumberger.	137
Figura 7.5	Exemplo da representação de uma curva S.E.V.	138
Figura 7.6	Exemplo de uma disposição de campo (CE) dipolo-dipolo.....	141
Figura 7.7	Esquema geral do campo eletromagnético (Reynolds, 1997),.....	149
Figura 7.8	Disposição das bobinas emissoras e receptoras.....	150
Figura 7.9	Modelo elétrico da configuração dos dipolos verticais.....	151
Figura 7.10	Circuito equivalente do dipolo da figura 7.9.....	152
Figura 7.11	Relação entre a condutividade aparente e condutividade real	154
Foto 7.1.	Leituras com a configuração de dipolos horizontais (bobinas verticais) realizadas nas paleodunas,	156
Foto 7.2	Bobina Receptora e console receptor (associado).....	157
Foto 7.3.	Bobina Transmissora e console do transmissor (associado).....	157
Figura 7.12	Contribuição relativa ao campo magnético para dipolos verticais	158
Figura 7.13	Contribuição relativa do campo magnético secundário no caso do dipolo horizontal.....	159
Figura 8.1	Modelo hipotético mostrando a distribuição de feições do fluxo de água subterrânea e a zona de dispersão num aquífero	161
Figura 8.2	Feição de fluxo de água subterrânea próxima a um bombeamento num aquífero costeiro idealizado no litoral.	163
Figura 8.3	Mapa de localização das estações de levantamento geofísico Eletromagnético (EM31 e EM34). Vieira Filho (2002)	168
Figura 8.4_r	Mapas previsionais de isocondutividade aparente da região de Icaraí, com espaçamento regional, semidetalhe reinterpretados.	170

Foto 8.1	Mostrando a projeção integrada dos pontos dos perfis de EM34 executados numa malha 01 de 800m x 600m, com nós de 40 ...	173
Foto 8.2	Mostrando a projeção integrada dos pontos dos perfis de EM34 executados na malha 02 de 600m x 600m, com nós de 40 em..	213
Foto 8.3	Emprego do equipamento EM-34-3XL, nas dunas recentes, num arranjo com DH-10, espaçamento de 10 metros	214
Foto 8.4	Complexo Industrial e Portuário do Pecém, recém construídos e próximos à área de levantamentos geofísicos com EM-34 e	215
Figura 8.5	PERFIL – 1/ NW, executado na sede da Administração do Porto do Pecém-Ce, conforme demonstra o mapa de localização das	176
Figura 8.6	PERFIL -2/NW, Executado após à sede da Administração do Porto do Pecém-Ce, dando continuidade.....	176
Figura 8.7	SEV 54 - Perfil indicando a espessura da zona saturada em contato com cristalino.....	180
Figura 8.8	SEV 53 – Dados de campo (Arranjo Schlumberger).....	181
Figura 8.9	SEV 53 – Mostrando regiões saturadas nas dunas e Formação Barreiras.	182
Figura 8.10	SEV 52 – Dados de campo (arranjo Schlumberger)-.UTM: 538.247 E / 9.592.851 S. Data: 25/06/1999 – Recolhida de	183
Figura 8.11	SEV 62 – Interpretada e recolhida de Marinho (2000), em Icaraí-Ce, indicando alta condutividade e confirmando	184
Figura 8.1DH_a	Mapa com curvas de isocondutividade representando todas as leituras com o dipolo vertical DH-10.....	190
Figura 8.1DH_b	Mapa com curvas de isocondutividade representando todas as leituras com o dipolo vertical DH-20.....	191
Figura 8.1DH_c	Mapa com curvas de isocondutividade representando todas as leituras com o dipolo vertical DH-20.	192
Figura 8.1DV_a	Mapa com curvas de isocondutividade representando todas as leituras com o dipolo vertical DV-10	193
Figura 8.1DV_b	Mapa com curvas de isocondutividade representando todas as leituras com o dipolo vertical DV-20	194
Figura 8.1DV_c	Mapa com curvas de isocondutividade representando todas as leituras com o dipolo vertical DV-40	195
Figura 8.12	Mapa mostrando localização das SEVs e suas proximidades com as malhas de levantamento geofísico, através de EM-34....	196
Figura 8.13	SEV 100 próxima à Malha 01 perdurando um comportamento resistivo a 40m de profundidade e	197

Figura 8.14	SEV 104 indicando uma curva de comportamento normal na região, com subida dos valores resistivos após alcançar a	197
Figura 8.15	SEV 110, mostra a curva de resistividade obtida e o perfil litológico interpretado. Recolhido e modificado de	198
Figura 8.16	SEV 111, mostrando interpretações análogas com zonas saturadas, parte argilosas da Formação Barreiras saturada e ...	199
Figura 8.2 DH_a	Mapa com curvas de isocondutividade representando todas as leituras com o dipolo vertical DH-10.	202
Figura 8.2 DH_b	Mapa com curvas de isocondutividade representando todas as leituras com o dipolo vertical DH-20.	203
Figura 8.2 DH_c	Mapa com curvas de isocondutividade representando todas as leituras com o dipolo vertical DH-40.....	204
Figura 8.2 DV_a	Mapa com curvas de isocondutividade representando todas as leituras com o dipolo vertical DV-10.	205
Figura 8.2 DV_b	Mapa com curvas de isocondutividade representando todas as leituras com o dipolo vertical DV-20.	206
Figura 8.2 DV_c	Mapa com curvas de isocondutividade representando todas as leituras com o dipolo vertical DV-40.....	207

ÍNDICE DE TABELAS

ÍNDICE DE TABELAS

		Página
Tabela 2.1	Coordenadas UTM que delimitam o polígono regular geral A da região de pesquisa.	6
Tabela 2.2	Coordenadas UTM da Sub-Área A1 de estudos detalhe geológicos e geofísicos, objeto de interpretações de detalhe.	6
Tabela 2.3	Principais Registros da Estação Meteorológica de Fortaleza Valores Médios Mensais – Período de 1974 a 1998	12
Tabela 6.1	Dados hidrogeológicos de poços (Stamford, 1986).	95
Tabela 6.2	Relação dos poços utilizados para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos	104
Tabela 6.3	Parâmetros hidráulicos do sistema aquífero Dunas/Barreiras deduzidos de testes de bombeamento no litoral oeste	107
Tabela 6.4	Parâmetros hidráulicos do sistema aquífero Dunas/Barreiras deduzidos de testes de bombeamento no Litoral oeste.	108
Tabela 6.5	Parâmetros hidráulicos do sistema aquífero Dunas-Barreiras deduzidos de testes de bombeamento no Litoral oeste C	109
Tabela 6.6	Balanço hídrico e obtenção da infiltração efetiva anual.	114
Tabela 6.7	Parâmetros estatísticos das análises químicas da Bacia do Rio Juá.	116
Tabela 7.1	Relação entre os diferentes fatores que afetam a profundidade de investigação.	156
Tabela 8.1	Medidas de Sondagens Eletromagnéticas EM-34, no Litoral da região de Pecém / Cauípe Estado do Ceará, Malha 01 .	185 a 189
Tabela 8.2	Medidas de Sondagens Eletromagnéticas no Município de Caucaia, Ce. Malha 02(Litoral de Icarai).	200 a 201
Tabela 8.3	PERFIL -1/NW, em frente à Sede da Administração do Porto do Pecém-Ce.	174
Tabela 8.4	PERFIL - 2 /NW, em frente à Sede da Administração do Porto do Pecém-Ce, continuação do perfil anterior ou	175
Tabela 8.5	Dados de Campo da SEV 53	181

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

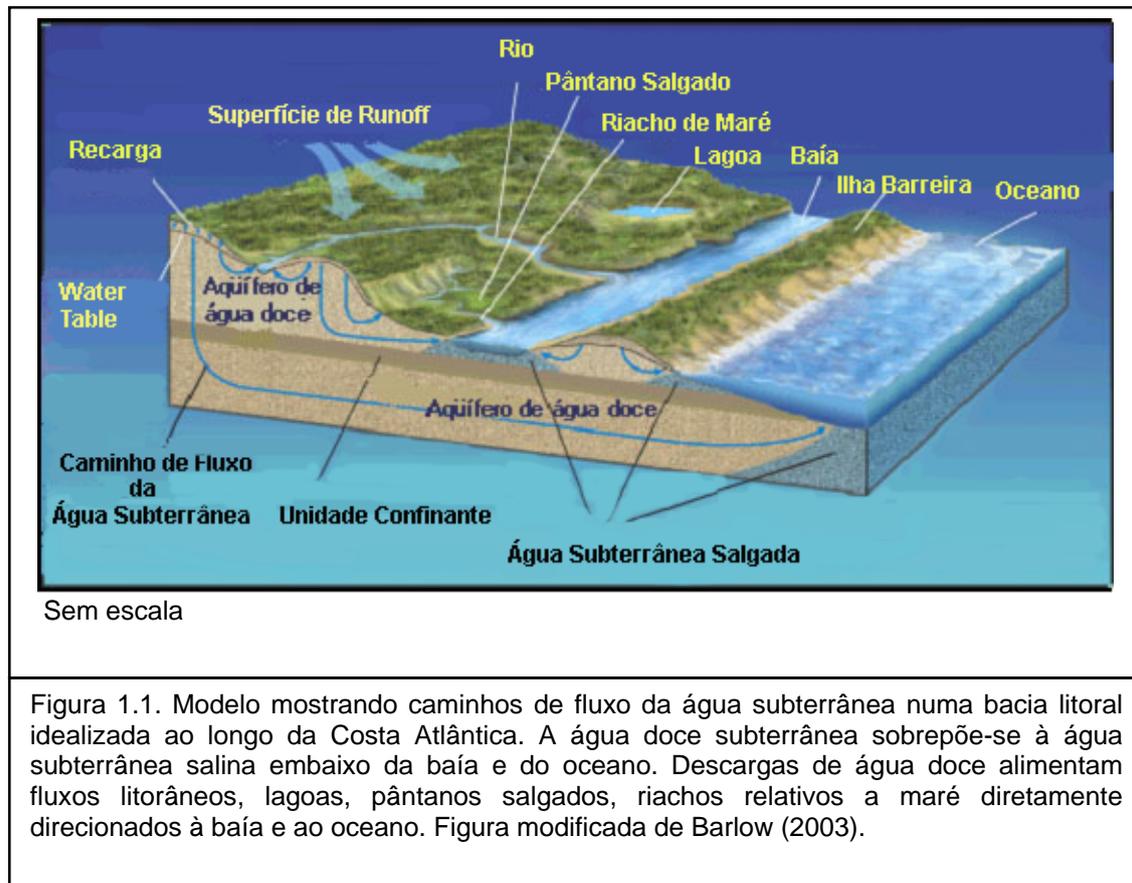
1.1 Introdução

A água subterrânea figura entre os recursos naturais mais importantes de uma Nação. Fornece água potável para comunidades urbanas e rurais, suporta a irrigação e a indústria, mantém o fluxo de córregos e rios, preserva ambientes ribeirinhos e ecossistemas de zonas úmidas. Em muitas áreas mundiais, o futuro sustentável de recursos de água subterrânea está sob risco de uso excessivo e da contaminação. Tendo em vista que, os sistemas de água subterrânea respondem tipicamente de forma lenta às ações humanas, uma perspectiva em longo prazo é necessária para gerenciar esse precioso bem mineral.

A importância fundamental de se manter reservas estratégicas de água subterrânea, cada dia se torna mais crescente e muito mais importante do que conservá-las é que sejam consideradas de boa qualidade para o consumo humano e industrial. Notadamente, observa-se que a qualidade dos recursos hídricos é altamente vulnerável, em função de causas naturais e antropogênicas.

Grande parcela dos recursos de água doce subterrânea está envolvida lateralmente ou sobreposta à água salina em determinadas regiões. Este fato tem se tornado mais evidente ao longo de áreas costeiras, onde os sistemas de água doce aproximam-se do contato com os oceanos e que, conseqüentemente, recebem influências da água do mar, quer pela intrusão de cunha salina marinha quer pela infiltração de aerossóis marinhos e outros. Desse modo, tais recursos potáveis, sendo avizinados e envolvidos por águas salinas, são significativos porque, sob algumas circunstâncias, esses tipos de água salina podem se mover para dentro de sistemas de água doce e tirar sua condição de potabilidade.

Recentemente, Barlow (2003), desenvolveu modelos hipotéticos, que mostra os caminho de fluxo da água subterrânea numa bacia litorânea, idealizada ao longo da Costa Atlântica de Maine, na Florida (figura 1.1). Nele, ficam demonstradas semelhanças parciais significativas com algumas zonas costeiras do Nordeste do Brasil. Os aquíferos são na maioria detríticos e livres. O protótipo assemelha-se a algumas áreas a sudeste da Costa do Brasil, entretanto, na Costa do Nordeste, pode ser representado pela Planície Costeira de Caucaia e Pecém-Ce, Icapuí-Ce, Planície Costeira de Boa Viagem, em Recife-Pe, Bahia de Salvador-Ba, etc.



Conclui-se, finalmente, que a Intrusão de água salgada marinha é a principal ameaça aos recursos de água doce das áreas litorâneas, de modo geral, havendo três mecanismos primários pelos quais a água salgada contamina o reservatório de água doce de aquíferos não confinados superficiais da região: (1) movimento de água salgada de sub-superfície (ampla intrusão lateral); (2) infiltração de água salgada de canais relativos a maré e fluxos; e (3) movimento superior de água salgada cognata (água que permanece o tempo de testemunho) de formações detríticas mais rasas devido a retiradas em poços no campo. Todos os três mecanismos são ocasionados pelo rebaixamento de níveis de água doce no aquífero superficial. Verifica-se, porém, que o efeito dos últimos dois mecanismos (infiltração e movimento superior) geralmente é limitado a regiões relativamente pequenas, considerando que a intrusão lateral afeta uma área muito mais ampla da região do aquífero.

1.2. Objetivos do Trabalho de Pesquisa da Tese

Estudos integrados, tanto da geologia, geofísica, hidrogeologia, hidrogeoquímica como da hidrodinâmica da Formação Barreiras e de seus sedimentos sobrepostos, poderão contribuir, técnica e cientificamente, para implantação de medidas técnicas e mitigadoras eficazes contra a o processo de salinização. Para o fato, torna-se necessário que se entenda a evolução geológico-geotectônica da área, caracterize as propriedades de seus aquíferos, estabeleça relação de qualidade com as litologias armazenadoras e as aplique na resolução dos conflitos ali apresentados. Nesta ótica, para atingir os objetivos têm-se os seguintes passos:

- a)** Delimitar a interface água doce / água salgada nos aquíferos da Formação Barreiras através de levantamentos geofísicos no litoral da área de pesquisa, com a utilização sistemática da prospecção eletromagnética, usando métodos elétricos EM31 e EM34 no domínio das frequências e sondagens de eletro-resistividade do tipo SEV (Arranjo Schlumberger) ou Dipolo-Dipolo em malha de 40 m x 40 m e/ou em perfis, respectivamente;
- b)** Realizar reinterpretação das sondagens elétricas verticais e eletromagnéticas, realizadas em campanhas anteriores, inseridas no contexto da zona de estudo e confrontá-la com novos resultados obtidos e ensejados nos trabalhos de campo;
- c)** Através de isótopos estáveis determinar a origem da água salina nesses aquíferos, quer seja por intermédio de aerossóis marinhos, paleoaquíferos ou por contribuições de aquíferos fissurais do embasamento subjacente;
- d)** Correlacionar resultados hidrogeológicos e hidrogeoquímicos para analisar a evolução da intrusão salina;
- e)** Georeferenciar faixas de posicionamento da interface água doce / água salgada, com sua evolução temporal e espacial, no âmbito da área, para determinar zonas de segurança para servir de apoio aos futuros projetos de exploração de aquíferos de água doce na região litorânea em apreço;
- f)** Avaliar as técnicas geofísicas utilizadas neste trabalho, como metodologia complementar aos métodos diretos de análise, quando estes últimos métodos não poderem ser aplicados por razões econômicas (custo muito caro) ou por logísticas.

1.3 Justificativas e Relevância da Pesquisa

Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (Ceará, 1992), existe na área uma reserva explorável 1.801.000 m³/ano com um montante de 372 poços perfurados com uma profundidade média de 36 m e uma reserva permanente estimada em 70.000.000 m³/ano na Região Metropolitana de Fortaleza. Entretanto, o Serviço Geológico do Brasil da companhia de Pesquisa e Recurso Mineral-CPRM (2000), num novo levantamento atualizou o cadastro para 646 de poços. Devido à forma, essencialmente, especulativa do mercado verifica-se quase sempre a inexistência de cuidados técnicos e de informações hidrogeológicas mais precisas sobre grande parcela dos mesmos. Evidentemente, faz-se necessária uma gestão adequada desses recursos hídricos, pois não se pode prescindir de bons conhecimentos das características hidrogeológicas de cada aqüífero e de um controle contínuo tanto em termos de qualidade como de quantidade. No contexto, a contribuição geofísica com uma possível delimitação da intrusão salina na região se faz necessária.

A escassez de trabalhos de cunho científico e técnico nas últimas décadas, no sentido de melhor direcionar a exploração desse precioso bem mineral, tem dificultado sobremaneira a exploração racional dessas reservas, no que se refere ao seu aproveitamento residencial-doméstico e industrial. Órgãos, como SRHCE - Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará, CAGECE - Companhia de Água e Esgotos do Estado do Ceará e FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia têm realizado trabalhos mais ligados à distribuição superficial dos recursos hídricos e a atendimentos emergentes provindos dos reclamos da seca. Órgão, como por exemplo, CPRM – Serviço Geológico do Brasil - Residência de Fortaleza tem contribuído no sentido de organizar e catalogar poços, entretanto a deficiência na informação sobre parâmetros químicos e físicos dessas águas e poços, fornecidos pela comunidade especulativa, tem deixado a desejar.

Recentemente, desenvolveu trabalhos (SIAGAS) no sentido de dividir o Estado do Ceará em micro-regiões municipais, contendo georeferenciamento e o perfil técnico-analítico de cada poço perfurado e indicando a situação atual do que existe disponível, no que se refere informação hidrogeológica em cada região.

No confronto com as explicações anteriores, tem-se a considerar que a determinação dos fatores que afetam as condições de qualidade da água nos aquíferos do Sistema Dunas /Formação Barreiras e a conseqüente locação de poços promissores em água potável, nas regiões litorâneas da Região Metropolitana de Fortaleza têm caráter muito especial, pela complexidade de suas estruturas. A variação faciológica sedimentar e o arcabouço do embasamento cristalino, heterogeneidades litológicas e irregularidades topográficas complementam esta realidade. Por outro lado, além dos caracteres litológicos e a decomposição mineralógica em algumas das unidades armazenadoras de água com as quais ela pode interagir e modificar sua composição tem-se também que levar em conta a influência direta ou indireta na qualidade dos aquíferos em função, todavia, da contribuição das águas de aquíferos fissurais provindas do embasamento cristalino sotoposto.

Nas zonas costeiras (praianas), onde há predomínio de conglomerados urbanos e balneários, têm-se detectado alterações na zona de interface águas doces/ água salgada com conseqüente contaminação em poços de boa qualidade e vazão, já em processo de utilização. Não há nenhum estudo científico para determinar e delinear a citada interface, através de levantamentos geofísicos e hidrogeoquímicos, o que será de fundamental importância para futuros planejamentos e gerenciamento de novas políticas de exploração de aquíferos em regiões semelhantes. A delimitação de zonas de segurança para locações e extrações desse bem mineral potável, sem interferência da intrusão salina poderá ser feita através de levantamentos geofísicos e indicado por uma cartografia digital num georeferenciamento.

Justifica-se e se considera relevante, a importância científica pioneira nesta zona, de estudos (para a qualidade de vida das populações costeiras e circunvizinhas na Região Litorânea de Caucaia e Pecem) direcionados à solução desses problemas de intrusão salina marinha que aumentam, em partes significativas da ampla Costa do Nordeste do Brasil, com exemplos desanimadores na planície costeira de Boa Viagem, em Recife-Pe, onde a super-exploração dos aquíferos costeiros avolumou-se de modo a atingir rebaixamentos da superfície potenciométrica até profundidades superiores a 100 m (Costa, 2000) e com expansão das áreas de salinizadas atingindo 20% da planície.

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização e Acesso

Está inserida na parte NW da Região Metropolitana da Fortaleza (R.M.F.), Estado do Ceará, conforme PROJETO SINFOR, Brandão, (1995), e a superfície estudada está delimitada pelas coordenadas geográficas projetadas na Tabela 2.1, abrange partes dos municípios de Fortaleza, Maracanaú, Caucaia e São Gonçalo do Amarante. Totaliza, aproximadamente, 7.348,5 Km², compreende um polígono geral maior **A** delimitado por quatro vértices contendo outro, análogo, de menor dimensão **A₁** inserida na área (Mapa de Pontos Amostrados na Região Costeira de Caucaia e Pecém-Ce, em anexo) que delimitada pelas coordenadas UTM demonstradas na Tabela 2.2, concentra a maioria dos trabalhos de detalhe da pesquisa.

Observando-se sob ponto de vista cartográfico geral, situa-se na parte NW da Folha Fortaleza: SA - 24 - Z - C - IV - 4; SUDENE/DSG; escala 1:100. 000.

Tabela 2.1 - Coordenadas que delimitam o polígono regular geral A da área de pesquisa, objeto de interpretações regionais, através dos vértices 1, 2, 3 e 4 do mapa de localização.

Coordenadas UTM	Vértices do Polígono Geral A			
	1	2	3	4
E-W	510.840,28	546.495,80	546.495,80	510.840,28
N-S	9.612.762,59	9.591.716,76	9.573.826,83	9.573.826,83

Tabela 2.2 - Coordenadas de localização da área A₁ para estudos de detalhe geológico e geofísico, onde se concentram dados adquiridos objeto de novas interpretações.

Coordenadas UTM	Vértices do Polígono A ₁			
	1	2	3	4
E-W	510.840,28	546.495,80	546.495,80	510.840,28
N-S	9.612.762,59	9.591.716,76	9.587.303,60	9.587.303,60

Fisiograficamente limita-se ao Norte pelo Oceano Atlântico, ao Este pelo Rio Maranguape, ao Oeste com o Lagamar do Rio Cauipe, Canal Sítios Novos / Pecém e Lagamar do Rio São Gonçalo do Amarante. Ao Sul, limita-se pela extremidade norte do Serrote do Bico Fino e da Serra de Taquara. Observe a figura 2.1 (Mapa de Localização da Área de Pesquisa)

O acesso principal é feito pela Rodovia Federal BR-222. Outros acessos opcionais podem ser feitos pelas Estradas Estaduais CE-085 (Rodovia Estruturante), CE-090 e CE-117 (Estrada Caucaia-Icarai), partindo-se da Cidade de Fortaleza na direção noroeste, onde aproximadamente aos 20 Km chega-se à parte central da área, na localidade denominada Jaboti e segue-se até à Cidade de Caucaia e do Porto do Pecem. O acesso à zona portuária é feito pela Rodovia Estruturante até à bifurcação com a CE-421, seguindo-se em direção ao norte até o litoral homônimo.

2.2 Aspectos Fisiográficos

2.2.1 Clima

Os sistemas sinóticos, que regem a circulação atmosférica no Estado do Ceará, são basicamente três: 1) os **Sistemas Frontais** (das chamadas frentes frias), tendo sua origem no Pólo Sul; 2) a **Zona de Convergência intertropical** (ZCIT), oscilando dentro da faixa dos trópicos (figura 2.2); e 3) um **Centro de Vorticidade Ciclônica**, que possui um tempo de atuação variável dentro do período de chuvas. Outros sistemas de escalas menores atuam na região, tais como linhas de instabilidade que se formam ao longo da costa e as brisas marítima e terrestre que incidem na zona litorânea (Ceará, 1992. Apud Brandão, 1995, p.23).

As condicionantes climáticas da região estudada mantêm uma estreita relação com o processo de deslocamento ou migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e com as condições meteorológicas no Hemisfério Norte. Atua no controle de um forte ciclo estacional com periodicidades anuais, associados às mudanças das estações climáticas. Desloca-se mais para norte durante o inverno austral (entre agosto a outubro) e mais para sul, durante o verão austral (março a abril).

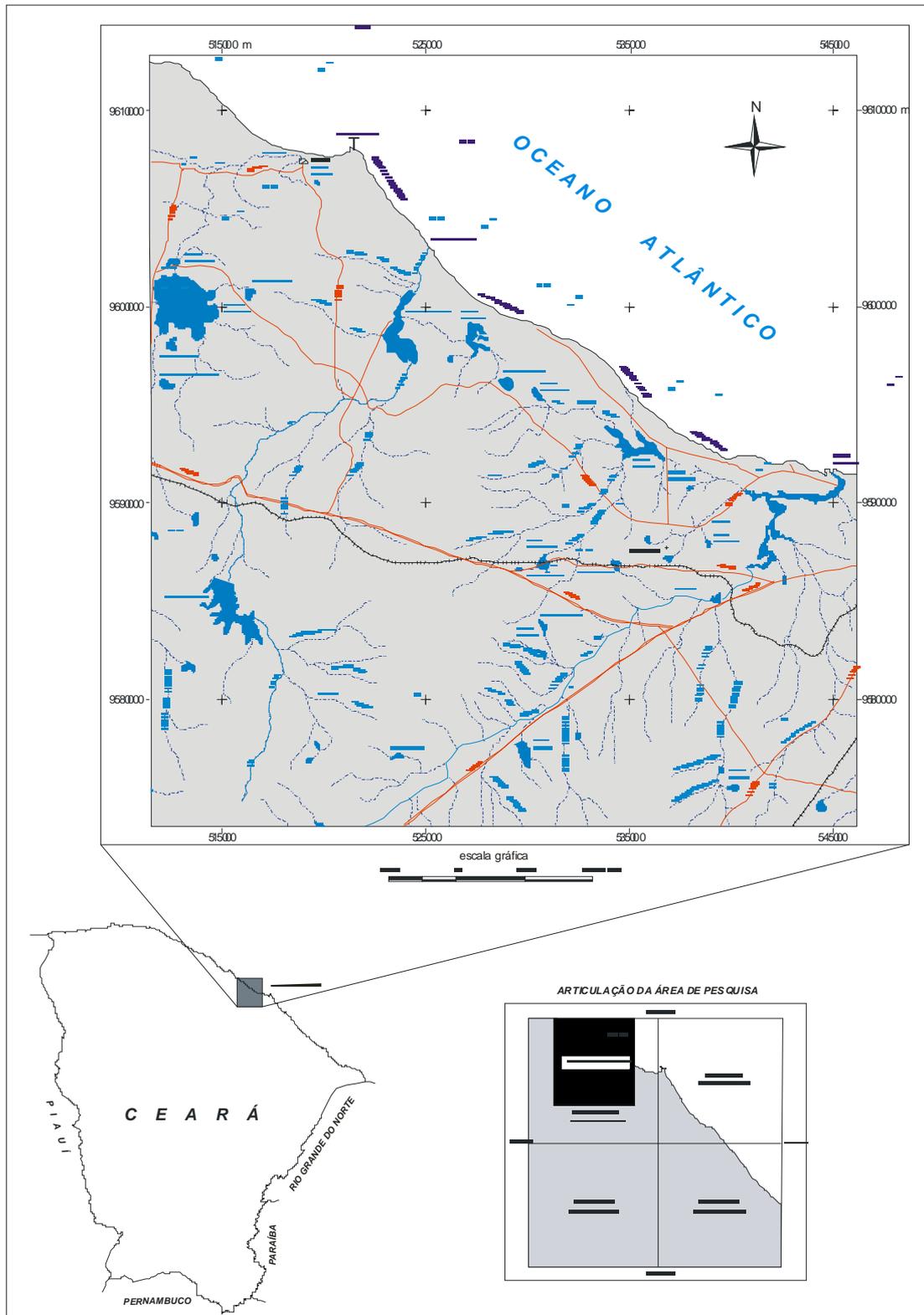


Figura 2.1 - Mapa de Localização da Área de Estudo

É marcada pela convergência dos ventos alísios de nordeste e de sudeste. Durante os meses de dezembro a abril desloca-se no sentido meridional, quando, em regra, é caracterizada a estação de chuvas na região. Neste período, verifica-se a presença dos alísios de NE, que também atingem a costa com mais frequência.

No período de julho a novembro a ZCIT desloca-se gradativamente para o norte, afastando-se do equador. Dentro desse contexto, as chuvas diminuem até caracterizar-se o período de estiagem. Os ventos alísios de sudeste/este se tornam mais efetivos e aumentam seu predomínio em relação aos de nordeste.

O clima da área é semi-árido. Entretanto, ao longo da faixa litorânea verifica-se uma tendência ao predomínio de condições úmidas a semi-úmidas, no litoral de Fortaleza, definindo uma climatologia com domínio da massa tropical atlântica. Este domínio atua e produz características de clima quente e chuvoso, conforme seqüências de dados fornecidas pelas estações meteorológicas da Fundação Cearense de Meteorologia-FUNCEME, distribuídas dentro e fora dos limites da área.

2.2.1.1 Regime Pluviométrico

Ocorrem na região apenas duas estações bem definidas, uma chuvosa com precipitações concentradas em seis meses consecutivos e outra seca.

O regime de precipitação pluviométrica na região é muito variável, observando-se intermitência entre os anos em que as precipitações são excessivas e outros anos nos quais elas são escassas. Apresenta uma grande variabilidade interanual espacial e temporal, às vezes, até mesmo dentro da própria estação chuvosa, variando entre 3 a 7 meses o período chuvoso (SEPLAN, 1994, p.14). No mês de dezembro ou, precocemente, em novembro aparecem as primeiras precipitações, com pouca importância quanto ao volume, mas indispensáveis sob o ponto de vista das culturas de subsistências locais. As principais chuvas se concentram nos meses de fevereiro a maio e há um declínio deste período chuvoso em junho, quando se inicia o período de estiagem. Entretanto, o ano de 1983, devido ao fenômeno “El Niño”, tornou-se atípico em termos de precipitação pluviométrica.

A precipitação média anual, medida durante o período considerado, é de aproximadamente 1.547,2 mm, observando-se uma heterogeneidade no que diz respeito à distribuição temporal, já referida anteriormente, ocorrendo uma pluviometria

excessiva nos primeiros meses do ano, enquanto que nos restantes a precipitação é escassa. De modo geral, os meses de fevereiro a maio constituem o quadrimestre de maior precipitação pluviométrica, fato verificado com maior intensidade recentemente (2004).

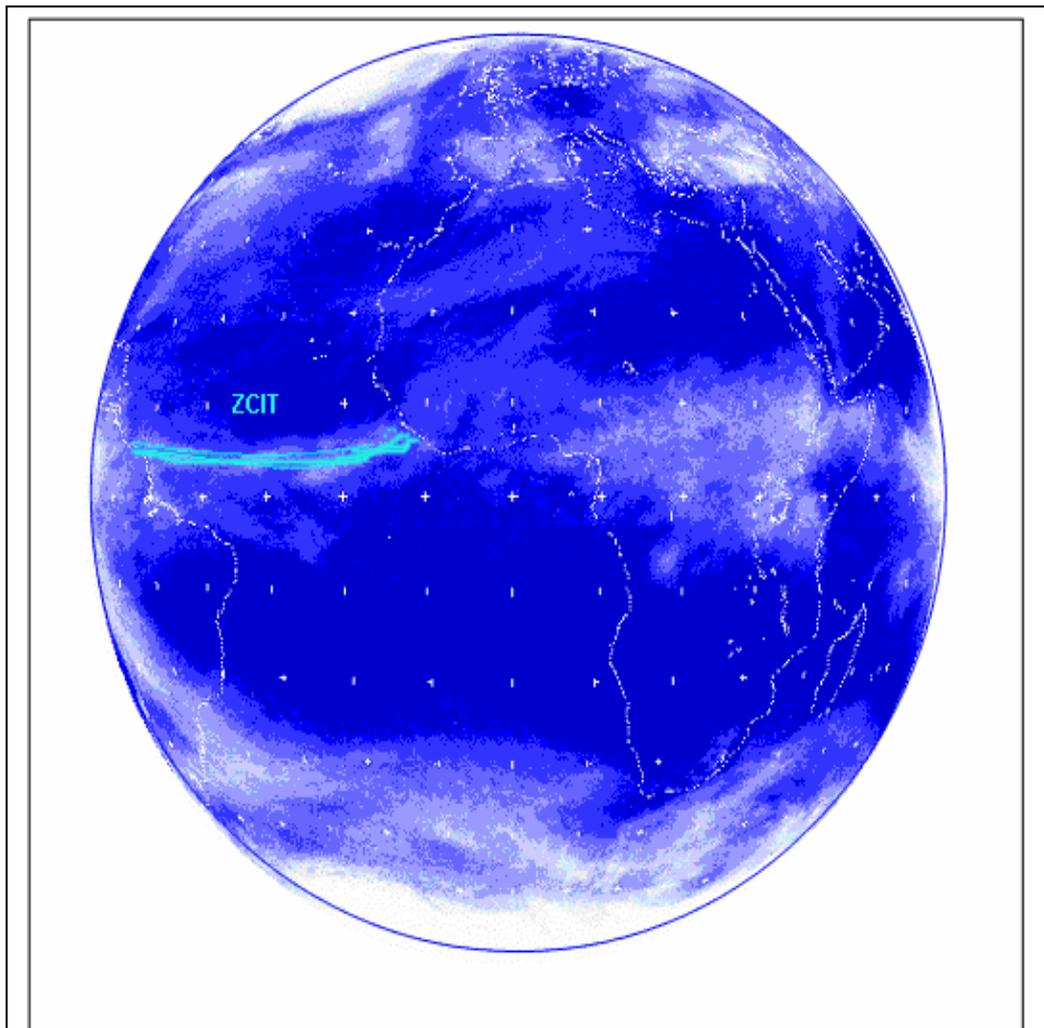


Figura 2.2 – Mostra a ZCIT - Zona de Convergência Intertropical com Banda de nuvens formadas devido a confluência dos ventos do Hemisfério Norte com os ventos do Hemisfério Sul. Sua posição tem um comportamento sazonal. No exemplo acima, tem-se sua posição observada durante o período entre junho e julho de 2004). A posição da ZCIT elaborada pela FUNCEME consiste na composição das imagens do Satélite Meteosat-Global Infra-Vermelho (36000 Km de altitude) a cada 5 dias. Utilizando-se polinômios determina-se a sua posição como mostra a figura acima, delineada com traços em verde.

Fonte: FUNCEME (2002).

A região de litorânea dos municípios de Caucaia e Pecém está inserida na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e pertence à micro região da Cidade de Fortaleza.

Os registros de temperatura, umidade relativa do ar, insolação e evaporação obtidos na Estação Meteorológica de Fortaleza, durante o período de 1974 a 2003, são também considerados representativos da Região de Caucaia e Pecém, abrangendo num aspecto mais amplo a área de pesquisa.

2.2.1.2 Temperatura

Essa variável climática, nas três décadas (1980, 1990 e 2000), medida pela FUNCEME em Fortaleza, possui uma temperatura média que se situa em torno de 27,3 °C, com uma temperatura máxima de 32,4 °C e mínima de 26,0 °C, gerando uma amplitude máxima de variação em torno de 6,4 °C. Este aspecto caracteriza o regime térmico da região como de temperaturas elevadas, mas de baixa amplitude. Entretanto, dados mais recentes de registros medidos na Estação Meteorológica de Fortaleza (com valores médios mensais) durante o período de 1974 a 1997, segundo FUNCEME/DATEN (1998), conforme Tabela 2.1, demonstram que os valores médios das temperaturas máximas são de 30,2 °C, enquanto que as médias das temperaturas mínimas anuais estão em torno de 24,2. As temperaturas das médias compensadas anualmente situam-se em torno de 27,35 °C, observando-se que a variação térmica durante cada ano é muito pequena, cerca de 1,0 °C.

2.2.1.3 Umidade Relativa do Ar e Evaporação

A umidade relativa do ar na área atinge uma média anual em torno de 78,11 %, com uma mínima mensal de 73,6 % no mês de novembro e máxima de 84,0 % em março. As taxas de evaporação ultrapassam os 1600 mm por ano, com uma mínima de 76,9 mm durante o mês de abril e uma máxima de 174,4 mm no mês de outubro.

2.2.1.4 Ventos

Os principais registros meteorológicos de ventos na Região Metropolitana de Fortaleza-Ce, que englobavam as regiões de Caucaia e Pecém, revelam que durante o período de 1974 a 2000 os valores médios mensais da velocidade aumentam de agosto a novembro e decrescem nos meses de março, abril e maio. Entretanto, a média geral da soma das médias de cada mês, durante o período total era de 7,6 m/s. Desse modo,

nota-se que estas variações obedecem a um padrão normal e sem valores anômalos de velocidades do vento. Predomina a direção dos ventos de ESE, seguido de E, e em menor quantidade, ventos de ENE com pequenas variações nos meses de aumento da velocidade dos ventos inclinando, às vezes, na direção e sentido de E para W. De acordo com os dados FUNCEME-DATEN (1998), verifica-se uma grande regularidade na direção dos ventos desde 1988 até os tempos atuais. A tabela 2.3 apresenta os dados meteorológicos para a cidade de Fortaleza, no período de 1974 a 1998.

Tabela 2.3 – Apresenta os dados meteorológicos para a cidade de Fortaleza, no período: 1974 a 1998 – Fonte: FUNCEME / DATEN – FORTALEZA (1998).

MESES	1. Velocidade do Vento (m/s) 2. Temperatura Máxima (°C) 3. Temperatura Mínima (°C) 4. Insolação (Horas e décimos) 5. Pressão Atmosférica (milibar)					6. Umidade Relativa (%) 7. Nebulosidade (0/10) 8. Visibilidade 9. Evaporação (mm) 10. Precipitação (mm)				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Janeiro	3,3	30,4	24,8	224,7	1006,1	78,2	5,5	6,3	133,5	113,3
Fevereiro	2,9	30,3	24,5	177,3	1008,0	80,5	5,9	6,4	99,6	215,6
Março	2,4	29,9	24,1	164,1	1008,3	83,4	6,4	6,4	83,8	368,5
Abril	2,5	30,0	24,0	176,9	1007,6	84,0	6,0	6,4	76,9	353,0
Mai	2,6	30,2	24,0	216,1	1007,6	81,7	5,4	6,6	92,6	213,5
Junho	3,1	30,0	23,5	237,2	1010,6	80,0	4,5	6,7	110,3	171,2
Julho	3,5	29,8	23,0	263,5	1011,2	77,2	3,9	6,9	137,5	87,8
Agosto	4,3	29,7	23,2	292,1	1011,6	74,8	3,3	6,8	166,7	28,4
Setembro	4,4	30,2	24,2	281,8	1010,9	73,9	3,5	6,9	169,2	22,7
Outubro	4,5	30,4	24,6	291,1	1009,2	73,6	4,0	6,8	174,4	16,7
Novembro	4,5	30,6	25,1	282,1	1008,2	74,1	4,5	6,9	160,5	13,4
Dezembro	3,9	30,7	25,2	257,1	1007,3	76,0	4,9	6,8	142,3	42,1
PERÍODO	41,9	362,1	290,2	2864,1	12106,6	937,4	57,7	79,8	1547,2	1646,2

Observação:

Segundo o Meteorologista Doutor Namir G. S. Mello (1998), em comunicação verbal, atualmente, a pluviometria do Estado do Ceará conta com mais de 300 pluviômetros convencionais do tipo Ville de Paris, distribuídos ao longo dos 184 municípios do Estado. As informações são coletadas a cada 24 horas (todos os dias, às 07:00 h).

2.2.2 Vegetação e Fauna

A cobertura vegetal do território da região estudada é predominantemente constituída pela caatinga arbustiva densa, a qual encontra-se geralmente associada ao domínio do embasamento cristalino.

Nos tabuleiros arenosos da Formação Barreiras, ocupando a região de baixo curso das bacias hidrográficas, ocorrem a vegetações de tabuleiros, a qual se apresenta substituída em grandes extensões de áreas por cultivos de cajueiro. Na zona de praia, observa-se sobre o cordão de dunas a ocorrência de um capeamento gramíneo e várias espécies herbáceas que agem como elementos fixadores distribuídos de forma bastante irregular na área. As paleodunas, por sua vez, exibem uma vegetação de porte arbóreo.

Na região de baixo e médio curso da Bacia nos rios Juá, Santo Amaro, Cauípe, Buriti e riacho Tapeba, são verificadas nas várzeas e nos eixos principais de drenagem a presença de carnaubais. Nas baixadas litorâneas que sofrem a influência das marés pode ser detectada a presença de manguezais, estando os principais associados ao Rio Juá este desaguando na Lagoa do Poço indo até a praia da Tabuba.

As regiões serranas Juá / Conceição, ao sul da Bacia, ostentam nos setores de topografias mais elevadas, uma vegetação exuberante de porte arbóreo denominada de matas úmidas, principalmente nas encostas mais altas. Ocupando os níveis inferiores dos citados relevos cristalinos e, portanto, na retaguarda da floresta citada, encontram-se as matas secas. Esta última formação vegetal recobre, ainda, relevos cristalinos mais baixos que são os denominados serrotes.

Estudos regionais anteriores mais aprofundados, inserem parte da área estudada na região de estepe (caatinga) na Depressão Sertaneja, com uma vegetação do tipo mata-galeria principalmente nas margens do relevo residual de Itaitinga e ao longo das linhas de água do canal Açude Riachão e Gavião a Sul e Sudoeste das cidades de Pecém e Caucaia-Ce.

De um modo geral, a estepe nesta superfície é condicionada pelo clima que varia de árido a semi-árido e que, conjugados, concedem uma característica peculiar de formações xerófilas lenhosas residuais geralmente espinhosas, entremeadas de plantas suculentas com herbáceo estacional, tendo características dominantes plantas

de folhas pequenas, muitas vezes, providas de espinhos e algumas apresentam órgãos de reserva subterrâneos (xilopódios).

Sua flora é heterogênea, porém apresenta certo número de dominantes arbóreos típicos, que se repetem freqüentemente; entre os quais: *Astronium urundeuva* (aroeira), *Schinopsis brasilienses* (baraúna) e várias espécies do gênero *Aspidosperma*, *Caesalpina*, *Mimosa* e *Piptadenia*. Das suculentas, destacam-se as cactáceas dos gêneros *Cereus* e *Pilosocereus*, segundo a Divisão de Vegetação do Projeto RADAMBRASIL (1981).

Adotando-se a subdivisão (Projeto RADAMBRASIL, 1981) da Região de Estepe, qual seja, em: “Estepe Arbórea Densa”, “Estepe Arbórea Aberta” e “Estepe Parque”, verifica-se que esta última não ocorre no domínio da área de trabalho.

As Estepes Arbóreas Densa, cuja ocorrência está limitada aos relevos residuais das superfícies aplainadas, no sopé dos “inselbergs” da área de trabalho representados pelas serra e serrotes, onde apresenta uma feição constituída por árvores de porte médio, em torno de 3 a 5m, densamente distribuído. Tal vegetação é representada por *Mimosa Caesalpina* (Sabiá), *Mimosa hostilis* (Jurema), *Auxema oncoclyx* (pau branco) e *Piptadenia macrocarpa* (angico).

A Estepe Arbórea Aberta reveste quase que totalmente a Depressão Sertaneja, que se constitui a maior porção de ocorrência na área, representada por um tapete herbáceo graminóide temporário e árvores esparsamente distribuídas representadas pelas seguintes espécies: *Cnidoscopus phyllacantus* (faveleira), *Aspidosperma pirifolium* (pereiro), *Mimosa hostilis* (jurema preta), *Mimosa Caesalpina* (sabiá), além de *Pilosocereus gounellei* (xique-xique), *Encholirium espetabile* (macambira de lajedo) e *Cereus jamacaru* (mandacaru).

A sub-formação Arbórea Aberta com Palmeira se faz representar pela *Copernicia cerifera* (carnaúba) desenvolvendo-se em locais pediplanados e de solos arenosos com drenagem imperfeita possibilitando o acúmulo de água no período chuvoso.

Ocorrem também na área outras espécies, tais como *Zisiphus juazeiro* (juazeiro) e *Licania rigida* (oiticica). A primeira, espalhadamente distribuída e a segunda nas margens dos rios Riachão, Gavião e açudes homônimos.

Embora essas informações anteriores contenham uma parcela de contribuição positiva à região de pesquisa, como identificar e associar litológica e geomorfologicamente os

tipos florísticos da Região de Estepe, fez-se necessário um estudo mais aprofundado identificando as espécies vítimas direta ou indireta, das constantes e até atuais agressões ao meio físico. Neste contexto, foram também englobados tipos faunísticos associados a cada grupo de vegetação.

Dote Sá (1998), num levantamento fitossociológico e faunístico realizado na área, numa sub-área da superfície estudada, identificou os seguintes ecossistemas: Vegetação Arbustiva com Palmeiras, Vegetação Antrópica e Caatinga Arbustiva. Esta última, a Oeste do Serrote do Japurá, Norte do Serrote Mineiro (380 m), Serra do Camará (381 m), Sul da Serra da Conceição (556, 514 e 524m) e da Serra do Juá e também próximos aos corpos migmatíticos, que ocorrem como maciços residuais (*Inselbergs*), ao lado esquerdo da BR-222, no sentido Caucaia-Boqueirão, finalizando com a expressão topográfica denominada Serrote do Bico Fino (435m).

Nesta tese, adotou-se uma conjunção entre a subdivisão empregada no projeto RADAMBRASIL e a usada por Dote Sá (op.cit.), complementadas através de levantamentos de campo, através de questionários aplicados aos trabalhadores do campo na agricultura e nas minerações, em busca de nomes populares de espécies conhecidas da flora e fauna e, posteriormente, checadas suas denominações científicas na bibliografia especializada.

Esta complementação consiste em adotar como ecossistemas: “Estepe Arbórea Densa”, “Estepe Arbórea Aberta” e “Estepe Arbórea Parque”, ambos com suas subdivisões e faunas correspondentes:

a) Estepe Arbórea Densa (Vegetação Arbustiva com Palmeiras)

Esse ambiente ocorre nos setores Sul e Sudoeste da área onde se sobressaem as elevações constituídas pelos os serrotes de Japurá, Mineiro, Serra do Camará e Serra da Taquara. Nestes, a cobertura vegetal apresenta porte arbustivo com leve crescimento gradual em direção ao topo da serra, uma formação florística pouco densa, onde se identificam locais cuja vegetação apresenta baixo porte ou mesmo ausência de vegetação e solo, quando afloram rochas graníticas e gnáissicas. As espécies predominantes são: *Auxemma* sp. (pau-branco); *Caesalpinia ferrea* (pau-ferro); *Cochospermum insigne* (pacotê); *Combretum leprosum* (mofumbo); *Croton* sp. (marmeleiro); *Syagrus comosa* (catolé); *Tabebuia serratifolia* (pau-d'arco-amarelo);

Astronium urundeuva (aroeira); *Piptadenia obliqua* (catanduva); *Tapirira guianensis* (cupiúba); *Thiloa glaucocarpa* (sipaúba); e *Orbignya martiana* (babaçu).

Como conseqüência de desmatamentos e de constantes detonações de explosivos nos serrotes e serras, à procura de britas, a fauna desses ambientes apresenta uma baixa densidade populacional e pouca diversidade de espécies, visto que os ruídos induzem os animais a migrarem para áreas contíguas.

Desta forma, é possível que a maioria dos animais identificados no ambiente, através de relatos de moradores, pegadas, e etc., possam usar a área apenas como corredor. Nesses ambientes, podem ser encontradas as seguintes espécies da Mastofauna: *Felis wiedii* (gato do mato); *Felis* sp. (gato maracajá); *Procyon cancrivorus* (gauxinim); *Callithrix jacchus* (soim). Entre as espécies da ornitofauna encontram-se: *Columbina Talpacoti* (rolinha); *Guira* (Anú-branco); *Piaya cayana* (alma de gato); *Leptoptila rufaxila* (juriti); *Contopus cinereus* (mané besta); *Turdus rufiventri* (sabiá) e *Passer domesticus* (pardal). A herptofauna está representada por *Tupinambis teguxim* (teju); *Cnemidophorus ocellifor* (tijubina) e *Iguana iguana* (camaleão) e alguns Boidae, Viperidae e Elapidae.

b) Estepe Arbórea Aberta (Caatinga de Capoeira)

A Caatinga de Capoeira, característica de áreas que já sofreram sucessivos desmatamentos e nestes ambientes as espécies apresentam porte pequeno de até 2,5 metros, troncos finos e tortuosos, com copas bastante esparramadas, demonstrando um aspecto fechado, embora a densidade, seja baixa.

De modo geral, a exemplo de outros tipos de caatinga, forma uma mata hipoxerófila, tendo maior incidência de tipos com espinhos e folhas pequenas. No período de estiagem, a maior parte dessa vegetação perde suas folhas, refolhando durante as primeiras chuvas da estação chuvosa, recompondo uma paisagem verde agradável.

Apresenta como característica peculiar a freqüência de algumas espécies como: *Mimosa hostilis* (jurema preta), *Croton sincorensis* (marmeleiro) e *Mimosa caesalpiniaefolia* (sabiá), que dominam o ambiente, visto que crescem mais rapidamente, ocupando o espaço e impedindo que uma maior diversidade de espécies se desenvolva no local.

Além da densidade das espécies florísticas responsáveis pelo fenômeno acima citado,

outras espécies vegetais são encontradas: *Mimosa hostilis* (jurema preta); *Auxemma oncololox* (pau-branco); *Mimosa caesalpiniaefolia* (sabiá); *Pithecolobium* sp. (jurema branca); *Acácia paniculata* (unha-de-gato); *Croton sincorensis* (marmeleiro); *Caesalpinia bracteosa* (catingueira); *Zizyphus joazeiro* (juazeiro); *Cobretum leprosum* (mofumbo) e *Croton argyrophyloide* (marmeleiro).

Dentro desse tipo de vegetação, temos os seguintes membros da fauna, onde os principais representantes da Mastofauna são: *Dideophis* sp. (cassaco); *Euphractus sexcintus* (tatu-peba); *Dasybus novencinctus* (tatu); *Grisson vittatus* (furão); *Mazona tetradactyla* (veado capoeiro); *Felis yagouroundi* (gato vermelho); *Cerdocyn fthous* A. (raposa); *Callithrix jaccus* (soim); *Cavia spixii* (preá).

No que se refere à Ornitofauna, entre as principais espécies identificadas, destacam-se: *Forpus xanthopterygius* (papacu); *Aratinga cactorum* (periquito do sertão); *Scardafelia squamata* (rola cascavel); *Buteo magnirostris* (ripino); *Geronospiba caerulescens* (gavião branco); *Columbina picui* (rola branca); *Otus choliba* (coruja); *Coreba flaveola* (sibite); *Crotophaga ani* (anu-preto); *Passer domesticus* (pardal); *Paroária dominicana* (galo-de-campina); *Pitangus sulphuratus* (bem-te-vi); *Coragyps atratus* (urubu); *Cyanocorax cyanopogum* (cã-cã) e *Blasthenteru flavenus* (canário-domato) .

As espécies mais comuns na Herptofauna são: *Tupimabis teguxim* (teju); *Iguana iguana* (camaleão); *Cnemidophorus ocellifor* (tijubina); além dessas espécies, ofídeos como *Botmrdps erythromelas* (jararaca) e *Crotalus durissus* (cascavel).

O ambiente Estepe Arborea Parque não ocorre na área, entretanto houve uma interferência antrópica que produziu uma vegetação composta por pomares e plantios de subsistência, cultivados nas áreas mais baixas nos entornos das serras, onde as condições ambientais são mais propícias, ainda dentro do ambiente Estepe Arborea Densa, principalmente nas áreas vizinhas às encostas úmidas das serras.

As principais culturas são: *Vigna sinensis* Endl (feijão); *Manihot* sp (mandioca); *Zea mays* (milho). Nos pomares identificam-se as seguintes espécies: *Manguifera indica* (mangueira); *Annona squamata* (ateira); *Spondias purpurea* (siriguela); *Spondias brasiliensis* (cajazeira) *Tolisia esculenta* (pitombeira); *Musa* sp. (banana); *Anacardium occidentale* (caju), dentre outras.

Esse ambiente demonstra uma densidade maior de vegetação, oferece abrigo e alimentação à fauna de indivíduos das diversas espécies, sendo também mais comum a presença da Ornitofauna e Herpetofauna. As principais espécies faunísticas identificadas na vegetação modificada pelas interferências antrópicas são: *Passer domesticus* (pardal); *Columbina* sp. (rolinha); *Guira-guira* (anu-branco); *Coereba flavela* (sibite); *Tharupis savaca* (sanhaçu); *Pitangus sulphuratus* (bem-ti-vi); *Tyrannus melancholicus* (siriri); *Sporiphila* sp. (papa-capim); *Pararia dominicana* (campina); *Tachycineta albiventris* (andorinha); *Cnemidophorus* sp. (tijubina); *Hyla* sp (rã); *Trupidurus torquatus* (calango); etc.

Na sua totalidade, esses ambientes na área são afetados na sua qualidade e produtividade, em função das grandes variações climáticas que lhes são impostas durante o ano. Alimentação e abrigo tornam-se escassos durante os grandes períodos de secas e a fauna é prejudicada neste aspecto e, muitas vezes, aliados a esses fatores somam-se fenômenos antrópicos que obrigam os indivíduos a migrarem do seu habitat natural para outras regiões mais amenas, possivelmente para as encostas úmidas das serras e serrotes citados.

As imagens de satélite obtidas pela FUNCEME, durante tais períodos, apresentam uma idéia da evolução rápida do fenômeno durante poucos dias e sua abrangência no ambiente litorâneo da área, através da medição do índice de vegetação, onde a tonalidade vermelha significa seco ou estado crítico da vegetação e a verde significa o estado pleno. Este fato, possivelmente, assegura uma variação espacial e temporal na qualidade e quantidade dos aquíferos costeiros. As figuras 2.3 mostram estados diferentes nos anos de 1997 e 1998.

A imagem do NDVI-ÍNDICE DE VEGETAÇÃO é extraída a partir das imagens do satélite da série NOAA-USA de órbita baixa (800 km de altitude) e consiste em medir o albedo (diferença entre a radiação solar que chega a terra e a que sai) e transformar em tonalidades de cores, cujo algoritmo foi desenvolvido na FUNCEME. A classificação do fenômeno vai do tom vermelho (estado crítico) até o tom verde (pleno estado de vegetação).

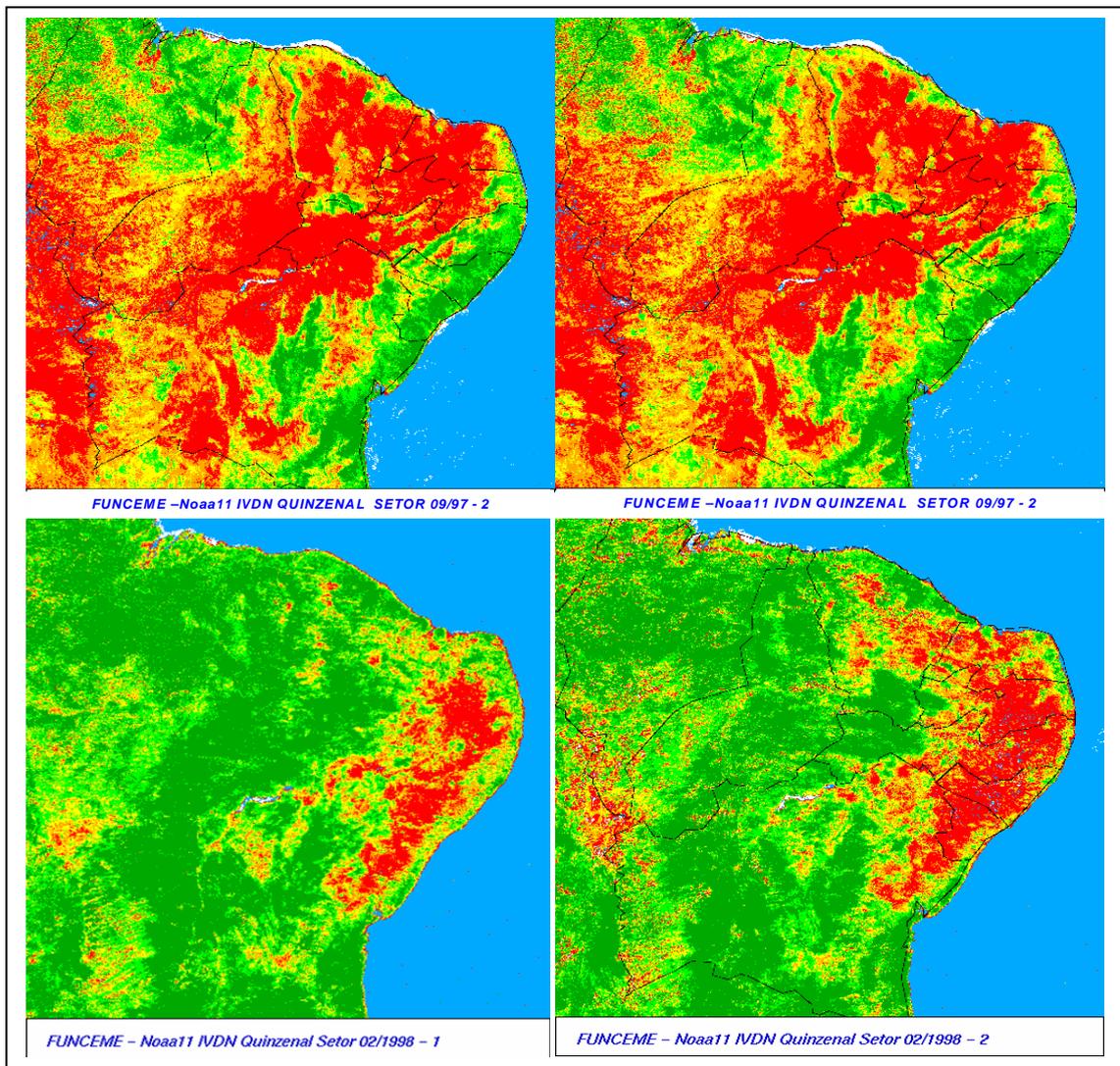


Figura 2.3 – Observações na 1ª e 2ª quinzena de setembro de 1997 mostram a plenitude do período de seca, indicada pela coloração vermelha nas figuras do setor 09/97 – 1 e 2. Na seqüência, as imagens NDVI (Índice de Vegetação) indicam a evolução do fenômeno da 1ª para 2ª quinzena do mês de fevereiro do ano de 1998, onde as manchas vermelhas iniciam sua expansão, indicando a tendência em direção ao fenômeno da seca. O ano de 2004 foi considerado atípico ensejando fortes chuvas.

Fonte: DATEM/FUNCEME (1998 e 2004).

2.2.3 Solos

A bibliografia tem encontrado dificuldades em definir solo, em face da dependência de aplicação e enfoques científicos. Tem sido interpretado de maneira diversa: produto intemperismo químico e físico das rochas (Geologia); material escavável, que perde sua resistência quando em contato com a água (Engenharia Civil); camada superficial

de terra arável, possuidora de vida microbiana (Agronomia), conforme Salomão & Antunes (1998). Por estes aspectos, tem-se recorrido a conceitos de solos considerando-se os vários leques de aplicações, desde empregos tradicionais, a obras civis até as aplicações às questões ambientais.

Neste trabalho, optou-se por solos edafológicos distribuídos na área, visando também entender fenômenos ligados às questões últimas acima referidas.

Geralmente, os solos da região dos municípios litorâneos estudados, sofrem fortes limitações quanto ao uso agrícola não só pela deficiência hídrica, mas também em função, às vezes, do caráter pedregoso e profundidade. Entretanto, sobram porções diminutas e restritas às planícies aluviais. A diferenciação tanto vertical como lateral entre os horizontes que definem o perfil de solo, tem sido fundamentalmente influenciadas pela composição litológica, relevo, vegetação e clima, sendo que este último fenômeno exerce uma maior influência sobre a evolução pedogenética da Região de Litorânea Caucaia e Pecém (área). Desenvolvem-se, preferencialmente, sobre as rochas gnáissicas e graníticas da área, apresentam na sua maioria, tonalidades amareladas, avermelhadas sobre rochas anfibolíticas e esbranquiçadas quando arenosas. As poucas faixas de solos aluviais existentes são de cores escuras, às vezes, com pequenas manchas avermelhadas, resultantes da oxidação do ferro por efeitos de hidromorfia temporária a que são submetidos.

Na parte norte da área, predomina os tipos Solonetz Solodizado, Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico Argissolo, Vermelho-Amarelo, Bruno não Cálcico, Solonetz Solodizado e Planossolo Solódico (Embrapa, 1999).

Os solos do tipo Solonetz Solodizado mostram uma textura arenosa/média e argilosa e ocorrem na fase caatinga hiperxerófito e os aluviais eutróficos, em relevo plano e floresta ciliar de carnaúba.

Solo do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, ocorre em regiões cascalhentas formando um horizonte A moderado, com textura média argilosa, relevo forte, ondulado a montanhoso, fase pedregosa e substrato gnáissico-migmatítico.

Os solos Planossolo Solódico apresentam textura arenosa média e argilosa com relevo plano e suavemente ondulado.

Os solos Bruno não Cálcicos possuem geralmente textura argilosa, fase relevo ondulado, podendo estar associado com planossol solódico A fraco a moderado, textura arenosa /média e argilosa, fase relevo plano e suavemente ondulado, e argissolo vermelho-amarelado, equivalente eutrófico a moderado com textura argilosa em fase relevo suave ondulado.

Os solos do tipo Solonetz Solodizado formam associação com o Planossolo Solódico, solos aluviais eutróficos, todos A fraco, textura indiscriminada com fase de floresta ciliar de carnaúba e relevo plano.

Os solos do tipo Planossolo Solódico ocorrem associados com Solonetz Solodizado com textura arenosa média e argilosa, solos Litólicos Eutróficos com textura média e fase pedregosa e rochosa de substrato de gnáisses e granitos, todo A fraco, de relevo plano a suavemente ondulado.

Nas serras da região já citadas anteriormente, predominam as seguintes classes de solo: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, ocorrendo com predominância na encosta leste, e Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, com predominância na encosta oeste das serras. A área abrange basicamente, conforme demonstra a figura 2.4, os dois tipos descritos abaixo:

a) Argissolo Vermelho-Amarelos Distrófico

São solos profundos ou medianamente profundos, geralmente bem drenados, ácidos, porosos e de textura variando de média a argilosa. A coloração é muito variada, predominando na região as tonalidades vermelho-amarelada e bruno-acinzentada. O horizonte A, apresenta-se fraco a moderadamente desenvolvido, com textura arenosa ou média e raramente argilosa. A passagem para o horizonte B pode ser difusa ou abrupta, e este exhibe coloração entre amarela e vermelha.

Na área da Serra da Conceição e da Serra do Câmara destacam-se os tipos concrecionários e fases pedregosas, apresentando baixa fertilidade natural e forte acidez, recomendando-se o uso de fertilizantes e a correção do pH.

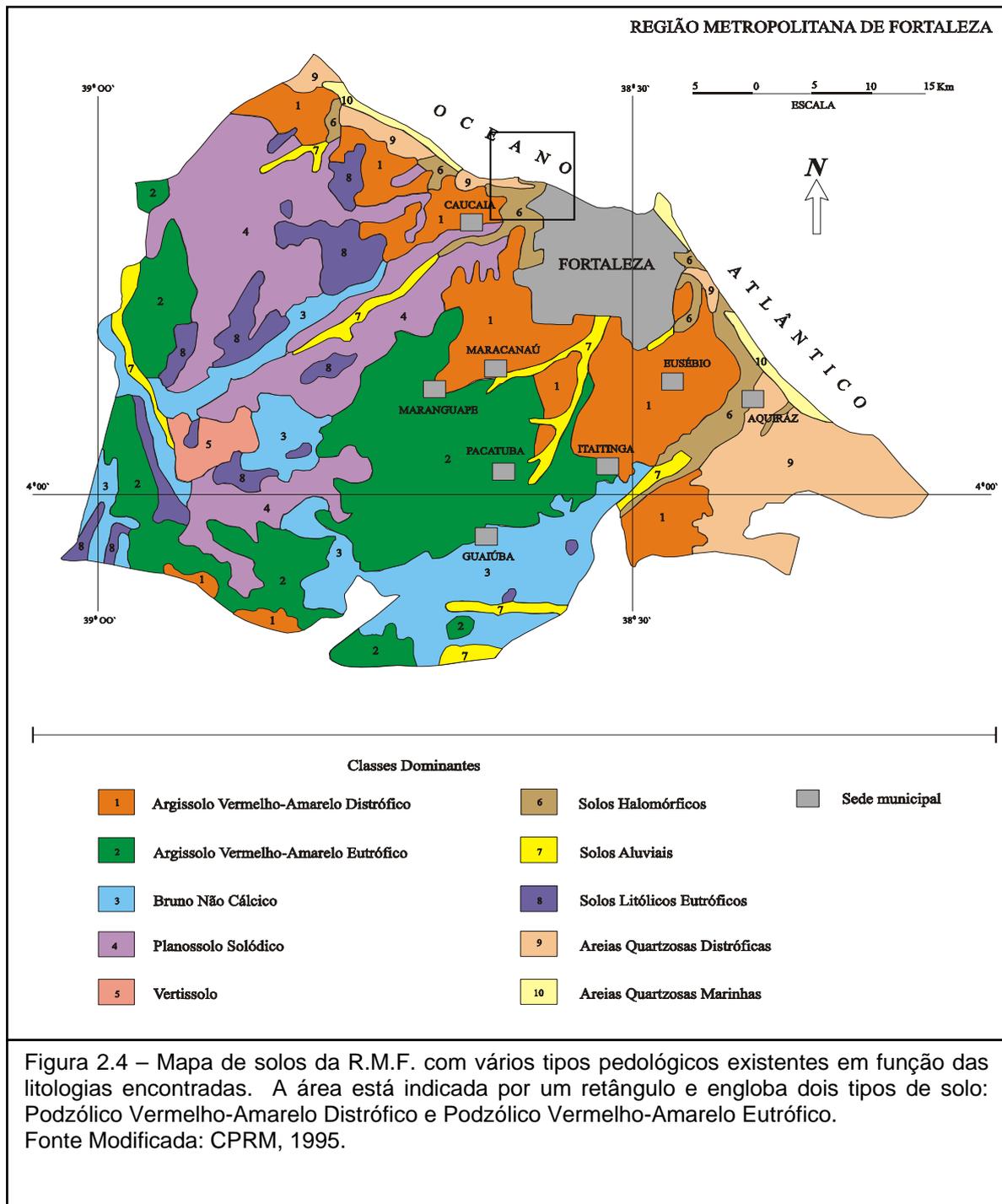
b) Argissolo Vermelho-Amarelos Eutrófico

A análise da distribuição dos solos na área teve seu caráter baseado em função das litologias existentes e na sua distribuição geográfica, definidos e interpretados a partir dos trabalhos executados pela C.P.R.M (1995).

São solos minerais, não hidromórficos, sendo que nas áreas de influência o destas serras os solos desta classe caracterizam-se por possuírem os tipos de horizonte A fraco a moderadamente desenvolvido, com textura arenosa ou média e raramente argilosa. A transição é gradual ou abrupta para o horizonte B, sendo este de textura argilosa, exibindo serosidade variável. Os solos assim classificados são de boas características físicas e químicas, fatos que os tornam favoráveis para implantação e desenvolvimento dos vegetais, dependendo das condições climáticas e de relevo do local de ocorrência.

2.2.4 Aspectos Gerais dos Recursos Hídricos

A área pertence a duas bacias hidrográficas de grande importância econômica na RMF - Região Metropolitana de Fortaleza. Os Maciços rochosos de maior expressão topográfica contribuem para alimentação dos principais rios A Serra do Camará e a Serra da Taquara funcionam como divisores destas bacias, cuja parte norte está representada pela Bacia Hidrográfica do Rio Ceará e Cauípe, respectivamente, e pelos seus afluentes. Os principais são os riachos Maranguapinho, do Topo, Caraucanga, Caboclo e Tapeba, com reservatórios próximos às zonas litorâneas, tais como lagoas do Poço, Pajuçara, Damião, Banana e Lagoa do Lagamar. A porção noroeste à Bacia Hidrográfica do Rio Cauípe que assume grande importância, tendo em vista se constituir num manancial balneário, com grande afluxo turístico e portuário. As duas bacias hidrográficas acima citadas fazem parte do contexto hidrológico da Região Metropolitana de Fortaleza, conforme demonstra a figura 2.9. Valendo a pena registrar a existência de um canal denominado Sítios Novos/Pecem (construído pela Companhia de Águas e Esgotos do Estado do Ceará-CAGECE, 1974), em direção a zona portuária do Pecém.



O Rio Juá nasce na vertente norte-ocidental do maciço do Baturité e possui um curso de cerca de 130,0 km, seguindo aproximadamente, a direção sudoeste-nordeste. A maior parte do seu leito (médio e alto curso) está contida em terrenos cristalinos, passando a drenar terrenos sedimentares apenas em seu baixo curso.

Segundo CEARÁ, (1992), o Rio Pacoti banha uma área de 717,06 km², com oferta potencial de 200,50 (m³/ano) x 10⁶ de água:

Na encosta leste dos serrotes de Japuru, Mineiro, Serra do Camará e Serra da Taquara, Destacam-se córregos que drenam em direção ao Rio Juá, sendo cursos d'água que têm como característica marcante o escoamento torrencial durante a curta estação chuvosa, por vezes secando completamente noutro período. Por outro lado, as serras do Camará e Conceição compõem o divisor de águas das bacias do Cauípe e Juá.

As características das águas subterrâneas (quantidade e qualidade) refletem o comportamento integrado de parâmetros que condicionam seu ciclo hidrológico, como: geologia, pedologia, pluviometria e excedente hídrico, entre outros. Estes parâmetros são utilizados para definir o potencial hidrogeológico da área de influência balneária e portuária da citada região litorânea, que está diretamente ligado ao balanço hidrogeológico da região.

No caso, a área de influência é dominada litologicamente pelo Complexo Granítico-Gnáissico do Pré-Cambriano, constituindo-se um sistema cristalino com todas suas restrições inerentes à captação d'água. Na parte peneplanizada do município de Caucaia e Pecém, na parte oeste e este da área, individualizam-se um sistema sedimentar representado pelo Grupo Barreiras e as aluviões que ocorrem tanto na região de domínio do embasamento cristalino, como nas porções sedimentares.

O aquífero no sistema cristalino é classificado como de potencial hidrogeológico fraco, embora a unidade geológica tenha vocação hidrogeológica média. Isto ocorre devido ao meio apresentar-se fraturado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico e do tipo livre, cujas dimensões são limitadas às zonas de fendilhamentos.

Os poços construídos nos aquíferos cristalinos caracterizam-se pela captação de água dos recursos acumulados nas fraturas existentes, sendo que os tipos de estruturas naturais podem influenciar a maior ou menor vazão dos poços no cristalino, mediante a interceptação e intensidade do sistema de fraturas.

A recarga do aquífero fraturado está relacionada diretamente à pluviometria, rede hidrográfica e a condicionantes litoestruturais. A circulação é praticamente inexistente e

a porosidade é de ordem secundária, sendo regulada pelo fissuramento e permeabilidade, e assim como os coeficientes de armazenamento estão associados à extensão, à conexão e ao grau de abertura das fraturas.

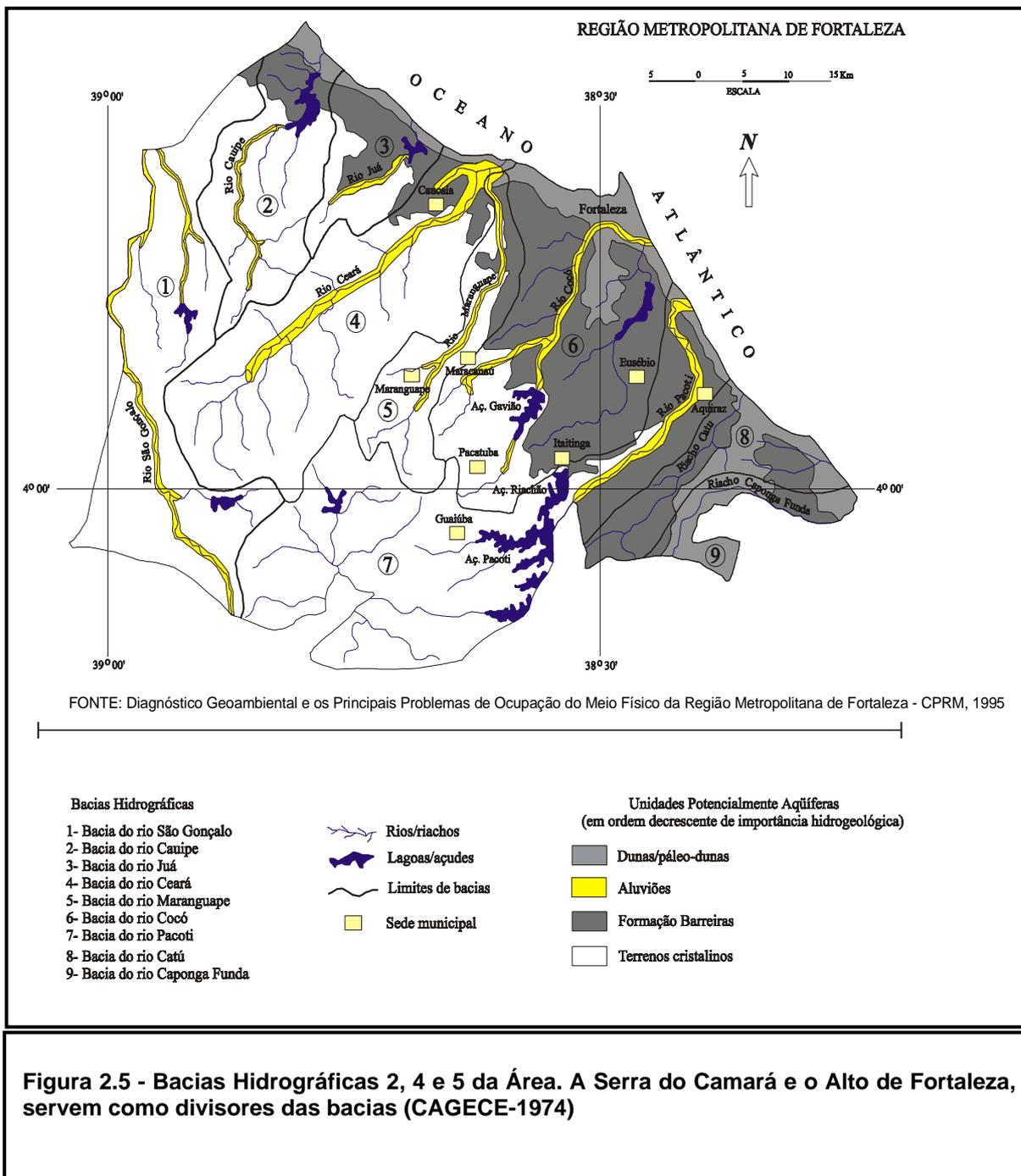
Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos (CEARÁ, 1992), o aquífero do sistema cristalino nos municípios de Caucaia e Pecém possui reserva de água exploráveis de 383.040 m³/ano com restrição quanto à qualidade de 114.912 m³/ano. Foram cadastrados 134 poços (1990), com disponibilidade atual de 1.447.152 m³/ano. Esses poços apresentam uma profundidade média de 58,5 metros e vazão média de 2,8 m³/hora. O Aquífero Barreiras nos municípios possui uma reserva explorável de 4.320 m³/ano, com restrição com restrição quanto a qualidade de 1.296 m³/ano.

2.3. Aspectos Sócio-Econômicos

Os municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante (Pecém-Ce), onde se insere a área do trabalho, têm como principal atividade econômica a exploração mineral, voltada para extração de britas de granitos, e granitos gnaisses, predominantemente de agregados para construção civil, sendo esta atividade o sustentáculo e agente multiplicador de empregos e renda para os demais setores da economia destes municípios.

A binômia agricultura-pecuária desenvolve-se de forma menos expressiva. A agricultura é de subsistência com o cultivo de milho, feijão e algumas frutíferas e a pecuária é de pequeno porte sem tipo selecionado, sendo o desenvolvimento desta atividade estacional, realizada durante a estação chuvosa.

A sudoeste das áreas urbanas das cidades dos municípios citados, na base e meia encosta das serras, também existem a extração de granitos e calcários e é marcante o plantio das citadas culturas nas encostas úmidas das serras. O número de empregos gerados nas pedreiras é significativo para os municípios, onde a geração de renda fortalece o comércio local. A população residente na área tem como fonte de renda atividades a partir do setor mineral, comércio de mercadorias, oficinas mecânicas, depósito de material de construção e outros serviços.



3. MARCO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO REGIONAL

3. MARCO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO REGIONAL.

3.1. Geologia Regional

A área trabalhada situa-se, regional e geologicamente, na extremidade Norte do Domínio Tectônico Setentrional (DTS) da Província Borborema (PB) (Almeida *et al.*1977), (Figura 3.1). Limita-se a noroeste pela Zona de Cisalhamento Sobral Pedro-II (ZCPII) e a sudeste pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu (ZCSP), mais precisamente numa porção norte-noroeste da zona costeira do Estado do Ceará. Está inserida nos Terrenos do Ceará Central (TCC) de Santos & Brito Neves 1984, Domínio Ceará Central (DCC) Jardim de Sá, (1994) ou Domínio Cearense (DC) Santos (1996), conforme demonstra a figura 3.2 e 3.3, entre as unidades cratônicas São Francisco-Congo e São Luís-Oeste África e deve sua configuração atual ao Ciclo Brasileiro, (desencadeado no Proterozóico Superior). A Região Metropolitana de Fortaleza afetada por esse último fenômeno, faz parte deste contexto e sugere seu enquadramento nos eventos regionais com suas nuances geológicas.

3.1.1 Pré-Cambriano

Pioneiros estudos sobre essa região de dobramentos procuravam enquadrar sua evolução dentro de uma concepção clássica de geossinclinal, com seu desenvolvimento a partir de um sistema de “geossinclinal em mosaico” de natureza ensialica e preenchimento sedimentar predominantemente terrígeno (Almeida 1967; Brito Neves 1975).

Estudos recentes admitem que a região corresponda a uma entidade tectônica com longa e complexa evolução crustal, que mostra uma influência generalizada do Ciclo Brasileiro. Santos & Brito Neves (1984) identificaram, na Província Borborema, independente de qualquer conotação geotectônica, dois domínios fundamentais Pré-cambrianos: os **Terrenos Gnáissico-Migmatíticos Graníticos** ou, simplesmente, os **Maçios** e os **Sistemas de Dobramentos** ou **Cinturões Metamórficos**. Esses autores classificaram os sistemas de dobramentos em marginais e interiores, em relação às regiões cratônicas que delimitam a província Borborema (figura 3.1).

O **Sistema de Dobramentos Jaguaribeano**, que inclui a área estudada é considerado por Santos & Brito Neves (op. cit.) como um “sistema interior vestigial”, formado por rochas supracrustais pouco desenvolvidas, distribuídas em bandas ou faixas estreitas e dispersas sobre um embasamento extensivamente exposto e altamente retrabalhado.

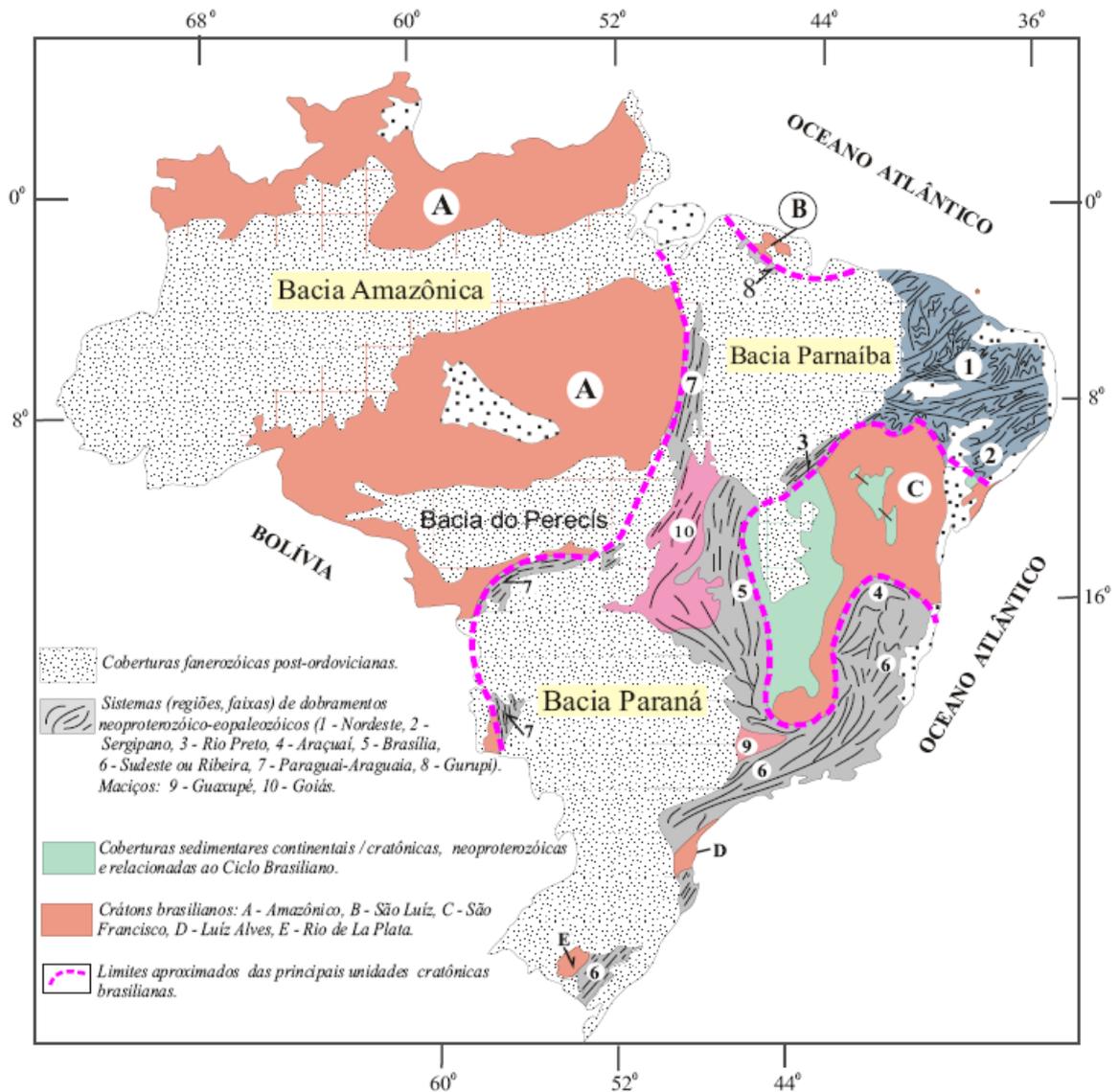
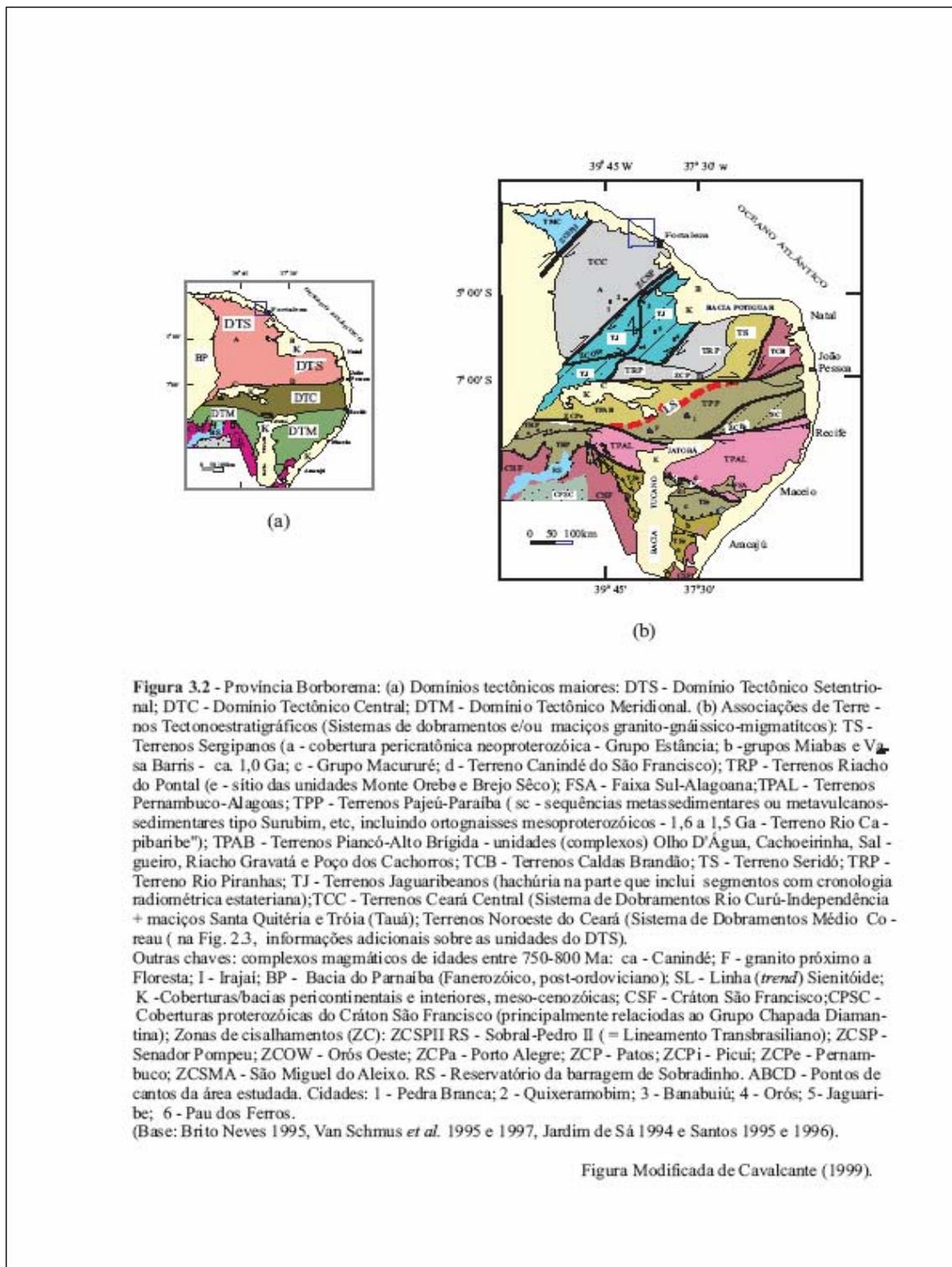


Figura 3.1 - Posicionamento da Província da Borborema (1 + 2) no contexto dos sistemas de dobramentos neoproterozóico-eopaleozóicos do Brasil (base: Shobbenhaus 1984)

Modificado de Cavalcante 1999.

Uma parte bem significativa destas supracrustais tem sido agrupada sob a denominação de Grupo Ceará. Santos et al. (1984) dividem o Pré-Cambriano da Região de Dobramentos Nordeste em Domínios Estruturais. Nesse aspecto, a área está inserida no Domínio Cearense que, segundo estes autores, é caracterizado por um estilo estrutural não linear, coerente com a predominância de uma infra-estrutura migmatítica-granítica, onde há amplas exposições de um embasamento Pré-Brasiliano e são freqüentes rochas máficas e ultra-máficas. No contexto dessa infra-estrutura gnássica, destaca-se um conjunto de metamorfitos, epi a meso-zonais, referidos como **Grupo Ceará** e **Complexo Independência**, de idade indefinida (entre Proterozóico Inferior e o

Proterozóico Superior). O Grupo Ceará é caracterizado por micaxistos e gnaisses granatíferos, com ou sem quartzito na base e com intercalações de mármore.



O Complexo Independência é constituído por supracrustais gnáissicas compostas por gnaisses bandados, gnaisses leucocráticos, biotita e/ou hornblenda gnaisse e, em menor proporção, leptinitos e gnaisses facoidais. Os autores incluem ainda, dentro desse Complexo, intercalações de metarcóseos, meta-grauvacas, anfibólitos, biotita e anfibólito xistos, tremolita-clorita xistos, metabasitos e mármore. Os gnaisses exibem bandamento bem preservado e ausência de processos migmatíticos, tão comuns no Complexo Gnássico-migmatítico do Proterozóico Inferior e identificam, também, uma foliação de baixo ângulo, aproximadamente horizontal.

Em relação aos corpos graníticos que afloram nesse domínio, Santos et al. (1984) destacam dois complexos granitóides, os intrusivos no Proterozóico Superior, constituídos basicamente por granodioritos porfiróides com herança ultramáfica, transformados total ou parcialmente em granitos equigranulares através de fusão anatética e as rochas graníticas do Proterozóico Superior/Paleozóico, representadas por alguns batólitos granitóides porfiróides, com enclaves dioríticos ovalados e intrusões menores, sempre ligados a falhamentos de grande expressão. Segundo Caby e Arthaud (1986), o Pré-Cambriano do Estado do Ceará é caracterizado por três tipos de terrenos. Os terrenos arqueanos retrabalhados em graus variáveis no Brasileiro, as seqüências supracrustais proterozóicas metamorizadas em um único ciclo orogênico pós-Arqueano (Ciclo Brasileiro) e os **Complexos Graníticos Brasileiros**. Dentro dos terrenos arqueanos destacam-se: a) um complexo de origem plutônica, cuja associação é dada por gnaisses de cor cinza, de composição tonalítica a granodiorítica, exibindo, às vezes, um tênue bandamento magmático, bem como alguns remanescentes de anfibólitos e metassedimentos; b) uma seqüência de baixo grau de metamorfismo considerada como do tipo "Greenstone Belt", que aparece na região de Independência; c) intrusões básicas e ultrabásicas acamadas, cortadas localmente por gnaisses graníticos (região de Tróia); e d) terrenos granito-migmatíticos de composição granítica, granodiorítica e tonalítica.

As seqüências supracrustais do Proterozóico são agrupadas, genericamente, sob a denominação de Grupo Ceará. Conforme Caby & Arthaud (op. cit.), o Grupo Ceará é formado, essencialmente, por metassedimentos, como xistos pelíticos e semi-pelíticos e gnaisses de fácies anfibólito, atingido por intensidades variáveis de mobilização e migmatização. Aparecem ainda associados a esses terrenos, quartzitos, mármore e cálcio-silicáticas, bem como gnaisses subalcalinos, alcalinos e sieníticos.

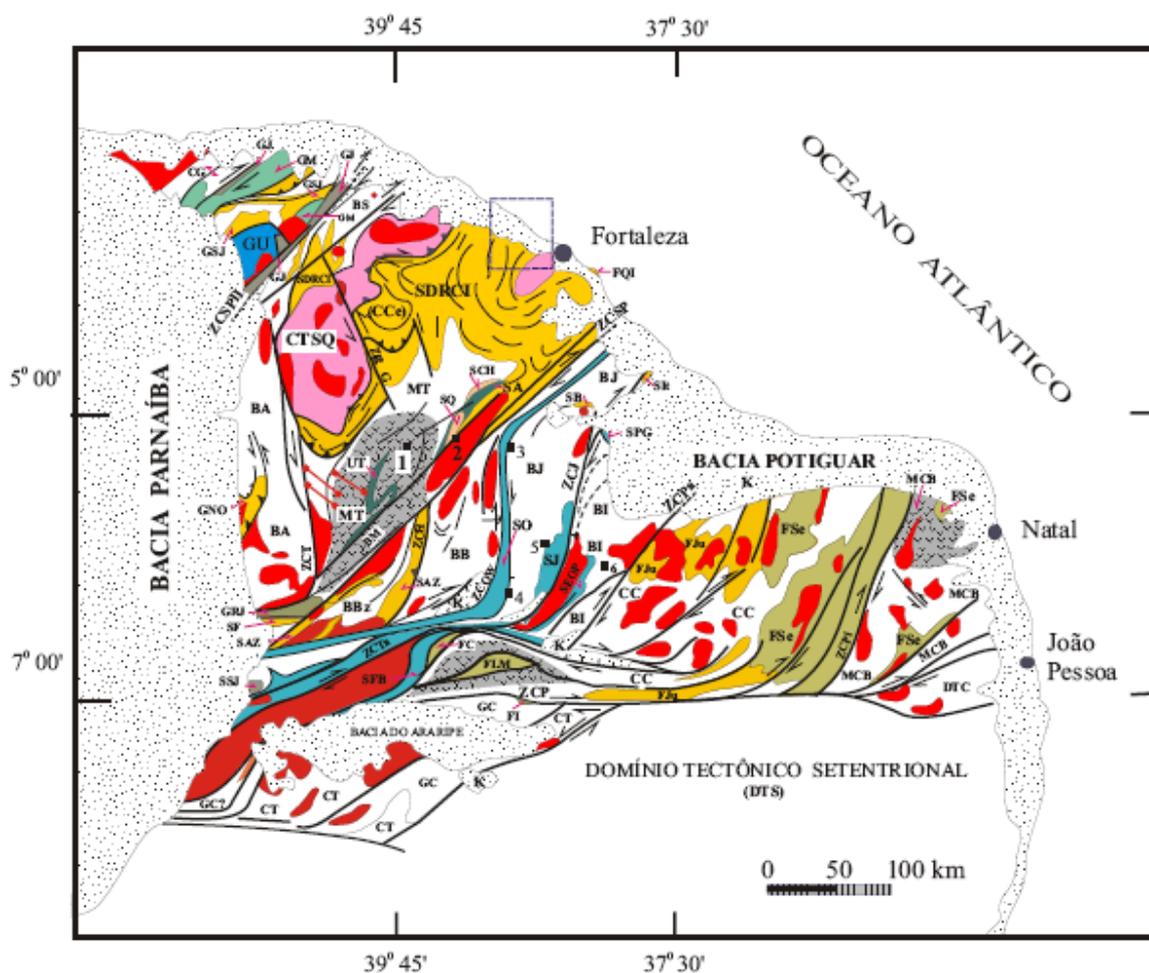


Figura 3.3 - Principais unidades litoestratigráficas do DTS (para leitura destas usar Fig. 3.2). :

a - nos TNC: CG - Complexo Granja, GM - Grupo Martinópole, GSJ - Grupo São Joaquim, GU - Grupo Ubajara, GJ - Grupo Jaibaras;

b - nos TCC: MT - Maciço Tróia (= Complexo Cruzeta: unidades Tróia - UT, tratos reconhecidos - Pedra Branca e Mombaça; BM - Bloco Mombaça), realce em segmentos com litotipos de cronologia arqueana - ; BA - Bloco Acaraú (complexo granito-gnáissico-migmatítico indiferenciado, extensivo ao BS - Bloco Sobral); SRCI - Sistema Rio Curú-Independência (CCe - Complexo Ceará, incluindo as seqüências Quixeramobim-SQ, Chorozi - nho - SCH e a Formação Quartzítica Iguape - FQI, além de unidades do "embasamento"); SA - Seqüência Algo - dões; SF - Seqüência Feiticeiro; GNO - Grupo Novo Oriente; CTSG - Complexo Tamboril-Santa Quitéria; GRJ - Grupo Rio Jucá;

c - nos TJ: BB - Bloco Banabuiú (BBz - Subbloco Zorra) - Complexo Acopiara, SAZ - Seqüência Arneiroz-Zorra; SO - Seqüência (Grupo) Orós, BJ - Bloco Jaguaratam (complexo homônimo), SJ - Seqüência Jaguaribe, SB - Seqüência Bixopá, SIt - Seqüência Itaiçaba, SPG - Seqüência Peixe Gordo, SFB - Seqüência Farias Brito, SSJ - Seqüência (Grupo) São Julião, SEOP - Seqüência Extremo Oeste Potiguar; BI - Bloco Iracema (complexo homônimo);

d - nos TRP: CC - Complexo Caicó (realce em trato com litotipos arqueanos), FJu - Formação Jucurutu, FLM - Formação Lavras da Mangabeira; FC - Seqüência/Formação Caipú;

e - no TS: FSe - Formação Seridó (Formação Equador como unidade subordinada);

f - nos TCB - Complexos gnáissico-migmatíticos com predomínio de unidades paleoproterozóicas; realce do trato com exposições de rochas arqueanas).

Granitóides neoproterozóicos; Diques neoproterozóico(?) - cambrianos.

Unidades do DTC: CT - Complexo Trindade, GC - Grupo Cachoeirinha, FI - Formação Iara.

Zonas de cisalhamentos (ZC), sem e com sentido de movimento indicado (farpas em cisalhamento contracional): ZCT - Tauá; ZCRG - Rio Groaíras; ZCH - Hebron; ZCJ - Jaguaribe; ZCPa - Portalegre; ZCTa - Tatajuba; ZCPi - Picuí. Para outros elementos, v. Fig. 3.2. Base: Cavalcante 1993 e Jardim de Sá 1994.

Modificado de Cavalcante (1999).

Elementos estruturais complementares e igualmente importantes no contexto desse mosaico são os lineamentos ou geofraturas, denominados como internos e externos ou delimitantes desses tipos de terrenos, mas sempre caracterizados pela marcante linearidade das zonas cataclásticas e miloníticas (Santos & Brito Neves, 1984).

Brito Neves (1983) discute os caracteres dos “lineamentos” e sugere que essas feições tectônicas correspondem às zonas lineares de mobilidades crustal, representadas por zonas de falhas paralelas e alongadas com atuação policíclica.

Para Santos & Brito Neves (op. cit.), a preservação de vários cinturões de xistos do Sistema Jaguaribeano no interior do Ceará é condicionada à atividade de falhas profundas (Jaguaribe, Orós, Senador Pompeu, e outras), cuja idade destes lineamentos deve ser proterozóica inferior, com freqüentes reativações em períodos posteriores. Caby & Arthaud (1986) foram os primeiros a considerar os “lineamentos” em questão como zonas de cisalhamento dúcteis. Afirmaram ainda, que os terrenos pré-cambrianos da porção Sul e Sudeste do Ceará são controlados por sistemas ramificados e sinuosos de zonas de cisalhamento dúcteis direcionais de extensão regional, enquanto aqueles distribuídos na porção Centro-Norte são por falhamentos de empurão, formando verdadeiras *nappes*, onde se verificam rochas do Arqueano recobrimo as rochas do Proterozóico.

Arthaud et al. (1987), em estudo de detalhe na região de Quixadá e Quixeramobim, consideram as rochas graníticas, ali aflorantes, como contemporâneas e/ou cogenéticas, e com grande diversidade faciológica, agrupando-as sob a denominação de **Complexo Granítico Quixadá-Quixeramobim**. De acordo com esses autores, a colocação dessas rochas graníticas é controlada por duas zonas de cisalhamento dúcteis, de rejeito direcional dextral: a **Zona de Cisalhamento de Quixeramobim**, localizada a oeste do Complexo, e a **Zona de Cisalhamento de Senador Pompeu**, posicionada a leste. As rochas hospedeiras, a Sul do Complexo, são consideradas como supracrustais metamorfasadas em condições de fácies anfíbolito de baixo a médio grau, enquanto que a NE do Complexo, as rochas hospedeiras são representadas por supracrustais formadas, principalmente, por quartzitos e metapelitos com sillimanita, indicando um grau metamórfico mais elevado. O contato das rochas graníticas é marcado pela presença de uma faixa de gnaisses, para e ortoderivados, extremamente deformados e ricos em molibizados leucocráticos, aplíticos ou pegmatóides.

Souza et al. (1987), consideram as rochas encaixantes da porção norte do Complexo Granítico de Quixadá-Quixeramobim, como Complexo Caicó representado por gnaisses com sillimanita, gnaisses com cianita, biotita gnaisses, muscovita gnaisses, lentes de quartzito, cálcio-silicáticas e granitos associados. Arthaud et al. (1988b), com base em estudos de deformação em uma das fácies que compõe o Complexo granítico de Quixadá-Quixeramobim (Fácies Serra Branca - granitos com megacristais de feldspato de até 20 cm), consideram que a colocação do Complexo foi cedo-cinemático, em relação ao funcionamento das zonas de cisalhamento dúcteis de Quixeramobim e Senador Pompeu. Admitem a possibilidade de parte das intrusões terem acontecido antes das transcorrências e que o aquecimento local da encaixante facilitou a instalação dos cisalhamentos dúcteis nessa região privilegiada.

Sidrim et al. (1987), denominaram informalmente as rochas encaixantes do Complexo Granítico Quixadá-Quixeramobim de “Rochas do Embasamento”, formadas por biotita-gnaisses, biotita-hornblenda gnaisses e xistos (com granada e/ou estaurolita), com freqüentes intercalações, decimétricas a métricas de anfibolitos, quartzitos e calciosilicáticas, metamorfas em condições de fácies anfibolito. Os autores consideram, também, que o Complexo Granítico de Quixadá-Quixeramobim representa granitos híbridos polintrusivos, formados por um número considerável de intrusões, individualizadas ou não, em escala de 1: 50.000, e diques sin-plutônicos posicionados subconcordantes às rochas do embasamento. Em função da textura, composição e grau de homogeneidade, as intrusões foram agrupadas em cinco fácies denominadas, sob caráter informal, de Fácies Muxurê Velho, Quixadá, Muxurê Novo, Serra Branca e Fácies Uruquê. Levaram em conta aspectos menos diferenciados da fácies para aspectos mais diferenciados, onde termos mais básicos são dioritos a quartzo-dioritos (Fácies Muxurê Velho) e os termos mais ácidos são representados por leucogranitos (Fácies Uruquê).

Torquato et al. (1987), ao estudarem os granitos que ocorrem a norte da região de Quixeramobim, definiram em função da composição e grau de homogeneidade, as fácies denominadas informalmente de Quixadá, Muxerê Velho, Muxerê Novo, Água Doce, Serra Branca, Uruquê e ainda “mobilizados tardios”, teceram considerações sobre sua gênese, filiação, correlação, estruturas, quimismo, idade e níveis de colocação.

Brandão (1995) reuniu sumariamente dados sobre o conhecimento geológico da Região Metropolitana de Fortaleza, adquiridos até o presente momento, sugerindo um novo

arcabouço básico para estudos multitemáticos, através de um mapa geológico, em escala de 1:150.000 e verificou o domínio de massas granitóides-migmatíticas na porção central da área, considerado por alguns autores como representante do Maciço Santa Quitéria (Brito Neves, op cit.) posicionado no Arqueano. Situou o Complexo Gnáissico-Migmatítico existente, na parte superior desta unidade, dentro do Proterozóico Inferior onde observou um domínio de biotita-gnaisses para e ortoderivados, com ou sem muscovita, anfibólios, granada e sillimanita, parcial ou totalmente migmatizados. Encontrou áreas com predominância de migmatitos incluindo lentes de calcário cristalino e de muscovita-quartzitos.

Acima destas unidades posicionou os Ultrabásitos (piroxenitos de coloração preta-esverdeada, maciços e de granulação média). Baseando-se em dados bibliográficos colocou os Granitos dentro do Proterozóico Superior classificando-os, preliminarmente, com referência às bases deformacionais do Ciclo Brasileiro. Este caráter preliminar deveu-se à carência de dados geocronológicos, análises químicas e relações tectonoestruturais com as encaixantes. Dessa forma, os granitos admitidos como cedo a sintectônicos ocorrem por toda área da RMF sob a forma de corpos não cartografáveis na escala de trabalho (1: 150.000), estratóides obedecendo à orientação da foliação regional com acentuada deformação e materializados como ortognaisses, com ou sem facóides fedspáticos, intercalados nas seqüências eoproterozóicas.

Segundo o mesmo autor, plutonitos considerados tardi a pós-tectônicos foram representados no mapa através de cinco corpos que ocorrem na porção sul / sudeste da área encaixado em terrenos gnáissico-migmatíticos (figura. 3.2). Suas encaixantes são biotita-gnaisses, muscovita-gnaisses, hornblenda-gnaisses e anfibolitos que podem aparecer como xenólitos dentro desses plutonitos.

Encontrou rochas filoneanas ácidas de aspectos tabulares e de caráter ácido a hiperácido, sob a forma de diques e veios não cartografáveis na escala de mapeamento de semidetalhe, constituindo as últimas manifestações ocorridas no Proterozóico Superior, através de injeções em sistemas de fraturamento.

3.1.2 Cenozóico

3.1.2.1 Terciário

Tem como principais representantes: o Vulcanismo Alcalino ($T\lambda$) que ocorre dentro do contexto geológico da Região Metropolitana de Fortaleza, representados por necks ou plugs, que se sobressaem topograficamente como elevações circulares e elipsoidais, que serão posteriormente discutidos no capítulo da Geologia Local, juntamente com as coberturas da Formação Barreiras (TQb), litologicamente constituída por uma seqüência de sedimentos areno-argilosos, com ou sem litificação, de coloração avermelhada, creme amarelada, às vezes, de aspecto mosqueado, mal selecionados, de granulação variando de fina a média, mostrando horizontes conglomeráticos e níveis lateríticos. A matriz é argilosa caulínica, com cimento ferruginoso e, por vezes, silicoso. A estratificação é geralmente indistinta notando-se discreto paralelismo entre os níveis faciológicos variando tanto vertical como lateralmente no âmbito de sua ocorrência.

31.2.2. Quaternário

As Coberturas Colúvio-Eluviais (TQc), ocorrem na R.M.F. de forma irregular constituindo manchas reliquiares ou “ilhas” que se sobrepõem diretamente aos litotipos pré-cambrianos, com espessuras diminutas, geralmente, inferiores a três metros. Resultantes do intemperismo *in situ* ou com pequeno deslocamento gravitacional, morfologicamente, caracterizam-se pelas suas formas de tabuleiros aplainados e até mesmo rebaixados ao nível da superfície do cristalino. Na faixa costeira, as semelhanças verificadas entre os sedimentos litorâneos dificultam a separação entre estes dois tipos de depósitos. As coberturas residuais resultantes da intensa decomposição e lixiviação das rochas o embasamento, em geral, formam platôs de bordas dissecadas.

Litologicamente são caracterizados como um material areno-argiloso, alaranjado e/ou avermelhado, possui uma granulometria que varia de fina a média, ocasionalmente mais grossa, com horizonte lateritizado na base. A matriz é areno-argilosa caulínica com cimento argiloso e/ou ferruginoso, segundo Braga et al. (1981). Segundo esses autores a falta de estratificação, o caráter arcoseano e morfoscopia dos grãos de quartzo caracterizam estes sedimentos com imaturos e sugerem condições climáticas semi-áridas impostas desde a deposição até o presente. Nas áreas serranas, estes depósitos

dependendo do seu local de formação variam tanto na composição dos seus constituintes como na sua granulometria e forma.

Os Depósitos Flúvio-Aluvionares-lacustres são representados na sua essência por depósitos constituídos de areias, cascalhos, siltes e argilas, com ou sem matéria orgânica, compreendendo sedimentos fluviais e lacustres.

Os cursos de água sobre os terrenos cristalinos são freqüentemente controlados por fraturas e falhas dando um caráter retilíneo a longos trechos de rios, constituindo depósitos sob a forma de faixas estreitas formadas por sedimentos de granulometria grosseira, ao longo dos canais ativos, enquanto que nas planícies de inundação esses sedimentos apresentam uma granulometria mais fina, desde silte até colóides. Geralmente, este último tipo de depósito tem sido responsável pela maioria das jazidas de argilas para cerâmica na Região Metropolitana de Fortaleza-R. M.F. Percorrendo sobre as coberturas sedimentares, os rios e riachos formam depósitos mais possantes, provenientes do retrabalhamento da Formação Barreiras, o que resulta em acumulações constituídas por areias finas, siltes e argilas.

Mota (1998) situou as coberturas Colúvio-Eluviais no início do Quaternário, conforme demonstra a figura 3.4.

Recentemente, a CPRM – Serviço Geológico do Brasil e a Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará (2003), ao mesmo tempo em que lançam uma nova edição impressa do mapa geológico do estado, escala 1:500.000, publicou um Atlas Digital de Geologia e Recursos Minerais do Ceará, em CD-ROM, onde se pode observar aspectos geológicos e estruturais mais atualizados através da figura 3.4 e de seu resumo concernente.

3.2 RESUMO ESTRATIGRÁFICO ATUAL: Aspectos Geológicos –

O quadro estratigráfico do Estado do Ceará, em diversos segmentos, encontra-se em estágio de reconhecimento ainda preliminar (Cavalcante et al. 2003), sobretudo no que se refere ao posicionamento das unidades litoestratigráficas precambrianas, em termos de eras e períodos. Pelo lado da Tectônica, os grandes traços estruturais (realçados por importantes zonas de cisalhamentos) encontram-se em bom nível de entendimento. Como exibida na Fig. 3.5, a síntese crono-litoestratigráfica, incluindo seus respectivos componentes rochosos, pode ser ditada nos seguintes termos:

COLUNA GEOLÓGICA REGIONAL DA RMF				
		UNIDADE	GEOLÓGICA	LITOLOGIA
		CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	Qa
Qd	Dunas Móveis ou Recentes			Areias finas e médias, esbranquiçadas, bem selecionadas, contendo níveis de minerais pesados. Minerais acessórios - afrisita, zircão, monazita e ilmenita.
Qpd	Paleodunas			Arenitos de granulometria fina a média, coloração amarelo-esbranquiçada, grãos subesféricos a esféricos, bem selecionados.
Tc	Coberturas Colúvio-Eluviais			Sedimentos areno-argilosos, semiconsolidados, coloração amarelo-avermelhada com concreções ferruginosas. Matriz caulínica, com grãos de quartzo, feldspato, micas e opacos alterados.
TERCIÁRIO	Tb		Formação Barreiras	Arenitos de granulação fina a média com tons avermelhados, matriz argilosa, semiconsolidados, com níveis conglomeráticos e concreções lateríticas.
		Tλ	Rochas Alcalinas	Fonólitos, traquitos e tufos - Rochas vulcânicas sob forma de <i>necks</i> . (feldspatos, nefelina, anfíbio, opacos e caulinita).
PROTEROZÓICO	SUPERIOR	Psr2	Granitos	Rochas plutônicas ácidas - agrupam associações granítico-granodiorítica. Psr2 - Leucogranitos rico em muscovita, de textura grossa, estruturalmente isotrópico.
		Psr1		Psr1 - Granitóides cinza-claros, foliados, com frequentes enclaves de composição diorítica (corpos sintectônicos).
	INFERIOR	Piub	Ultrabasitas	Piroxenito. Coloração castanho-escura, maciço, granulação média equigranular.
		Pign-mg ^{qt} mg	Complexo Gnáissico-Migmatítico	Biotita-gnaisses, total ou parcialmente migmatizados, com muscovita, anfíbólio, sillimanita e granada. Intercalações de corpos de migmatitos, de quartzitos e lentes de calcário. Diques de pegmatito e de rochas básicas (rochas paraderivadas).
		Pigr-mg	Complexo Granitóide-Migmatítico	Ortognaisses, granitóides e migmatitos, com microclina, biotita e hornblenda. (rochas ortoderivadas)

Figura 3.4 – Coluna Geologica Estratigráfica da Região Metropolitana de Fortaleza.
Fonte Modificada e adaptada da CPRM (1995) – Mapa Geológico da RMF. Texto Explicativo.

Arqueano (A) - Paleoproterozóico (PP)

Como unidades litoestratigráficas arqueanas, são representadas pelos complexos **Cruzeta (Apc)** e **Granjeiro (Apg)**, que incorporam rochas paleoproterozóicas. Estes mesmos encerram, como litotipos principais, ortognaisses cinzentos, principalmente de composições tonalito-granodioríticas e, em segundo plano, rochas graníticas e trondhjémíticas. Adicionam-se, a estes tipos, gnaisses e xistos aluminosos, com ou/sem sillimanita e/ou cianita, e faixas estreitas de formações metavulcanossedimentares que, por vezes, incluem corpos de metagabros e metadioríticos diferenciados, como por exemplo: a Unidade Tróia: metabasaltos, metagabros/anfibolitos, metaultramáficas,

quartzitos ferríferos ou não, calcários cristalinos, rochas calcissilicáticas, (biotita paragneisses e gonditos).

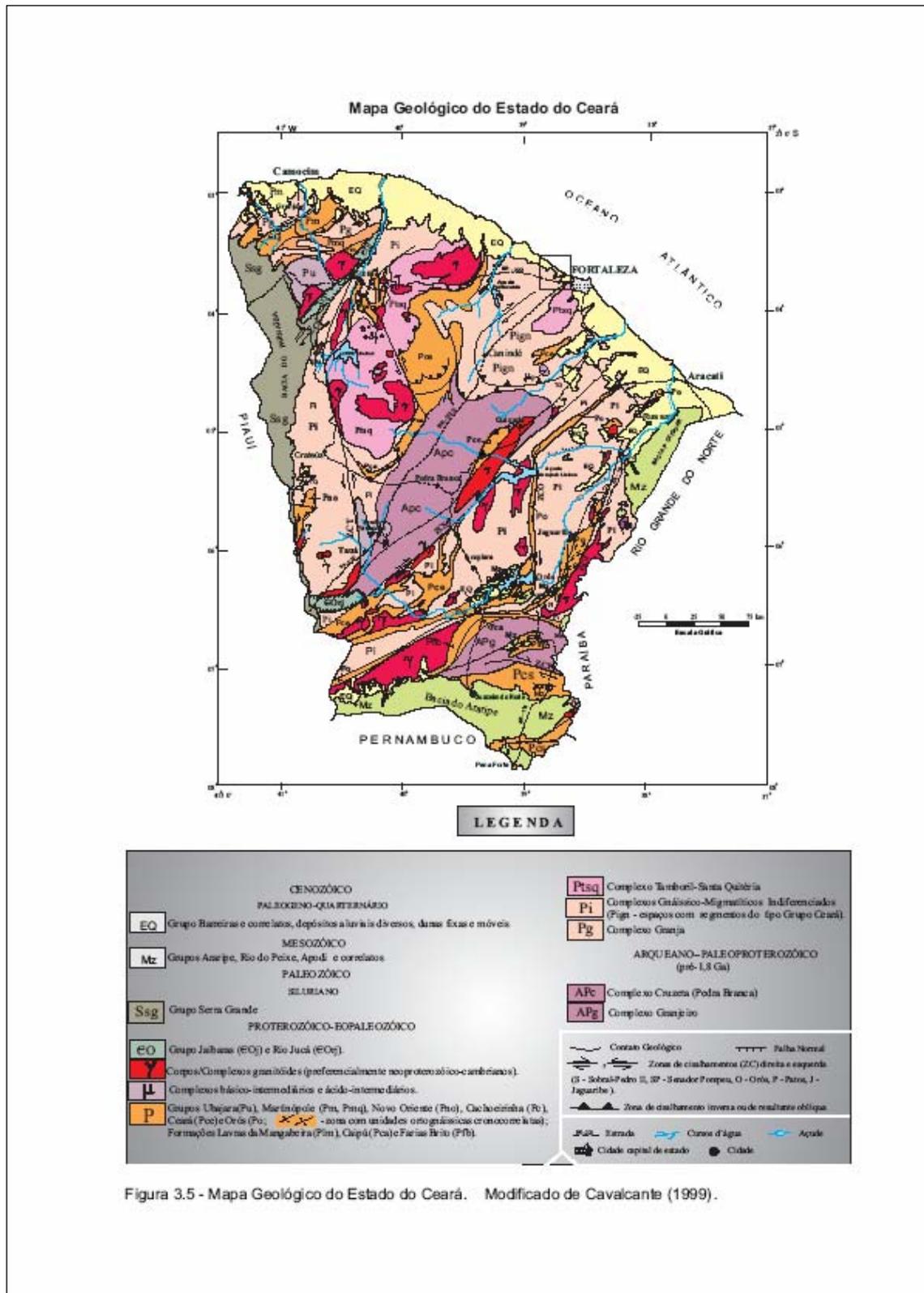


Figura 3.5 - Mapa Geológico do Estado do Ceará. Modificado de Cavalcante (1999).

Parte dos granitóides gnaissificados exhibe baixo índice de cor (um dos corpos, inserido no Complexo Cruzeta, é explotado sob o nome fantasia de Granito Casa Blanca).

Proterozóico (P)

A maioria dos terrenos gnáissico-migmatíticos do Estado do Ceará é considerada como de idade proterozóica, evulidos a partir de protólitos paleoproterozóicos (intervalos de 2,5 – 2,3 Ga e 2,3 – 2,0 Ga). Dentre estes, encontra-se, no noroeste do estado, o Complexo Granja (gnaisses diversos, de derivações sedimentar e magmática, descritos como biotita-gnaisses, sillimanita-biotita gnaisses, hiperstênio gnaisse - charnockito e enderbito), cujas idades U-Pb (zircões) situam-se entre 2,3 – 2,5 Ga.

Enquanto isto, para os terrenos gnáissico-migmatíticos, situados a leste da Zona de Cisalhamento Sobral-Pedro II (Figura 3.4) tem-se uma compleição litoestratigráfica mais complicada, geralmente incorporando uma associação de gnaisses e xistos aluminosos, calcários cristalinos e quartzitos, que têm sido relacionados, tanto ao Paleoproterozóico como ao Neoproterozóico (v. Grupo/Complexo Ceará). Nesta Figura 3.4, os mesmos encontram-se marcados como Pi, Pign, Ptsq, cujas unidades rochosas são:

Pi – biotita gnaisses cinzentos e rosados, com ou sem granada e/ou sillimanita, de granulação média a grossa, localmente fina e com fácies miloníticas, localmente xistosos, leucognaisses/gnaisses alaskíticos, hiperstênio gnaisses (charnockito e enderbito), gnaisses aluminosos (biotita +/- granada, +/- sillimanita), migmatitos de estruturas diversas, além de lentes de dimensões variadas de quartzitos, rochas calcissilicáticas e calcários cristalinos, anfibolitos e, mais raramente, metaultrabasitas.

Pign – complexo gnáissico-migmatítico com a importante participação de componentes de derivação sedimentar (gnaisses aluminosos), quartzitos, rochas calcissilicáticas, calcários cristalinos e lentes de formações manganesíferas, similares às incluídas no Grupo Ceará (exemplificado na região que tem sido tratada como de exposições da Unidade/Complexo Canindé).

Ptsq – diferencia-se dos complexos anteriores por exhibir uma alta taxa de corpos graníticos neoproterozóicos, rosados e cinzentos, de granulação média a grossa (até fácies rica em grandes cristais de feldspatos – granitóides porfiríticos), além de alguns *stocks*, *plugs* e diques cambrianos. Encontra-se constituído de migmatitos de estruturas riadas (bandada, *schlieren*, nebulítica, *schöllen*, agmática, com porcentagens

diferenciadas de neossomas graníticos), subordinando ortognaisses facoidais (*augen* gnaisses), rochas calcissilicáticas (geralmente abundantes, desde pequenos enclaves nos corpos graníticos, até lentes de dezenas de metros de comprimentos), anfibolitos e quartzitos ferruginosos.

Grupo (Complexo) Ceará (Pce) – Encontra-se distribuído, preferencialmente, no chamado Domínio Ceará Central, entre as zonas de cisalhamento Sobral-Pedro II (ZCSP II, Figura 3.2b) e Senador Pompeu (ZCSP) (Figura 3.2b). Seus principais tipos petrográficos são: gnaisses e xistos aluminosos, de fácies anfibolito (biotita +/- sillimanita +/- cianita +/- anfibólio), quartzitos e calcários cristalinos (mármore puros e impuros). Subordinadamente ocorrem gnaisses leucocráticos (leptitos), rochas calcissilicáticas (em jazimentos intercalados nos gnaisses e nos mármore), anfibolitos e anfibólio gnaisses. Partes dos gnaisses encontram-se migmatizados e penetrados por corpos pegmatíticos.

Grupo Orós (Po) - Trata-se de uma unidade do intervalo superior do Paleoproterozóico (1.8 a 1.6 Ga – Estateriano), representada por uma seqüência metavulcanossedimentar (metabasaltos, meta-andesitos, metarriolitos, micaxistos, filitos, quartzitos, metacarbonatos – calcários cristalinos, metadolomitos, incluindo importantes jazimentos de magnesita). Ao mesmo, associam-se destacados jazimentos de granitos porfiríticos gnaissificados – (*augen gnaisses*).

“**Formação Farias Brito**” – Situada na porção meridional do estado e sendo estratigraficamente relacionada a formações do Grupo Orós, constitui-se numa seqüência de micaxistos, paragnaisses, rochas carbonáticas e subordinadas lentes de metabásicas, tendo nos jazimentos de calcários cristalinos o maior realce econômico.

Grupo Cachoeirinha (Pc) e unidades correlatas – Esse Grupo, com distribuição ao sul da Zona de Cisalhamento Patos, é constituído por um conjunto metavulcanossedimentar (**metassedimentos**: com micaxistos finos, filitos (predominantes) e metassiltitos, metarenitos, metagrauvas, metaconglomerados, e rochas calcissilicáticas, em menor escala; **metavulcânicas**: metakeratófiros, metandesitos, metariolitos?). Como unidade cronocorrelata, tem-se as formações Lavras da Mangabeira e Caipú, cuja soma exhibe um quadro litológico ditado por micaxistos, filitos, quartzitos, conglomerados e subordinados corpos de anfibolitos (metabasaltos ou metandesitos?).

NEOPROTEROZÓICO-CAMBRO-ORDOVICIANO

Grupo Ubajara (Pu) – Com provável idade Neoproterozóica, encontra-se representado pelas seguintes unidades: Formação Trapiá (quartzitos conglomeráticos e arenitos de granulação fina a grossa); Formação Caiçaras (ardósias com intercalações de quartzitos); Formação Freicheirinha (calcários com raras intercalações de metamargas e metassiltitos); e Coreaú (arcóseos, subarcóseos e grauvas, em parte conglomeráticas).

Complexos Granitoides - Geralmente com idades distribuídas entre 650 e 500 Ma e em jazimentos com dimensões de pequenos diques e *plugs* a batolíticas, encontram-se formados, principalmente, por tipos petrográficos de granulação média a grossa (incluindo importantes corpos porfíricos), de tonalides cinzentas e rosadas ou avermelhadas, com facies leucocráticas, em parte equigranulares. Petrograficamente são constituídos de granitos, granodioritos, monzogranitos, monzonitos e sienitos. Facies subordinadas são descritas como microgranitos, aplitogranitos e tonalitos. Como enclaves ocorrem dioritos e monzodioritos.

Complexos Básico-Intermediários - Diversos corpos básico-intermediários, geralmente de dimensões não cartografáveis na escala da Fig. 3.5, e de idades distribuídas entre o Neoproterozoico e o Cambriano, ocorrem nos domínios precambrianos do Ceará. No caso dos complexos Canindezinho (Pnc) e Pedra Aguda (Pnpa) (Fig. 3.4), tem-se uma composição essencial a partir de dioritos (dominantes), gabros e granitóides. Também, relacionados a esses tempos Neoproterozóico-Cambrianos, aparecem diques de microgranitos, pegmatitos, sienitos, rhyolitos, dacitos, riocacitos, quartzo andesito, dioritos, lamprofiros.

Grupo Jaibaras (PCOj) – Com base em dados cronoradiométricos de granitóides que cortam essa unidade e litocorretas, nos estados do Ceará e Piauí, sua cronologia é vista como do final do Neoproterozóico (Neoproterozóico III) ao Ordoviciano, encontra-se representado pelas formações **Massapê** (conglomerados), Pacujá (arenitos diversos, folhelhos, siltitos e conglomerados), Parapuú basalto maciços e amigdaloidais, dacitos, riolitos maciços e porfíricos, andesitos amigdaloidais, brechas vulcânicas, lapillitos, tufos e rochas vulcanoclásticas epiclásticas, andesitos, arenitos arcoseanos, siltitos e filitos de derivação vulcanânicas (cinzas e tufos) e Aprazível

(conglomerados). As condições metamórficas foram de anquimetamorfismo à facies xisto verde baixo.

Grupo Cococi (PCOc) – cronologicamente correlacionável ao grupo anterior, é representado, da base para o topo, pelas formações Angico Torto (conglomerados, brechas, arenitos diversos, siltitos e argilitos), Cococi (ardósias, folhelhos, argilito e siltitos) e Melancia (conglomerados, subordinando siltitos, argilitos e arenitos) (Cavalcante *et al*, 1983) Mesozóico

Grupo Apodi – No Estado do Ceará afloram rochas das formações superiores, representadas pela Formação **Açú** (arenitos finos a grossos, localmente conglomeráticos, de tonalidades cinza claro, amareladas e avermelhadas, com intercalações de folhelhos e argilitos sílticos, principalmente no sentido ao topo) e Formação **Jandaíra** (rochas calcárias, calcioarenitos e calciolutitos bioclásticos, cinza claros a amarelados, com nível evaporíticos na base), em posicionamento sobreposto.

Grupo Araripe – Da base para o topo encontra-se marcado pelas formações Mauriti/Cariri (conglomerados, arenitos grossos, em parte silicificados, de tonalidades cinzentas a avermelhadas), Missão Velha (arenitos claros, amarelados e avermelhados, geralmente de granulação grossa, em parte feldspáticos, com gradações locais para arcóseos, congloreados, siltitos, folhelhos e argilitos); Santana (arenitos finos a médios, níveis de arenitos grossos a conglomeráticos, siltitos, folhelhos, em parte calcíferos e fossilíferos, calcários, parcialmente laminados, margas, calcarenitos, calcários brechóides, gipsita; Formação Exú: arenitos amarelados e avermelhados, de granulação média a grossa, com fácies conglomeráticas).

CENOZÓICO:

Magmatitos Messejana – representado por rochas alcalinas (fonolitos, traquitos, tufos alcalinos e essexito porfirítico, ocorrendo associados ou isoladamente) que ocorrem, preferencialmente, na forma de necks e diques, em tratos da Grande Fortaleza e áreas próximas. Seus jazimentos não ostentam dimensões passíveis de representação na escala da Fig. 3.4. Alguns jazimentos desses magmatitos têm sido utilizados na produção de britas, pedra tosca e de pavimento.

Formação (Grupo) Barreiras – encontra-se constituído, basicamente, de arenitos de granulação fina a média, por vezes grossa, conglomerados, argilitos e siltitos.

Outros depósitos sedimentares que tem sido cartografados como paleogeno (ou terciário)-quaternários, dizem respeito às formações Camocim, no noroeste do Estado do Ceará, Faceira na região do baixo rio Jaguaribe (conglomerados, arenitos pouco litificados, siltitos com níveis de argilas e cascalhos, e lateritos na base), e Moura, na região da Bacia de Iguatú (conglomerados, areias de granulação variáveis, siltitos). Neste intervalo cronológico, somam-se ainda diversas coberturas de espriamento aluvial, incluindo capeamentos de planaltos e coluviões holocênicas; sedimentos arenosos eólicos litorâneos (dunas fixas e móveis), sedimentos fluvi-marinhos e marinhos (vasas escuras, areias de praias e recifes areníticos, etc.), além dos sedimentos aluviais recentes (areias, argilas, areias conglomeráticas e cascalhos).

3.3. Geomorfologia Regional

A Região Metropolitana de Fortaleza, onde se inserem o Complexo Gnáissico-Migmatítico, Complexo Granitóide-Migmatítico e Ultrabásitos do Proterozóico Inferior e Rochas Graníticas do Proterozóico Superior, serve de suporte para estudos mais detalhados no que diz respeito as suas unidades geomorfológicas distintas, tais como: Planície Litorânea, Tabuleiros Pré-Litorâneos, Depressão Sertaneja, Maciços Residuais e Planícies Aluviais.

Na faixa costeira do Estado do Ceará, encontram-se sedimentos plio-pleistocênicos da Formação Barreiras que se constituem nos Tabuleiros Pré-Litorâneos e os sedimentos quaternários, que formam a Planície Litorânea.

Segundo Souza (1988), os Tabuleiros Pré-Litorâneos nesta região apresentam feições desenvolvidas anteriores aos cordões de dunas com materiais detríticos da Formação Barreiras. Seus relevos são rebaixados e apresentam uma distribuição regional de topos planos e horizontais com altitudes que variam entre 30 e 40 metros, com suas superfícies retrabalhadas quase sempre pela ação eólica. Como um todo, essa unidade apresenta inclinações suaves com declividades em torno de 5%, direções de mergulho que variam de local para local em função dos parâmetros estruturais e irregularidades do embasamento. Sobre as referidas superfícies se desenvolvem um padrão de drenagem retangular-paralela (obedecendo a traços estruturais de fraturas do cristalino refletidos, às vezes, no pacote sedimentar) com ocorrências de meandros em cursos fluviais mais senis, onde a rede de drenagem é desenvolvida com riachos de pequeno porte.

A Planície Litorânea abrange uma faixa estreita e irregular com uma extensão de 90 km, desde a foz do Riacho Caponga Funda até a foz do Rio Cauípe, cuja largura varia entre 5 e 10 km, constituída por sedimentos arenosos recentes, retrabalhados intensamente pela ação eólica atuante na região, Souza (op. cit.). Como resultante desses processos foram desenvolvidos vastos cordões de dunas, com predomínio das transversais sobre as longitudinais que são mais restritas às terminações frontais e de gerações mais antigas. A paisagem desta unidade é marcada também pelo desenvolvimento de planícies flúvio-marinhas, lagunas e amplos terraços praias. Outro aspecto mais atual é a ação do transporte eólico produzindo barramentos de cursos fluviais por aporte de sedimentos e o conseqüente crescimento de lagoas costeiras. O posicionamento das dunas decide a elaboração de um padrão de drenagem anastomótica ou labiríntica, observados nos baixos cursos d'água ou nos desvios freqüentes das desembocaduras dos rios e/ou riachos (Souza et al, 1979).

Todas estas unidades sedimentares retromencionadas estão de uma maneira seqüencial sobrepostas à unidade denominada Depressão Sertaneja que possui a maior expressão territorial pertinente à Região Metropolitana de Fortaleza, abrangendo essencialmente os municípios mais próximos, a exemplo de Caucaia e Maranguape. corresponde a uma superfície de aplainamento produzida sobre as rochas do Embasamento Cristalino com exposições diversificadas de tipos litológicos, quanto a sua composição mineralógica, mais resistente ou não aos fenômenos que encerram processos de basculamento da região.

As atuais condições climáticas sub-úmidas a semi-áridas atuam nessa região, com precipitações médias anuais, já anteriormente comentadas, juntamente com sua superfície apresentam uma drenagem densamente dendrítica ou sub-dendrítica, em função da quantidade de fraturamentos existentes nas rochas cristalinas do embasamento e do padrão heterogêneo erosivo. Os cursos d'água são intermitentes e os solos são bastante diversificados, sendo normalmente rasos incipientes ou medianamente profundos, com grande incidência de afloramentos rochosos e detritos resultantes de litologias mais estáveis ao intemperismo químico pouco acentuado na região. Essa incidência maior de materiais rochosos sob forma de afloramentos se destaca na paisagem e a vegetação é típica dos sertões semi-áridos predominando a

paisagem de Estepe Arbórea Densa nos maciços residuais mais elevados e Estepe Arbórea Aberta nas extensas superfícies pediplanadas das rochas parametamórficas.

Dentro desta unidade foram compartimentadas duas sub-unidades menores em função da morfologia apresentada: Pedimentos com Inselbergs (extensas superfícies com topografias planas incidentes na base dos maciços residuais e que se inclinam na direção dos vales e do litoral, com cotas altimétricas de 60 a 120 metros, observando-se ocorrências de morros isolados que se destacam na planura da região, denominados de inselbergs) e Pedimentos Dissecados em Colinas Rasas (possuem as mesmas características naturais, como componentes geológicos, pedológicos, climáticos, hidrológicos, etc., dominantes na sub-unidade anterior, diferenciando-se apenas no que concerne às morfologias topográficas, cuja dissecação nas rampas pedimentadas é mais evidente e os interflúvios de feições convexas são isolados produzindo relevos colinosos com níveis superiores a 100 metros de altitude).

Os Maciços Residuais representam uma forte ruptura de declive das serras e morros residuais, que quebram o aspecto monótono das formas planas ou suavemente onduladas da Depressão Sertaneja. São compostos por rochas granito-migmatíticas e suas feições atuais resultam da erosão diferencial que rebaixou áreas circunvizinhas de constituição litológica menos resistente e na região incluem os municípios anteriormente citados. As Serras de Maranguape e Pacatuba (Aratanha) destacam-se no âmbito da Região Metropolitana de Fortaleza por atingirem níveis altimétricos da ordem de 700 a 800 metros e são típicos representantes de serras com encostas úmidas, apresentando condições climáticas diferenciadas do contexto semi-árido, com precipitações médias anuais entre 900 a 1600 mm e temperaturas mais amenas. As outras serras de menor representatividade espacial e altimétrica, tais como, Serra de Itaitinga e Serrote do Jatobá assemelham-se mais aos de clima seco das superfícies rebaixadas do sertão.

As Planícies Fluviais formam superfícies topográficas mais baixas e são constituídas de faixas estreitas de acumulação aluvial (Depósitos Aluviais), quando estão no domínio das rochas cristalinas e mais largas quando no domínio sedimentar. As condições de disponibilidade hídrica e de solo representam uma diferenciação no contexto dos sertões semi-áridos. Favorecem a instalação de uma cobertura vegetal com fisionomia de mata ciliar ou mata-galeria dominada por carnaubais em contraste com a vegetação caducifólia e de pequeno porte dos interflúvios sertanejos. Nestas planícies podemos

considerar dois principais tipos de depósitos, sob ponto de vista geotécnico: um de areia grossa c/uma pequena fração argilosa e outro de argila quase pura para construção civil. São representadas com maior ênfase na Região Metropolitana de Fortaleza, as planícies aluviais associadas ou terraços do Rio Pacoti, Ceará, Cocó, São Gonçalo, Cauípe, etc.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Em função do que se pretendeu executar nos objetivos desse trabalho, envolvendo aspectos ligados à geologia, geofísica e hidrogeologia da região litorânea dos Municípios de Caucaia e Pecém, no Estado do Ceará, metodologia de trabalho foi subdividida em dois grupos:

4.1 Trabalhos de Gabinete e Laboratório

- **Etapa I** – Levantamento, aquisição bibliográfica, consultas e interpretação de imagens de sensores remotos e formação de banco de dados;

⇒ Levantamento, aquisição e consulta bibliográfica:

1. Levantamento de vários documentos bibliográficos, fotográficos e cartográficos;
2. Elaboração de mapa índice dos levantamentos do meio físico da região;
3. Confecção de mapas através da documentação geológica preliminar existente, contendo dados para captação de água subterrânea, sondagens SPT, SEV's, Dipolo-Dipolo, GPR, EM31 e EM34, aplicados à geologia e hidrogeologia da região de Caucaia e Pecém-Ce;
4. Obtenção de cópias de arquivos ou fichários sedimentológicas com descrições petrográficas, análises granulométricas e morfométricas, de sondagens elétricas verticais, caminhamentos elétricos e boletins analíticos;
5. Elaboração e adaptações de mapas de solos, vegetação, da geomorfologia e de recursos hídricos, compilados da bibliografia básica da R.M.F.;
6. Documentação das análises físico-químicas de águas existentes com interpretação da influência de seus elementos para definição e classificação de suas finalidades com o software AQUACHEM 3.7;
7. Elaboração de questionários para aquisição de dados sobre contaminação de poços com interferência da cunha salina na qualidade d'água de poços perfurados próximos ao litoral;
8. Confronto entre os dados obtidos na bibliografia.

⇒ Formação de Banco de Dados:

1. Formação de Banco de dados para armazenamento de informações sobre ensaios granulométricos, geotécnicos de amostras, modelo digital de terreno, mapa de aspecto e declividade, análises micropetrográficas de coletas sistemáticas na de amostras na Formação Barreiras, parâmetros estruturais através de fotos aéreas e de imagens de sensores remotos com checagem em campo;

⇒ Interpretação de Sensores Remotos:

1. Atualização da atual base planimétrica a partir de imagens de satélite LANDSAT 5 – TM, na banda 7, com imagens "SPOT" da R.M.F.
2. Interpretação dos *landforms*, utilizando fotos aéreas convencionais, na escala de 1: 70. 000;
3. Planejamento de todas atividades de campo, com seleção de áreas relacionadas à região do litoral do Município de Caucaia, para selecionar seções-tipo, localizar e estudar as estruturas sedimentares propícias ao armazenamento d'água.

4.2 Trabalhos de Campo:

- **Etapa II – Levantamento de Campo:**

1. Investigação de campo para dirimir dúvidas dos trabalhos de fotointerpretação e controle de áreas consideradas confiáveis quanto a sua fotogeologia;
2. Uniformização de critérios adotados para etapas de mapeamento de detalhe, semidetalhe, descrições de afloramentos e definições de áreas consideradas confiáveis para identificações de estruturas sedimentares propícias para levantamentos geofísicos e definições de unidades geoambientais;
3. Caracterização e delimitação de materiais rochosos sedimentares quanto as suas variações faciológicas tanto laterais como vertical. Coleta de dados que venha contribuir para escolher zonas de melhor armazenamento d' água;

4. Coleta de amostras d'água para construção de parâmetros estatísticos nas estruturas já referidas;
5. Cadastro de fontes potencialmente poluidoras e de agressões ao meio físico.

Etapa III – Processamento, Interpretação e Integração de Dados.

Análises, interpretação e integração de dados geológico-geofísicos e hidroquímicos levantados na consulta bibliográfica e daquelas resultantes dos trabalhos de campo com:

1. Confeção dos mapas geológicos e de pontos das unidades sedimentares e do substrato cristalino, tendo como ferramenta auxiliar sondagens elétricas verticais, dipolo-dipolo eletromagnéticas, visando construir e interpretar de perfis geológicos transversais e longitudinais da faixa de ocorrência da Formação Barreiras na sua extensão litorânea;
2. Elaboração do texto preliminar e final da tese de doutoramento.

Etapa IV - Confeção de Textos e Documentos Gráficos.

Material:

a) Informações Anteriores:

- 245 pontos descritos em mapeamento geológico pelo Projeto Fortaleza (Braga *et al.* 1981), contendo 45 análises petrográficas e 15 análises químicas de rochas;
- 345 pontos com informações de sondagens na prospecção de água subterrânea, levantados no Projeto Fortaleza-Hidrogeologia e controle tecnológico nas perfurações tubulares no Município de Fortaleza-Ce (Morais Sampaio & Sales, 1984); e no Banco de Dados da FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia, referentes a dados climáticos e índices de vegetação no DATEN-FUNCEME;
- Dissertações de Mestrado em Hidrogeologia e Geofísica na R.M.F., nos Departamentos de Geologia da Universidade Federal do Ceará/ UNESP e de Doutorado no Instituto de Geociências da USP – 1978 a 2004. Publicações Internas.

b) Mapas Topográficos – MDT

Utilizados, em princípio, para confecção de mapas planialtimétricos para levantamento de dados geológicos e hidrogeológicos de campo, com dados de GPS:

- Folha Fortaleza - SA-24-Z-C-IV-4, escala de 1: 100.000, SUDENE/ DSG (1971).
- MDT – Modelos digitais de Terreno para emprego de sondagens geofísicas na área de estudos;

c) Mapas e Cartas Temáticas

- Carta Geológica do Projeto Fortaleza, quadrícula – Folha Fortaleza, escala 1: 250.000, DNPM/CPRM (Braga *et al* 1977);
- Mapa Geológico da Região Metropolitana de Fortaleza, escala 1: 100.000, CPRM (Brandão, 1995);
- Carta Potencial de Minerais Não-Metálicos da Região Metropolitana de Fortaleza, escala 1: 100.000, CPRM (Medeiros, 1995);
- Mapa Geomorfológico do Estado do Ceará, escala 1: 500.000, Atlas do Estado do Ceará (1995);
- Mapas de Recursos Hídricos do Estado do Ceará escala 1: 500.000, Atlas do Estado do Ceará (1995).

Sensoriamento Remoto e Processamento Digital de Imagens:

Processamento digital de imagens com base em trabalhos de fotogeologia já existentes para confecção de mapas relacionados com a geologia da área, para checagem com imagens “SPOT”. Em princípio, serão utilizados os softwares: ER-MAPPER 6.0 e ENVI 4.0.

- Fotografias aéreas na escala aproximada de 1: 25.000, Projeto SUDEC/PC-OBRA 175, obtidas pelo Serviço Aéreo Cruzeiro do Sul em 1968, fotoíndice na escala de 1: 100.000, Quadrícula 688 – Fortaleza;
- Imagens “SPOT”, PAN 703/375 de 24/02/1998, QUICK BIRD, 2004, Projeção UTM, DATUM SAD-69.P.R. Internacional – 1967, com deslocamento de 50^o, abrangendo os municípios de Fortaleza, Caucaia e Porto das Dunas (Aquiraz), no Estado do Ceará.

Uso de SIG´s - Sistemas de Informação Geográficas através de Softwares

- *ArcView 3.3, ArcGis 9.0, SPRING 4.1 e Idrisi 3.2.*
Construção de Modelos Digitais de Terreno – Ferramentas indispensáveis também para tratamentos estatísticos dos dados hidroquímicos e geofísicos;

d) Equipamentos

- Estereoscópio de Espelho marca WILD HEERBRUNGG, modelo *Aviopretri* APTI, aumenta de 31x e oculares de 20x;
- Bússola *Brunpton*;
- *Aerosketchmaster* marca *Carls Zeiss*;
- Microscópio de Polarização e Reflexão, com adaptadores microfotográficos, marcas *Nikon*;
- *Scanner*, formato A4, marca HP, *modelo Scanjet 5s Color*, com resolução ótica de 800x600dpi;
- Impressora Jato de Tinta marca *Hewlett Packard*, modelo *Desk Jet 890 C*, resolução de 800 x 600 dpi;
- Microcomputador Pentium IV da Intel 900 MHz, Monitor SVGA “SONY” com dot pitch 0.25 Linha 14, fotos 1903 a 1908;
- *Global Position System (GPS)*, *Trimble Navigation Ensign GPS*;
- Máquina Fotográfica *NYKON*, Abertura de 35 mm 1:38;
- Mesa Digitalizadora *Digigraf*, Tamanho A0.

- Resistímetro Modelo PER-80, fabricado pela empresa DPM Engenharia Ltda. (Desenvolvimento, Projeto e Manutenção) sediada na Cidade de Fortaleza-Ce. Transmissor de potência máxima de 400 W; receptor com alta impedância de entrada na ordem de 20 megaOhms, medida digital com fundos de escala de 20 V, 2V e 200mV.
- Condutímetro GEONICS Modelo EM34 - 3XL
Duas bobinas: uma transmissora e outra receptora;
Dois consoles eletrônicos: um transmissor e um receptor;
Três cabos de separação entre bobinas de 10, 20 y 40 metros e dois cabos curtos que unem as bobinas com os consoles.

5. MARCO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO LOCAL

5. MARCO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO LOCAL

5.1 Geologia da Região de Caucaia-Pecem-Ce

5.1.1 Precambriano-Cambriano

A ampla porção oeste do Domínio Tectônico Setentrional (DTS) é uma das menos estudadas da Província da Borborema. Marcada por importantes vazios de ordem cronológica tem propiciado a prática “indutiva” de crono-litocorrelações baseadas em experiências vividas noutras localidades dessa PB (Cavalcante, 1999).

A área se insere na configuração proposta por Santos e Brito Neves (1984), dentro dos Terrenos Ceará Central (TCC) entre as zonas de cisalhamento Senador Pompeu e Sobral Pedro II (Figura 3.2). De acordo com as incertezas bibliográficas e dos objetivos deste trabalho resolveu-se subdividir as principais unidades do Embasamento Cristalino em: Domínio Petrográfico do Proterozóico Inferior com Subdomínio de Rochas Paraderivadas e Subdomínio de Rochas Ortoderivadas, com a finalidade de sistematizar resultantes dos efeitos tectono-estruturais. O primeiro subdomínio é comparável litologicamente ao Complexo Gnáissico-Migmatítico é definido como uma seqüência constituída de gnaisses variados, em parte migmatizados e, freqüentemente, intercalados por níveis quartzíticos (q) e carbonáticos (ca). Observa-se nele o predomínio de biotita-gnaissite com ou sem muscovita, anfibólio, granada e sillimanita, muitas vezes, servindo de encaixante para *sheets* de leuco-ortognaisses, pegmatóides e augen-ortognaisses. De modo subordinado, ocorrem corpos anfibolíticos e calcossilicáticos sob a forma de jazimentos lenticulares de pequenas dimensões e concordantes com a foliação gnáissica. O segundo subdomínio de rochas ortoderivadas é comparável ao Complexo Granitóide-Migmatítico, onde há quase uma homogeneização granítica na fase de migmatização. As rochas migmatíticas ocupam grandes extensões na região de ocorrência do Complexo Gnáissico-Migmatítico, tendo como áreas de predominância representativas a Serra do Juá, Serra da Conceição, Serra do Camará e Serrote Mineiro (foto 5.1). Os termos migmatíticos comuns, nessas unidades morfológicas ou topográficas, são os de estrutura bandeada-dobrada com litotipos mais evoluídos tendendo à homogeneização e ocorrem em menor proporção. De modo geral, geologicamente, a área da região especificada é composta por cerca de 60% de rochas do Embasamento Cristalinas e sobrepostas em seus 40 % restantes por Coberturas Cenozóicas , estas últimas, quase sempre limitadas respectivamente às

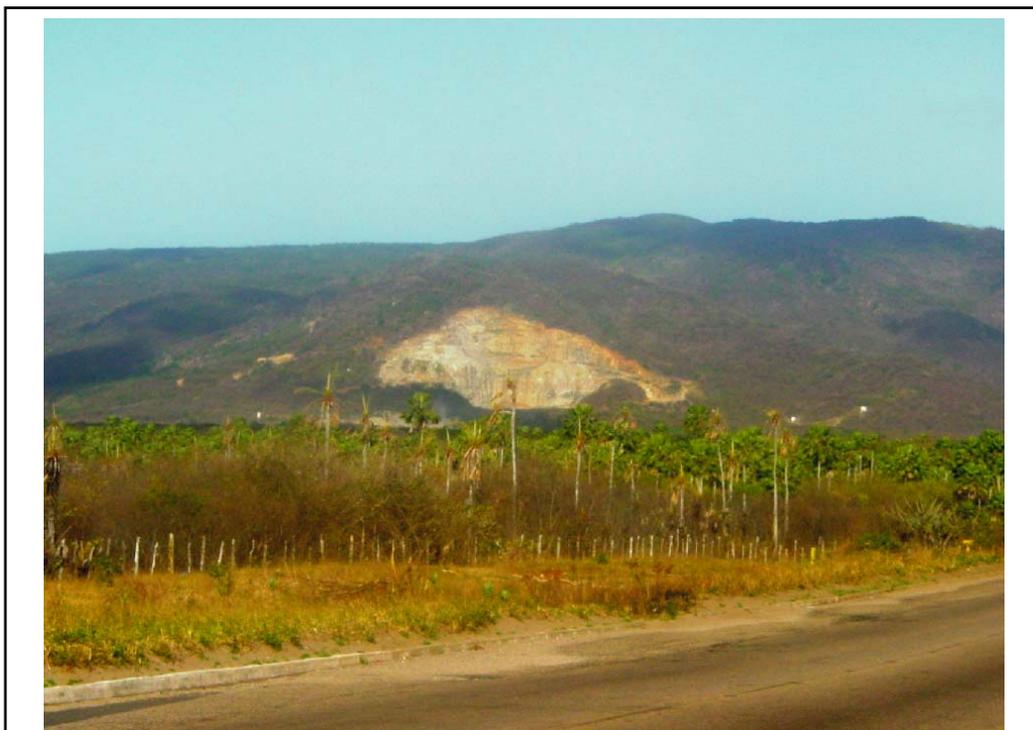


Foto 5.1 - Complexo serrano do Camará, Serra da Conceição e Serra da Taquara mostrando na sua parte norte, perpendicular à direção E-W um corte de exploração de britas para construção civil em migmatitos e/ou gnaisses associados, levemente migmatizados, através do sistema de desmonte por bancadas na localidade denominada Serrote Mineiro.

porções norte, noroeste, sudeste da região litorânea dos municípios de Caucaia e Pecém-Ce, como pode ser visto no mapa geológico da área (Anexo). A unidade maior quantificada corresponde ao Proterozóico Inferior com rochas representadas por seqüências litológicas compostas de rochas paraderivadas com predomínio de biotita-gnaiss, moscovita-biotita-gnaisses, raras lentes de hornblenda-gnaiss e anfibolitos total ou parcialmente migmatizadas. Quartzitos ocorrem também neste contexto, sob forma de cristas resistentes ao intemperismo da região, sendo representados por pequenos morros na parte sudeste situados após 5 km na direção sudeste da Cidade de Caucaia. Na parte sul da sede do município de Caucaia, ocorrem rochas do Complexo Migmatítico-Granitóide compostas por ortognaisses, granitóides e migmatitos com microclina, biotita e hornblenda fazendo parte da unidade de rochas ortoderivadas, responsáveis pela maior expressão topográfica da área fazendo parte do complexo de rochas cristalinas, através do maciço da Serra da Taquara com cotas altimétricas de 510 a 514 metros. Ao oeste, aproximadamente a 10 km em linha reta da mesma Cidade de Caucaia ocorre o maior corpo migmatítico. Possui direção geral

sudoeste-nordeste, compondo a paisagem cristalina que abrange o Serrote do Japurá (90 m), Serrote Mineiro (380 m), Serra do Camará (381 m), Serra da Conceição (556, 514 e 524m) e Serra do Juá (648 m), todos constituídos de corpos migmatíticos sob a forma de maciços residuais (*Inselbergs*). Ao lado esquerdo da BR-222, na direção Caucaia-Boqueirão, cerca de 1 km da sede distrital Boqueirão, na parte centro-oeste da área, encontra-se mais uma expressão topográfica composta ainda de migmatitos, denominada Serrote do Bico Fino (435 m) e posicionada no limite sudoeste da área.

Ocorrem lentes de calcários cristalinos (mármore) pouco significativas, não mapeáveis na escala de trabalho. Junto com estas expressões morfológicas menos expressivas, ocorrem outras de porte significativo, concernentes aos quartzitos encontrados na porção litorânea do Porto e na Cidade de Pecém, ao sul da Serra do Câmara, exibem foliações significativas, têm dimensões longitudinais aproximadas de 1800m e transversais de 750 m, são concordantes com a direção regional norte-nordeste a sul-sudoeste. Os contatos são discordantes com o embasamento mais antigo e podem ser observadas apófises graníticas entrecortando a unidade de rochas gnáissicas de forma desordenada ou discordante. No seu corpo geral, apresenta xenólitos disseminados de biotita-gnaiss e anfibólitos provenientes das rochas encaixantes, às vezes, como *roof pendent* ou mesmo preenchendo fraturas, preservados ou não, e afloram nas bancadas principais de desmonte de rochas nas pequenas pedreiras de brita situadas na parte nordeste da localidade Fazenda das Pedras. Os contatos das rochas paragnáissicas apresentam-se migmatizados ou não e sem auréola de metamorfismo. Observa-se uma leve orientação de litotipos, segundo a foliação regional, quase norte-sul ou mais precisamente nordeste-sudoeste com evidentes sinais de tectonismo.

No contexto geológico e geotectônico, um grande maciço granítico que engloba a Serra do Camará, Serra da Conceição, Serra do Juá, resultante do basculamento do Maciço do Baturité, encontra-se encaixado nas rochas gnáissicas paraderivadas num posicionamento sub-concordante dentro das Zonas de Cisalhamento Sobral - Pedro II (ZCSP II) e Zona de Cisalhamento Senador Pompeu (ZCSP).

As unidades cristalinas topograficamente mais expressivas desse complexo serrano são identificadas no mapa geológico (Anexo), sob a aparência de uma elipse disforme, quase semelhante a uma silhueta humana, com seu eixo maior alongado na direção NE-SW. Localmente, são responsáveis pela pendência do pacote de sedimentos da Formação Barreiras e, hidrogeologicamente, pelos direcionamentos dos fluxos

regionais de águas subterrâneas e superficiais. Constituído-se o mais importante relevo influente na recarga dos aquíferos e na distribuição da maioria dos padrões de drenagem da área.

5.1.1.1 Domínio Petrográfico do Proterozóico Inferior

5.1.1.1.1 Subdomínio de Rochas Paraderivadas

Este subdomínio abrange na área mais de 60% dos afloramentos pertencentes ao embasamento cristalino e está representado por rochas, tais como gnaisse e quartzitos, pertencentes ao Grupo Ceará. Na sua grande maioria essas rochas apresentam estruturas com foliações contínuas ou não, correspondendo a uma alternância de bandas mineralógicas diferenciáveis com percentagens de feldspato superiores a 20 % onde, em geral, o quartzo é abundante. Genericamente, há nas rochas gnáissicas uma predominância de minerais granulares, como quartzo e feldspato, em relação aos minerais lamelares, tabulares ou prismáticos alongados como micas (biotita, moscovita e clorita) e os anfibólios, que se concentram em bandas próprias, de molde a definirem texturas granolépido/nematoblásticas alternadas. Uma ocorrência de quartzito de grande porte situa-se no Município de São Gonçalo do Amarante, próximo ao Canal Sítios Novos/Pecém e ao lado da Serra do Camará, compondo uma forma de ∇ e estruturalmente um sinclinal com caimento para sul. As rochas quartzíticas ocorrem sob a forma de lentes encaixadas nos paragnaisses. Devido a forte resistência à erosão e ao intemperismo químico afloram também sob a forma de pontais projetados para dentro do mar. Denomina-se “Ponta do Pecém” (porção noroeste da área) e em razão dessa resistência ao intemperismo químico em paleoclima úmido permanecem aflorando com maior pujança não só nessa região, mas também em outras regiões do litoral cearense. Os quartzitos na área litorânea são responsáveis pelos promontórios de sedimentos (Foto 5.2) e, pela formação entre eles, de praias dissipativas, que favorecem a presença de aquíferos livres rasos de boa qualidade, para consumo humano, porém de grande vulnerabilidade à intrusão salina quer pela proximidade da cunha salina marinha quer pela infiltração de aerossóis marinhos.



Foto 5.2. Ocorrência de quartzito com mergulho para NW na Praia do Pecem-Ce, na zona portuária, responsável pelos promontórios de sedimentos nesta zona litorânea.

Geralmente, estão associados às rochas gnáissicas, relevos mais acentuados, tais como Serrote do Japurá, Serrote Mineiro, Serra do Camará, Serra da Conceição e Serra do Juá (648 m), constituídos de corpos migmatíticos e afloram como maciços residuais sob a forma de *Inselberg*.

5.1.1.1.2 Subdomínio das Rochas Ortoderivadas

Situa-se numa pequena porção da parte sul da Cidade de Caucaia e pertence ao complexo Granitóide-Migmatítico (*Pcgr-mg*) (Lima *et al*, 1980 Apud Brandão, 1995) representando pequena parte do Embasamento Cristalino. Tem ocorrência incipiente e quase sempre próxima ou dentro das zonas de cisalhamento sem possuir grandes expressões topográficas, como em outras zonas de cisalhamento, a exemplo da Pedreira de Itaitinga-Ce (Mota, 1998) na região extra limite sudeste da área.

Segundo Brandão (1995), a atuação de processos metamórficos e deformacionais, compatíveis, em escala regional, com a fácies anfífolito de alto grau e uma anisotropia

estrutural está representada por uma foliação resultante de deformação dúctil ou plástica em regime de cisalhamento simples.

5.1.1.2 Domínio Petrográfico do Proterozóico Superior

Este domínio não possui representatividade mapeável na área de trabalho e a presença de seus granitóides está quase sempre ligada a fenômenos de recristalização dentro de zonas de cisalhamento dúctil. A área não apresenta corpos com essas transformações.

5.1.2 Cenozóico

5.1.2.1 Vulcanismo Alcalino do Terciário (T_λ)

Coube a Almeida (1958), a primeira referência sobre rochas ígneas alcalinas no Estado do Ceará, localizadas no Morrote do Caruru. Entretanto, novas ocorrências foram encontradas na parte norte do Serrote Bico Fino com a denominação de Serrote Salgadinho (394 m), ao lado do Rio Cauípe distando 6 km da Fazenda Caruru. O mesmo ampliou também suas observações associando essas ocorrências aos grandes lineamentos estruturais submarinos relacionados ao Vulcanismo do Arquipélago de Fernando Noronha, alongando-os, possivelmente, ao interior do Estado do Ceará.

A Região Metropolitana de Fortaleza abriga as idéias de extensão dessas ocorrências e engloba *necks* de fonolitos com formas semicirculares e diques de traquitos provenientes do “Vulcanismo Alcalino”, que se processou ao longo do paralelo 4° S, descritos por Vandoros & Oliveira (1968) e que são testemunhos emersos do “*Rift* de Fernando de Noronha”. Baseados em estudos geocronológicos e químicos, esses autores indicaram uma idade Oligocênica de aproximadamente $28,6 \pm 9$ m.a. para o corpo alcalino (Morrote do Caruru). Nascimento *et al* (1981.), estudaram e dataram geocronologicamente pelos métodos Rb/Sr e K/Ar seis ocorrências nas localidades denominadas serrote Caruru, Ancuri, Salgadinho, Japarara e Pão de Açúcar e indicaram idades em torno de 34 ± 2 m.a. ambas inseridas na Região Metropolitana de Fortaleza. Os aspectos morfológicos externos dessas ocorrências mais assemelhadas a cones vulcânicos são as de Salgadinho, Pão de Açúcar e Caruru.

Da mesma forma, consideraram essas ocorrências como resultado de uma importante manifestação vulcânica relacionada também a uma importante fase de reativação da plataforma Sul-Americana, em zonas de fraqueza, cuja extensão se limitaria entre a região citada, Arquipélago Fernando de Noronha e o Atol das Rocas.

Braga *et al*, (1977), integram os corpos alcalinos existentes na Folha Fortaleza (em escala de 1: 250.000) e identificam nos *necks* e diques estudados quatro variedades petrográficas, tais como fonolitos, traquitos, tufos e essexitos.

Na área, encontram-se duas ocorrências de fonolitos com morfologias análogas e mapeáveis em escala de 1: 100.000. Uma situada no Serrote Salgadinho ainda não cartografado na literatura geológica, na porção sudoeste da área pesquisada, com diâmetro de 2.000 m e cota altimétrica de até 390 metros encaixado em rochas gnáissicas (biotita-gnaïsse) do Embasamento e outra mais abaixo representada por um pequeno serrote sem denominação, na parte limítrofe sul da área.

Os diques de traquito possuem formatos tabulares sem expressão de relevo, discordam da direção de foliação das rochas encaixantes, geralmente biotita-gnaïsse. Neste contexto, um deles possui cerca de 6m de espessura e 20m de comprimento e aflora no Canal Sítios Novos-Pecém, próximo ao Município de São Gonçalo do Amarante. Nas ocorrências de maior porte anteriormente citado (por ocasião, Serrote do Salgadinho), a exemplo da literatura em Passos & Gomes (1979), foram identificadas as presenças litológicas de fonolitos traquitóides de tamanhos razoáveis em contatos bruscos com biotitas-gnaïsse e anfibólio-gnaïsse distantes e pouco circundantes, enquanto que os diques menores de traquito estão quase sempre bem próximos a essas ocorrências maiores.

5.1.2.2 Tércio-Quaternário: Formação Barreiras (Tb)

As coberturas sedimentares cenozóicas estão representadas pelas unidades sedimentares da Formação Barreiras e abrangem toda faixa da zona costeira da área, compreendendo uma porção segmentada desde a sua parte inicial a oeste do Município de Fortaleza até a parte noroeste, onde englobam as zonas costeiras dos municípios de Caucaia-Pecém. As coberturas colúvio-eluviais (com maior incidência sobre os terrenos) e depósitos flúvio-aluvionares (nos leitos dos rios citados e nas planícies de inundação), fazem parte do mesmo contexto.

Branner (1902) usou o termo Barreiras pela primeira vez para definir camadas de vários matizes aflorando em diversas barreiras ao longo da costa brasileira, desde o Estado do Rio de Janeiro até o Estado do Amazonas. Oliveira e Leonardos (1943) imputaram um caráter estratigráfico ao termo denominando-o de Série Barreiras. Kegel (1957) concedeu um caráter mais restrito ao termo “Formação Barreiras” no Rio Grande do Norte, ligando-o a camadas superiores e “Infra-Barreiras” a camadas inferiores. Bigarella e Andrade (1964) atribuíram uma definição sistemática com a seqüência representando um grupo, chamado “Grupo Barreiras”, com uma seqüência inferior denominada “Formação Guararapes” e outra superior denominada “Formação Riacho Morno”. Campos e Silva *et al.* (1972), deram uma nova concepção ao grupo compondo-o em três unidades estratigráficas: “Formação Serra dos Martins”, “Formação Guararapes” e “Formação Macaíba”.

Mabessone *et al.* (1987) retomaram a denominação original de “Formação Barreiras” para representar os sedimentos terció-quaternários que ocorrem nos Estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, procedimento utilizado nesta tese.

A Formação Barreiras na área está representada por uma unidade sedimentar pertencente ao Tércio-Quaternário que repousa em discordância erosiva angular sobre rochas do embasamento cristalino. Sua espessura é bastante variável, atingido o máximo de 55 metros, observada através de sondagens mecânicas em perfurações de poços profundos e de sondagens elétricas verticais, COGERH (1999). Em função de seu relacionamento com o relevo dissecado e irregular do embasamento e de seu atual nível de erosão em sua superfície ou topo, fornece aspectos importantes para estudos geofísicos e hidrogeológicos. A predominância de sua ocorrência situa-se nas porções noroeste da sede de Fortaleza, norte do Município de Caucaia, litoral sudeste do Porto do Pecém e parte noroeste da Barra do Cauípe.

Objetivando melhor visualização da geologia local e estratigrafia na superfície de trabalho, elaborou-se uma coluna geológica local com as litologias aflorantes (figura 5.3), com o intuito de sistematizar o estudo das litologias encontradas e confrontar a referida coluna com a proposta por Brandão (1995) para Região Metropolitana de Fortaleza-R. M.F.

Os depósitos da Formação Barreiras são mais representativos no setor noroeste da área em estudo (Foto 5.3). Neste, apresentam um perfil geral (da base para o topo) com um nível conglomerático com seixos de tamanhos variados, subarredondados na

base, cimentados numa matriz argilosa, caulinizada, exibindo uma granodecrescência. Os sedimentos das camadas superiores são representados por arenitos friáveis, possuindo textura fina a média e coloração creme; os grãos de quartzo ocorrem de maneira dispersa e são angulosos a subangulosos. Os produtos intempéricos produzem um voçorocamento caracterizado pelas crostas de ferro nas bordas, como resultado da segregação do óxido.



Foto 5.3 - Na direção noroeste de Cauípe, mostrando ocorrência da Formação Barreiras com cobertura uma tênue de dunas recentes, localizada à margem do Rio Cauípe-Ce.

Análises granulométricas e morfoscópicas classificaram como areias finas, mal selecionadas e os grãos de quartzo mostram uma esfericidade de média a baixa. Constituídos de materiais, principalmente de fontes proximais, seus sedimentos refletem a litologia com uma diversidade litológica em âmbito local e/ou regional e de acordo com o posicionamento da fonte podem fornecer depósitos com larguras bastante variáveis (Carvalho, 2003).

Estão distribuídos continuamente ao longo da faixa costeira da área com uma inserção ocupando mais de 70% da porção entre o Alto Estrutural de Fortaleza e Alto Estrutural do Ceará. Constituem as unidades mais representativas da região e sua extensão prolonga-se através da linha de costa sobre a plataforma continental. Na região de Cauípe afloram sob a forma de pequena falésia inativa e normalmente são encontrados em zonas interdunares. Em geral, seus depósitos no litoral estão na maioria recobertos

por sedimentos eólicos e seu contato-limite interno é dificultado pela zona de coberturas colúvio-eluvionares terció-quaternárias desenvolvidas e demonstradas na foto 5.4. A maioria dessas coberturas possui melhor definição na região da Rede Ferroviária Sociedade Anônima - RFESA, no limite extremo sudeste da área. Embora de difícil definição seu contato basal com o substrato do embasamento cristalino é feito sob discordância litológica, enquanto que seu topo é recoberto por sedimentos quaternários mais recentes e diversos, exemplificados por depósitos fluviais, eólicos e praias.

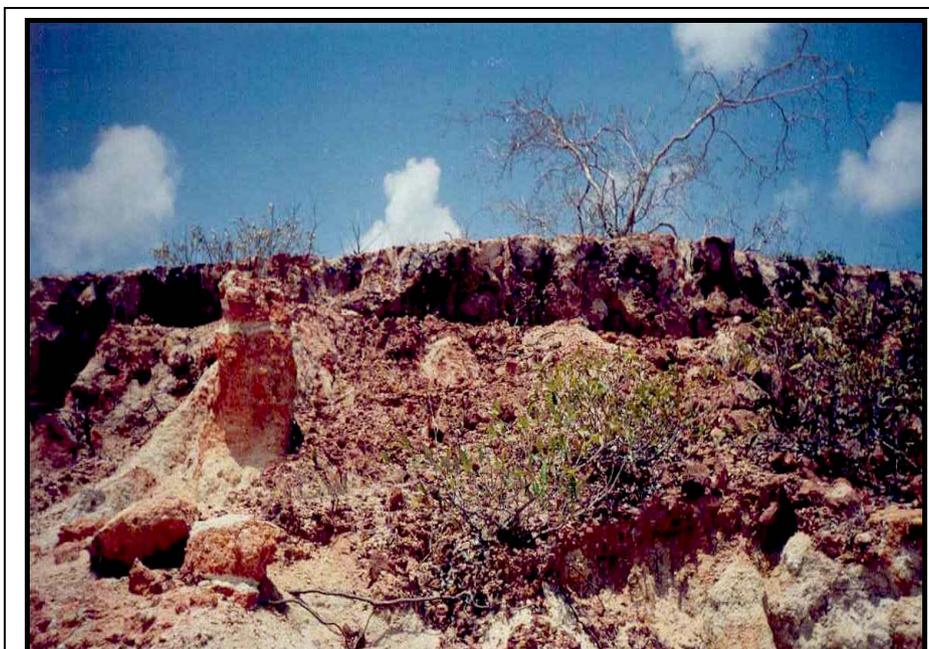


Foto 5.4. Entres as localidades Primavera e Pecém-Ce, ocorrências de Colúvio-Elúvio, confundindo-se, às vezes, com a Formação Barreiras, abrangendo grandes extensões na área e dificultando a delimitação da base da Formação Barreiras.

Observa-se de uma forma mais ampla não só as unidades litológicas aflorantes, mas também as formas e distribuição geográfica das unidades referidas, parâmetros de drenagem e feições estruturais, que certamente influenciam o comportamento dos recursos hídricos tanto no seu aspecto de superfície como no de subsuperfície, no que se refere aos aquíferos da área (Mapa Geológico anexo).

Na sua parte inferior, têm-se esboços dos perfis geológicos entre a Região Costeira de Caucaia-Pecém com direções NNE-SSW. Nestes, observa-se a distribuição da litologia, unidades aquíferas da área com suas peculiaridades hidrogeológicas e a

influência sofrida em função do comportamento tectono-estrutural dos grandes lineamentos da região, através de arqueamentos que controlam as principais drenagens do Rio Ceará, Rio Juá e Rio Cauípe na direção NE.

5.1.2.3 Depósitos Colúvios-Eluviais (TQc)

Estas coberturas, desenvolvidas entre o Terciário e o Quaternário, ocorrem numa distribuição irregular na área, sob a forma de manchas compostas por sedimentos arenosos, areno-argilosos e lateríticos resultantes do intemperismo *in situ* que, segundo Braga *et al.* (1981) e Brandão (1995) recobrem os litotipos do Pré-Cambriano. Sua ocorrência está restrita aos tabuleiros mais aplainados, morfologicamente com suaves ondulações e são normalmente detectados nos cortes das estradas (vide foto 5.4 e 5.5) com boas exposições e, às vezes, confundida com os sedimentos da Formação Barreiras e torna-se difícil a delimitação de seu contato com a citada unidade litológica. Sua coloração é acentuadamente amarelada a avermelhada, exhibe mancha de oxidação em cores variegadas e, em alguns locais, ainda preservam a imagem da rocha originária.

Na área identificam-se coberturas areno-argilosas depositadas entre o final do Terciário e o início do Quaternário que recobrem as unidades estratigráficas mais antigas. Tal afirmativa está embasada na decomposição das rochas alcalinas e em evidências do manto de intemperismo que as recobre. Nas suas essências são constituídas por sedimentos lateríticos inconsolidados a semiconsolidados, mal selecionados, de matriz areno-argilosa, com caulim e limonita dispersos e seixos de quartzo.

As coberturas colúvio-eluviais possuem disposição sub-horizontal com pequena espessura, comumente colonizadas por carnaubais e ocorre também na parte sudeste, no limite da área. A ausência de estratificação, caráter arcoseano, morfoscopia dos grãos de quartzo, a forte presença de minerais micáceos e feldspáticos caracterizam estes sedimentos como imaturos. A preservação original da textura das rochas, ainda que decompostas, das estruturas e texturas gnáissicas e migmatíticas marcam a forte presença destas unidades litológicas na área, quase sempre em afloramentos significativos para sua identificação como unidade imediatamente abaixo da Formação Barreiras.

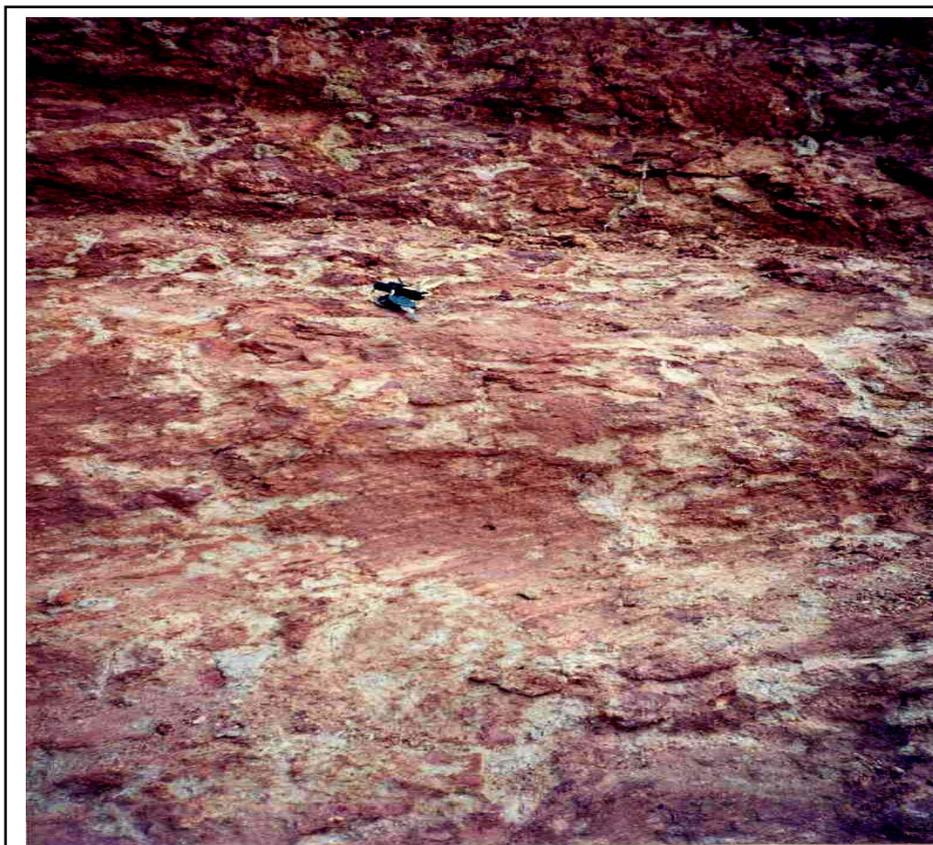


Foto 5.5. Ocorrência de colúvios num corte da CE-421, estrada no sentido Pecem-Taíba. Observam-se na parte superior e inferior do corte, aspectos da caulinação dos feldspatos da rocha proveniente da intemperismo químico, com decomposição dos minerais mais básicos. Numa visão mais geral, um leve desenho da textura original da rocha com bandeamentos gnáissicos migmatizados.

5.1.3 Quaternário

Até meados dos anos setenta, estudo dos depósitos quaternários no Estado do Ceará constituía-se um tema de plano secundário, onde poucos foram os autores a se reportarem sobre o mesmo. Manoel Filho (1970), Beltrão (1970) e Silva & Silva (1970), foram alguns dos pesquisadores que abordaram alguns aspectos relativos a constituição das dunas costeiras e, Morais & Souza (1971) desenvolveram um estudo mais detalhado sobre os depósitos eólicos, consistindo neste período um trabalho mais abrangente sobre o tema.

Na década seguinte, Gava *et al.* (1981) fizeram um breve comentário sobre a forma, distribuição e composição das dunas costeiras e de sedimentos litorâneos. Braga *et al.* (1981) reportaram-se às dunas, reconhecendo a existência de uma diferenciação entre

dois tipos: as paleodunas e as dunas móveis. Referiram-se ainda às *beach rocks*, considerando-as arenitos flúvio-marinhos e emitiram também significativas observações sobre os depósitos fluviais e lagunares.

Foram iniciados mapeamentos enfocando as unidades quaternárias na região, a partir de Paiva & Viana (1985) que geologicamente delimitaram uma porção costeira no município de Aquiraz, Estado do Ceará. Posteriormente, Carvalho & Maia (1990) abordaram o tema em detalhe, pela primeira vez na região, onde trataram as dunas como feições distintas, distribuídas em gerações, associando-as a eventos de flutuações do nível relativo do mar, cujo aspecto foi posteriormente abordado por Meireles (1991) e, detalhado por Maia (1993) e Carvalho (1994).

A partir dessas incursões os estudos dos depósitos quaternários têm sido intensificados na região, adquirindo realce nos projetos envolvendo a região litorânea do Estado Ceará fornecendo novos subsídios à geologia ambiental e hidrogeologia.

O desenvolvimento das unidades quaternárias na região costeira, inclui depósitos de praia, eólicos, lacustres, flúvio-marinhos e *beach rocks*, os quais guardam uma estreita relação com o desenvolvimento fisiográfico da linha de costa.

A atividade eólica tem forte domínio sobre o litoral cearense e é regido pelos ventos SW. Responsável pela presença de campos de dunas, em geral, dispostos sobre a superfície dos Tabuleiros da Formação Barreiras, compõem a feição e os depósitos mais característicos da costa Norte-Nordeste do Brasil e, evidentemente, um segmento litorâneo também representativo da área (Caucaia-Pecém).

Segundo Carvalho (2003), os depósitos eólicos distribuem-se entre três e cinco gerações de dunas e são diferenciadas, principalmente, pelos tipos e formas de ocorrência: a primeira é conhecida pela denominação de “paleodunas”, a segunda e terceira caracterizadas pelas dunas parabólicas, a quarta por eolianitos e a quinta pelas dunas barcanas atuais.

As praias arenosas, amplas e de baixa inclinação, são enquadradas nos tipos dissipativa a intermediária, no conceito de Short & Hesp (1982). O sedimento da face praial é predominantemente composto por areias finas a médias e secundariamente por areias grossas. Cúspides praias são características da face de praia.

Os depósitos flúvio-lacustres também são comuns ao longo da costa cearense, tendo sua origem relacionada à ação do vento no deslocamento de dunas costeiras, que barram os cursos fluviais.

Depósitos fluviais são de pouca expressão na região, em virtude do caráter intermitente dos rios, porém em alguns segmentos da área são mais expressivos na área, principalmente, nas proximidades da Barra do Ceará e Barra do Cauípe, nas faixas de planícies aluviais proximais, onde o caráter meandrante dos rios maiores, Ceará e Cauípe desenvolvem amplas áreas de deposição. Destacam-se também os depósitos flúvio-marinhos, onde proliferam os manguezais localizados nas já citadas localidades. Outro tipo de depósito bastante comum na costa norte-nordestina e na área são os *beach rocks* (rochas de praia), constituindo uma feição tabuliforme, geralmente associada a desembocaduras fluviais, cujas características e origem têm sido abordados por muitos autores, a exemplo de Branner (1904), Morais (1968, 1970), Carvalho & Maia (1991) e Maia *et al.* (1997), entre outros.

Em face da vigente sistematização dos aquíferos na Região Costeira do Ceará, não serão descritos ou conceituados todos os tipos de dunas. Apresentar-se-ão aquelas inseridas no contexto hidrogeológico e geofísico objetivo maior deste trabalho.

5.1.3.1 Depósitos Praiais e Sedimentos da Face de Praia

Os **depósitos de praia** estão distribuídos sob a forma de um contínuo cordão alongado na direção NW compreendido entre as margens do Rio Ceará e a porção imediata do Porto do Pecém e constituem uma faixa dominada pela interação entre os processos marinhos e continentais. Tem como limites o início da maré baixa e a parte basal das dunas móveis. São acumulações de areia de granulação média a grossa constituída de restos de concha e/ou matéria orgânica. Entretanto, ocorre forte presença de cascalhos nas desembocaduras dos rios Ceará, Cauípe e Juá.

De uma forma geral, as praias são planas (variando em média de 50 a 80m de largura) caracterizadas pelo desenvolvimento de formas triangulares e barramento de areias distribuídas entre formas oblíquas e paralelas à linha de costa. As praias são enquadradas, basicamente, nas categorias dissipativa e intermediária, segundo o esquema de Wright & Short (1983), onde os tipos D e C de praias intermediárias são mais comuns.

Nos **sedimentos da face de praia**, Carvalho (2003) avaliou as características texturais dos sedimentos da face das praias dividindo-as entre os períodos de chuva e de estiagem na área. Coletou cinquenta amostras na porção intermediária do estirâncio, durante o período das chuvas e durante o período de estiagem.

Observou que, segundo o tamanho médio dos grãos, predominam nas praias areias finas e médias em proporções equivalentes. As areias grossas são raras e ocorrem sob a forma de pequenas faixas, onde sua concentração está associada aos trechos em erosão ou adjacentes aos canais associadas às correntes de retorno, ou ainda aprisionadas por barreiras naturais formadas por *beach rocks* posicionadas na faixa de praias paralelamente às linhas de costa.

O desenvolvimento de praias compostas por areias predominantemente grossas, foi observado apenas em trechos próximos à localidade de Icaraí e Pecém. Nestes trechos, a praia apresenta caracteristicamente uma maior inclinação do seu perfil e exibe um terraço de baixa-mar bem marcado. Os sedimentos são constituídos por uma areia quartzosa com presença de fragmentos de algas calcárias e seixos de quartzo. Nestes trechos, a linha de *beach rocks* protege a pós-praia formando assim uma espécie de armadilha que aprisiona estas areias grossas. Neste contexto, os materiais finos são transportados enquanto os mais grossos ficam retidos atrás da linha de rochas de praia, explicando assim a grande disparidade entre estas areias grossas e aqueles presentes nas praias vizinhas.

5.1.3.2 Depósitos Eólicos

Estes depósitos na área foram separados em diferentes gerações, tendo como critério básico a geomorfologia dos mesmos e suas relações de superposição, complementados por outros critérios, ligados à cor, teor de carbonato e/ou matéria orgânica, grau de litificação, aspectos texturais e estratigráficos.

Datações radiométricas mostraram-se inviáveis para estes depósitos, em face da indisponibilidade de amostras datáveis por métodos convencionais (carbono 14) e outros. Desta forma, a delimitação das gerações de depósitos eólicos baseou-se no conjunto de características apontadas acima.

No Litoral do Estado do Ceará, o processo de individualização dos depósitos eólicos evoluiu de duas gerações iniciais (Braga et al., 1981; RADAMBRASIL, 1981 e Carvalho & Maia, 1990) para três a partir dos trabalhos de Maia (1993) e Carvalho (1994) e, em seguida, para quatro gerações nos trabalhos mais recentes de Maia (1998) e Carvalho *et al.* (1999), dentre outros.

Na costa noroeste, onde os trabalhos estão inseridos, assinala-se a presença de pelo menos três gerações de dunas. Na costa sudeste deste Estado, os trabalhos realizados

só permitiram a identificação de no máximo de três gerações (Maia, 1993 e Carvalho, 1994). O padrão evolutivo sofre variações significativas que vai depender das características locais, destacando-se a posição da linha de costa em relação às direções de vento, disponibilidade de sedimentos e efetividade do vento.

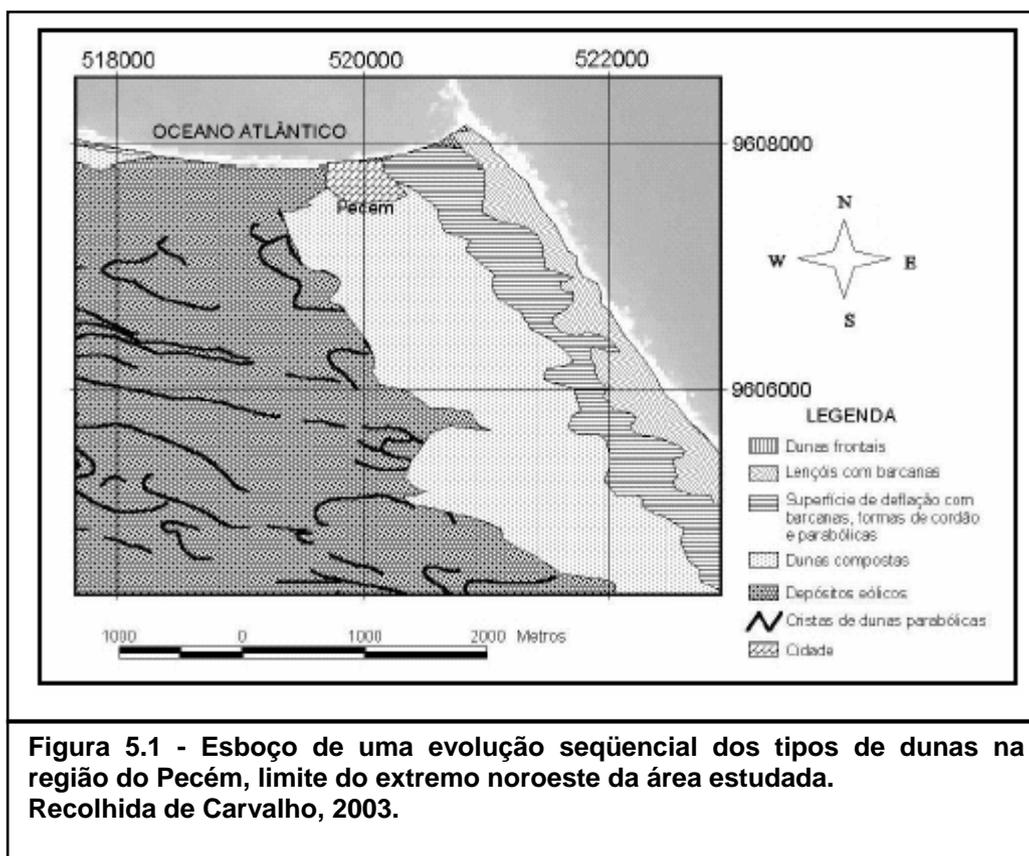
A distribuição dos tipos de dunas na região estudada evolui segundo uma seqüência da praia ao interior do continente, que se inicia por: (1) dunas frontais; (2) pequenos lençóis de areia da ordem de centenas de metros e dunas barcanas; (3) pequenas dunas e fluxos disformes de areia sobre uma superfície de deflação, com eventual formação de pequenas dunas móveis dos tipos barcana e em forma de cordão de sapato ("string") e parabólicas; (4) dunas compostas, constituídas por grandes dunas barcanas e barcanóides cavalgantes, invariavelmente associadas a lençóis de areia da ordem de dezenas de quilômetros quadrados; e (5) estágio final, onde se desenvolvem grandes dunas parabólicas abertas e fechadas ou na forma de *hairpin* (Fig. 5.1).

5.1.3.2.1 Primeira Geração de Dunas

Estes depósitos eólicos ocorrem ao longo da zona costeira da área, sendo identificada como a mais antiga e amplamente conhecida como "**paleodunas**" (Braga *et al.*, 1981 e RADAMBRASIL, 1981). Estão sobrepostas aos sedimentos da Formação Barreiras, em contato direto com o topo desta, em geral, formando camadas expostas na superfície variando de poucos centímetros a dezenas de metros de espessura. As estruturas internas, em geral são de difíceis identificações.

Mais recentemente, na região de Paraipaba, na localidade Lagoinha, Guimarães & Baptista Filho (2001), através do método geofísico *Ground Penetrating Radar* (GPR), colocaram em evidência a existência de algumas estratificações plano-paralelas de baixo ângulo nos sedimentos desta geração de dunas. Sua superfície é bastante dissecada, exibe formas eventualmente onduladas, cobertas por vegetação dos tipos arbustiva e arbórea. Estes depósitos possuem formação de solo bem desenvolvido e são constituídos por sedimentos arenosos, variam de moderadamente a bem selecionados, classificados como areias médias, eventualmente finas e com baixo conteúdo em argila. Quanto a sua composição, os sedimentos da primeira geração de dunas são predominantemente constituídos de grãos de quartzo, areias bem selecionadas, de granulação fina a média, quartzosas e/ou quartzo-feldspáticas, raramente siltosas, com coloração variando de cinza claro e alaranjado no topo

avermelhado na base. Em acessórios ocorrem grãos de turmalina (variedades afrisita e verderita), zircão, monazita e ilmenita.



Representa na área a geração mais antiga de dunas, caracterizando-se pelo desenvolvimento de processos pedogenéticos, com a conseqüente fixação de um revestimento vegetal de porte arbóreo/arbustivo. Morfologicamente, exibem feições típicas de dunas parabólicas, com eixos alinhados segundo a direção E-W, refletindo a predominância dos ventos que sopram do quadrante Leste. Apresentam camadas com espessuras em torno de 15m próximo à linha da costa e podem ocorrer em cotas valores altimétricos mais elevados (Maia 1998).

Para o interior, apresentam-se rebaixadas quase ao nível dos tabuleiros motivado pelo constante retrabalhamento dos ventos, com progressiva redução de espessura e com suas formas dissipadas em algumas áreas.

Carvalho (2003) realizou ensaios granulométricos e morfoscópicos que identificaram grãos quartzosos com uma fração areia média que varia grãos arredondados a sub-arredondados e esfericidade média. Suas superfícies se apresentam foscas e com

raras inclusões de minerais de opacos. Possuem seus poros menores preenchidos com óxidos hidratados de ferro, quase que iniciando o processo de limonitização.

Seu índice de clasticidade situa-se na faixa de 2 mm (-1fi), superior ao verificado para as outras gerações de dunas. Isto a pode significar que os sedimentos desta geração estariam associados a níveis estratigráficos mais inferiores dos depósitos eólicos, que de acordo com Glennie (1970), explicaria um alto índice de clasticidade.

A coloração de seus sedimentos varia entre tons avermelhados e amarelados e tem levantado suposições quanto a sua origem.

Segundo Walker (1979) a distância de transporte experimentado pelos sedimentos durante a formação de dunas em desertos, associadas aos parâmetros tais como teor de umidade, disponibilidade de ferro, quantidade e tipos de minerais de argila aderidos aos grãos, junto com processos de precipitação de óxido de ferro, constituiriam os fatores responsáveis pela cor avermelhada dos sedimentos eólicos como um todo.

O fator tempo destes depósitos de primeira geração pode ser a explicação mais adequada à coloração avermelhada dos mesmos. Restrições, entretanto, devem ser observadas nestas generalizações. A coloração avermelhada pode também ser creditada às características dos sedimentos na área fonte.

Na área de estudo, as dunas constituídas de sedimentos provenientes da Formação Barreiras, apresentam uma coloração avermelhada e, no entanto, não apresentaram um longo transporte.

5.1.3.2.2 Segunda e terceira gerações de dunas

Estes dois depósitos de dunas, neste trabalho, apresentam muitas características em comum. Serão tratados em conjunto e diferenciados basicamente por critérios geomorfológicos e estratigráficos, nos seus posicionamentos espaciais, nas suas fisiografias e por suas relações de contato.

Os de segunda geração correspondem a uma seqüência de maior distribuição na área, compostos por formas de leito que muitas vezes experimentaram processos de deflação.

As de terceira geração caracterizam-se pelo aspecto transgressivo desenvolvido sobre os depósitos anteriores e se apresentam mais bem preservados.

O contato em perfil entre estas duas gerações, em algumas situações, a exemplo da região do Pecém, expressa claramente um hiato deposicional bem marcado pelas concentrações ferruginosas, pelo solo húmico e restos vegetais.

Em planta, esta relação de contato pode ser observada em imagens de satélite e fotografias aéreas (Fig.5.2).

Estas gerações são representadas por formas parabólicas e suas cristas são retilíneas nos tipos aberta e fechada (*hairpin*). A terceira geração apresenta os contornos mais claros. As duas gerações apresentam de uma forma geral, dunas com o eixo maior orientado direção N270°. Ocorrem em formas isoladas ou na forma de campos compostos. As mais altas, de terceira geração, alcançam mais de 30m de altura. As formas rebaixadas das de segunda geração caracterizam seus limites externos e se apresentam sob a forma de arco em corte transversal, enquanto as dunas de terceira geração, caracteristicamente do tipo “grampo de cabelo”, exibem uma geometria em corte transversal mais abaulada. Há deslocamentos dos depósitos da segunda geração a uma distância máxima de 10 km no interior do continente, em relação o limite de praia, enquanto as de terceira geração alcançaram apenas 6 km.

As colorações amarelada à avermelhada clara e vermelha com concreções ferruginosas caracterizam mais as dunas de segunda geração. As dunas da terceira de geração exibem processos pedogenéticos (Foto 5.6), compondo um solo de horizonte (A) de até 15 cm de espessura e de uma coloração cinza esbranquiçada. Na seqüência abaixo deste horizonte os sedimentos mudam e apresentam uma cor amarelada

Estas gerações são constituídas de sedimentos compostos por areias médias a finas, variando de bem a moderadamente selecionadas, com índice de clasticidade de 1,5mm (-0,5 Φ). Possuem uma composição básica quartzosa, com turmalinas, ilmenita, monazita e zircão como acessórios mais comuns. Observam-se, em algumas amostras, a presença de raros fragmentos carbonáticos, a exemplo de carapaças de foraminíferos e micro-gastrópodes, além de fragmentos de algas e o mínimo de conteúdo carbonático.

De modo geral, as estruturas internas sedimentares estão praticamente ausentes ou imperceptíveis, ocorrendo somente nos sedimentos da terceira geração de dunas, nas

faixas onde se desenvolvem os níveis lateríticos, que normalmente são responsáveis pela preservação de estruturas sedimentares.

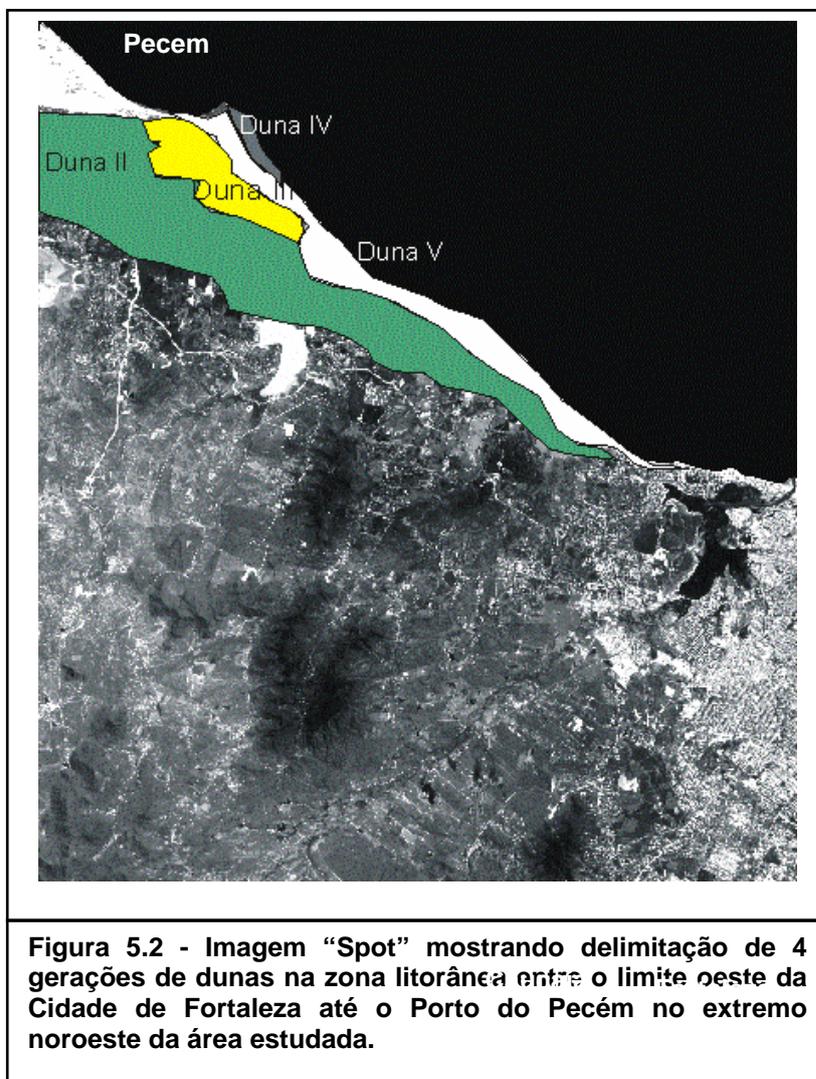


Figura 5.2 - Imagem "Spot" mostrando delimitação de 4 gerações de dunas na zona litorânea entre o limite oeste da Cidade de Fortaleza até o Porto do Pecém no extremo noroeste da área estudada.

Carvalho (2003) fez medidas das atitudes destas estratificações em onze pontos de três cortes de estrada intersectando transversal e obliquamente uma série de dunas parabólicas na localidade do Pecém, onde são mais bem expostas e encontrou valores médios das atitudes variaram em torno de $S05^{\circ}E$ $20^{\circ}SW$ para os flancos e $S35^{\circ}E$ $35^{\circ}SW$ para a face de sotavento das dunas.



Foto 5.6 - Região de dunas próxima à curva da Estrada Velha em direção zona do Porto do Pecém, com a implantação de processos pedogenéticos nas dunas de terceira geração com desenvolvimento de gramíneos e pequenos arbustos. Ao fundo da foto observam-se a presença de dunas de quarta e de quinta geração

5.1.3.2.3 Quarta geração de dunas

Compostas por uma unidade de aspecto geomorfológico e características litológicas especiais, distribuídas ao longo de quase toda a costa noroeste do Estado do Ceará, são constituídas de eolianitos definidos como depósitos eólicos formados por areias quartzosas biodetríticas cimentados por carbonato de cálcio.

Esta unidade é formada por corpos tabulares, invariavelmente estratificados, que apresentam variado grau de litificação, desde friáveis a fortemente litificados ou cimentados por carbonato de cálcio.

A superfície destes depósitos exibe formas de relevo essencialmente produzidas por abrasão eólica, destacando-se o aspecto ruiforme. As estruturas sedimentares internas são comuns, normalmente com estratificações plano-paralelas, tangenciais e eventualmente do tipo acanalada ou festonada. Estas estruturas nas dunas atuais

estão presentes basicamente nos campos de dunas compostas e complexas, aspecto característico de um estágio mais avançado de evolução dos depósitos eólicos da região. Os depósitos eólicos portadores destas estruturas sedimentares possuem um estágio de evolução onde domina a presença de formas barcanóides migrando sob a forma cavalgante.

Geralmente estão assentadas sobre os depósitos eólicos de terceira geração e, raramente, sobre as paleodunas e sedimentos da Formação Barreiras. Existe ainda, a possibilidade de repousarem também sobre terraços marinhos.

Os seus sedimentos são de granulometria variada, distribuída entre areia grossa e fina e sua composição predominante é quartzosa com frações subordinadas de minerais pesados, turmalinas, feldspatos e grão carbonáticos de origem orgânica marinha.

O cimento é composto, principalmente, por calcita espática. A porosidade é predominantemente intergranular distribuída entre primária e secundária por dissolução do carbonato de cálcio.

O posicionamento destes depósitos, distribuídos adjacentes e de modo longitudinal ao contorno da forma espiral da linha de costa, está embasado na análise da dinâmica atual, considerando parâmetros como geometria da linha de costa e padrão de direção do vento.

5.1.3.2.4 Quinta geração de dunas

Está representada pelos depósitos eólicos atuais e os formados durante o Holoceno recente. Podem ser encontrados em plena formação nos dias atuais. Estão incluídos nestes depósitos, tanto aqueles formados pelo retrabalhamento de dunas mais antigas, como os desenvolvidos diretamente a partir de sedimentos transportados da face de praia atual.

Ocorrem como dunas frontais, pequenos lençóis de areia da ordem de dezenas a centenas de metros quadrados e dunas barcanas, além das formas de cordão de sapato e parabólicas móveis. Os dois tipos mais expressivos quanto as suas dimensões são as dunas compostas e complexas. As primeiras são constituídas por grandes dunas barcanas e barcanóides cavalgantes. As últimas correspondem a uma combinação de dunas coalescentes da ordem de dezenas de quilômetros quadradas, eventualmente associadas a *blow outs*. Nestas dunas, é comum a presença de sedimentos provindos do retrabalhamento de dunas de outras gerações.

As dunas frontais são especialmente desenvolvidas ao longo de um trecho de praia marcado por transporte eólico paralelo e oblíquo à praia.

Normalmente, estes depósitos são compostos por areias brancas, de granulação predominantemente fina a média. Via de regra, são areias bem selecionadas embora, ocasionalmente, apresentem seleção moderada. O grau de arredondamento dos grãos situa-se na faixa de angulosos a subarredondados e exibem baixa a média esfericidade. Na área estudada, as dunas barcanas isoladas atingem alturas médias de 25 m, mas quando conjuntas e cavalcando umas sobre as outras, formam dunas compostas e complexas que ultrapassam os 45 m de altura.

5.1.3.3 Depósitos Lacustres

São ambientes amplamente distribuídos ao longo da planície costeira da área e sua origem é creditada geralmente à interrupção ou barramento de cursos fluviais pela migração de campos de dunas.

As planícies lacustres desenvolvidas estão posicionadas à frente das faixas de deslocamento das dunas ou ocorrem ocupando espaço entre elas. A sedimentologia dos depósitos destes ambientes, conseqüentemente, reflete um caráter misto de sedimentos fluviais, eólicos e lacustres, onde a presença de depósitos de carapaças de algas diatomáceas é uma característica marcante.

Os depósitos de carapaças destas algas são compostos exclusivamente por espécies do tipo penada (Carvalho, 1994), que atesta sua origem continental. A ocorrência destes depósitos associados às dunas costeiras é comum e entre estes ambientes destacam-se os relacionados a pequenos cursos fluviais ou a processos de deflação eólica que, ao atingir o nível do lençol freático, favorecem à formação de lagoas interdunares ou os conhecidos localmente como “açudes hidrostáticos”.

5.1.3.4 Depósitos Fluvio-Aluvionares e de Mangues

Ocorrem sob a forma de faixas alongadas de sedimentos, estreitas e sinuosas e depositadas nas calhas dos rios Ceará, Juá, São Gonçalo e Cauípe com um condicionamento estrutural predominantemente orientado segundo NE e NNE. Iniciam-se no interior sobre o cristalino do embasamento e obedece à pendência dos flancos do arqueamento do proterozóico superior na região e se alargam progressivamente no

sentido da zona litorânea, onde são seccionadas pela linha da costa. Após sua deposição, participam de um ambiente misto, juntamente com os ambientes flúvio-marinhos próximos às desembocaduras dos rios, onde seus cursos fluviais são caracterizados por um comportamento sazonal apresentando caráter intermitente.

As aluviões, litologicamente, são compostas por areias puras e cascalho, areias argilosas e argilas. As argilas são abundantes, nas calhas dos rios e, às vezes, englobam partes dos sedimentos colúvio-eluviais durante o seu período de formação. São detríticas, possuem boa plasticidade, cores variadas e constituídas predominantemente por caulinita e se alojam nas planícies de inundação. Nos cursos médios dos rios, estes depósitos aluviais são constituídos essencialmente por areias grossas, puras com seixos e calhaus, enquanto que nos baixos cursos predominam areias mais impuras, com elevados teores de argila e silte escuro.

As pequenas vazões dos rios favorecem a uma maior penetração das marés rio acima. Nestes ambientes é marcante a penetração da águas do mar pela ação da oscilatória das marés e se desenvolvem condições propícias à proliferação de vegetação de mangue. Ao longo dos baixos cursos dos citados, a migração das dunas provoca o aterramento de mangues e a formação de uma barra interna (próxima à desembocadura) modificando a configuração da foz do rio e estabelecendo erosão nas margens anteriormente dominadas por depósitos lamosos característicos de ambiente de manguezal. No sentido de melhor viabilizar análise de caráter morfo-estrutural, elaborou-se a coluna estratigráfica e geológica da área (Fig. 5.3).

COLUNA GEOLÓGICA LOCAL				
	UNIDADE GEOLÓGICA	LITOLOGIA		
CENOZÓICO	QUATERNÁRIO			
	Qa	Depósitos Fluvio-Aluvionares	Sedimentos arenosos, argilo - arenosos e siltes, podendo conter matéria orgânica; engloba depósitos fluviais argilosos.	
	Tc	Coberturas Colúvio-Eluviais	Sedimentos areno - argilosos, semiconsolidados, coloração amarelo-avermelhada com concreções ferruginosas. Matriz caulínica, com grãos de quartzo, feldspato, micas e opacos alterados.	
	TERCIÁRIO			
	Tb	Formação Barreiras	Arenitos de granulação fina a média com tons avermelhados, matriz argilosa, semiconsolidados, com níveis conglomeráticos e concreções lateríticas.	
	Tλ	Rochas Alcalinas	Fonólitos, traquitos e tufos - Rochas vulcânicas sob forma de necks. (Feldspatos, nefelina, anfibólio, opacos e caulinita).	
PROTEROZÓICO	SUPERIOR	Ps_{r1}	Granitos	Ps _{r1} - Granitóides cinza-claros, foliados, com frequentes enclaves de biotita gnaisses, hornblenda gnaisses e anfibolitos (corpos sintectônicos).
	INFERIOR	Pign-mg	Complexo Gnáissico-Migmatítico	Biotita-gnaisses, total ou parcialmente migmatizados, com muscovita, anfibólio, sillimanita e granada. Intercalações de corpos de migmatitos, de quartzitos e lentes de calcário. Diques de pegmatito e de rochas básicas (rochas parade-rivadas).
		Pigr-mg	Complexo Granitóide-Migmatítico	Ortognaisses, granitóides e migmatitos, com microclina, biotita e hornblenda. (rochas ortoderivadas)

Figura 5.3 – Coluna Estratigráfica da Região de Caucaia e Pecém, Estado do Ceará. Fonte Modificada da CPRM (1995) – Mapa Geológico da R.M.F. Texto Explicativo.

5.2 Geomorfologia da Região Litorânea de Caucaia-Pecem-Ce

Observando-se a sistematização das unidades morfológicas do Estado do Ceará, depreende-se a necessidade complementar de incluir aspectos ligados à idade de eventos tectônicos, deposicionais, erosivos e suas influências na distribuição das unidades fundamentais na superfície. A satisfação dessas exigências contribuirá em muito com setores técnicos da geologia aplicada e econômica, fundamentalmente, com a hidrogeologia, para delinear uma melhor distribuição dos fenômenos ligados à circulação, acúmulo de água superficial e subterrânea na região. Os eventos têm se mostrados difíceis de serem assimilados, em função da carência de dados e da complexa evolução morfogenética da região. Observa-se que as primeiras formas de sistematização foram no sentido de propor unidades de relevos quase somente do ponto de vista cartográfico e de realizar uma divisão do relevo em unidades, províncias ou domínios, relacionados à cronologia das formações fundamentais e aos processos morfodinâmicos a que foram submetidos.

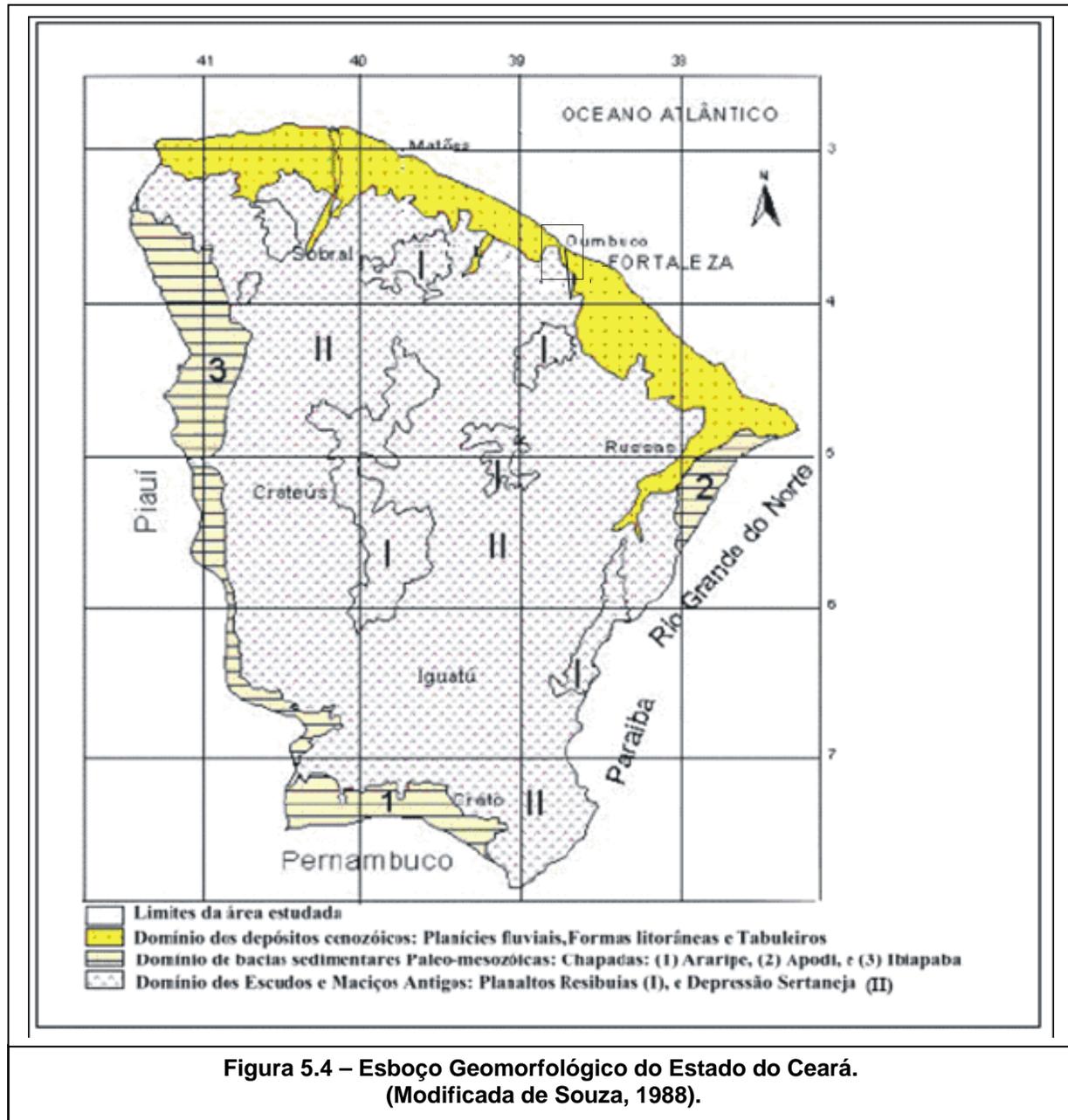
No contexto acima, Santos *et al.* (1972) foram pioneiros, definindo cinco “Domínios Morfológicos”, subdivididos em dez compartimentos de relevo, produzindo assim uma delimitação entre grandes e pequenas unidades.

Souza (1983 e 1988), baseado em aspectos tais como estruturação geológica e dinâmica morfogenética, dividiu a morfologia da região, sugerindo uma nova classificação para as unidades morfo-estruturais, ampliando o conceito de grandes unidades, dividindo-as em unidades menores ou subunidades, ressaltando critérios de posicionamento cronoestratigráfico das litologias e suas relações com características morfodinâmicas predominantes (Fig. 5.4).

Esta classificação mostra uma compartimentação geomorfológica caracterizada por unidades bem definidas e desenvolvida em: (1) Domínio dos depósitos sedimentares cenozóicos, incorporando as unidades de planícies fluviais, formas litorâneas e dos Tabuleiros Pré-Litorâneos; (2) Domínio das bacias sedimentares fanerozóicas, incorporando as unidades da Chapada do Apodí, Chapada do Araripe e *Planalto da Ibiapaba* e (3) *Domínio dos escudos e maciços antigos*, incorporando os *planaltos residuais* e a *depressão sertaneja*.

Esta classificação resultou numa proposta mais concisa, que delimita melhor as unidades geomorfológicas, apesar de alguns aspectos relacionados aos depósitos quaternários

atuais representarem um complicador na análise das unidades. Isto ocorre pelo fato de algumas feições quaternárias estarem distribuídas sobre todas as outras unidades, merecendo um desmembramento em unidades quaternárias.



Os *maciços antigos* são representados por morfologias de altitudes que chegam a ultrapassar na área os 600m, representados pelo complexo serrano do Camará, Conceição e Juá, ao sul da zona litorânea de Caucaia e pelo Serrote do Bico Fino a sudoeste da área, destacando-se assim do nível aplainado do sertão. Segundo Souza et

al, (1979), representam verdadeiras “ilhas” de umidade no contexto do semi-árido, desenvolvidas sob morfogênese química, com sua evolução associada a processos de dissecação do relevo. São feições desenvolvidas pela ação dos processos morfodinâmicos sobre as unidades predominantemente Pré-Cambrianas.

As cristas quartzíticas, pequenos maciços residuais ou “*inselbergs*”, do domínio dos Escudos e Maciços Antigos, caracterizam-se como forma de relevo positivos resultantes do trabalho seletivo dos processos de erosão na superfície do embasamento, principalmente em função do arqueamento do proterozóico superior responsável pelo desenvolvimento pelas grandes drenagens da área na bacia do Cauípe, Juá e Ceará. Desses processos resultaram morros ou cristas isolados, geralmente desprovidos de vegetação ou recobertos por caatinga de porte arbustivo, que se destacam da superfície da depressão sertaneja (Souza, 1988). A altimetria destas unidades é um fator limitante da incidência de chuvas mais abundantes (Souza, 1988; 1999).

A *depressão sertaneja* representa segundo Souza *et al*, (1979) e Souza (1988), a unidade de maior extensão geográfica do Estado, geralmente está ligada à ocorrência de rochas paraderivadas e responde por cerca de 60% do território cristalino da região de Caucaia e Pecém. Constitui uma superfície plana a suavemente ondulada, na área de estudo e está assentada adjacente aos grandes planaltos, sotoposta ou mesmo encaixada entre os planaltos sedimentares, com níveis altimétricos variando entre 100 e 350m. Segundo Souza *et al*, (1999), abrange os setores de contato entre o embasamento cristalino e os sedimentos da Formação Barreiras, transições entre os sertões e os tabuleiros, sem apresentarem rupturas topográficas nítidas.

Localmente, a morfologia do embasamento apresenta uma superfície plano-ondulada, com elevações maiores no extremo sudoeste da área, sustentadas pelos corpos migmatíticos e na porção centro-oeste pelos maciços ou planaltos residuais (Fig. 5.4) esculpidos nas unidades granitóides e granitóide-migmatítica.

Na porção leste /sudeste da área estudada, os afloramentos migmatíticos, com altitudes de mais de 300m, destacam-se da planura geral e ondulações suaves do embasamento gnássico-migmatítico, formando cristas residuais lineares e *inselbergs* (Fig. 5.4).

Algumas litologias de composição quartzítica produzem cristas retilíneas e/ou dobradas de pequenas dimensões. As maiores expressões geomorfológicas são definidas pela serra de Uruburetama, com altitudes que ultrapassam os 600m, constituindo um exemplar dos maciços cristalinos úmidos ou planaltos residuais, onde os índices de precipitação

são mais elevados. As unidades geomorfológicas desenvolvidas sobre estas litologias, diminuem gradativamente em altitude em direção ao mar até serem cobertas por depósitos sedimentares, a exceção de algumas cristas residuais e *inselbergs* que, algumas vezes, afloram ao longo da linha de costa.

Os relevos possuidores de uma superfície plana a suavemente ondulada na área com pendência geral no sentido do oceano, em função de seu assentamento sobre o complexo serrano do Camará e outros, representam *Tabuleiros Pré-Litorâneos* no Município de Caucaia e São Gonçalo do Amarante. Nas flexões do alto estrutural de Fortaleza a superfície dos tabuleiros Pré-Litorâneos é constantemente entrecortada por cursos fluviais (já citados) de padrão dentrítico a retangular com direção geral NE. Desenvolvem meandros em cursos fluviais mais senis e, muitas vezes, servem de substrato ao desenvolvimento de pequenos interflúvios tabuliformes ligeiramente abaulados de lagoas, tais como Lagoa do Poço, Damião, Pajuçara, do Tapaca, Banana, do Tanupapa e Lagamar ou Lagoa do Cauípe. A maioria obedece a um lineamento NW e o restante S-N. Geralmente, iniciados nos flancos das escarpas de *inselbergs*, estendem-se até os limites da linha de costa, às vezes, truncada pela ação das ondas, os tabuleiros desenvolvem falésias costeiras com desníveis de cotas que superam 20m. comumente se apresentam sob forma de rampa com declive suave em direção ao oceano, cujo taxa não ultrapassa os 5% e se constitui num típico *glacis* de acumulação.

O relevo litorâneo é caracteristicamente representado na área pelos campos de dunas, sobrepostos em sua grande maioria à superfície dos Tabuleiros Pré-Litorâneos, que representam a feição mais marcante da porção costeira estudada.

As superfícies eólicas desenvolvem na área feições peculiares representadas por: (I) terraços em forma de amplos lençóis de topos planos a levemente ondulados; (II) as paleodunas, com sua forma plana a suavemente ondulada e (III) os campos de dunas compostas com superposições de formas transgressivas. As dunas citadas são representadas pelos tipos fixos e móveis, que se deslocam sobre os platôs da Formação Barreiras ou das paleodunas. A mobilidade destes corpos eólicos assume importância ecológica fundamental para o desenvolvimento do padrão da drenagem local e da formação de lagoas costeiras.

Morfologicamente, as dunas na área pesquisada se sobressaem às demais unidades, possuem formas isoladas e lineares que acompanham toda porção costeira e/ou campos com dunas compostas com alturas que atingem mais de 40 m. Contribuem com os

ecossistemas adjacentes, uma vez que, constituem os elementos condicionantes da drenagem e formam barragens naturais que acumulam águas superficiais conhecidas como “açudes hidrostáticos” ou lagoas interdunares.

Nas zonas baixas do litoral, os cursos fluviais estão sujeitos às influências das marés, invasão de água salina do mar, principalmente, nos dos rios Ceará, Juá e Cauípe, onde se desenvolvem planícies flúvio-marinhas, com a proliferação comum dos manguezais dispostos ao longo das calhas e próximos das embocaduras fluviais, obedecendo a um traçado eventualmente imposto pelas das dunas. Normalmente, estão perpendiculares à linha de costa e/ou variam de maneira oblíqua onde há intensa interferência dos depósitos eólicos, conforme se observa na imagem de satélite (Foto 5.7).

As planícies flúvio-marinhas desenvolvidas na área estudada são de porte acentuado, associadas às embocaduras dos maiores rios, formadas pela deposição de sedimentos com predominâncias argilosas, ricas em matéria orgânica, onde se desenvolve vegetação de mangue e são caracterizados por serem formados pela ação de processos continentais e marinhos.

Planícies flúvio-lacustres, com origem relacionada à ação do vento no deslocamento de dunas costeiras são comuns barrando os cursos fluviais que lhes originaram.

A interseção dos pacotes sedimentares dos Tabuleiros Pré-litorâneos na área estudada, pela atividade abrasiva marinha gera falésias dos tipos inativas, em Cauípe, onde produzem desníveis que variam entre menos de um até mais de seis metros de altitude, resultado de eventual erosão anterior da Formação Barreiras. Estas feições são esculpidas em sedimentos eólicos litificados (eolianitos), bem como em afloramentos do Embasamento Pré-Cambriano.

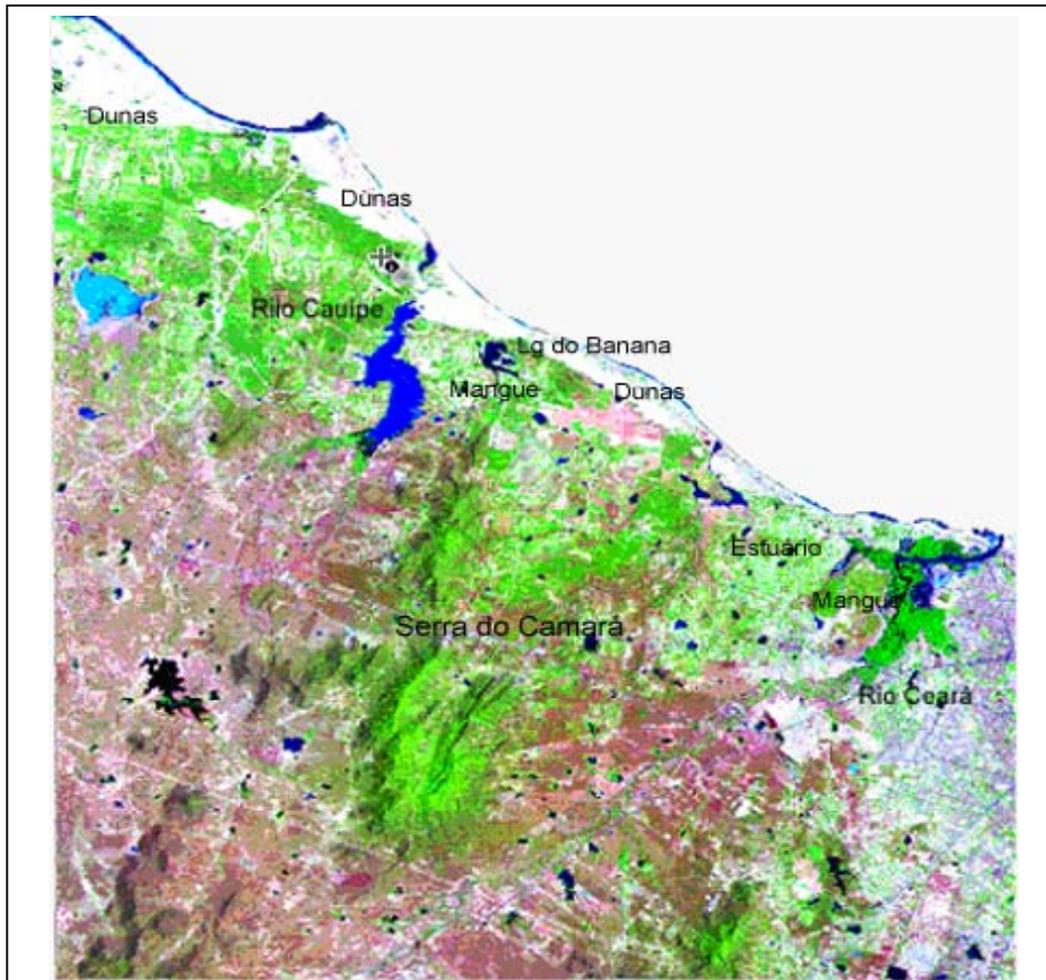


Foto 5.7 – Imagem TM – Landsat 7 – 345, mostra as zonas baixas do litoral, os cursos fluviais sujeitos às influências das marés, invasão de água salina do mar, principalmente, nos dos rios Ceará e Cauípe, onde se desenvolvem planícies flúvio-marinhas e a proliferação comum dos manguezais nos principais estuários desses rios.

Este processo erosivo nas falésias gerou plataformas de abrasão, com eventuais construções de paredões de recifes arenosos variados, paralelos e/ou perpendiculares à linha de costa, mar adentro, alcançando mais de 1.000m de extensão.

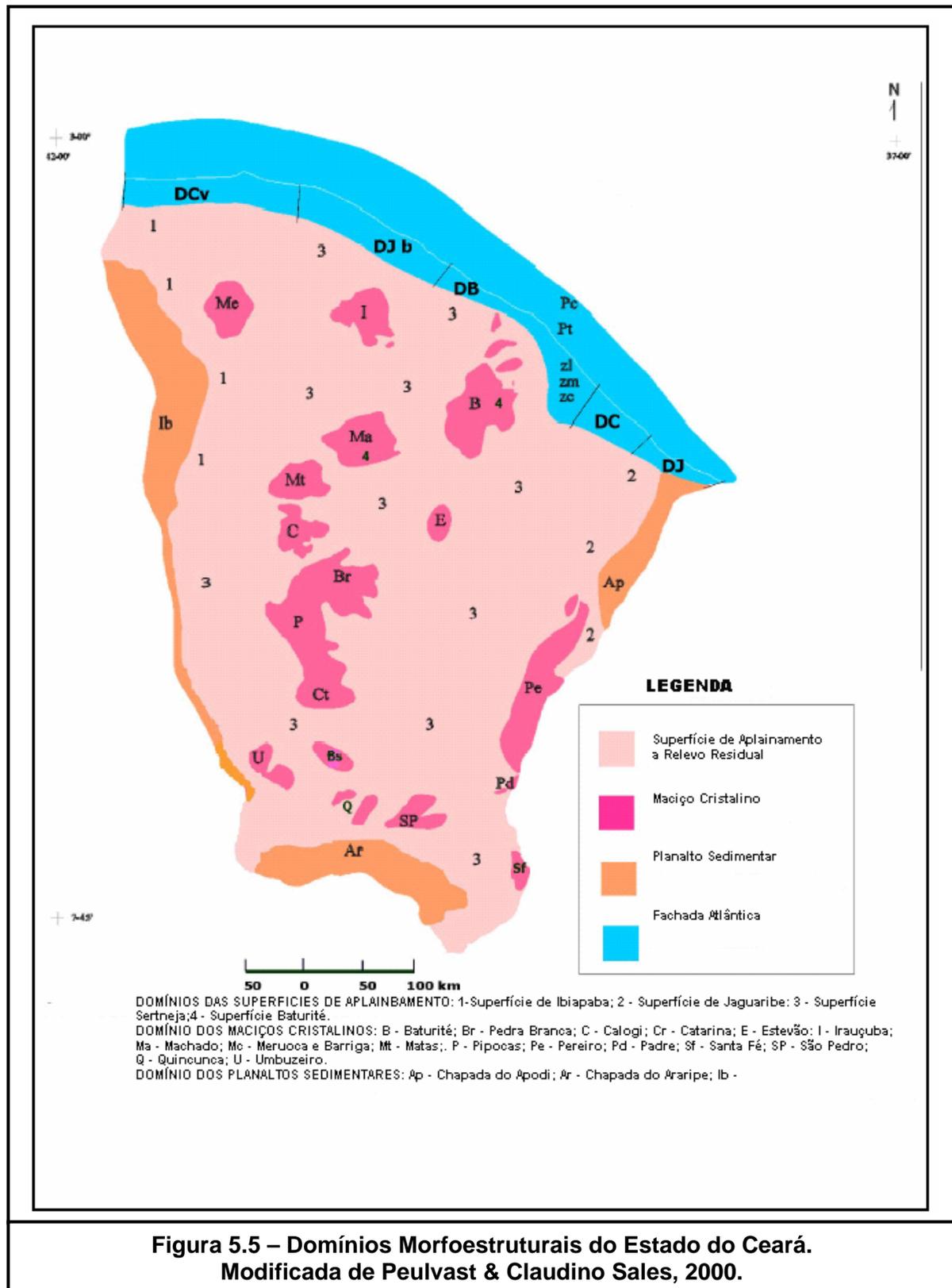
As *Planícies fluviais* desenvolvidas na área são caracterizadas pelas condições climáticas e pela intermitência dos rios. Apresentam relevos mais baixos e ocorrem sob a forma de faixas estreitas de acumulação, quando situadas no domínio das rochas cristalinas e mais largas quando repousam sobre depósitos sedimentares, gerando terraços rasos e de pequenas larguras. Apenas os rios que possuem maior escoamento atingem larguras de mais de 10 km nas áreas de várzeas (Souza, 1988b). Localmente, os depósitos fluviais desenvolvem vales agudos e planícies estreitas. Apenas os maiores cursos fluviais,

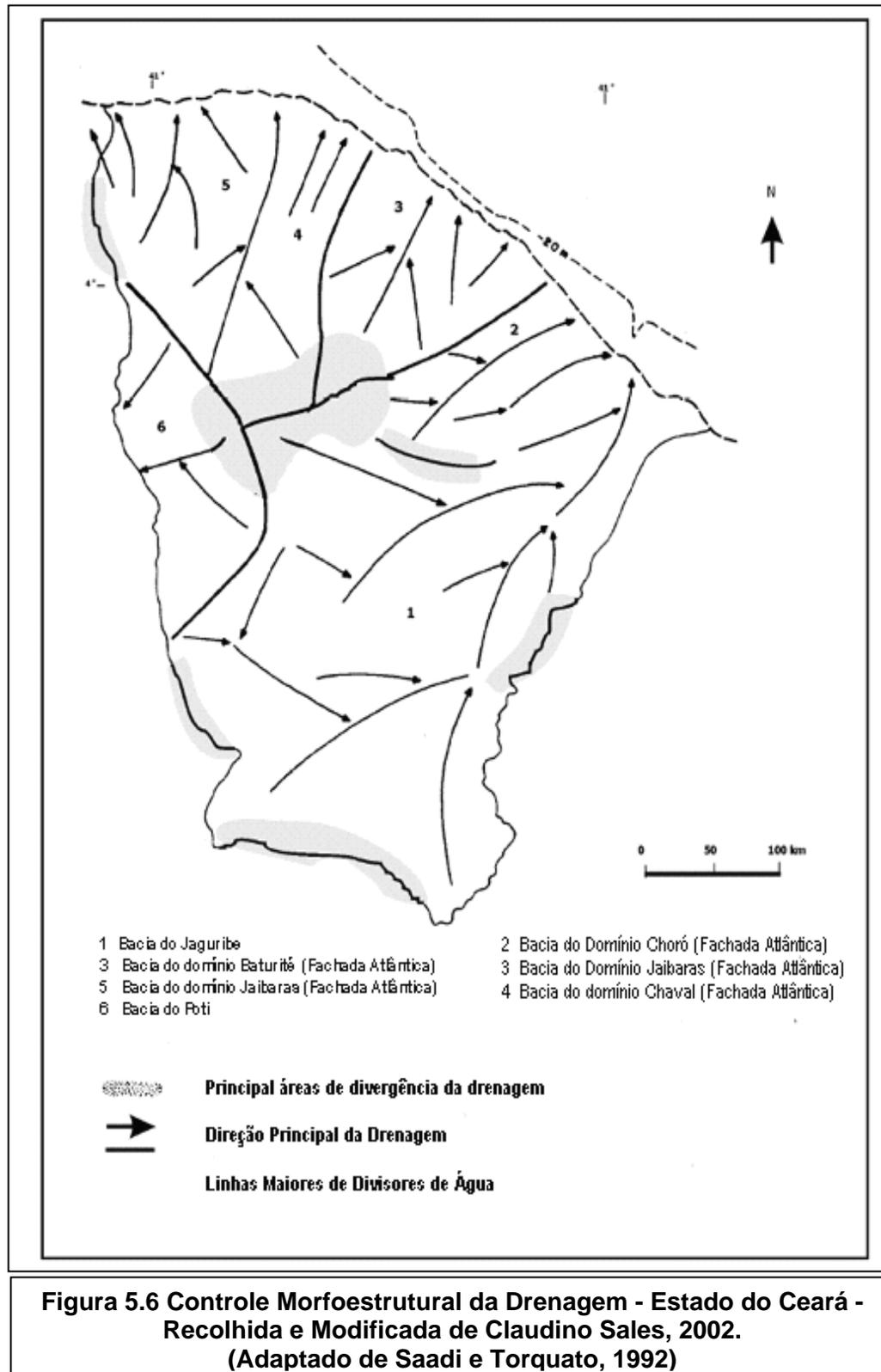
principalmente o do Rio Ceará, geram planícies de inundação mais amplas e com vales meandранtes de muitos cursos abandonados.

Recentemente, Claudino Sales (2002) apresentou um novo estudo sobre a Evolução Geomorfológica da Zona Costeira do Estado do Ceará, estabelecendo novos domínios morfo-estruturais (Figura 5.5), classificando-os em: (I) Domínios de Superfícies de Aplainamento; (II) Domínios de Maciços Cristalinos; (III) Domínios de Planaltos Sedimentares; e (IV) Domínio de Fachada Atlântica. Subdividiu este último em subdomínios: Jaguaribe, Choró, Baturité, Jaibaras e Chaval, Atlântica, com orientação geral, SW-NE em mais de 150 km do interior até à Região Metropolitana de Fortaleza. O subdomínio do Baturité é responsável na área por pequenas parcelas de maciços já mencionados, tais como Serra do Camará, Conceição e Serrote do Bico Fino, com menores medidas e separadas um dos outros através de porções niveladas da chamada Superfície Sertaneja. Em complementação, apresentou as chamadas Zonas Morfológicas da Fachada Marítima (Figura 5.6) com a seguinte subdivisão: Zona Costeira *Strict Sensu*, Zona Marítima, Zona litoral e Zona da Plataforma Continental.

Abaixo do Maciço de Baturité existem duas zonas litorâneas aplainadas formadas essencialmente de quartzitos onde se situam o Porto do Mucuripe em Fortaleza e o Porto do Pecém na Cidade de Pecém-Ce.

Do ponto de vista hidrogeológico, observa-se uma contribuição substancial, no que refere a uma compartimentação em domínios morfoestruturais da fachada marítima do Litoral do Estado do Ceará (figura 5.6), com uma visão distributiva dos depósitos ali existentes entre o Pediplano Sertanejo e a Plataforma Interna, acentuando um controle morfo-estrutural da drenagem com direções dos principais divisores de água do Ceará. Sistematiza e coloca a área estudada numa compartimentação morfológica de eventos do Domínio do Baturité e sua fachada marítima correspondente (figura 5.7)





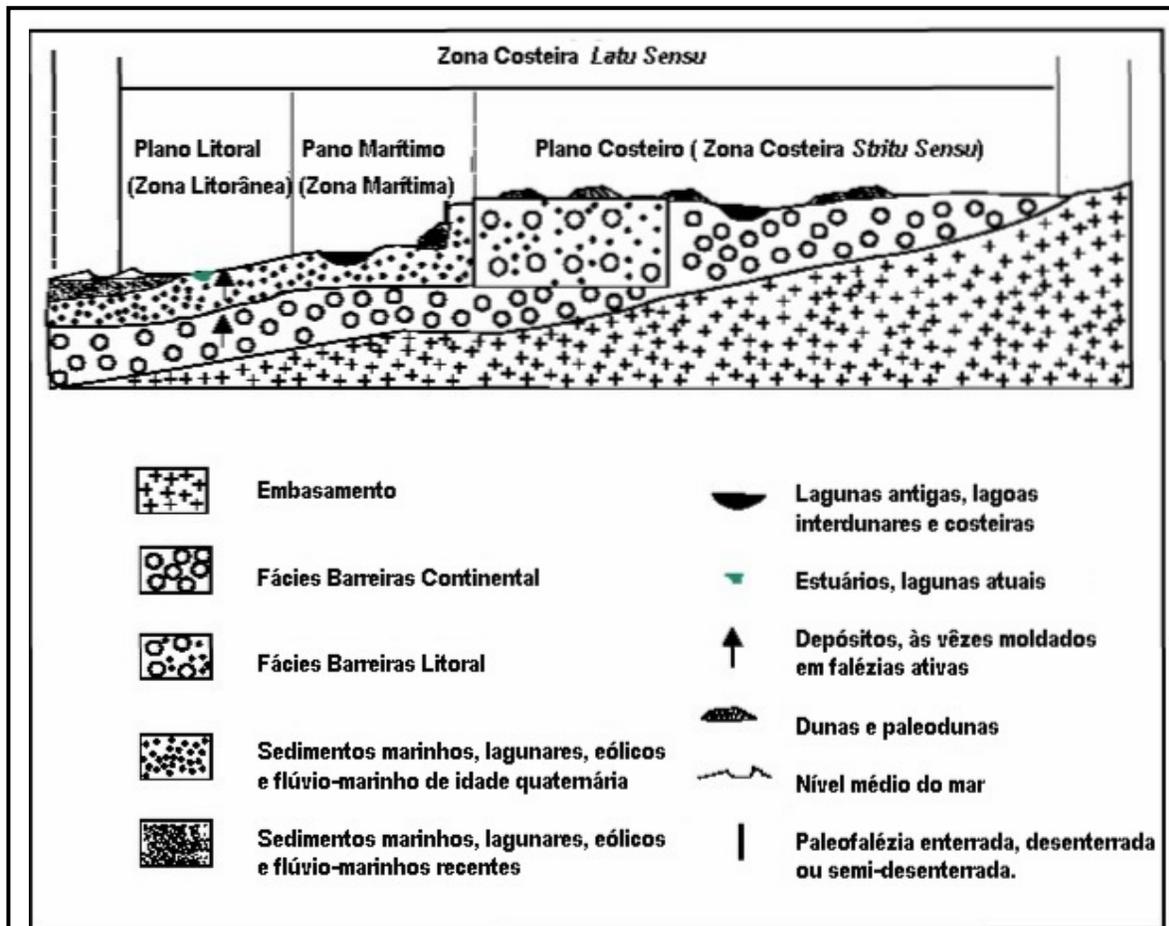


Figura 5.7 Domínios Morfológicos da Fachada Marítima. Recolhida e Modificada de Claudino Sales, 2004.

5.3 Aspectos Tectono-Estruturais na Região de Caucaia e Pecém-Ce

Em âmbito regional, muito se tem observado e despertado grande interesse sobre o que acontece nos entremeios tectono-estruturais da Região Costeira do Nordeste do Brasil. Deve-se, evidentemente, ao fato de que as grandes concentrações humanas têm migrado para esta região e também aumentadas à procura de soluções geológicas aplicadas à resolução de conflitos ambientais. O interesse tem sido maior, uma vez que, o desconhecimento de como se comportam os bens de consumo frutificados pela hidrogeologia diante do arcabouço estrutural do subsolo da região abrangida tem causado grandes prejuízos à comunidade suplicante.

A complexidade se estabelece ocasionada por eventos que tiveram seu ápice no Proterozóico Superior e prolongamentos no Terciário com o evento do Vulcanismo Alcalino estudado por Almeida (1958), sugerindo que o magma teria atingido a superfície através de grandes lineamentos, durante uma reativação tectônica no Terciário.

Autores mais recentes têm preocupações com os mecanismos de transporte de sedimentos analisando a conformação da linha de costa e seus condicionantes litoestruturais sugerem coincidência com estruturas dobradas em antiformes e sinformes com altos estruturais no interior do continente e embaiamento, respectivos, Carvalho *et al.* (2005). Pensamento este, até certo ponto, análogo ao de Saad e Torquato (1992) com observações semelhantes, no contexto regional.

Além de se situar dentro da extremidade norte do Domínio Tectônico Setentrional da Província Borborema, limita-se a NW pela Zona de Cisalhamento Sobral-Pedro II e a SE pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu, inserida nos Terrenos do Ceará Central, torna-se evidente e normal a presença de zonas secundárias de cisalhamento geradas pelas duas grandes zonas dominantes. Isto é, produzem estruturas dobradas e redobradas não obedecendo a um padrão regional dominante NE.

No sentido hidrogeológico da área, existe uma zona de cisalhamento no sentido noroeste de Caucaia entre o promontório do Pecém e o chamado protopromontório do Cumbuco de direção N50E que converge, próximo à costa, para N10E (Mapa geológico, anexo 3) e serve de recarga não só à unidade aquífera do cristalino da Serra do Camará, mas também à unidade do Aquífero Barreiras.

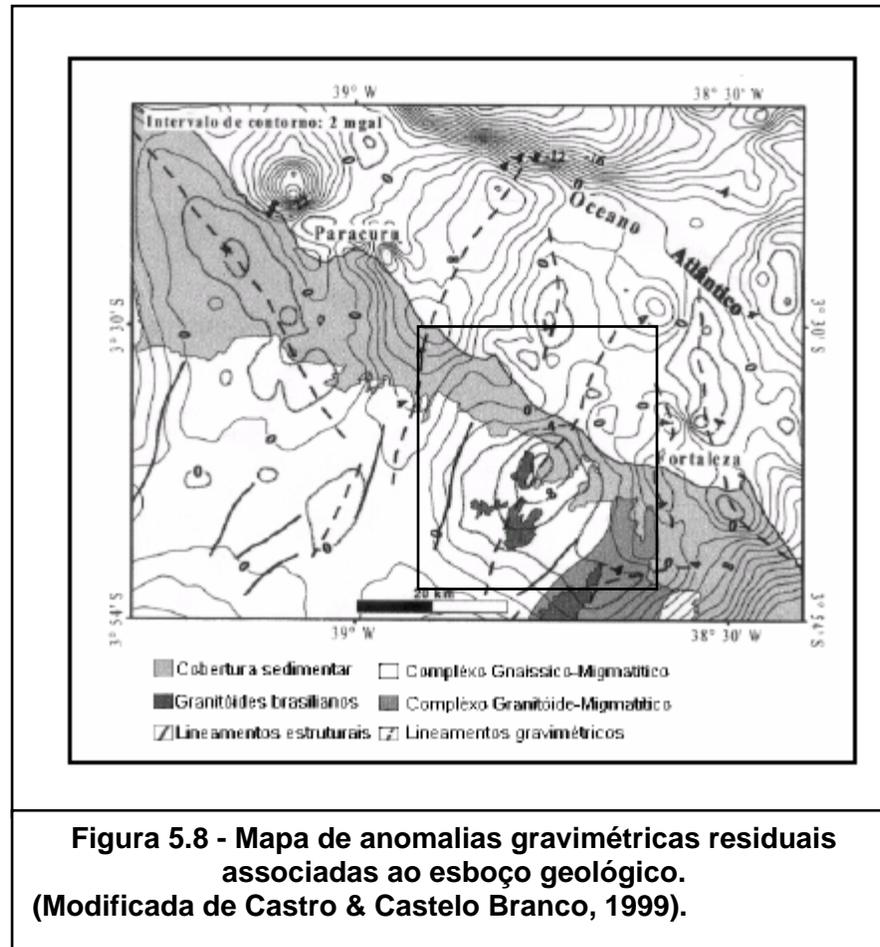
Nesta zona, a presença de falhas de sentido aproximado N25E e com paralelismo proeminente ao direcionamento do Rio Cauípe, cujo prolongamento conjunto segue em direção ao mar, sugere sua participação nas unidades aquíferas costeiras adjacentes e,

provavelmente, condiciona o arcabouço da linha de costa. Nas faixas de Icaraí, Cumbuco, a ocorrência de rochas gnáissicas-migmatíticas posiciona-se com suas foliações evidentes obedecendo ao prolongamento dessas linhas de falhas e de litologias semelhantes, que afloram no interior do continente. O padrão estrutural é o mesmo dos afloramentos que ocorrem na faixa na faixa costeira. Evidentemente, as rochas paraderivadas obedecem a este mesmo padrão estrutural e pode ser verificadas através de afloramentos de rochas quartzíticas e gnáissicas dobradas que constituem “Ponta do Pecém”. Entre esta feição do Pecém e o limite oeste do município de Caucaia já próximo ao Canal Sítios-Novos, uma grande estrutura dobrada sinforme com caimento para sudoeste, composta por quartzito parece indicar um movimento no sentido do continente da zona de cisalhamento que condiciona a linearidade do Rio Cauípe. Outros termos dobrados antiformes nas rochas paraderivadas que compreendem o Complexo Gnáissico-Migmatítico, são coincidentes com o posicionamento dos promontórios e a projeção dos lineamentos parece se estender até a plataforma continental, participando no condicionamento da batimetria (Mapa Geológico anexo e Fig. 3.3).

Anomalias gravimétricas sugerem uma concentração de litologias mais densas, o que pode ser atribuído aos termos granitóides, que afloram, em escala de detalhe, em alguns lugares próximos à costa. Verifica-se a presença de contatos na parte sudeste da área (na direção do Batólito de Itaitinga) entre unidades litológicas que foram submetidas a movimentos transtensionais responsáveis pelos processos de enrugamento da litosfera e parece ter atuado como elementos diferenciadores da configuração da linha de costa.

O prolongamento das litologias do embasamento e dos lineamentos estruturais sob as coberturas cenozóicas, no sentido do interior para o mar (Fig. 5.8), pode ser verificado no levantamento gravimétrico apresentado por Castro & Castelo Branco (1999), o qual engloba um trecho a oeste de Fortaleza e inclui os promontórios do Cumbuco e Pecém, dentro da área. Neste trabalho os referidos autores relacionam as anomalias Bouguer e gravimétricas residuais com as estruturas identificadas em superfície.

Na região de Icaraí a linha de costa torna-se mais retilínea e recuada em direção ao continente, em relação a sua orientação geral. Este trecho é marcado pela coincidência de prolongamentos de lineamentos de sentido SE-NW, os quais são interceptados mais a diante pela Falha de Forquilha (sentido NE-SW) e por lineamentos de direção principal E-W (Fig. 3.2). A partir deste ponto até próximo da localidade de Icaraí a isóbata de dez metros torna-se mais próxima da linha de costa.



Complicadores estruturais, envolvendo também a falha de Icarai e lineamentos no sentido E-W, parecem ter influenciado na compartimentação dos blocos deformados pelas falhas normais localizadas na plataforma continental.

Saadi & Torquato (1992) propuseram a atuação de um campo compressivo regional de direção E-W na elaboração do arcabouço geomorfológico regional, baseados em evidências de neotectonismo, a exemplo de falhamentos em rochas da Formação Barreiras e presença de diques clásticos em terraços fluviais terciários, localizados na região de Camocim no extremo oeste do Ceará. Segundo este autor, tomando como base os dados sismológicos, existe um campo de tensões atual, compressivo de direção E-W e WNW-ESE, e uma direção de extensão NNE-SSW. Defenderam a ascensão de compartimentos elevados através dos planos de grandes zonas de cisalhamento por movimentos de falhas inversas. Neste pensamento, poder-se-ia dizer que a área estudada pertence a um compartimento alto de Fortaleza, que se estende a partir da zona de cisalhamento, na porção a leste de Fortaleza, até a zona de cisalhamento posicionada entre Pecém e Cumbuco.

Segundo Marinho & Vasconcelos (2000), há presença de um sistema de fraturas de direção predominantemente NE, na região de Cauípe, extra limite da área estudada do *necks* Pão de Açúcar acompanhando, em linhas gerais, os *trends* dominantes da Província Borborema. Na área encontram-se corpos mapeáveis, tais como Serrote do Cararu e Serrote do Salgadinho obedecendo ao mesmo padrão estrutural de fraturas, aspecto que reforça a interpretação de Almeida (1958).

Algumas sondagens elétricas verticais têm encontrado aquíferos promissores em termos de vazão e qualidade, segundo fontes informais e particulares, onde se identifica a presença de rochas alcalina abaixo da Formação Barreiras. Plotando alguns pontos de sondagens elétricas (em alcalinas para locação de poços) em número de 6 (seis) observou-se que o alinhamento destes pontos estava na mesma direção do já conhecido *trend* regional. A possibilidade de circulação ou residência de água subterrânea nessas fraturas tem uma boa possibilidade de aos poucos já se transformarem numa realidade bem próxima.

Neste trabalho, admite-se que a melhor forma de compartimentar e sistematizar as zonas de recarga das unidades aquíferas da área engloba o “Controle Morfo-Estrutural da Drenagem do Estado do Ceará” de Claudino Sales (2002). Este enquadra esta região num compartimento hidrológico, pertencente ao Domínio Baturité, através de suas principais direções de drenagem (indicadas na figura 5.7) do capítulo de Geomorfologia da Área, já comentadas como sendo as pertencentes ao Rio Ceará e Cauípe. Aliam-se também a esta compartimentação as grandes fraturas secundárias de cisalhamentos existentes na parte central da área (no Complexo Gnáissico-Migmatítico), falhas paralelas à zona costeira, fraturas e lineamentos insipientes em rochas paraderivadas e fraturas portadoras do material alcalino do “Vulcanismo Terciário”.

6. HIDROGEOLOGIA DA REGIÃO LITORÂNEA DE CAUCAIA – PECÉM-CE

6. HIDROGEOLOGIA DA REGIÃO LITORÂNEA DE CAUCAIA – PECÉM-CE

6.1 Introdução: Sinopse do Aquífero Barreiras no Estado do Ceará

No princípio do século passado, pesquisadores observaram a ocorrência de rochas sedimentares inconsolidadas a levemente consolidadas, de estratificações pouco distintas, areno-argilosas, argilosas e conglomeráticas, estendida numa grande faixa de ocorrência litorânea contínua desde o Rio de Janeiro até o Pará, com penetrações no vale do Rio Amazonas (Mascarenhas *et al.* 1979). A partir de então surgiram denominações para estas unidades de rochas sedimentares, desde Oliveira & Leonardos (1940) que as designaram de "Série Barreiras" até Mabessone *et al.* (1972) que estabeleceram uma estratigrafia para o "Grupo Barreiras", subdividindo-o em três formações: Serra dos Martins, Guararapes e Macaíba.

Em algumas regiões, penetra pelo continente por cerca de 100 km, como na região de Medeiros Neto, sul da Bahia. Ocorrem, também, como ilhas isoladas e preenchendo "paleovales" do embasamento cristalino. A feição morfológica típica dessa unidade é de tabuleiros. Constitui um relevo aplainado, monótono, cujas cotas oscilam em torno dos 100 metros, diminuindo suavemente no sentido do litoral, onde terminam, às vezes, bruscamente, em extensas falésias ao longo da costa. O sistema de drenagem nesses tabuleiros forma vales encaixados, profundos, dissecados, em forma de "V" e "U", com bordas abruptas e encostas de declividades elevadas (Mascarenhas *et al.*, 1979). Estudos mais recentes caracterizaram o Grupo Barreiras como um conjunto de rochas sedimentares continentais, afossilíferas, que ocorre em grande parte da Zona Costeira do Brasil, desde o Estado do Rio de Janeiro no sudeste do continente até o Estado Pará no norte do mesmo. Litologicamente é constituído predominantemente por arenitos finos, argilosos, com intercalações areníticas e conglomeráticas, apresentando uma grande variação de fácies nos sentidos vertical e horizontal. É recoberto por sedimentos recentes e do Quaternário, representados por aluviões atuais e antigos, dunas e "paleodunas", constituídos predominantemente por areias, silte, argilas e cascalhos. (Araújo *et al.*, 1986).

Em face da grande extensão de ocorrência do Aquífero Barreiras no Brasil e seu caráter diversificado restringiu-se sua análise à Zona Costeira do Estado do Ceará, com a

proposição de enquadrar a área pesquisada na compartimentação morfoestrutural de Claudino Sales (2003), mais condizente com os objetivos do trabalho.

A superfície de afloramento do Grupo Barreiras é de 16.600 km² o que representa 11,06% da área total do Estado, segundo Cordeiro, Gonçalves & Holanda (1984). Estende-se ao longo de todo o litoral e adentra no semi-árido através de uma faixa com uma largura de 10 a 50 km. Apresenta-se também sob a forma de ilhas discordantes ou preenchendo paleovales sobre as rochas Précambrianas. Em geral, são rochas sedimentares de coloração vermelha e amarela, constituídas de arenitos finos a médio, conglomerados, siltitos e argilas variegadas, com níveis caulínicos e conglomeráticos. Fora dos altos estruturais do embasamento sua espessura pode chegar a mais de 100 metros. De acordo com suas variações vertical e lateral de fácies, há presença de níveis delgados de argila intercalados nos arenitos que provocam a formação de aquíferos suspensos e o aparecimento de fontes de encostas, como se pode observar na região de Beberibe (foto 6.1).

Após estas avaliações, Coelho, Morais & Roberto também, em 1984, restringiram mais um pouco delimitaram a área de afloramento do Grupo Barreiras na região metropolitana de Fortaleza em 127 km². O aquífero foi caracterizado como bastante heterogêneo, com espessura total, variando de 10 a 100 metros para uma espessura média saturada de 15 metros. Para uma porosidade efetiva estimada de 10% foi calculada uma reserva de 2.755 x 10⁶ m³.

Stamford (1986) num estudo sobre a hidrogeologia da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), quantificou o potencial hídrico subterrâneo da área. A região possui uma área de 3.483 Km² e abrange os municípios de Fortaleza, Caucaia, Maranguape, Pacatuba e Aquiraz. A pluviometria média da área é de 1.400 a 1.700 mm/ano. Identificou dois grandes sistemas aquíferos distintos do ponto de vista geológico: uma faixa de rochas sedimentar paralela à costa, com uma largura média de 15 km, constituída por dunas, paleodunas e Grupo Barreiras; e outro sistema presente nas rochas cristalinas, que é aquífero fissural das rochas do embasamento. O sistema aquífero Dunas/Barreiras possui uma área de 1.100 Km² e está representado por uma geomorfologia de baixadas litorâneas, aluviões, cordões de dunas e tabuleiros arenosos do Grupo Barreiras. A recarga do sistema aquífero

Dunas/Barreiras processa-se diretamente através da pluviometria. Para unidade do Aquífero Dunas foram calculadas as reservas exploráveis de $540 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$.



Foto 6.1. Fontes formadas por aquitardos (ou aquíferos suspensos) nas camadas argilosas de sedimentos da Formação Barreiras (Observada na “Praia das Fontes” em Beberibe-Ce). Nota-se um bloqueio de dunas caídas do topo da Formação, formando pequenas superfícies com água. Foto Recolhida de Claudino Sales (2002)

A espessura média da Formação Barreiras foi estimada em 30 metros. Sua constituição litológica encerra desde conglomerados até arenitos sílticos e argilosos, com grande variação lateral de fácies horizontal e vertical, refletindo heterogeneidade litológica. Apresentam comportamento horizontal ou sub-horizontal, com leve mergulho para a costa, sendo sua drenagem estruturada com arranjo subparalelo. A camada saturada, um arenito síltico, possui uma espessura média de 10 metros. As reservas exploráveis são de $360 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Para o Aquífero Barreiras, foram calculadas a transmissividade $T = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e a permeabilidade $K = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ Stamford, (1986). A tabela 6.1 mostra os valores médios da profundidade, nível estático, nível dinâmico e vazão específica encontrados nos poços da Região Metropolitana de Fortaleza.

Tabela 6.1 - Dados hidrogeológicos de poços (Stamford, 1986).

Valores médios	Fortaleza	Aquiraz	Maranguape	Caucaia	Pacatuba
Profundidade (m)	51,00	47,35	50,80	34,40	41,46
Nível Estático	11,15	8,81	8,35	8,08	10,61
Nível Dinâmico	30,66	28,93	38,70	20,00	27,94
Vazão Específica	1,15	1,01	0,58	1,09	0,64

Na região, 80% da infiltração potencial provêm diretamente das áreas de dunas, 10,3% nas áreas de Barreiras e o restante nas rochas cristalinas. Nesta área sedimentar, existe um elevado número de poços não cadastrados, onde é captado um volume de água desconhecido, evidenciando o descontrole por parte dos órgãos públicos competentes, tornando impossível a quantificação dos volumes de água captados destes sistemas aquíferos (*op. cit.*).

De acordo com o autor, o potencial hídrico subterrâneo da região mostra-se insuficiente para uma resolução isolada do problema da região metropolitana citada, em função das características hidrogeológicas dos aquíferos presentes, porém indica que este pode ser utilizado como solução alternativa para o abastecimento de pequenas comunidades ou bairros, por tratar-se de uma solução ágil e de baixo custo.

Cavalcante, Rebouças & Veríssimo (1996), caracterizaram as águas subterrâneas do município de Fortaleza, numa análise sobre o conhecimento e a preservação dos mananciais subterrâneos da área. Chegaram à conclusão de que as águas subterrâneas de Fortaleza constituem a fonte alternativa de abastecimento e, nos períodos críticos de estiagem, assumem uma importância estratégica e vital. São águas predominantemente cloretadas sódicas, de boa qualidade físico-química, que não encontram restrições ao uso. Porém, em função da ausência de saneamento básico adequado, densidade populacional crescente, poluição dos recursos hídricos superficiais e perfuração de poços sem critérios técnicos adequados, este manancial hídrico vem sofrendo a deterioração da qualidade, a tal ponto que as análises demonstram uma poluição bacteriológica de 70% a 80% das águas desta região urbana.

Segundo dados obtidos em 1994, a CAGECE atendia 1.451.491 habitante (82% da população), restando 314.303 habitantes sem abastecimento de água. Esta parcela da população não abastecida, conseqüentemente, explora as águas subterrâneas, principalmente, porque essa água está próxima ao local da demanda, é de fácil acesso e sai praticamente a custo zero. Foram cadastrados pela CAGECE mais de 400.000 habitantes, os quais se auto-abastecem através de poços tubulares rasos, profundos, cacimbas ou poços escavados.

Somente no período de 1989 a 1995, ocorreu a perfuração de cerca de 1.000 poços tubulares profundos e mais de 500 poços tubulares rasos na região metropolitana. Atualmente, quase toda fábrica, condomínio residencial, hospital, escolas, além de centenas de residências, utilizam água subterrânea captada por poços tubulares ou cacimbas para o abastecimento principal ou complementar. Levando-se em conta que esta atividade não é cadastrada, constata-se que a taxa de 20% pode ser duplicada, ou seja, mais de 40% da população está efetivamente utilizando água subterrânea (Cavalcante *et al.* 1996).

Na região, este aquífero é recoberto pelas coberturas coluvionares, aluvionares, dunas e as paleodunas do Quaternário, constituídos de sedimentos clásticos de espessuras variáveis, imaturos e friáveis. O sistema aquífero Dunas/Paleodunas em função das características sedimentológicas, de elevada permeabilidade, da porosidade efetiva e do coeficiente de infiltração elevado (estimado entre 20% e 30% da pluviometria), além da posição sub-aflorante do nível d'água, este sistema aquífero é altamente susceptível à contaminação, representando uma unidade aquífera altamente vulnerável aos impactos antrópicos de uso e ocupação do meio físico. (Cavalcante *et al.*, 1996).

No contexto acima, realizaram análises físico-químicas nas águas coletadas nos poços dos sistemas Dunas/Paleodunas e Barreiras. De acordo com o diagrama de Piper, as águas foram classificadas na sua maioria como cloretadas sódicas, seguidas das bicarbonatadas sódicas e mistas. O diagrama de Shoeller & Berkloff ressalta que, embora águas dos aquíferos Dunas/Paleodunas e Barreiras possuam boa qualidade, existem pontos cujas concentrações de cloretos estão acima do permitido e com tendência à salinidade.

Segundo Cavalcante *et al* (1996), os fatores que provocam elevada vulnerabilidade dos sistemas aquíferos Dunas /Paleodunas e Barreiras, são: a elevada taxa de ocupação e uso do meio físico; a inexistência de saneamento básico e determinados aspectos técnicos

construtivos na perfuração dos poços, como a inexistência de cimentação bacteriológica e de separação dos aquíferos. Os fatores acima mostram que as águas subterrâneas de Fortaleza estão submetidas à elevada poluição bacteriológica. Estima-se que 70% a 80% destas águas estejam poluídas por coliformes fecais, conforme foi demonstrado no cadastro de 957 análises bacteriológicas, Cavalcante *et al.* (1996). A unidade aquífera da Formação Barreiras na região possui uma expressiva variação faciológica, com intercalações de níveis de diferentes permeabilidades, onde a média estimada é de $1,85 \times 10^{-6}$ m/s. Bianchi, Morais & Gurgel (1984) determinaram uma espessura média saturada de 15 metros, com porosidade efetiva de 10%. Os poços tubulares possuem profundidades entre 40 e 60 metros, com uma vazão média oscilando em torno de $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$. A recarga é realizada pelas águas de chuvas, riachos e rios influentes que percolam este meio. Deve-se ressaltar que, a recarga na região mais litorânea é feita por drenagem vertical da unidade aquífera Dunas /Paleodunas.

Leite & Möbus (1998) realizaram um estudo sobre a vulnerabilidade natural dos aquíferos da região da Bacia do Rio Mundaú, distante 120 km de Fortaleza, situada no litoral oeste do Estado do Ceará. Do ponto de vista geológico, a bacia é constituída por rochas metamórficas do embasamento cristalino, rochas sedimentares do Grupo Barreiras, dunas e aluviões, sendo que cerca de 60% da área total estão compreendidos pelo sistema aquíferos Aluviões /Dunas /Barreiras. Empregando a metodologia baseada no índice DRASTIC, ficou evidenciada a alta vulnerabilidade para os sistemas aquíferos existentes. Em que pese a variabilidade comentada nos seus tipos litológicos, verificou-se o predomínio de arenitos, caracterizando-o como um meio propício à circulação das águas e da carga contaminante a ela porventura associada. O solo Podzólico vermelho-amarelo, predominante na região, apresenta uma textura arenosa que favorece a infiltração e a percolação da água. A influência da recarga das aluviões e dunas para o Grupo Barreiras faz com que esta área deva ser gerenciada com cuidado especial, em termos de uso e proteção dos mananciais subterrâneos.

Estudos empreendidos sobre aspectos qualitativos das águas subterrâneas da Região Metropolitana de Fortaleza, com a colaboração de Cavalcante, Veríssimo & Rebouças (1998), foram efetuados visando contribuir ao conhecimento e à conservação dos

mananciais subterrâneos. Nesse estudo, foram pesquisadas 1.478 análises físico-químicas e 1.073 análises bacteriológicas. Também foram definidos quatro sistemas aquíferos assim distribuídos: Dunas/Paleodunas (4%), Grupo Barreiras (17,6%), Aluviões e o meio fissural das rochas cristalinas (67%). As análises mostraram que as águas são cloretadas sódicas, com boa qualidade química, mas sendo observados problemas quanto às qualidades bacteriológicas, pela presença de coliformes fecais, com predominância da bactéria *Escherichia coli*.

Conforme Cavalcante *et al* (1998), o Grupo Barreiras ocupa uma área de 615 km², cerca de 20% da região metropolitana de Fortaleza. Este aquífero possui uma espessura média entre 40 e 50 metros, constituído por uma intercalação de níveis arenosos a siltico-argilosos, que condicionam as diferentes permeabilidades, tanto verticais quanto horizontalmente. Observa-se um nível estático entre 8 e 12 metros, tendo uma espessura média saturada de 15 metros. Os poços tubulares que captam suas águas possuem uma profundidade entre 40 e 60 metros, obtendo vazões de 1,5 a 3,0 m³/h.

Conclui-se então que, os principais fatores que podem influenciar a contaminação do aquífero na área estão atrelados à alta vulnerabilidade dos sistemas aquíferos Dunas/Paleodunas e Barreiras; a cada vez mais crescente e elevada taxa de ocupação e uso do meio físico; poluição bacteriológica das águas superficiais e os aspectos técnicos construtivos dos poços perfurados, sem cimentação superficial (bacteriológica) e cimentação interaquíferos.

O resultado deste desordenamento teve seu *boom*, com a chegada de recentes períodos de seca em meados da década passada e com a indústria imobiliária adotando a existência de poço tubular na obra como *marketing* de venda. Estes fatos ocasionaram (e ocasionam ainda) um processo mais desordenado e acelerado de perfuração de poços em Fortaleza, muitas vezes, comprometendo o manancial hídrico subterrâneo Cavalcante *et al*. (1996).

6,2 Estudos Hidrogeológicos da Região Costeira de Caucaia-Pecem-Ce

Hidrogeologicamente, a exploração dos sistemas de aquíferos no Litoral do Município de Caucaia e Pecem, na Região Metropolitana de Fortaleza, vem sendo intensificada em função da progressiva procura e pelas constantes explorações de água potável para atender

aos reclamos de uma região litorânea portadora de um grande fluxo turístico e de uma intensa ocupação imobiliária. Os conglomerados urbanos e clubes balneários, nessa região costeira, são abastecidos por água subterrânea que, em função de grandes e desordenadas retiradas, vêm causando um proeminente desequilíbrio da interface água doce e água salgada, inviabilizando em alguns locais a captação de água potável.

Trabalhos hidrogeológicos têm sido realizados na Região Metropolitana de Fortaleza, como foi observado no capítulo anterior, com a finalidade captar água para abastecimento humano, atender às indústrias e à agricultura da região. Os dados são dispersos, às vezes, inexistentes principalmente os parâmetros hidrogeológicos que definem os aquíferos. A inexistência do cumprimento de regras estabelecidas na exploração desse manancial ou a falta de regras mais rígidas que visem otimizar o aproveitamento dos aquíferos potáveis têm contribuído para esta dispersão.

Alguns pesquisadores e órgãos tais como UFC, CORGERH, CPRM-REFO e FUNCEME, têm contribuído sobremaneira com novos trabalhos no sentido de melhorar os dados e aprimorar as informações. Neste aspecto, observou-se que seu enquadramento no Domínio de Baturité, da Compartimentação Geomorfológica e Morfoestrutural de Claudino Sales (2002), se faz necessário por entender de que se trata de uma compartimentação que obedece a geotectônica regional com reflexos estruturais evidentes locais, em que os grandes fluxos regionais de água superficial e subterrânea com seus armazenamentos, obedecem às estruturas de um domínio gerador de arcabouços condizentes. Nesta região, os sedimentos da Formação Barreiras apresentam uma espessura superior a 30 m (SUDENE, 1978) e ocupam no referido domínio uma área da ordem de 791 km² (RADAMBRASIL, 1981). Na litologia deles/delas dominam arenitos, argilas, e alguns níveis conglomeráticos permitindo a formação de fontes. Avaliações relativas ao volume dos aquíferos e aquitardos (Bianchi e al., 1994) indicaram uma espessura de 15 m da camada saturada e um recurso permanente de 10,2 a 10,8 m³/ano. Os poços em exploração neste domínio (Morais *et al.* 1984) têm *déficits* situados entre 3,7 e 10 m³/h.

Neste estudo, analisa-se o aquífero livre do sistema Dunas /Formação Barreiras na zona costeira de Caucaia e Pecem, próximo às desembocaduras dos rios Ceará, Juá e Cauípe, por possuir alta vulnerabilidade e se situar próximo às zonas de praias e dos conglomerados urbanos susceptíveis de intrusão salina. Entretanto, a área de ocorrência encerra quatro

unidades hidrogeológicas distintas e de comportamentos hidrodinâmicos diferentes: as dunas e paleodunas apresentando um único meio aquífero, as aluviões, a Formação Barreiras e as rochas do embasamento cristalino, representadas pelo complexo gnáissico migmatítico e granitóide migmatítico. Observa-se que, nas áreas fora dos limites dos terrenos sedimentares da zona costeira abordada, os terrenos cristalinos sotopostos ou não à Formação Barreiras, possuem aquíferos fissurais de boa qualidade que atendem às necessidades de pequenos empreendimentos e são representados pelas fraturas de alívio de rochas paraderivadas registradas em alguns perfis de poços.

No domínio cristalino citado, o contexto hidrogeológico está inteiramente associado aos fendilamentos, pois suas rochas possuem uma porosidade primária quase nula, conferindo-lhe uma permeabilidade extremamente baixa. A infiltração da água ocorre essencialmente nas zonas fraturadas, com circulação restrita às fraturas abertas citadas. Os mantos de intemperismo ou as coberturas colúvio-eluviais estabelecidas sobre essas rochas podem armazenar, dependendo de suas espessuras, volumes de água que, eventualmente, podem ser aproveitados em captações pontuais. No entanto, a maior importância dessas coberturas está no fato de funcionarem como áreas de recarga para o meio fraturado subjacente.

Nas unidades compostas por terrenos sedimentares distinguem-se três sistemas aquíferos: as dunas/paleodunas, as aluviões e os sedimentos da Formação Barreiras, que em virtude sua variação faciológica vertical e lateral com intercalação de níveis areno-argilosos, argilo-arenosos e argilosos, se posiciona na categoria de aquíferos mais e menos permeáveis, o que lhe confere uma diversidade de parâmetros hidrogeológicos. Bianchi *et al.* (1984), estimaram valores entre $5,27 \times 10^{-5}$ e $5,38 \times 10^{-7}$ m/s para a condutividade hidráulica, refletindo mais as características de um aquífero. Das unidades geológicas distribuídas na área de estudo, as Dunas /Paleodunas, dispostas discordantemente sobre os sedimentos da Formação Barreiras ou sobre manchas aluvionares, constituem os melhores reservatórios hídricos subterrâneos e podem contribuir substancialmente para o abastecimento de água. Representam o aquífero superior livre, desenvolvem-se ao longo do litoral e forma uns cordões aproximadamente paralelos à costa, sendo interrompido ou recortado em alguns trechos pela drenagem.

As aluviões têm sido pouco utilizadas para exploração de água subterrânea na área de trabalho e, provavelmente, um dos motivos recai sobre sua proximidade do litoral, baixa

declividade dos rios e a penetração das marés ao longo dos cursos d'água, que modificam a qualidade das águas armazenadas nessa unidade.

Quanto às dimensões, o sistema Dunas/Barreiras no continente, especificamente nas áreas de interesse objeto do estudo, ocupa no litoral noroeste Caucaia-Pecem, como faixa de maior interesse, uma superfície de 144 km², sendo 63 km² (9 km x 7 km) entre Barra de Cauípe e Pecem, e 81 km² (18 km x 4,5 km) entre Pacheco e Cumbuco.

Na tentativa de minimizar o trabalho hidrogeológico desordenado, nas zonas costeiras do Ceará, onde dados importantes não são anotados e arquivados por entidades gerais, pesquisadores da universidade federal e estadual, órgãos estatais de gestão hídrica têm dirigido esforços para diminuir a quase culturalmente assimilada “dispersividade ou mesmo ausência de dados”, da exploração de água subterrânea.

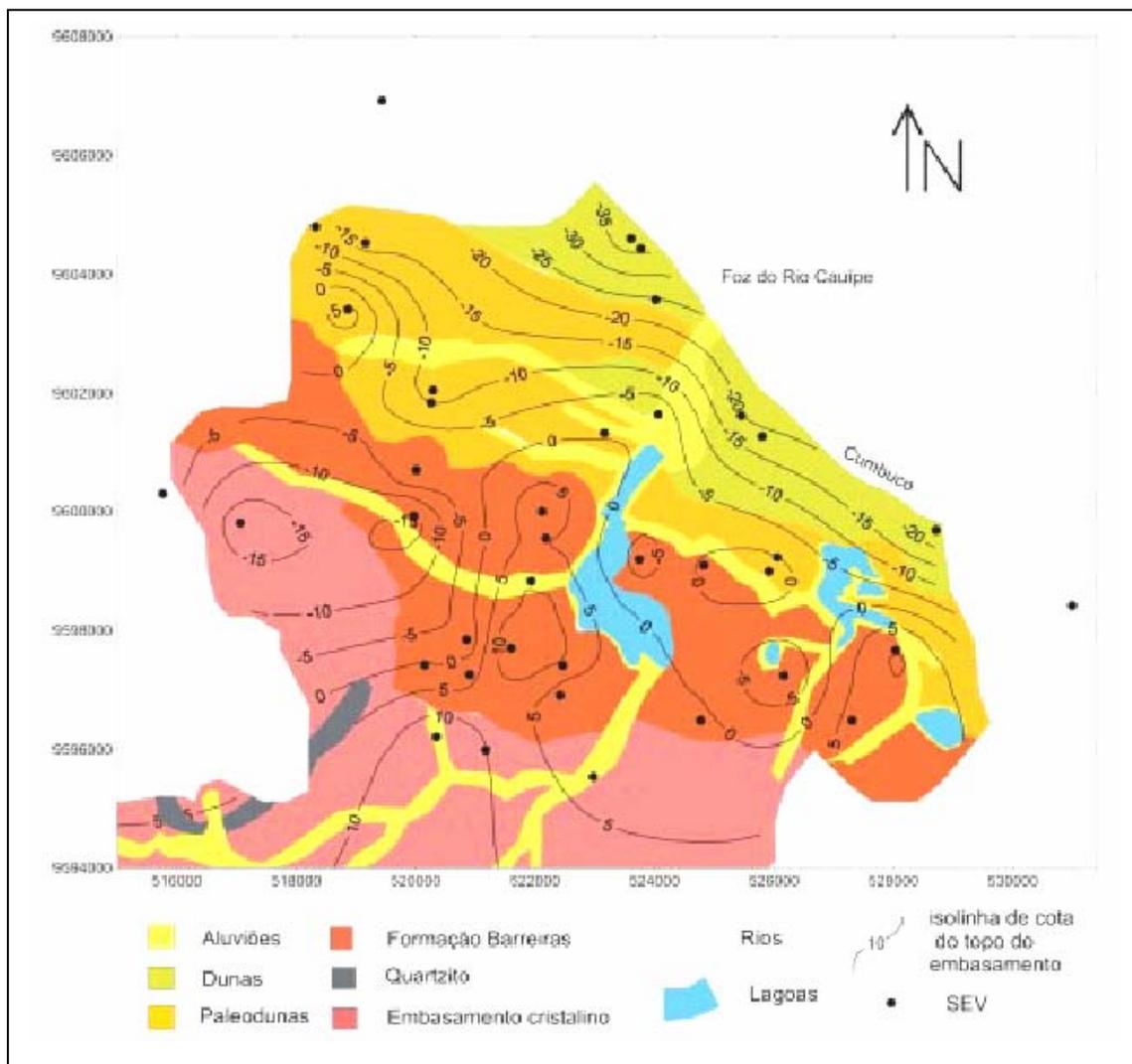
Marinho *et al* (2000), através de levantamento hidrogeológico e geofísico na Bacia do Rio Cauípe, com 25 medidas de nível estático e condutividade elétrica em poços amazonas, elaboraram mapas de isocondutividade elétrica das águas dos citados poços e da medida do potencial do lençol freático incluindo sua direção de fluxo. Constataram a existência de um gradiente positivo da condutividade para leste, onde a água é salobra (afirmação constatada no campo). Do lado oeste da bacia, a condutividade situou-se abaixo de 500 µS/cm significando a presença de água doce.

O mapa potenciométrico mostrou um gradiente negativo para leste acompanhando a topografia e um baixo potenciométrico local no lado oeste da área, onde há convergência de fluxo das águas subterrâneas, que aliada à boa qualidade química das águas indicam o melhor local na área para captação de água potável.

Assumiram, através de SEVs espessuras saturadas desde quase nulas ao sul da área, até de 40 m, nas encostas dos vales. Na planície litorânea essas espessuras atingem em média de 20 a 40 m e as profundidades para estes aquíferos variam de 0,5 a 20,5 m. Estabeleceram um parâmetro balizador de 1000 µS/cm, equivalente a 660 ppm de STD, indicando que abaixo desse valor as águas tem qualidade química para consumo humano e se situam na cobertura sedimentar porosa. Acima desse limite predominam as águas do aquífero fissural. O Aquífero Dunas evidencia ser o mais importante na área.

Observando-se o mapa potenciométrico da região encontram-se duas presenças distintas: a) um paleovales do Rio Cauípe, na parte central da área e um poço deslocado para leste

reafirmado pelos mapas do substrato cristalino e das isópacas da zona saturada; e b) a presença da Lagoa do Banana entre um divisor de águas das Bacias do Rio Cauípe e Juá (figura 6.1). Resultam dessas análises locais, limitadas potencialidades de exploração de água e o Aquífero Dunas apresentam-se como o mais promissor e a identificação de zonas fraturadas abaixo da cobertura sedimentar pode conduzir à exploração mista com aumento de vazão, entretanto pode ocorrer um acréscimo de salinidade.



Recolhida de Marinho *et al.* (2003)

A aplicação da prospecção eletromagnética mediante dispositivos de bobinas móveis (tipo EM-34), mostrou-se versátil e bem adaptada às necessidades dos estudos em zonas aquíferas contaminadas por sais, Sabadia *et al.* (2002). No caso específico da praia do Pacheco, a possível frente de contaminação seria proveniente das zonas das antigas salinas por lixiviação e fluxo natural em direção ao mar. Próximo a linha de costa (ao norte da área), encontram-se os mais baixos valores de isocondutividade aparente do terreno, relacionados à recarga em função das dunas.

No contexto de avaliarem novas e de resgatarem outras informações hidrogeológicas não disponíveis à comunidade, Holanda *et al.* (2003), reuniram dados disponíveis em órgãos públicos, tais como 11 poços do Atlas, CPRM (1999), 52 poços com cota no Departamento de Geologia da UFC, 299 poços do cadastro realizado pela PIVOT (2001) e 25 cacimbas e 3 poços cadastrados no Projeto Cauípe, Marinho *et al.* (2000). Da obtenção desses dados processaram informações hidrogeológicas da região costeira de Caucaia-Ce.

Dos poços cadastrados, apenas 32 apresentavam relatório com perfis e ensaios de bombeamento e somente em 3 destes poços (*) foram realizados testes de aquífero (observe a tabela 6.2 contendo os dados selecionados). Com base em dados altimétricos e em dados de nível estático dos poços cadastrados foi elaborado também um mapa potenciométrico (Figura 6.2).

Os dados foram interpolados através do procedimento de krigagem, modelo de variograma linear usando-se um *grid* de 200 x 200 m. A malha de níveis de potencial hidráulico foi obtida por subtração dos valores de altitude e de nível estático calculados por interpolação. Nas linhas de isopotencial utilizaram procedimento *spline* com inserção de dois nós. Os vetores do gradiente hidráulico foram obtidos através da aplicação da função mapa vetorial sobre a malha de interpolação da carga hidráulica. Os resultados indicaram uma concordância com a morfologia da superfície topográfica. A drenagem interna e externa está direcionada à linha de costa e registraram zonas de convergência de fluxo pouco deslocadas dos canais de drenagem superficial. O gradiente hidráulico ficou situado numa variação entre $1,3 \times 10^{-4}$ e $1,7 \times 10^{-2}$.

A avaliação final leva a concluir que o sistema Dunas /Paleodunas apresenta o melhor potencial hidrogeológico da área com uma condutividade hidráulica média de $5,93 \times 10^{-4}$ m/s. Trata-se de um aquífero livre com espessura saturada variando entre 2 e 20 metros e

nível estático subafiorante com um máximo de 6 metros de profundidade. Na área de estudo, como em outras dessa mesma zona costeira, o sistema da Formação Barreiras apresenta condutividade hidráulica de aquífero e pode também assumir característica de aquífero confinado como foi verificado em alguns poços.

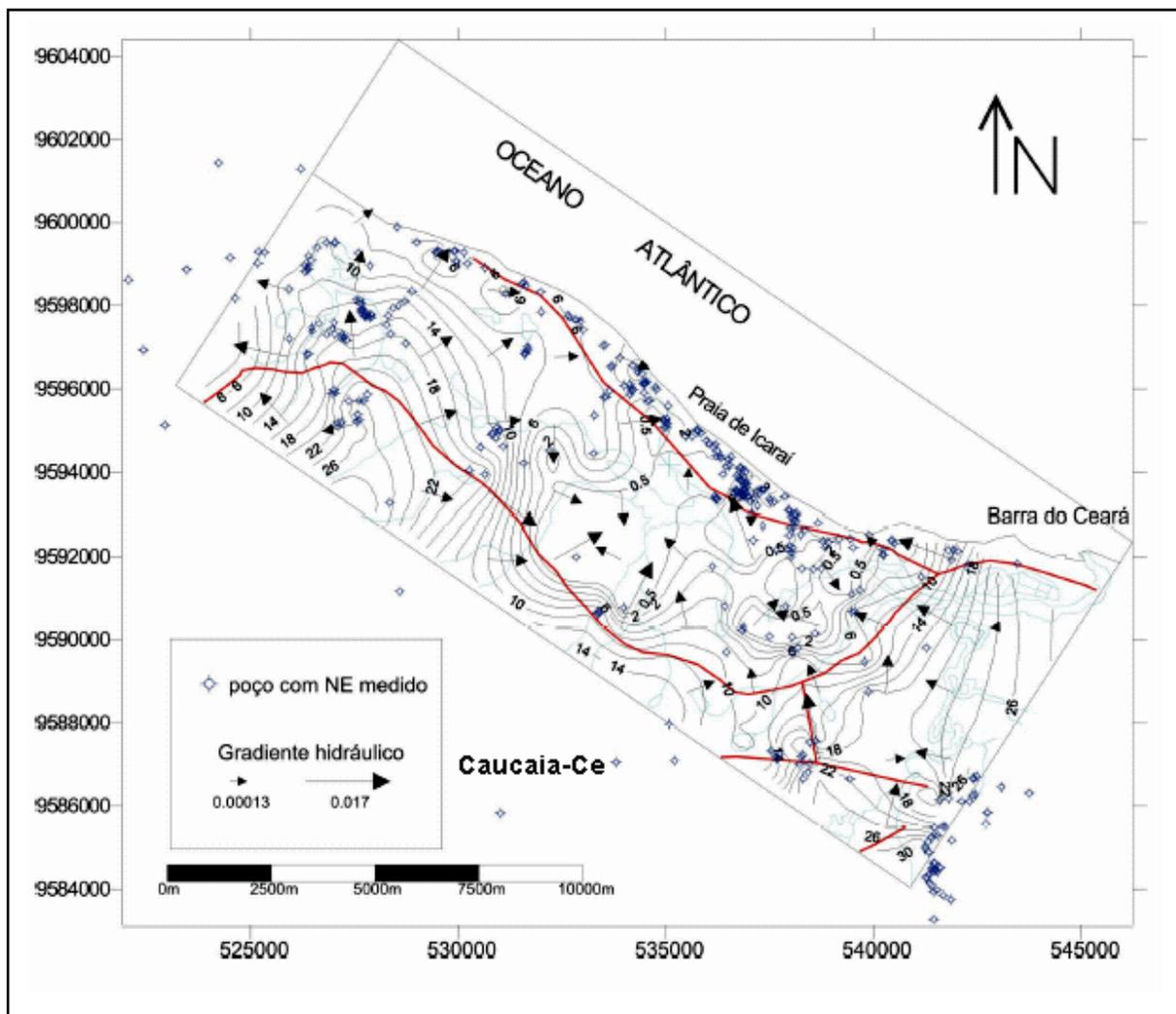
Tabela 6.2 - Relação dos poços utilizados para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos na região de Caucaia-Ce.

Fonte modificada da CPRM - REFO (1999) e recolhida de Holanda (2003).

Nº de Identificação	UTM E-W (m)	UTM N-S (m)	Aquífero
P01	541316	9591701	Barreiras/ Embasamento
P02	541472	9591731	Barreiras/ Embasamento
P03	541655	9591768	Barreiras/ Embasamento
P04	541149	9591891	Barreiras/ Embasamento
P05	541124	9591904	Barreiras/ Embasamento
P06	537101	9592394	Barreiras
P07	541163	9591933	Barreiras/ Embasamento
P08	541188	9591974	Barreiras/ Embasamento
P09	538623	9592778	Dunas/ Paleodunas/ Barreiras
P10	537050	9593615	Dunas/ Paleodunas/ Barreiras
P11	537034	9593150	Dunas/ Paleodunas/ Barreiras
P12	534540	9595702	Dunas/ Paleodunas/ Barreiras
P13 (*)	536653	9593641	Barreiras
P14 (*)	533441	9597017	Barreiras
P15	531102	9598273	Dunas/ Paleodunas/ Barreiras
P16	530176	9598845	Dunas/ Paleodunas/ Barreiras
P17	529343	9599259	Dunas/ Paleodunas/ Barreiras
P18	528551	9599833	Dunas/ Paleodunas
P19	527546	9599242	Dunas/ Paleodunas
P20	521546	9598878	Barreiras
P21	524558	9598170	Barreiras
P22	529870	9594208	Dunas/ Paleodunas/ Barreiras
P23	531600	9596837	Dunas/ Paleodunas
P24	531620	9596865	Dunas/ Paleodunas
P25	531633	9596913	Dunas/ Paleodunas
P26	531629	9596957	Dunas/ Paleodunas
P27	531668	9597019	Dunas/ Paleodunas
P28	532176	9594549	Dunas/ Barreiras
P29	532795	9591962	Cristalino
P30	533932	9590756	Aluvião
P31 (*)	536828	9590228	Barreiras
P32	536596	9590705	Barreiras

Entende-se que, a zona litorânea de Icaraí, potencialmente é a mais atingida pelas sobre-explorações de água subterrânea, pois o nível hidrostático apresenta-se a pequenas

profundidades e a espessura reduzida do Aquífero Dunas aproxima-se do limite da interface salina. Pertence ao município de Caucaia, situa-se na Bacia Hidrográfica Metropolitana e recebe a influência maior do Rio Ceará, por está próximo de sua extensa zona de mangue. A superfície é rebaixada, muito plana com tributários tributários meandранtes que invadidos quase sempre pela água do mar.



**Figura 6.2 Mapa de linhas de isopotencial hidráulico com indicação do fluxo subterrâneo.
Recolhida de Holanda, (2003)**

Neste complexo situam-se a localidade de Coqueiros, Iparana e Pacheco. Os rios de maior porte, como Cauípe e Anil influenciam setores mais a oeste, onde obedecem a outros tipos

de lineamentos estruturais, principalmente de rochas paraderivadas do Complexo Gnáissico-Migmatítico. O Rio Santo Amaro, Burití e os riachos Burití Forte, Juá e Tapeba, fazem parte da bacia hidrográfica do município. Encontram-se no contexto a Lagoa do Poço, os rios Pajuçara, Damião, Parnamirizinho e Açude Camurupim.

O volume dos dados selecionados para qualquer trabalho é muito grande, porém os dados mais importantes que definem a perspectiva hidrogeológica da região, pois em cada lote de 20 poços cadastrados e referenciados com GPS, no máximo 2 têm descrição completa como requerem as normas técnicas oficiais.

6.2.1 Parâmetros Hidrodinâmicos

De acordo com os resultados dos testes de produção adquiridos pela COGERH (1999) e de aquífero, conduzidos durante as pesquisas desenvolvidas em campo, as propriedades hidráulicas do sistema aquífero Dunas/Barreiras para o Litoral Oeste, ou zona litorânea Caucaia-Pecem-Ce, se resumem nos resultados condensados nas tabelas 6.3, 6.4 e 6.5 e levam a considerar como parâmetros representativos para fins de cálculos, os seguintes: transmissividade $0,000335 \text{ m}^2/\text{s}$, espessura saturada 13 m e porosidade efetiva 0,062. O coeficiente de armazenamento, para fins de estimativa de volumes armazenados sob pressão é de 0,00108. Após estes estudos e testes chega-se à conclusão de que o coeficiente de transmissividade considerado como representativo do sistema aquífero Dunas /Barreiras na área estudada (Litoral Oeste de Fortaleza), é de $0,0004 \text{ m}^2/\text{s}$.

O fluxo natural não se apresenta com as freqüentes feições de interflúvios. Destacam-se entre outras, duas grandes zonas de recargas: uma mais pronunciada no extremo noroeste da área, entre Matões e Pecem: e a outra menos acentuada na área que inclui a Lagoa do Damião, Lagoa Pajuçara e drenagens associadas. Enquanto na primeira área a recarga é diretamente associada ao grande desenvolvimento de dunas com cotas elevadas, na segunda área a recarga pode ser devida às lagoas presentes. De modo Geral, entretanto, as grandes lagoas da região como o Lagamar do Cauípe, a Lagoa do Banana (a noroeste da zona litorânea da área) e a Lagoa do Poço, constituem-se em importantes zonas de recargas.

A ampla zona estuarina do Rio Ceará possibilita a salinização de suas água pela invasão marinha no seu curso principal e em afluentes, intervindo no estado natural de suas águas superficiais e refletindo, posteriormente, nas águas subterrâneas das cercanias alocadas nos sistemas aquíferos da zona.

Tabela 6.3 – Parâmetros hidráulicos do sistema aquífero Dunas/Barreiras deduzidos de testes de bombeamento no litoral oeste Caucaia-Pecem-Ce.

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Valor Central Adotado
T (m ² /s)	0,34E-04	11,09E-04	2,74E-04	2,16E-04	2,5E-04
K (m/s)	0,0072E-04	4,11E-04	0,63E-04	0,17E-04	0,4E-04
h _o (m)	2,48	48,28	16,09	11,96	14,0
S _y	1,31E-02	18,20E-02	9,84E-02	10,16E-02	10,0E-02
S _A	3,5E-04	61,7E-04	20,2E-04	8,37E-04	14,3E-04

T = Transmissividade K = Condutividade hidráulica h_o = Espessura saturada
 S_y = Porosidade efetiva S_A = Coeficiente de armazenamento

Tabela 6.4. – Parâmetros hidráulicos do sistema aquífero Dunas/Barreiras deduzidos de testes de bombeamento no litoral oeste em Caucaia-Ce

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Valor Central Adotado
T (m ² /s)	4,59E-07	3,32E-03	7,78E-04	2,42E-04	7,78E-04
K (m/s)	4,78E-08	3,55E-04	6,16E-05	1,24E-05	3,70E-05
h _o (m)	4,0	16,5	12,6	15,0	14,0
S _y	1,84E-02	14,9E-02	8,39E-02	7,10E-02	7,10E-02
S _A	2,88E-05	8,84E-04	4,56E-04	4,56E-04	4,56E-04

T = Transmissividade K = Condutividade hidráulica h_o = Espessura saturada
 S_y = Porosidade efetiva S_A = Coeficiente de armazenamento

Tabela 6.5. – Parâmetros hidráulicos do sistema aquífero Dunas/Barreiras deduzidos de testes de bombeamento no Litoral oeste Caucaia-Ce.

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Valor Central Adotado
T (m ² /s)	4,59E-07	3,32E-03	7,78E-04	2,42E-04	7,78E-04
K (m/s)	4,78E-08	3,55E-04	6,16E-05	1,24E-05	3,70E-05
h _o (m)	4,0	16,5	12,6	15,0	14,0
S _y	1,84E-02	14,9E-02	8,39E-02	7,10E-02	7,10E-02
S _A	2,88E-05	8,84E-04	4,56E-04	4,56E-04	4,56E-04

T = Transmissividade K = Condutividade hidráulica h_o = Espessura saturada
 S_y = Porosidade efetiva S_A = Coeficiente de armazenamento

- ✓ 200%, avaliado na 3^a etapa do teste do poço PT-80
- ✓ 81% no poço PT-70; 55% no poço PT-151 e 58% no poço PT-158
- ✓ 151% e 61,2%, avaliados respectivamente na 2^a e na 1^a etapas do teste do PP3.

Na mesma seqüência os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos, transmissividade T e condutividade hidráulica K, foram determinados a partir da análise dos dados de recuperação dos ensaios de bombeamento utilizando a adaptação da metodologia de Theis (1935) efetuada por Jacob (1963). No caso do poço 31, o aquífero explorado (Formação Barreiras) apresenta comportamento de aquífero confinado. Neste caso, prevalece a solução resultante da metodologia de Theis, Holanda *et al.*(2003)

Os resultados da análise dos dados de testes de bombeamento e testes de aquíferos estão apresentados nas Tabelas 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11. Os resultados das análises dos dados de testes de bombeamento e de aquíferos os sistemas explotados nos diversos poços apresentaram condutividades hidráulicas características de materiais permeáveis, ou seja, superior a 10⁻⁶ m/s. Apenas no sistema Barreiras/ Embasamento cristalino e em um poço da Formação Barreiras, foram registradas condutividades hidráulicas inferiores.

**Tabela 6.6 - Parâmetros hidrodinâmicos do sistema dunas/ paleodunas
Recolhida e modificada da CPRM (2003)**

Código do Poço	Espessura (m)	Vazão (m ³ /h)	T (m ² /s)	K (m/s)
18	2,48	3,13	$2,32 \times 10^{-3}$	$9,36 \times 10^{-4}$
19	7,00	1,00	-	-
23	17,83	49,5	$9,06 \times 10^{-3}$	$5,08 \times 10^{-4}$
24	17,69	49,5	$1,21 \times 10^{-2}$	$6,86 \times 10^{-4}$
25	17,27	49,5	$5,52 \times 10^{-3}$	$3,19 \times 10^{-4}$
26	18,38	10,03	$6,64 \times 10^{-3}$	$3,61 \times 10^{-4}$
27	16,18	27,33	$1,21 \times 10^{-3}$	$7,49 \times 10^{-4}$
Médias	13,83	27,14	$7,96 \times 10^{-3}$	$5,93 \times 10^{-4}$

**Tabela 6.7 - Parâmetros hidrodinâmicos da Formação Barreiras
Recolhida e modificada da Holanda et al. (2003).**

Código do Poço	Espessura (m)	Vazão (m ³ /h)	Recuperação		Newman		Tbeis	
			T (m ² /s)	K (m/s)	T (m ² /s)	K (m/s)	T (m ² /s)	K (m/s)
6	48,00	0,998			$2,58 \times 10^{-3}$	$2,58 \times 10^{-3}$		
13	14,15	0,200	$8,82 \times 10^{-3}$	$2,58 \times 10^{-3}$	$7,41 \times 10^{-4}$	$5,01 \times 10^{-3}$		
14	2,50	0,480	$2,15 \times 10^{-4}$	$8,63 \times 10^{-4}$	$2,90 \times 10^{-3}$	$1,16 \times 10^{-3}$		
20	13,07	0,871			$4,96 \times 10^{-3}$	$3,80 \times 10^{-4}$		
21	10,83	0,965			$3,84 \times 10^{-3}$	$3,54 \times 10^{-4}$		
31	13,00	0,200					$1,27 \times 10^{-4}$	$9,77 \times 10^{-4}$
32	12,6	1,404			$4,52 \times 10^{-4}$	$3,58 \times 10^{-3}$		
Médias	16,31	0,731						

**Tabela 6.8 - Parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero aluvião
Recolhida e modificada de Holanda et al, (2003).**

Código do Poço	Espessura (m)	Vazão (m ³ /h)	T (m ² /s)	K (m/s)
30	9,71	1,079	$2,88 \times 10^{-3}$	$2,97 \times 10^{-6}$

**Tabela 6.9 - Parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero do meio de rochas cristalinas
Recolhida e modificada de Holanda et al, (2003).**

Código do Poço	Vazão (m ³ /h)	T (m ² /s)	K (m/s)
29	0,987	$5,83 \times 10^{-5}$	$5,95 \times 10^{-6}$

Tabela 6.10 - Parâmetros hidrodinâmicos do sistema misto Dunas /Paleodunas /Barreiras Recolhida e modificada de Holanda (2003).

Nº do Poço	Espessura (m)	Vazão (m ³ /h)	T (m ² /s)	K (m/s)
28	6,00	1,000	-	-
9	23,71	2,757	1,42 x 10 ⁻⁴	6,01 x 10 ⁻⁶
10	17,85	1,650	-	-
11	26,04	4,444	4,23 x 10 ⁻⁵	1,62 x 10 ⁻⁶
12	21,05	3,000	-	-
15	28,50	3,500	-	-
16	24,50	4,670	-	-
17	25,75	1,980	-	-
22	11,30	0,800	2,42 x 10 ⁻⁴	6,01 x 10 ⁻⁶
Médias	22,77	2,645		

Tabela 6.11 - Parâmetros hidrodinâmicos do sistema Barreiras/ Embasamento cristalino Recolhida e modificada de Holanda (2003).

Nº do Poço	Espessura (m)	Vazão (m ³ /h)	T (m ² /s)	K (m/s)
1	50,66	1,955	1,08 x 10 ⁻⁵	2,13 x 10 ⁻⁷
2	45,56	1,290	1,26 x 10 ⁻⁵	2,78 x 10 ⁻⁷
3	46,31	2,258	8,86 x 10 ⁻⁶	1,91 x 10 ⁻⁷
4	34,10	2,028	9,43 x 10 ⁻⁶	2,76 x 10 ⁻⁷
5	36,30	1,196	7,39 x 10 ⁻⁶	2,03 x 10 ⁻⁷
7	45,00	1,000	-	-
8	32,00	0,900	-	-
Médias	36,24	1,518	9,82 x 10⁻⁶	3,32 x 10⁻⁷

Confrontando trabalhos hidrogeológicos da COGERH (1999), de Marinho *et al.* (2000), Sabadia *et al.* (2002), Holanda *et al.* (2003) e empresas da iniciativa privada, observa-se discordância entre as informações, principalmente, no que se refere ao tipo de aquífero mais promissor.

Dentro da mesma área de Caucaia e Pecem, há aqueles que se direcionam somente para analisar o sistema Dunas /Barreiras e outros que subdividem as dunas tipificando-as isoladamente como unidade aquífera e, por fim, encontram-se aqueles que integram todas unidades: aluvião, dunas. Paleodunas, Barreiras e Cristalino.

A grande dificuldade encontrada acima para definir quem é quem, passa pela ausência de dados precisos. A maioria dos poços cadastrados e já comentados, carecem de perfis litológicos e parâmetros hidrodinâmicos que os definam. Os mapas potenciométricos nascem de iniciativas isoladas e são elaborados com insuficiência de dados, entretanto, esta é uma iniciativa salutar que acrescenta sempre algo de positivo.

6.2.2 Precipitação e Balanço Hídrico

A média pluviométrica anual na zona costeira do Estado do Ceará se situa entre 1.386 mm em Fortaleza, que representa o local mais úmido da zona costeira e 850 mm em Icapuí, onde se situa o setor mais seco (Ribeiro e Gonçalves, 1981; Bezerra et al., 1997; observe a figura. 6.3).

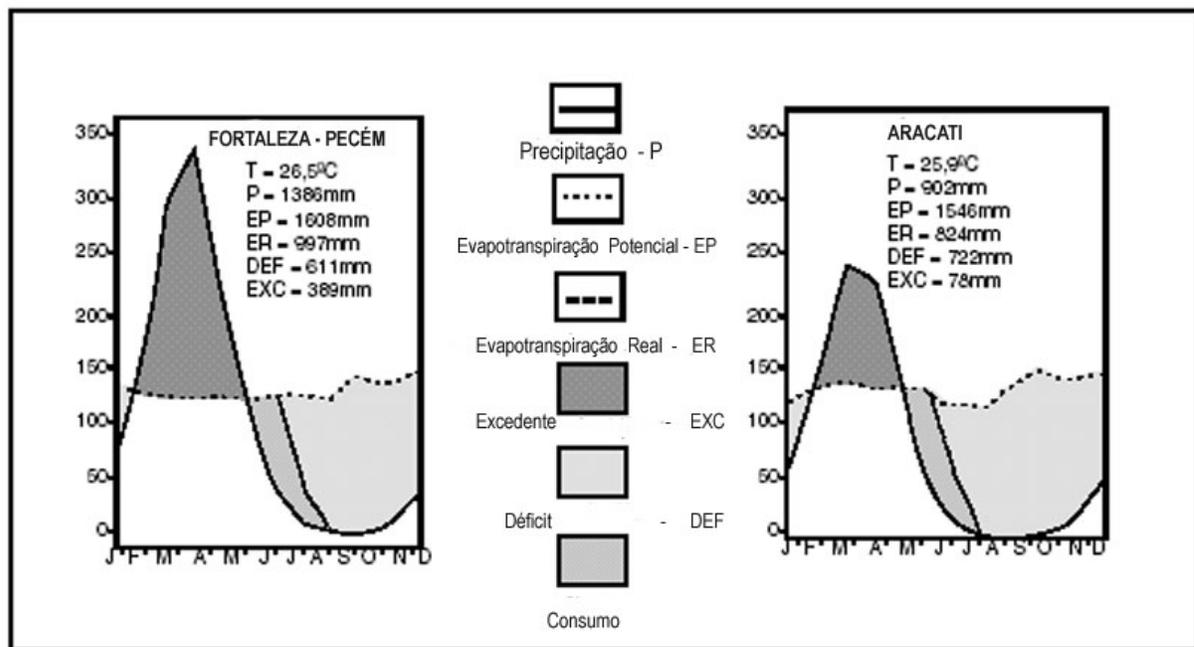


Figura 6.3 – Balanço Hídrico Atualizado para o Período de 1974 e 1997- Extensivo às Regiões de Aracati, Fortaleza, Caucaia e Pecém-Ce. Fonte Modificada de Bezerra 1967.

Mesmo que estes totais pluviométricos sejam pouco significantes são, em todo caso, mais elevados do que os das planícies do sertão, onde se faz sentir o efeito o d'abril, em relação ao maciço da Borborema (e.g. Ribeiro e Gonçalves, 1981; McGregor e Nieuwolt, 1999),

condições de semi-árido se em razão de balanceamentos sazonais da ZCIT e da variabilidade interanual. Assim, as chuvas estão principalmente concentradas entre os meses de fevereiro e de maio, donde uma ausência próxima completa de umidade para curso do inverno / primavera austral.

Os balanços hídricos são estabelecidos a partir de índices mensais de pluviometria, média de temperaturas, de valores de evaporação real, oferece uma genuína síntese de caracteres climáticos da zona costeira e fazem bem a conta das mudanças das condições hidrogeológicas da faixa marítima (pulsção do lençol freático, variação de nível e extensão de lagoas na costa).

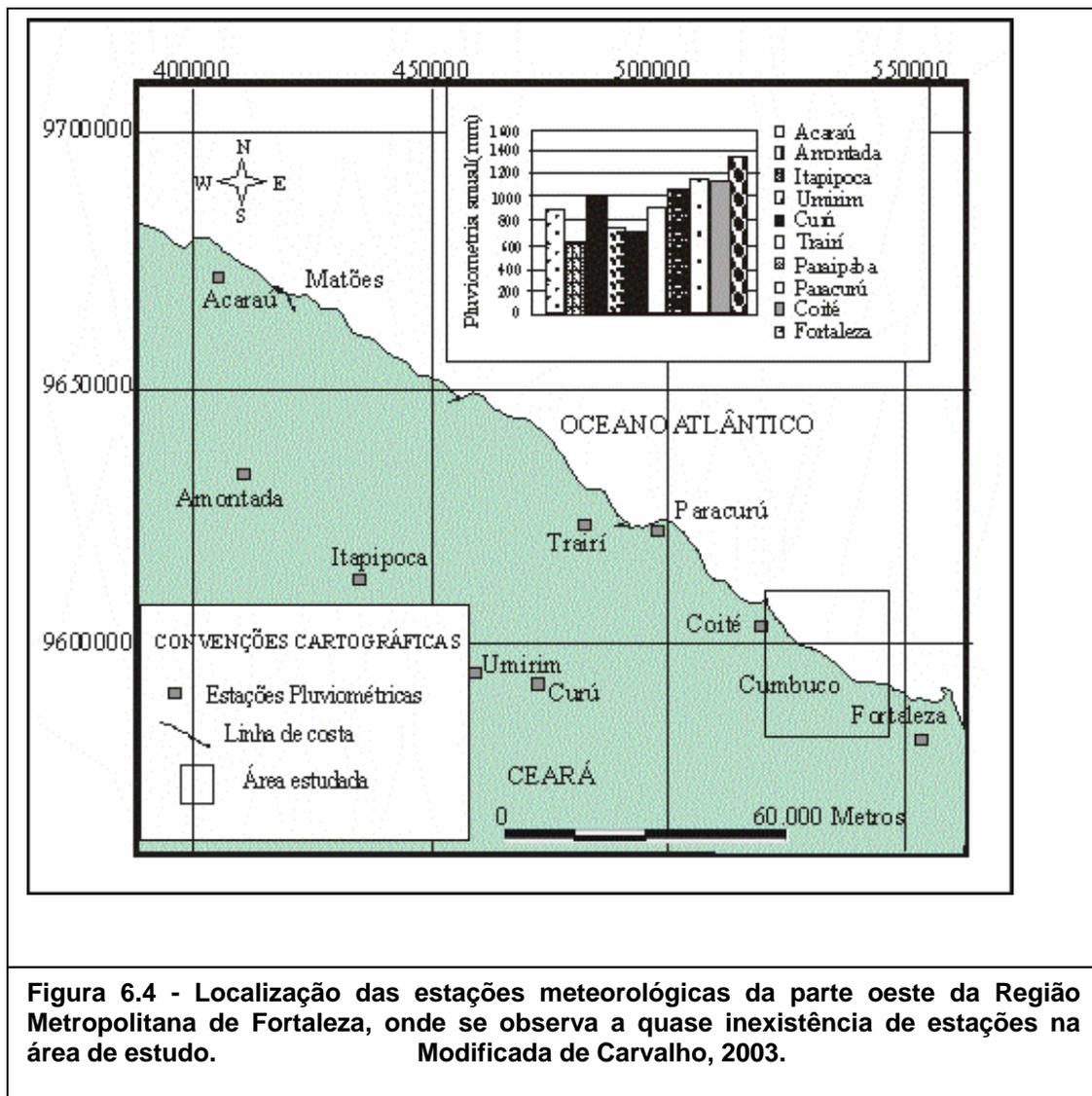
Disponibilidade de dados:

Analisando-se a maioria dos dados climáticos, incluindo direção e velocidade dos ventos, pluviometria, temperatura, insolação, nebulosidade e evaporação, foram obtidos de estações fixas, a exemplo da pertencente à Fundação Cearense de Meteorologia - FUNCEME, outros da Universidade Federal do Ceará – UFC e do banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Este conjunto de dados é referente às localidades entre Fortaleza e Jericoacoara (Fig. 6.4).

Como a Tabela 2.3 do Capítulo 2 (Características Gerais da Área de Estudo) possui dados meteorológicos da Estação de Fortaleza, com valores médios mensais do período 1974 a 1998 – FUNCEME/DATEN resolveu-se realizar o cálculo do Balanço Hídrico com dados da área de trabalho. Estes foram obtidos de um posto de observações meteorológicas da mesma Fundação na área, com medidas de totais mensais de precipitação pluviométrica, registradas no período de 1976 a 2000, com obtenção das médias mensais de precipitação para período, e temperaturas médias mensais (Figura 6.5). Os totais anuais de precipitação para este período estão apresentados na figura 6.6. Estes dados foram usados na elaboração do balanço hídrico. A base cartográfica com diferenciação dos tipos litológicos foi adaptada a partir de digitalização efetuada na escala de 1:100.000. Para elaboração do mapa potenciométrico com indicação do fluxo do lençol superficial, foram utilizados 11 poços do Atlas, CPRM (1999), 52 poços com cota, gentilmente, cedidos pelo Professor Paulo Thiers do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Ceará, 299 poços do

cadastro realizado pela PIVOT (2001) e 25 cacimbas e 3 poços cadastrados no Projeto Cauípe, Marinho e Vasconcelos (2000).

O balanço hídrico da área foi realizado utilizando-se os dados de precipitação, médias de totais mensais do período de 1976 a 2000, designados por PPT.



As temperaturas médias mensais, para o mesmo período, foram usadas na fórmula de Thornthwaite para o cálculo da evapotranspiração potencial (ETP). A estimativa da evapotranspiração real (ETR) foi efetuada admitindo que a capacidade máxima de retenção

de água no solo (C) é de 100 mm, conforme orientação de Castany, 1975. Obteve-se uma infiltração efetiva (I_e) anual de 238,3 mm, que corresponde a uma recarga subterrânea de $0,2383 \text{ m}^3$ por ano para cada m^2 de área de recarga (Tabela 6.6 e figura 6.7).

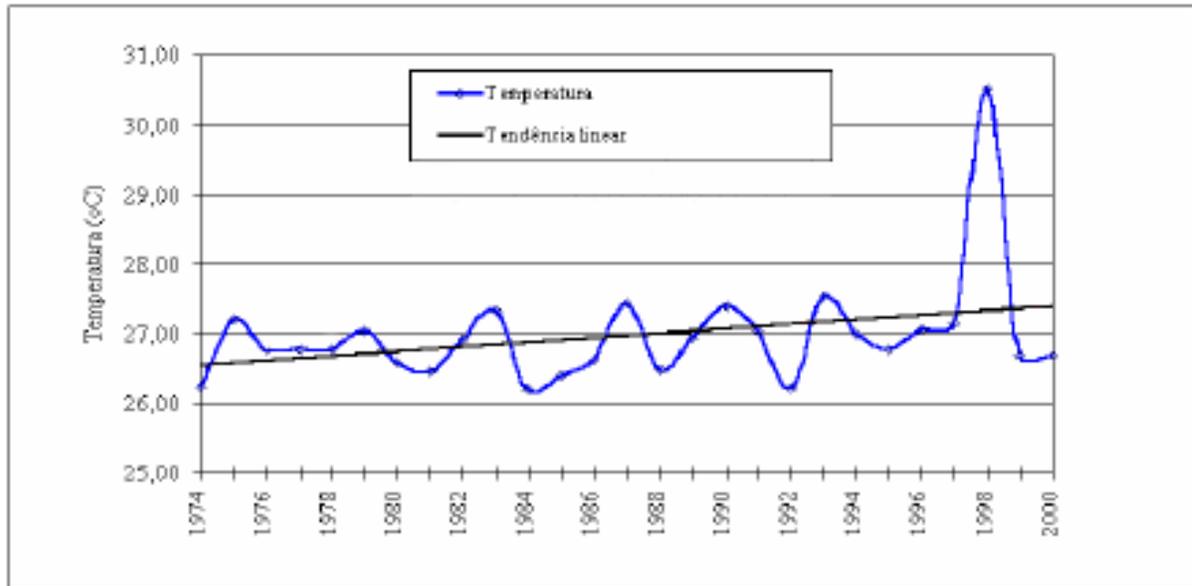


Figura 6.5 - Distribuição anual das médias mensais de temperatura na zona litorânea de Caucaia e Pecém-Ce.

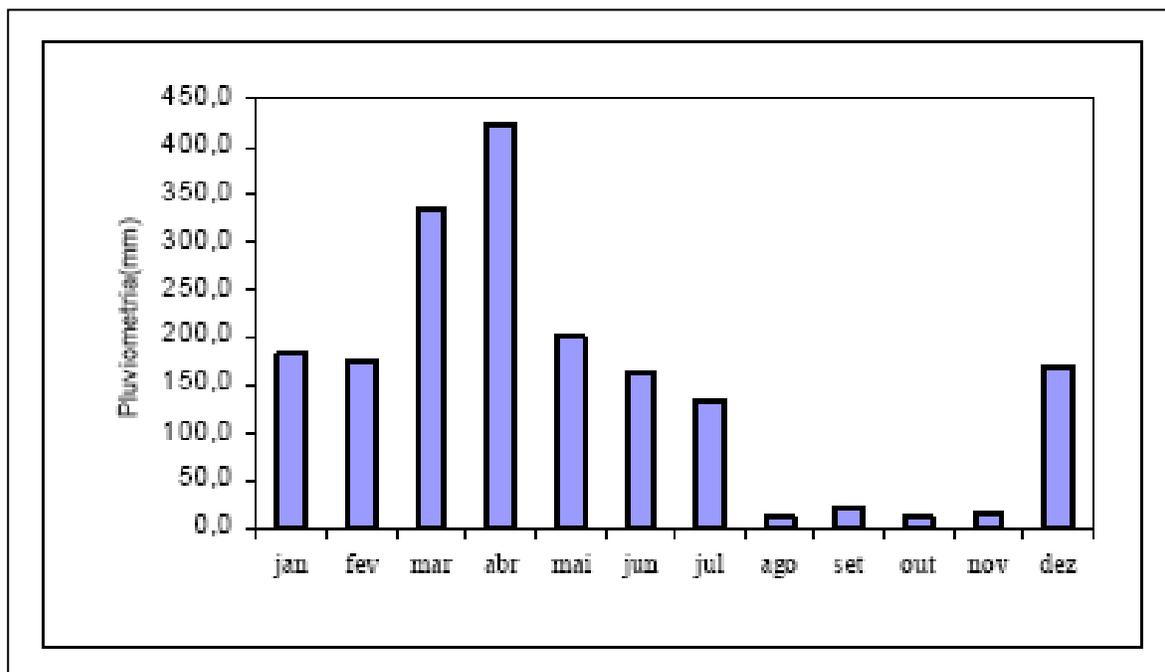
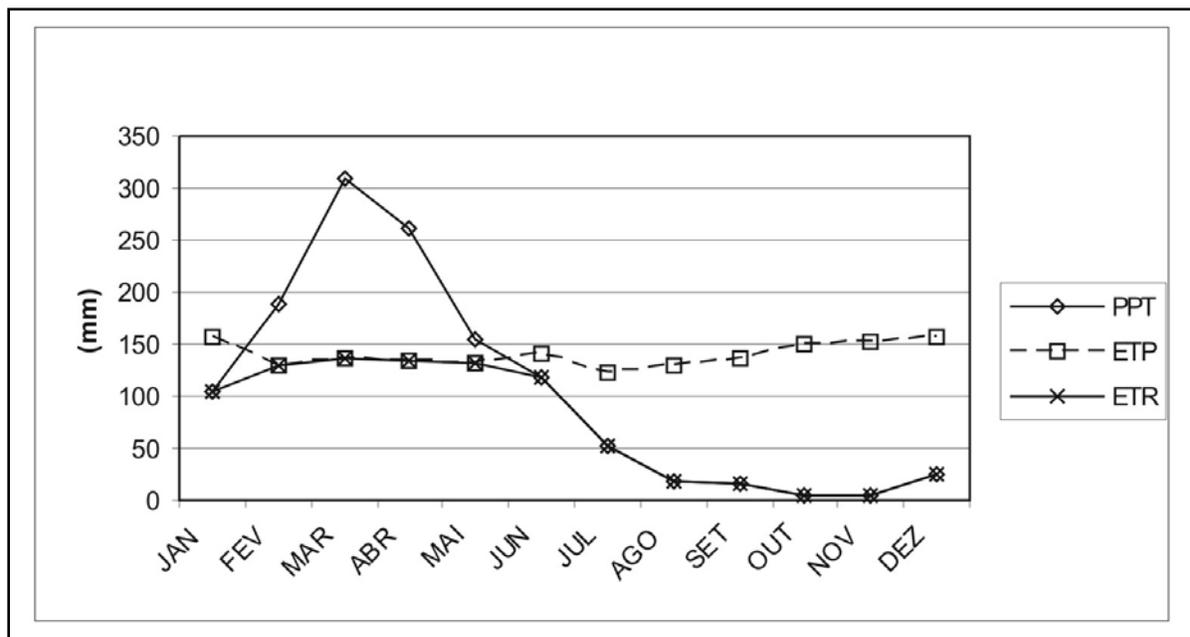


Figura 6.6 – Gráfico mostrando a distribuição dos totais anuais de precipitação pluviométrica no período entre 1976 e 2000. Recolhida e modificada de Medeiros 2003

Tabela 6.12 – Balanço hídrico e obtenção da infiltração efetiva anual.

Meses	PPT	ETP	PPT-ETP	C	ETR	le
JAN	104,2	157,9	-53,7	0,0	104,2	0,0
FEV	188,3	130,5	57,7	57,7	130,5	57,7
MAR	310,1	135,3	174,9	100,0	135,3	132,6
ABR	260,8	133,7	127,1	100,0	133,7	127,1
MAI	153,6	132,7	20,9	100,0	132,7	20,9
JUN	118,6	139,8	-21,2	78,8	118,6	0,0
JUL	52,5	122,0	-69,5	9,3	52,5	0,0
AGO	17,4	130,3	-112,9	0,0	17,4	0,0
SET	14,8	135,6	-120,8	0,0	14,8	0,0
OUT	4,1	150,3	-146,2	0,0	4,1	0,0
NOV	4,3	151,4	-147,1	0,0	4,3	0,0
DEZ	26,0	157,9	-131,9	0,0	26,0	0,0
Total	1254,7	1677,4			874,1	338,3

**Figura 6.7 - Gráfico da distribuição anual da precipitação (PPT), Evapotranspiração Potencial (ETP) e Evapotranspiração Real (ETR)**

6.3 Aspectos Preliminares Químico-Qualitativos dos Aqüíferos

Dentro do panorama geral, já observado na sinopse do Aqüífero Barreiras no Ceará, Cavalcante *et al.* 1996, realizaram um grande número de análises físico-químicas nas águas nos poços dos sistemas Dunas /Paleodunas e Barreiras. Usando o diagrama de Piper classificaram a grande maioria como as águas como cloretadas sódicas e mistas. Entretanto, o diagrama de Shoeller & Berkloff revela que, embora a água desses citados aqüíferos possuam boa qualidade, no que se refere à potabilidade, existem pontos onde as concentrações de cloretos estão acima do permitido.

Vieira Filho (2002) realizou um estudo hidroquímico na Região Litorânea de Caucaia-Ce, pretendendo identificar e qualificar as principais propriedades e componentes das águas superficiais e subterrâneas na tentativa de estabelecer uma relação com o ambiente físico. Dos poços selecionados, 29 foram submetidos a análises químicas e bacteriológicas de suas águas na Companhia de Água e Esgoto (CAGECE) (Tabela 6.7). Os resultados das análises químicas mostraram uma variação alta nos valores de concentração dos elementos químicos determinados indicando heterogeneidade dos aqüíferos.

Tabela 6.7 - Parâmetros estatísticos das análises químicas da Bacia do Rio Juá

	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼	NO ₃ ⁻	pH
Média	39.1	23.9	79.7	11.0	159.9	112.1	21.9	9.0	6.4
Máxima	132.0	112.0	520.0	107.0	1198.0	365.0	50.7	49.0	8.9
Mínima	3.6	0.2	4.8	2.4	12.0	9.0	3.2	0.9	5.1

Considerando as concentrações iônicas e comparando em relação a o padrão da Organização de Saúde Mundial, observa-se que somente quatro amostras são mais significativas (poços P16, P17, P18 e P19, Tabela 6.2). O poço P16 apresenta concentração mais alta de Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ e Cl⁻, considerando que os outros só apresentam concentração mais alta de Cl⁻. Estes poços são localizados em área mais interiores da bacia com profundidades de 19 a 30 metros e possuem taxas mais altas de exploração para abastecimento público.

Aguiar *et al* (1999), estudando a interferência da ocupação urbana nas águas da faixa costeira do Município de Caucaia-Ce, fez coletas de dados hidroquímicos em dois

períodos e apresentam os valores de condutividade elétrica e concentrações iônicas, em miligramas por litro (mg/L), das amostras coletadas em setembro de 1998 e em junho de 1999, respectivamente. Caracterizaram, quimicamente, essas águas através de uma análise comparativa das concentrações iônicas de todas amostras coletadas nesses dois períodos, utilizando os digramas de Piper mostrados nas figuras 6.8a e 6.8b. Observaram que não existe água sulfatada e que há predominância das águas do tipo bicarbonatada mista a cálcica e cloretada sódica nas duas coletas. Comparando os resultados das duas coletas, observaram-se quanto aos ânions que, tinham águas bicarbonatadas 22 amostras na primeira coleta e 23 na segunda; tinham águas cloretadas 16 amostras na primeira coleta e 14 na segunda; do tipo misto foram somente 2 amostras na primeira e 3 na segunda coleta.

Com relação aos cátions, amostras do tipo sódicas foram 14 na primeira coleta e 19 na segunda coleta, do tipo cálcica foram 9 na primeira coleta e 12 na segunda e do tipo mista foram 15 na primeira e 12 na segunda.

Águas cloretadas sódicas

Os histogramas das figuras 6.8 e 6.9 mostram que as razões rCl^-/rNa^+ na maioria das amostras coletadas em setembro de 1998 e junho de 1999 são da ordem do valor da água do mar e que, os valores das razões rMg^{++}/rCa^{++} estão numa faixa muito abaixo do valor da água do mar, com exceção dos poços P86, na coleta de setembro/98, P72 e P91, na coleta de junho/99, que apresentaram razões rMg^{++}/rCa^{++} em torno de 5,2.

Comparando os histogramas da figura 6.8, observa-se uma pequena variação no número de amostras nos intervalos de valores das razões rCl^-/rNa^+ após o período chuvoso (junho/99), com a diminuição do número máximo de amostras no intervalo de 3,4 para 2,2. Notadamente, nesta segunda coleta as razões rCl^-/rNa^+ apresentaram uma maior tendência ao valor da água do mar (1,17).

Estes resultados mostram que as águas de recarga não são do tipo das águas armazenadas, mas que há processos internos no sistema aquífero que modificam a composição química das águas, como é esperado. São processos que aumentam o sódio em relação aos cloretos e aumentam o cálcio em relação ao magnésio.

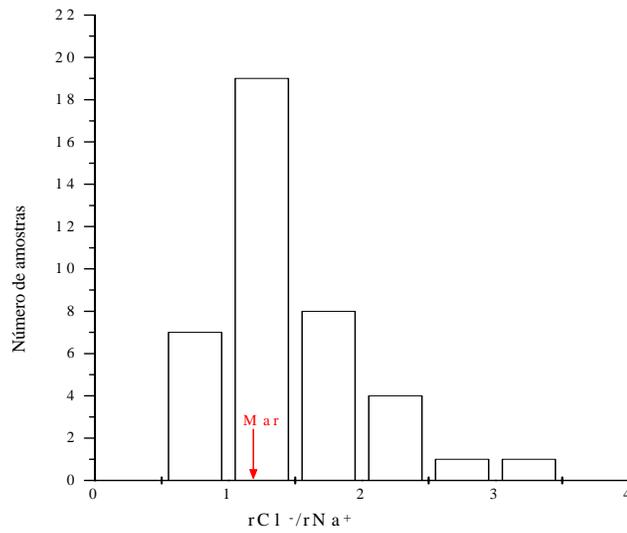
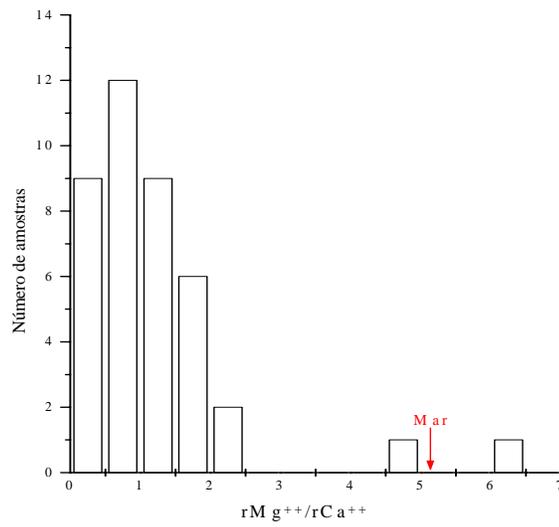


Figura 6.8 - Histograma das razões rCl^-/rNa^+ das amostras coletadas em (a) setembro/98 e (b) junho/99

(a)



(b)

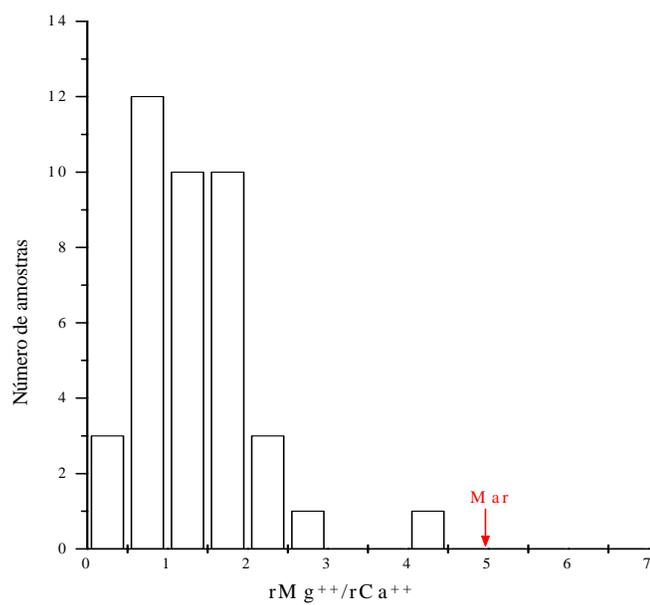
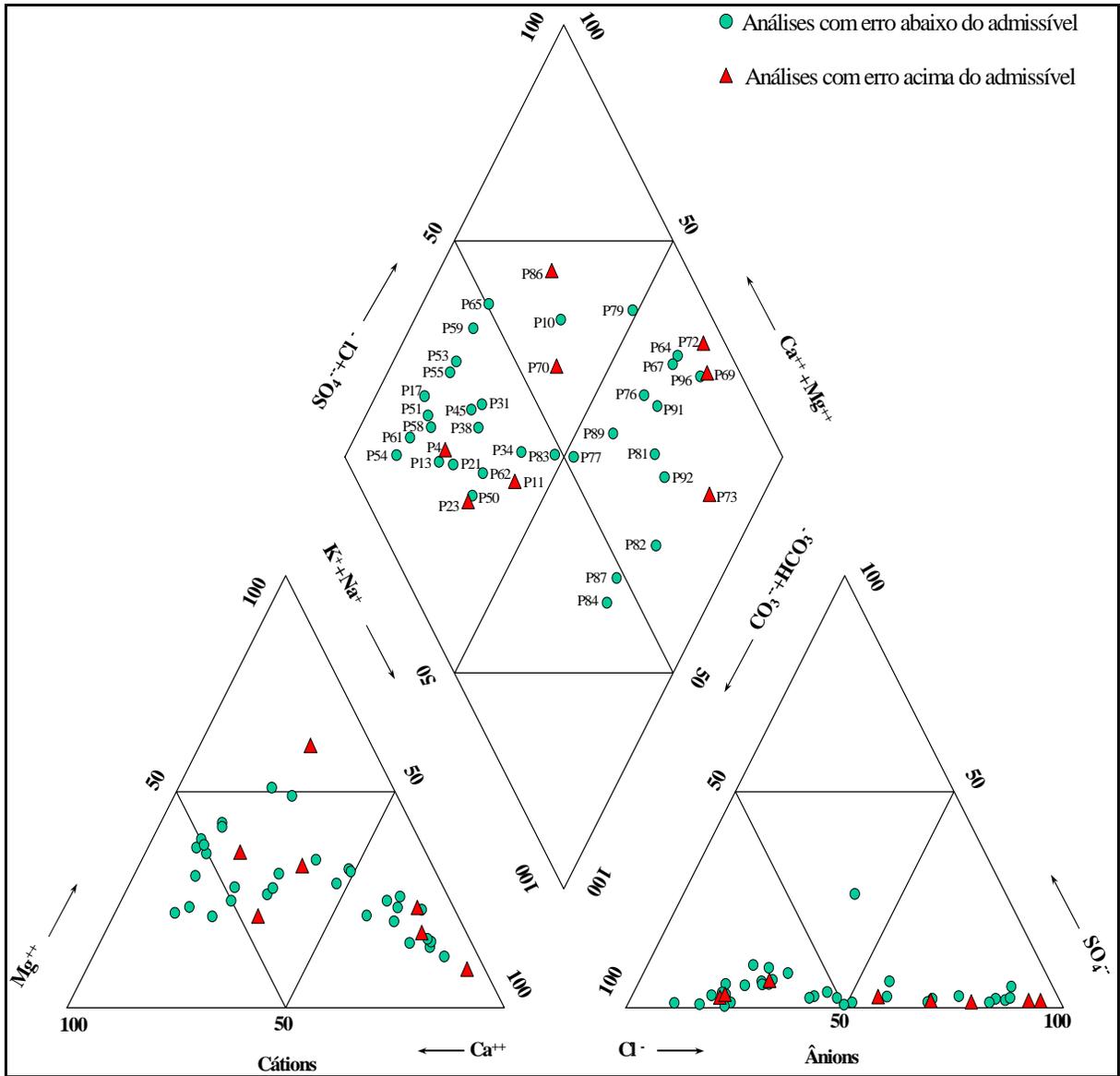


Figura 6.9 - Histogramas das razões rMg^{++}/rCa^{++} das amostras coletadas em (a) setembro/98 e (b) junho/99



**Figura 6.8a – Diagrama de Piper das amostras d'água coletadas em setembro/98
Recolhida de Aguiar (1999)**

Uma origem possível dos íons Cl^- e Na^+ é a deposição úmida de aerossóis procedentes do mar, responsável pelas águas de chuvas cloretadas sódicas em áreas da costa (Moreira-Nordmann, et al., 1989). Estudos anteriores mostram que a água da chuva carrega sais de Cl^- vindos da água do mar e que, a concentração de Cl^- diminui com o aumento da distância à costa (Rebouças, 1973 e Santiago, 1984). Quando este processo é responsável pela concentração desses íons nas águas superficiais e subterrâneas, as razões $r\text{Cl}^-/r\text{Na}^+$ são da ordem das encontradas na água do mar (1,17), definida por Laraque, 1991. Os valores na área (Figura 6.10) indicam os aerossóis marinhos como a principal fonte de Cl^- e Na^+ .

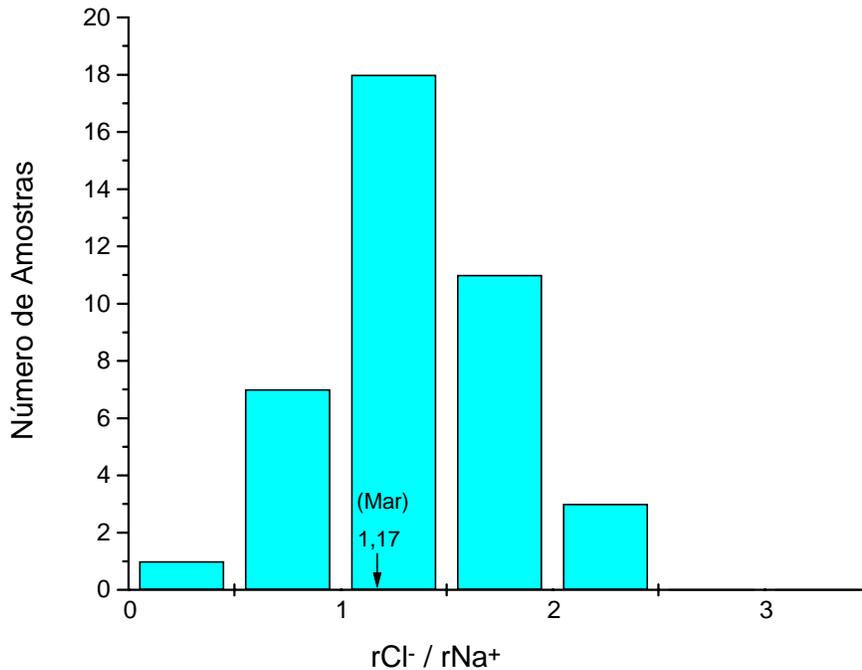


Figura 6.10 – Histograma das razões rCl^- / rNa^+

6.3.1 Composição da Água Subterrânea: Relação Água doce-Água salgada

a) Composição das águas subterrâneas

Na água subterrânea natural, a maioria das substâncias dissolvidas se encontram em estado iônico. Certos íons, que se encontram presentes quase sempre e cujas somas representam quase a totalidade dos tipos de íons dissolvidos são denominados, menores ou maiores.

Os íons fundamentais são os Anions Cloro (Cl^-), Sulfato (SO_4^{2-}) e Bicarbonato (CO_3H^-), podendo ainda incluir o Nitrato (NO_3^-) e o Carbonato (CO_3^{2-}) (em geral considerados íons menores); e os Cátions Sódio (Na^+), Cálcio (Ca^{++}) e Magnésio (Mg^{++}), podendo ainda incluir o Potássio (K^+) e o Íon Ferroso (Fe^{++}) (em geral considerados íons menores).

Entre os gases é considerado como fundamentais o anidrido carbônico (CO_2) e o oxigênio dissolvido (O_2), e entre as substâncias dissolvidas pouco ionizadas no estado coloidal são importantes os ácidos e anions derivados da sílica (SiO_2).

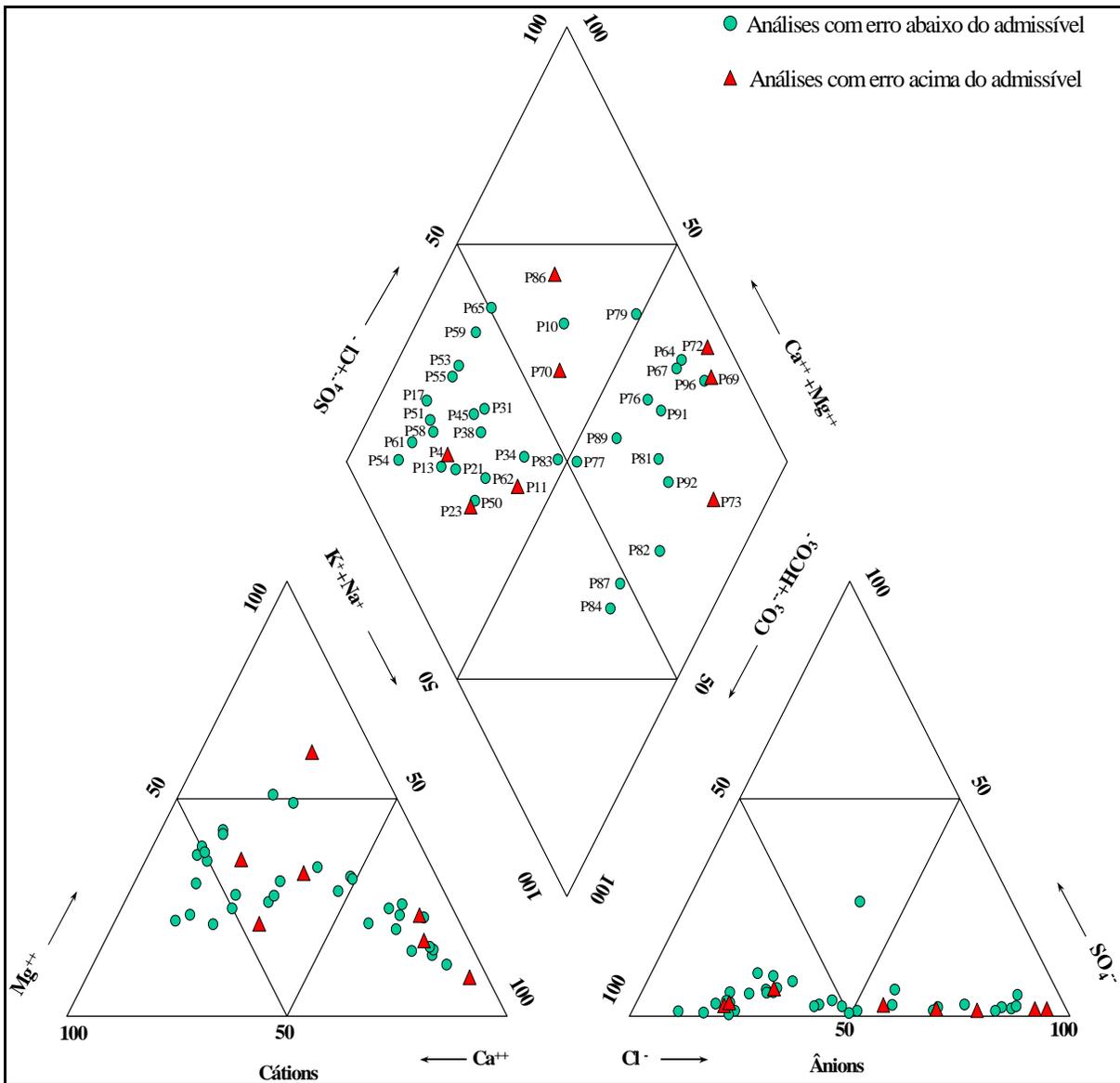


Figura 6.8b - Diagrama de Piper das amostras d'água coletadas em junho/99 Recolhida de Aguiar(1999)

O restante dos íons e substâncias dissolvidas que se encontra em quantidades bem menores, formando menos de 1% do conteúdo total iônico, são chamados de *íons menores*. Aqueles que estão presentes em quantidade dificilmente medidos por métodos químicos usuais, são denominados *elementos traços*.

Os íons menores mais importantes em concentrações entre 0,01 e 10 mg/L são o NO_3^- , NO_2^- , F^- , CO_3^{2-} , K^+ , Fe^{2+} , NH_4^+ e Sr^{2+} ; em concentrações entre 0,0001 e 0,1 mg/L são o Br^- , S^{2-} , PO_4^{3-} , BO_3H_2^- , NO_2^- , OH^- , I^- , Fe^{3+} , Mn^{2+} , NH_4^+ , H^+ , Al^{3+} , e etc.

Os íons metálicos derivados do As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, Ba, V, Hg, U, etc., às vezes, estão em quantidades miscíveis, porém em geral são elementos traços.

As águas subterrâneas chamadas *doces* contêm no máximo 1000 mg/L (às vezes 2000) de substâncias dissolvidas, acima disto até 5000 mg/L são chamadas de *salobras*, até 40000 mg/L são chamadas de *águas salgadas* e acima disto até 300000 mg/L são chamadas de *salmouras*. Nestas últimas, mesmo contendo quantidades elevadas de elementos menores e traços, ainda domina os íons Cl^- e Na^+ , às vezes também Ca^{++} .

b) Relações água doce – água salgada em regiões costeiras

Aspectos químicos:

O melhor indicador da contaminação marinha é o íon Cl^- , que não é alterado pela circulação e nem pelo terreno. Entretanto, é preciso assegurar que não procede do terreno ou de fugas de águas salinas antigas. A água marinha, a água salgada e a água proveniente da mistura de ambas, apresentam propriedades muito diferentes quanto a composição química, salinidade, força iônica e incluindo o pH. Havendo deslocamento das mesmas, dentro do aquífero se produzem mudanças físicas e químicas nas zonas afetadas. Estas mudanças podem consistir em variações na permeabilidade, em geral aumentando a uma certa quantidade a permeabilidade do terreno afetado pela água salgada (Goldberg & Babushkin, 1963) e também alterando a capacidade de dissolução da água. Outras modificações afetam a composição química da água por reação no terreno, pois existe ainda a possibilidade de que precipitações ou dissoluções possam produzir mudanças iônicas.

Aparte o estudo da variação temporal ou espacial do conteúdo em cloros, é indicativo o rápido aumento da relação:

$$R \text{ Cl}^- / r \text{ CO}_3\text{H} \quad (r = \text{meq/l});$$

Visto que, a água marinha não aporta quantidades significativas de CO_3H e sim de Cl^- , enquanto que em águas continentais acontece ao contrário. Também se pode analisar o aumento da relação $r \text{ Mg} / r \text{ Ca}$, ainda que seja um índice menos representativo.

6.3.2 Cloretos (ou STD) na água de aquíferos e suas características físicas

A invasão na água doce pela intrusão de água salina em aquíferos costeiros ou não é um movimento de água, tal como de uma água doce num pântano. Sob condições naturais, o movimento do fluxo de água doce para o mar impede a invasão da água

salgada nos aquíferos costeiros e, por esse fato, à interface entre a água doce e a água salgada é mantida próxima ou distante da costa na sub-superfície da terra. Pode haver invasão salina como resultado de um processo natural com uma tempestade surgida de um furacão. Entretanto, mais freqüentemente, a intrusão de água salgada resulta de atividades humanas, tais como bombeamentos excessivos em zonas costeiras (como observado na parte introdutória da tese).

Intrusão de água salgada pode ser prejudicial para o consumo populacional em zonas costeiras, para agricultura em zonas úmidas como na região estudada e para os pântanos também, porque a alta concentração de sal pode adversamente afetar sua vegetação. Por exemplo, quando a água altamente salina entra numa água de baixa salinidade, ou não salina, a maioria das plantas nativas podem ser mortas, porque os sistemas de raízes das plantas, juntamente com os solos, são essenciais ao domínio dos pântanos e, nestas condições, conduzem as plantas à perda de suas vidas, facilitando uma rápida erosão no ecossistema.

O gosto salgado da água se dá em função da quantidade de cloretos. Sua concentração é definida como a quantidade de gramas de cloreto em um litro de água, ou seja, g/L ou partes por mil. Tudo vai depender da percentagem de sólidos totais dissolvidos (STD), que são representados por sólidos dissolvidos na forma coloidal em solução (partículas < 12 μ m).

Conforme a quantidade de sólidos dissolvidos, as águas podem ser classificadas, segundo Mcneely et al., (1979) em: doces (STD < 1.000 ppm); ligeiramente salobras (1.000 - STD < 3.000 ppm); moderadamente salobras (1.000 - STD < 10.000 ppm); salgadas 10.000 - STD < (100.000 ppm); e salmoura (STD > 100.000). A água do mar tem uma concentração média de aproximadamente 19.000 ppm ou 55% de Sólidos Totais Dissolvidos (STD). A temperatura influencia os processos biológicos, as reações químicas e, também, a solubilidade dos gases dissolvidos na água.

Têm-se as condutividades elétricas, que é a capacidade da água transmitir a corrente elétrica através de substâncias dissolvidas. Esta depende do tipo e da quantidade de concentração da espécie iônica, valência e mobilidade do íon e da temperatura do meio. É um parâmetro importante porque sugere o tipo de material que a água está em contato. Por exemplo, tem-se maior condutividade em quantidade em águas associadas a calcários e basaltos do que associadas a granitos e quartzitos. Seu parâmetro é

medido com um condutímetro e seus resultados expressos em: microSiems/cm ($\mu\text{S/cm}$), equivalente a microOhms/cm. Exemplos: águas naturais situadas entre 5 – 50 $\mu\text{S/cm}$ e a água do mar entre 5.000 – 50.000 $\mu\text{S/cm}$. A quantidade de STD (mg/L) é diretamente proporcional à condutividade em microOhms/cm e que pode ser estimada pela soma dos cátions em meq/L.

Medidas de salinidade (quantidade de sal dissolvido em determinado volume de água) são feitas através da condutividade, densidade, velocidade sonora ou índice de refração. A concentração em águas naturais varia amplamente. O rio de regiões úmidas geralmente tem concentração de cloretos inferior a poucos miligramas por litro (mg/l). Em regiões áridas, em função do predomínio da evaporação sobre a precipitação, a concentração de cloretos pode alcançar algumas centenas de mg/l.

Os cloretos são alguns minerais que controlam o gosto da água; contudo, a concentração de cloreto não deve exceder o padrão da água de beber. O padrão comum de cloretos em água de beber para o consumo humano, em regiões desenvolvidas, é de 250 ppm. Em muitas áreas do mundo, fontes de concentração acima de 2.0 mg/L são utilizadas para propósitos domésticos. Altas concentrações de cloreto na água de beber são questionáveis, por causa dos possíveis efeitos fisiológicos, gosto mineral intragável, elevado custo, por causa da corrosão e da necessidade de tratamento adicional.

Cloretos têm uma vital importância no crescimento da vegetação, como já foi observado Mcneely et al., (op cit). Uma das fontes de cloreto na vegetação é o conteúdo de cloretos nas águas de irrigação; visto que altas concentrações de cloreto podem ter impactos adversos. Alguns resultados de estudos e de investigação indicam que impactos não são observados se a concentração de cloretos na água de irrigação for menor que menor que 0.14 g/l. Os impactos na vegetação variam de ligeiro a moderada para uma faixa de concentração que aumenta de 0.14 a 0.36 g/l. Os impactos são graves se a concentração de cloretos na área de irrigação excede 0.36 mg/L.

A água com elevadas concentrações de cloreto pode causar impacto sobre o gado e peixes de água doce. O setor avícola ou animais sensíveis podem mostrar ligeiros efeitos com o uso prolongado de águas com concentrações acima de 1.5 g/L. Os efeitos tornam-se adversos se a concentração de cloretos excede 3.0 g/l. Todas espécies de peixe e vida aquática podem tolerar uma determinada faixa de cloretos, na ordem de menos de 2.5 g/L para sobreviver em condições naturais; contudo, a água com

concentrações de cloretos em excesso a partir de 15.0 g/L, 5 – 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ torna-se inconvenientes para maioria dos peixes de água doce.

6.3 Estado da Arte da Intrusão Salina em Aquíferos Costeiros Locais

Este problema ambiental de caráter mundial está se tornando cada vez mais crescente em áreas costeiras agricultáveis ou com assentamentos populacionais urbanos, onde materiais de granulação fina desenvolvem uma espessa franja capilar por onde se infiltram os efluentes. Efeitos negativos de atividades humanas têm sido registrados em muitas áreas do mundo. Conseqüentemente, este problema tem aumentado em áreas de pobres recursos d'água, pela baixa precipitação e alta evapotranspiração, pelo mau gerenciamento dos recursos d'água ou em áreas com densas populações e altas faixas de consumo (khair et al. 1994).

Recentemente, Ano 2003, o “Instituto Geológico y Minero de España (IGME)”, organismo de caráter autônomo, ligado ao Ministério de Ciência e Tecnologia, através da Secretaria Geral de Política Científica, realizou o Congresso Internacional sobre “Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar em Acuíferos Costeros: Países Mediterrâneos” TIAC' 03. Este congresso é realizado de 2 em 2 anos e isto tem demonstrado o interesse da comunidade em relação ao assunto

Após exame de trabalhos diversificados sobre intrusão salina em zonas costeiras, considera-se que os estudos abaixo comentados e encontrados na bibliografia nacional e internacional representam dentro de uma visão provisional o “Atual Estado da Arte” do assunto a ser pesquisado, afunilando este estágio mais amiúde para o estagio dos atuais aquíferos costeiros do Estado do Ceará.

Montenegro et. al. (2000) observaram na Região Metropolitana do Recife (RMR) problemas de rebaixamento potenciométrico elevado e aumento de teores de sais dissolvidos nas águas captadas em vários poços condominiais, no Aquífero Cabo, após uma campanha de campo em 1999 a aproximadamente 150m do contorno de praia. Verificaram também uma tendência de crescimento, na medida em que se aproximam da Bacia do Pina, região de estuário, na Grande Recife, com evidentes

Aguiar et. al. (2000) referem-se a um estudo da origem dos sais nos sistemas aquíferos Dunas e Dunas/Barreiras, no município de Caucaia-Ce, através da análise de 40

amostras coletadas em setembro/98 e fevereiro /99. As análises mostraram uma salinidade de baixa a média e uma condutividade de 157 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 880 $\mu\text{S}/\text{cm}$, em contraste com valores de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 4.630 $\mu\text{S}/\text{cm}$ da salinidade de água de poços perfurados em rochas cristalinas ali existentes. Com estudos de isótopos estáveis de oxigênio-18 e deutério concluíram que os cloretos encontrados são provenientes de aerossóis marinhos e não da contribuição direta de intrusão marinha.

Marinho & Vasconcelos (2000), através de Sondagens Elétricas Verticais e medidas de condutividade elétricas voltadas para estudos hidrogeológicos da Zona Costeira da Bacia de Cauípe, Caucaia, Estado do Ceará, encontraram uma zona mista de explorações de aquíferos sedimentar e fissural (do embasamento cristalino da região) com bom aumento de vazão. Entretanto, surgiram indicações de uma contribuição salina deste último no aquífero da Formação Barreiras.

Estudos geofísicos realizados por Nowroozi et. al. (1999) na parte oriental da costa da Virgínia, representam exemplos mais clássicos da literatura geológica, onde através da construção de 111 curvas de sondagens de campo usando o Método de arranjo Schlumberger, detectaram contrastes entre as altas resistividades das zonas saturadas de água doce e as baixas resistividades aparente das zonas saturadas de 880 $\mu\text{S}/\text{cm}$, em contraste com valores de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ água salgada, numa estreita faixa da Baía de Chesapeake e a Região Costeira de Accomack, no Oceano Atlântico. Este indica na literatura geológica ser um dos trabalhos mais completos em termos de integração de parâmetros geofísicos de resistividade, determinando a forma da intrusão salina com a integração de valores de sondagens obtidas em níveis diferentes dos dois lados da referida Baía.

7. METODOLOGIA GEOFÍSICA: CONTEXTO DA INTRUSÃO SALINA

7. METODOLOGIA GEOFÍSICA: CONTEXTO DA INTRUSÃO SALINA

7.1. Introdução

A prospecção geofísica pode ser definida como a ciência que estuda a estrutura e a composição do subsolo, através da aplicação de princípios e métodos da física, com o objetivo de obter um benefício científico e econômico.

Este tipo de prospecção tem colocado a serviço do geólogo e de outros profissionais congêneres um leque de técnicas que permitem a medida de diferentes propriedades físicas das formações geológicas. Desse modo, podem ser determinadas as diferenças na distribuição da densidade (**gravimetria**), da velocidade de propagação de ondas elásticas (**sísmica de refração ou de reflexão**), da suscetibilidade magnética (**magnetometria**) ou da resistividade e/ou condutividade elétrica (**método elétrico e/ou eletromagnético**).

A escolha entre um método ou outro, ou mesmo a combinação de 2 ou 3 entre vários métodos, não é uma decisão aleatória, mas fundamentalmente básica ao primeiro passo de qualquer estudo para se obter resultados coerentes com a realidade do meio. A eleição depende de vários fatores, tais como o contraste de propriedades físicas entre o objetivo e seu entorno, a profundidade de investigação, a resolução necessária e também das condições logísticas que beneficiam determinadas técnicas sobre outras, uma vez que, sempre se tem em mente estabelecer uma melhor relação custo/ benefício.

No âmbito da hidrogeologia, a geofísica participa de três níveis distintos:

- No estudo da geometria do aquífero, que consiste não só em determinar a profundidade da base e do topo do aquífero, mas também sua extensão lateral;
- No conhecimento dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, ou seja, estabelecer uma correlação entre os parâmetros físicos medidos por geofísica e as propriedades hidráulicas do aquífero;
- Na determinação da qualidade da água subterrânea nos aquíferos contaminados por sais minerais ou componentes orgânicos, geralmente, aproveitando a variação da resistividade elétrica em função da salinidade.

7.1.1 Relação entre Parâmetros Geofísicos e Hidrogeológicos

Na maioria dos estudos hidrogeológicos, um terreno saturado em água se considera sempre, por razões práticas, como se fosse um modelo de duas fases: uma matriz de rocha isolante e a outra a água intersticial. O fluxo da água e a corrente elétrica se movem através dos espaços intergranulares, como se observa na figura 7.1.

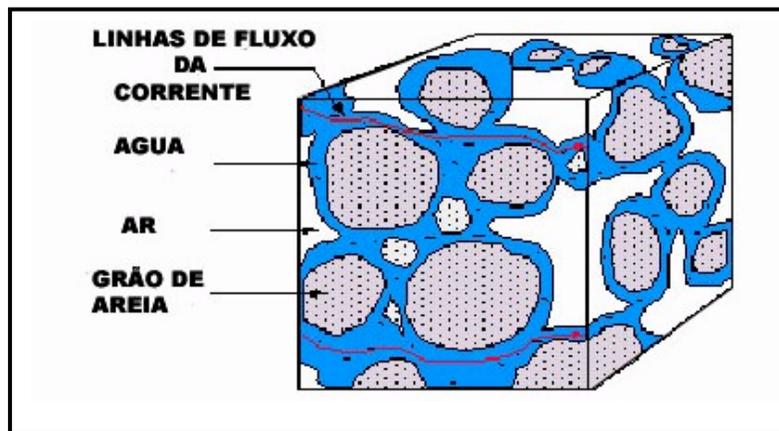


Figura 7.1 - Esquema do fluxo no solo.

Nestas condições, a condutividade elétrica está controlada por vários fatores, que de modo conciso, são os seguintes:

- Porosidade;
- Condutividade do líquido de saturação;
- Textura da rocha hospedeira e tamanho dos poros;
- Grau de saturação (fração da porosidade saturada);
- Temperatura;
- Presença das argilas de média a alta capacidade de intercâmbio catiônico CEC & CEC (*Cation Exchange Capacity*).

Archie (1942) desenvolveu experimentalmente para os três primeiros fatores uma relação empírica entre a resistividade ρ_o de uma formação saturada a 100% de água salgada e a resistividade do fluxo saturante ρ_w cuja expressão é a seguinte:

$$\rho_o = F\rho_w$$

Onde F é um fator denominado “Fator de Formação”

A partir da análise dos gráficos do fator de formação em função da porosidade, (figura 7.2), o autor estabelece a seguinte relação:

$$F = \frac{1}{\phi^m}$$

(2)

Donde ϕ é a porosidade e m se denomina expoente “*expoente de cimentação*” ou também chamado “*coeficiente de distribuição do vazio*” e varia de 1.3 a 2.35, dependendo do tamanho dos grãos, de suas distribuições e da complexidade do caminhos intersticiais ou tortuosidade (Cassirage & Gomes, 1996)

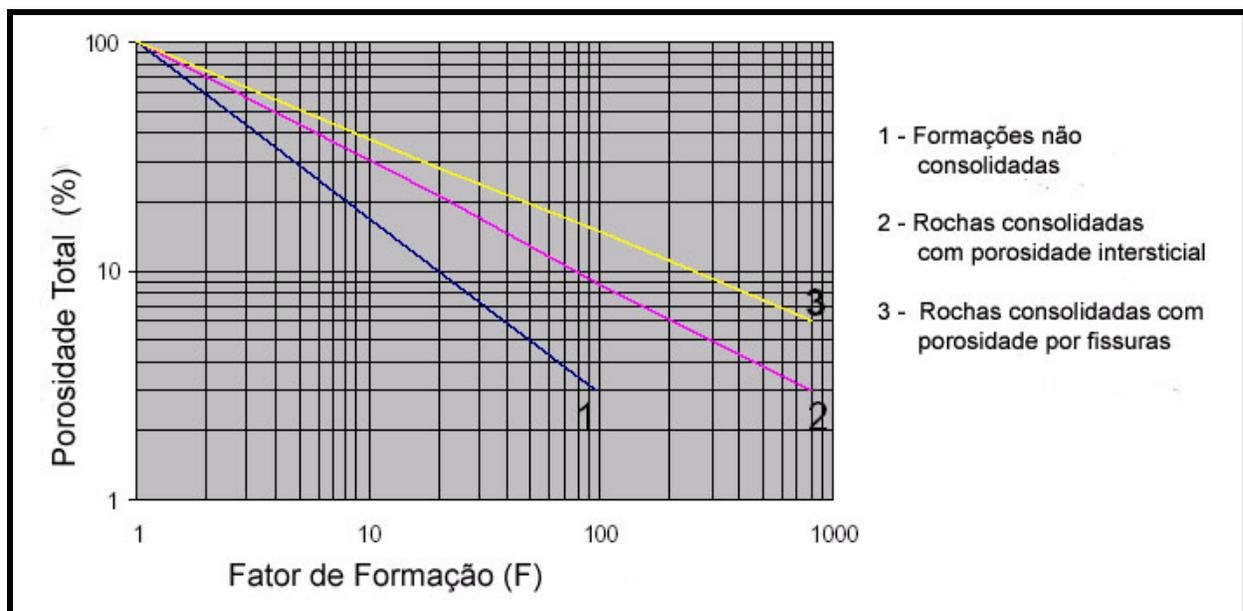


Figura 7. 2 - Curvas de porosidade total de uma formação aquífera saturada não argilosa em função do fator de formação.

A resistividade das formações aquíferas decresce mais rapidamente para as rochas fraturadas do que para as rochas porosas quando a porosidade aumenta. Teoricamente, a porosidade total de uma formação aluvial não supera os 47.6 %. Observando-se a linha 1

da figura 7.2 em questão, esta corresponde a um fator de formação 2.5. Então, quando o fator de formação é menor do que 2.5, de acordo com Astier (1971), o terreno tem certo conteúdo argiloso.

De outro lado, para um meio parcialmente saturado, apresentou uma relação que descreve a variação da resistividade das areias com conteúdo de água em seus poros. Para conteúdos de água entre 15 e 20 %, estabeleceu a seguinte relação:

$$S_w = \left(\frac{\rho_o}{\rho_t} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

Onde S_w é a saturação em água (proporção de poros ocupados por água), ρ_o é a resistividade do solo saturado, ρ_t é a resistividade da formação não saturada, e n é o expoente de saturação, cujos valores variam entre 1.8 e 2.5.

Combinando estas fórmulas se obtém a relação conhecida na literatura como *Equação de Archie* para a estimar da saturação da água e se escreve:

$$S_w = \left(\frac{F \rho_w}{\rho_t} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

Posteriormente, a relação (2) foi modificada por Winsauer (1956), com a introdução de um novo coeficiente a que depende da textura da rocha:

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad (5)$$

O coeficiente a varia entre 0.5 e 1.5, segundo a textura da rocha.

Determinando experimentalmente a relação entre a resistividade de uma mostra e a resistividade da água para diferentes porosidades de amostras granulares e não coerentemente saturadas Zarroca (1980), obteve uma expressão parecida com a de Winsauer (1956):

(6)

$$F = \frac{10^{2.58}}{\phi^{1.28}}$$

A condutividade da água de saturação é dada por:

$$\sigma_w = 96500 \sum C_i M_i \quad (7)$$

onde:

C_i = número de gramas equivalentes de cada íon por m^3 de água

M_i = a mobilidade iônica de cada íon (m^2/sV)

A relação entre a condutividade elétrica do terreno e a temperatura determina-se (a temperaturas superiores a de congelamento) pela temperatura dos íons moveis, sendo esta última da ordem de 2% por grau de temperatura para íons comuns. Este coeficiente é relativamente grande. Portanto, a condutividade pode variar significativamente com a temperatura, segundo McNeill (1990).

A presença das argilas é considerada sempre como um componente adicional à condutividade elétrica que é uma função do conteúdo e do tipo das argilas, já que é uma função da capacidade de intercâmbio catiônico, segundo Keller e Frischknecht (1982), e independe essencialmente do componente iônico. Então, a equação da condutividade elétrica passa a ser:

$$\sigma_a = \sigma_w \Phi^m + \sigma_{\text{argilas}} \quad (8)$$

No tocante à contribuição das argilas, observa-se o fato claramente quando a concentração do condutor iônico é baixa e, ao contrário, é insignificante para elevadas concentrações iônicas. Especialmente, para as argilas de baixa a moderada capacidade de intercâmbio catiônico.

7.2. Prospecção Geofísica Elétrica

7.2.1. Introdução

Dentre os métodos elétricos de prospecção geofísica, um dos mais populares e utilizados na atualidade é o método de resistividades. Suas vantagens são numerosas e podem se resumir no seguinte:

- Numa metodologia muito simples;
- Numa metodologia rápida;
- Num baixo custo econômico;
- Podem alcançar notáveis profundidades de investigação.

O campo de aplicação é muito amplo e abrange desde investigações de pouca profundidade até outras maiores e mais profundas, como acontece com a investigação petrolífera, onde se alcançam profundidades de milhares de metros. Como caso intermediário, pode-se citar sua aplicação na prospecção hidrogeológica, onde se observa que a profundidade é de centenas de metros.

7.2.2. Método de Resistividade

No método de resistividades se cria um campo elétrico mediante dois eletrodos pontuais A e B denominados de emissão, através dos quais se injeta no terreno uma corrente elétrica contínua de intensidade I . Entre outros dois pontos do terreno com ajuda de dois eletrodos M e N de medida, situados nestes pontos e mediante o correspondente instrumento de medida, se medem as diferenças de potencial, ΔU , que se têm gerado. A disposição relativa dos eletrodos A, B, M e N, que configuram o dispositivo tetraeletródico, está determinada pelo tipo de problema geológico que se quer resolver.

Os eletrodos A e B criam no ponto M, que dista de eles de uma distância r_{AM} e r_{BM} um campo elétrico com potenciais U_{MA} e U_{MB} , segundo as expressões:

$$U_{MA} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{AM}}, \quad U_{MB} = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{BM}} \quad (9)$$

O potencial total no ponto **M** é:

$$U_M = U_{MA} + U_{MB} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{AM}} - \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{BM}} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) \quad (10)$$

De modo análogo, o potencial no ponto **N** é:

$$U_N = U_{NA} + U_{NB} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{AN}} - \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{BN}} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) \quad (11)$$

A diferença de potencial entre os pontos **M** e **N** será:

$$\begin{aligned} \Delta U = U_M - U_N &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) \\ &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

Desta equação se obtém a seguinte expressão para a resistividade r de um meio homogêneo, em cuja superfície se encontra um dispositivo tetraeletródico:

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I} \quad (13)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}}$$

(14)

A magnitude K está só em função da distribuição dos quatro eletrodos sobre o terreno e se denomina coeficiente do dispositivo. Segundo a expressão (14), o coeficiente do dispositivo tem dimensões de longitude.

A expressão (13), obtida para um meio homogêneo, pode ser aplicada para a interpretação dos resultados da medição com um dispositivo tetraeletródico situado na superfície de um terreno heterogêneo. Contudo, neste caso o resultado de cálculo será uma certa magnitude arbitrária que tem as dimensões de uma resistividade. A esta magnitude arbitrária se denomina *resistividade elétrica aparente* e se simboliza por ρ_a . Por conseguinte, no caso geral:

$$\rho_a = K \frac{\Delta U}{I} \quad (15)$$

No caso particular de um meio homogêneo, a resistividade aparente coincide com a resistividade verdadeira, $\rho_a = \rho$.

As trajetórias do fluxo de corrente no terreno seguem o traçado demonstrado na figura 7.3.

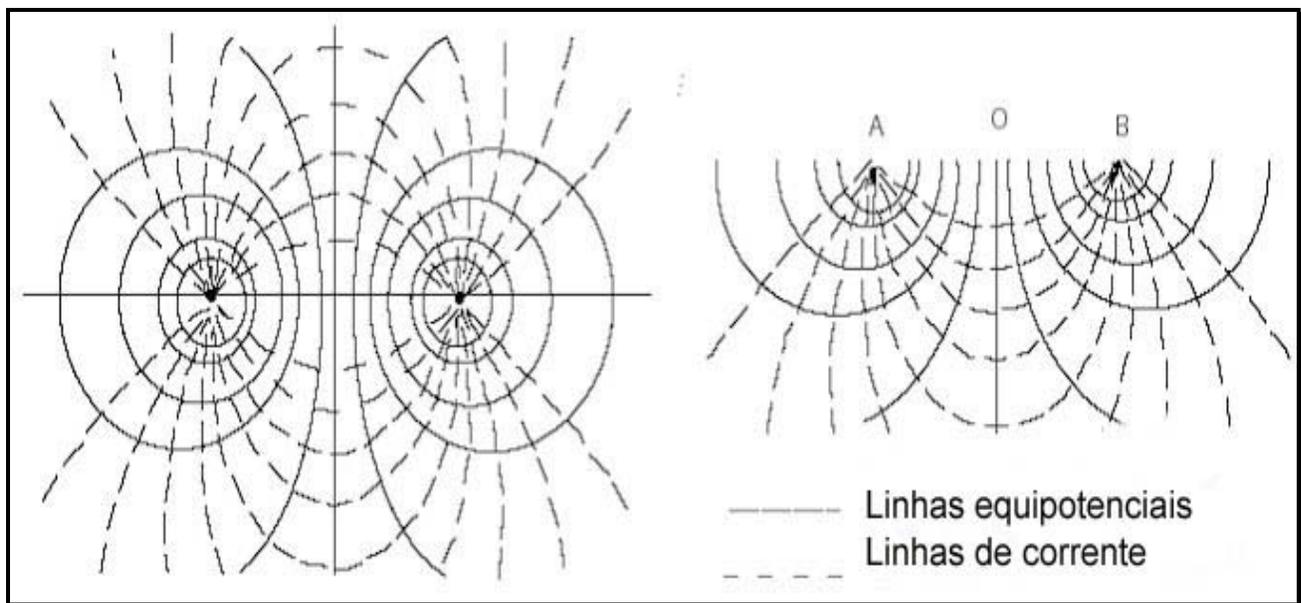


Figura 7.3 – Linhas equipotenciais e linhas de fluxo: (a) plano vertical dos eletrodos; e (b) plano horizontal da superfície do terreno (Recolhido de Dobrin, 1961).

7.2.3. Dispositivos de Medida no Método de Resistividade

Os dispositivos utilizados no método de resistividades se diferenciam entre si pelo número de eletrodos e sua disposição relativa. Cada um destes dispositivos está destinado a solucionar alguns problemas geológicos bem determinados.

Um dos dispositivos mais usados é o do tipo tetraeletródico simétrico AMNB conhecido como *Dispositivo Schlumberger*, como pode ser visto na figura 7.4.



Figura 7.4 - Dispositivo tetraeletródico tipo Schlumberger.

Para este dispositivo, os eletrodos de medida estão situados sobre a linha reta que une os eletrodos de corrente, de modo simétrico em relação ao centro do segmento AB. A distância entre os eletrodos de medida r_{MN} deve ser menor do que um terço da distância entre os eletrodos de corrente r_{AB} . Com esta condição, a relação $\Delta U / r_{MN}$ pode ser considerada, com suficiente exatidão, igual a intensidade do campo no centro do dispositivo. Isto facilita a comparação dos resultados das observações de campo com os cálculos teóricos dados pela intensidade do campo.

Também se podem subdividir os dispositivos segundo a forma com a qual se trabalha em campo. Desse modo, distinguimos: as sondagens e os caminhamentos elétricos.

7.2.4. Sondagens Elétricas Verticais e Caminhamentos Elétricos

a) Sondagens Elétricas Verticais

Supondo-se que na superfície do terreno se tenha situado um dispositivo tetraeletródico simétrico AMNB. A magnitude da resistividade aparente deste dispositivo depende de como estão distribuídas no semi-espço inferior às rochas de diferentes resistividades e, também, da posição relativa dos eletrodos de emissão e medida, assim como da profundidade de penetração da corrente no terreno, que depende diretamente da distância entre os eletrodos A e B. A maior influência no valor de ρ_a tem as rochas que se encontram no volume intermediário, onde se distribui a parte fundamental da corrente. As rochas que se encontram a uma profundidade grande em comparação com a distância

entre os eletrodos de corrente, praticamente não influem na distribuição da corrente na superfície do terreno e, por conseguinte, tampouco no valor de ρ_a .

Quando se aumenta a distancia entre as tomadas de emissão da terra, sem variar a situação do centro do dispositivo, então a profundidade de penetração da corrente no terreno aumenta e como consequência disto, começam a exercer influencias no valor de ρ_a nas rochas de maior profundidade. Por conseguinte a medida de ρ_a com um dispositivo em que se varia a distancia entre as tomadas de emissão do terreno, para um disposição invariável do seu centro, permite estudar a variação do corte geológico com a profundidade. Portanto, o método de estudo descrito que permite determinar a variação da resistividade aparente com a profundidade recebe o nome de Método de Sondagens Elétricas Verticais.

Os valores de $(AB/2)$ e resistividade aparente correspondente, são representados num gráfico bilogarátmico que tem por abcissa a separação $AB/2$ e como ordenadas

a resistividade aparente. A curva obtida se chama curva de resistividades, figura 7.5.

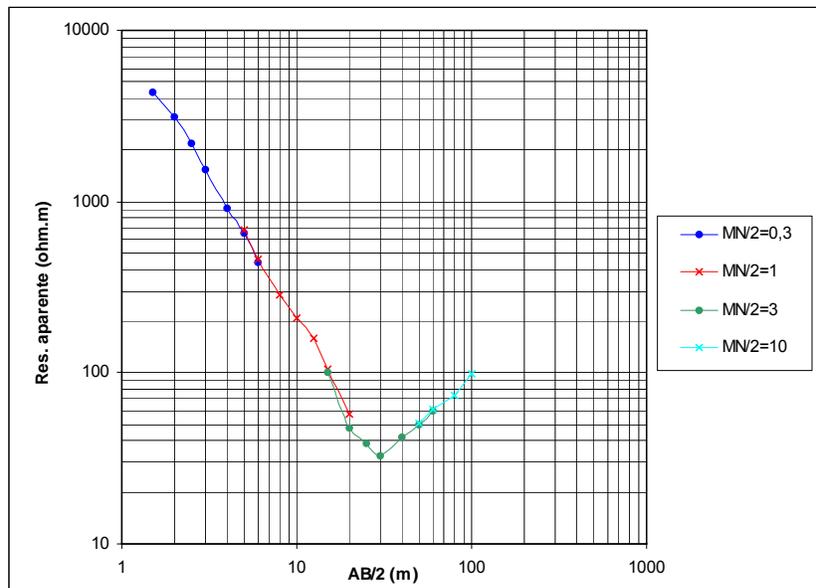


Figura 7.5 – Exemplo da representação de uma curva de S.E.V.

A interpretação quantitativa da curva de campo se realiza por intermédio de programas informáticos de inversão interativa dos dados, obtendo-se no final do processo a

distribuição geométrica em pequena profundidade sob o ponto de atribuição da sondagem, na forma de modelo monodimensional de camadas definidas por suas espessuras e resistividades reais.

O arranjo de eletrodos utilizados nas Sondagens Elétricas Verticais (SEV's) foi o dispositivo simétrico, mais usado no mundo, que foi proposto por Schlumberger e para o Caminhamento Elétrico (CE) foi o proposto por Wenner (Orellana, 1972)

7.2.5 Equipamentos Utilizados

a) Resistímetro - Modelo PER – 80/DPM

O equipamento de prospecção geofísico utilizado nos trabalhos de campo no Litoral dos municípios de Caucaia e Pecem, na área tese, caracteriza-se pelo uso de um campo elétrico artificial criado por uma corrente elétrica constante. Por esse fato tem-se algum controle da profundidade de investigação, diferindo de outros métodos geofísicos .

Os equipamentos de SEV empregados para o estudo dos aquíferos na Região Metropolitana de Fortaleza e neste trabalho são do Laboratório de Prospecção Geofísica e Sensoriamento Remoto do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (LGPSR/DEGEO/UFC).

A maioria dos dados foi adquirida por um Resistímetro Modelo PER-80, fabricado pela empresa DPM Engenharia Ltda. (Desenvolvimento, Projeto e Manutenção) sediada na Cidade de Fortaleza-Ce. O transmissor de corrente tem uma potência máxima de 400 W; receptor com alta impedância de entrada na ordem de 20 megaohms, medida digital com fundos de escala de 20 V, 2V e 200mV.

Os componentes de cada um dos seus circuitos são:

- Circuito de emissão:
 - Fonte de alimentação (baterias);
 - Regulador de corrente.
 - Miliamperímetro
 - Eletrodos para injetar a corrente no subsolo.
 - Carretéis e cabos condutores.

- Circuito de potencial:
- Milivoltímetro.
- Eletrodos para medir o potencial
- Carretéis e cabos condutores.

b) Caminhamentos Elétricos

A técnica do caminhamento está baseada na análise e interpretação de um determinado parâmetro físico, obtido a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando ao longo de uma seção reta, sua variação na horizontal, a uma ou mais profundidades determinadas.

Os resultados obtidos se relacionam entre si através de mapas realizados a uma ou mais profundidades determinadas ou de seções com várias profundidades de investigação ou vários níveis de investigação.

Por outro lado, várias são as modalidades de arranjos de campo utilizadas no desenvolvimento desta técnica. Diante do fato de ser um dos mais tradicionais e importantes escolheu-se o dipolo-dipolo.

Este arranjo revela-se como um dos mais precisos e rápidos de serem executados no campo. Uma das grandes vantagens reside no fato de que, o estudo da variação lateral do parâmetro pode ser feito em vários níveis de profundidade e se obtém uma caracterização dos materiais em superfície, tanto horizontal como verticalmente. Esta característica é importante para estudos ambientais, onde se a tipificação de uma pluma de contaminação pode ser estudada tanto lateralmente como em profundidade.

O arranjo dipolo-dipolo pode ser definido como tendo as seguintes características:

- Os centros dos dipolos AB e MN não permanecem fixos, mas se deslocam ao longo da linha do perfil a ser levantada;
- O espaçamento entre os eletrodos A-B e igual ao de M-N;
- O espaçamento entre os dipolos AB e MN pode variar, utilizando-se simultaneamente, vários dipolos MN disposto ao longo da linha; e,
- Cada dipolo MN refere-se a um nível de investigação.

A figura 7.6 ilustra a disposição inicial desse arranjo ao longo de uma linha de estudo. Observam-se vários dipolos de recepção (MN) instalados na superfície do terreno, onde cada par de dipolos MN, em relação ao dipolo AB, representa um nível de investigação (profundidade teórica investigada). Portanto, quanto mais dipolos de MN forem instalados, maior será a profundidade de investigação.

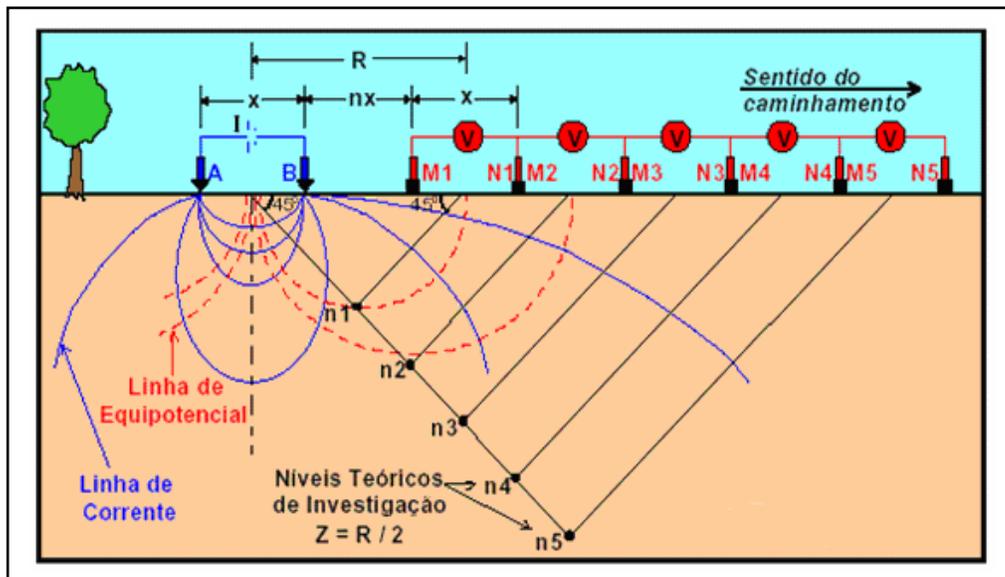


Figura 7.6 Exemplo da uma disposição inicial no campo do arranjo dipolo-dipolo, num Caminhamento Elétrico(CE) ao longo de uma linha de uma linha de sondagem. Recolhida de Braga (2002).

Deve-se ressaltar que, nesse tipo de arranjo ilustrado, na medida em que nos afastamos do dipolo AB, o potencial diminui sensivelmente e as medidas mais afastadas se tornarão mais difíceis de serem obtidas com precisão.

Braga (2002) recomenda na leitura de cinco a seis níveis correspondendo, respectivamente, a cinco ou seis dipolos MN. Dependendo das características do equipamento transmissor de corrente, pode-se obter até oito níveis.

7.2.6 Limitações do Método

O método elétrico resistivo é um método eficaz para localizar diferentes níveis horizontais e descontinuidades verticais que implicam uma mudança significativa de suas resistividades, porém, se não for o caso, o método torna-se inadequado.

Na seqüência resumimos as principais limitações do método:

- A informação proporcionada pelo método apresentado, dificilmente é interpretada sem um conhecimento complementar da geologia da zona estudada;
- A interpretação está limitada a estruturas simples e qualquer complicação pode ser impossível de interpretar;
- A topografia e os efeitos das variações superficiais da resistividade podem mascarar os efeitos das variações mais profundas;
- Para se distinguir várias litologias, torna-se necessário que suas resistividades sejam diferentes, porém esta condição nem sempre é suficiente;
- A resistividade não caracteriza unicamente os materiais geológicos, todavia também está relacionada com a quantidade de água que a contém e sobretudo com seu grau de mineralização;
- A profundidade de investigação não está bem fixada e varia entre 0.2 e 0.4 vezes a separação entre eletrodos de injeção de corrente ($AB/2$);
- A diferença de potencial medida está influenciada pela distribuição das espessuras e resistividades das formações geológicas presentes numa zona ampla centralizada no ponto de medida. Além disso, podem existir diferentes modelos que expliquem os resultados obtidos.

Portanto, uma das principais limitações do método é a ambigüidade da interpretação, que para o caso das sondagens elétricas verticais se define mediante o *Princípio de Equivalência*. Esta situação, obriga a ter que considerar a informação geológica "a priori" para tratar de resolver a indeterminação na resolução do problema inverso.

7.3 Prospecção Geofísica Eletromagnética

7.3.1 Introdução

Os métodos eletromagnéticos são os que têm maior faixas de diversidade instrumental entre todos métodos geofísicos e em muitas circunstâncias são preferíveis aos demais pelo notável campo de aplicação em que podem ser úteis. Assim, distingue-se uma grande variedade de aplicações que pode ser resumida no seguinte:

- Exploração das águas subterrâneas;

- Cartografia da intrusão salina;
- Cartografia de plumas e zonas contaminadas;
- Investigação dos recursos geotérmicos
- Exploração mineira;
- Detecção de cavidades;
- Localização de falhas e outras descontinuidades;
- Investigação arqueológica;
- Cartografia geológica.

Os métodos eletromagnéticos que podem ser aplicados no estudo das águas subterrâneas são muito diversificados. Entre eles, há aqueles que usam como fonte de excitação um campo distante que proporciona na área de estudo ondas que podem ser consideradas planas, como o método conhecido como *VLF (Very Low Frequency)*, ou o *AMT (Áudio Magneto telúrico)*, enquanto que outros instrumentos usam campos próximos gerados por dipolos magnéticos ou bobinas. Estes últimos, podem por sua vez ser classificado em dois: os que operam no domínio temporal (*TDEM*) considerando as medidas como uma função do tempo e os que operam no domínio das frequências (*FDEM*), nos quais a profundidade de investigação é função da frequência.

a) Teoria de propagação dos campos eletromagnéticos:

Um campo eletromagnético pode se definir em cada instante por quatro campos vetoriais que são definidos no Sistema Internacional como (Sharma, 1997):

E: intensidade do campo elétrico (V/m)

H: intensidade do campo magnético (A/m)

B: indução magnética, ou densidade do fluxo (Wb/m³, ou tesla)

D: densidade elétrica (C/m³)

As quatro equações de *Maxwell* relacionam estes vetores com suas fontes, uma distribuição da densidade de carga elétrica ρ_c (C/m³) e a densidade da corrente elétrica i (A/m²), como seguem:

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (16)$$

$$\operatorname{rot} H = i + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (17)$$

$$\operatorname{div} B = 0 \quad (18)$$

$$\operatorname{div} D = \rho_c \quad (19)$$

As outras equações que relacionam os vetores do campo elétrico são:

$$D = \varepsilon E; B = \mu H; i = \sigma E \quad (20)$$

onde ε , μ , σ , são respectivamente, a constante dielétrica (F/m), a permeabilidade magnética (H/m) e a condutividade elétrica (S/m) do meio. Usando estas equações pode se reduzir as equações de *Maxwell* somente em dois vetores E e H , contudo ao assumir E e H , há uma dependência com o tempo de forma que $E(t) = E_0 e^{i\omega t}$, onde por sua vez $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular do campo, desse modo as equações vetoriais para E e H , tomam a seguinte forma:

$$\nabla^2 E = i\omega\mu\sigma E - \varepsilon\mu\omega^2 E \quad (21)$$

$$\nabla^2 H = i\omega\mu\sigma H - \varepsilon\mu\omega^2 H \quad (22)$$

onde, $i = \sqrt{-1}$.

Estas são as equações básicas para a propagação dos vetores do campo elétrico e magnético num meio isotrópico, homogêneo com as propriedades físicas ε , μ e σ . As equações 21e 22, os termos que implicam $i\omega\mu\sigma$ estão relacionados com as correntes de condução, enquanto que os termos $\varepsilon\mu\omega^2$ estão relacionados com as correntes de

deslocamento. As propriedades das rochas (ϵ , μ e σ) e a frequência angular ω podem ser agrupadas num só termo K^2 , dado por

$$k^2 = -i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon) = \mu\epsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma \quad (23)$$

as equações 21 e 22, podem ser reescritas como:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0; \quad \nabla^2 H + k^2 H = 0 \quad (24)$$

O parâmetro:

$$k = \sqrt{\mu\epsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma},$$

denomina-se “*número complexo da onda*” ou “*parâmetro de propagação*”.

O comportamento do parâmetro de propagação com variação da frequência é importante para uma melhor compreensão da propagação e da atenuação das ondas eletromagnéticas.

Devem se distinguir dois casos extremos:

1- A baixas frequências ($F < 10^5$ Hz) as correntes de deslocamento são muito menores do que as correntes de condução ($\mu\epsilon\omega^2 \ll i\omega\mu\sigma$), já que ϵ para a maioria das rochas é pequeno e a condutividade σ é, geralmente, superior a 10^{-2} S/m. Neste caso, conhecido como modo indutivo, o parâmetro de propagação vem dado aproximadamente por:

(25)

$$k^2 = -i\omega\mu\sigma$$

2- A altas frequências (ordem de 10 MHz ou mais), as correntes de deslocamento dominam sobre as correntes de condução ($\mu\epsilon\omega^2 \gg i\omega\mu\sigma$).

Neste caso, conhecido como método de reflexão eletromagnética ou radar de penetração de subsolo, para os materiais de baixa condutividade ($\sigma < 1$ mS/m), o parâmetro de propagação vem dado por:

$$k^2 = \mu\epsilon\omega^2$$

(26)

b) Atenuação do campo magnético e profundidade de penetração:

Considerando o caso de uma onda plana, que se propague na direção z , de modo vertical e em direção para baixo de um semi-espço de condutividade σ , com um campo elétrico que tem somente a componente x , e o campo magnético somente a componente y , e a amplitude dos dois campos varia de modo sinusoidal com z . Para este caso, as equações (22 e 24) do campo tem somente uma solução dada por:

27)

$$E_x = E_0 e^{-ikz} = E_0 e^{-i(\beta + i\alpha)z}$$

Donde E_0 é a amplitude da componente do campo elétrico E_x , num certo ponto de referência meio, onde $Z=0$, e k é o parâmetro de propagação.

A solução para o campo magnético pode se escrever substituindo o E por H .

A parte real de k está associada com o fator de fase β (rad/m) e a parte imaginária está associada ao fator de atenuação α (db/m), da onda. As expressões do fator de fase e do fator de atenuação são respectivamente:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2\omega^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (28)$$

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2\omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (29)$$

Quando as correntes de condução dominam sobre as de deslocamento, ($\sigma^2/\epsilon^2\omega^2 \gg 1$), as expressões α e β se simplificam da seguinte forma:

$$\alpha = \beta = \sqrt{(\omega\mu\sigma / 2)} \quad (30)$$

A profundidade δ , a qual a amplitude do campo se reduz a $1/e$ de seu valor na superfície, conhece-se como “profundidade efetiva” ou “*skin depth*”. Esta profundidade, às vezes, designada como profundidade de penetração da onda eletromagnética, está relacionada com o fator de atenuação α da seguinte maneira:

$$\delta = 1/\alpha = (2/\mu_0 \rho \omega)^{1/2} = 504 (\rho / f)^{1/2} \quad (31)$$

Onde $\rho (=1/\sigma)$ é a resistividade em Ωm , f é a frequência da onda eletromagnética (Hz), e $\mu = \mu_0 (4\pi \times 10^{-7})$ para meios magnéticos.

Dos dois métodos eletromagnéticos distintos: um que opera no domínio das frequências (FDEM), através do condutivímetro EM34-3XL (*Geonics, Ltd.*), modelo de fabricação Canadense e outro que opera no domínio de tempos (TDEM) mediante o instrumento russo Time-Fast 48, têm sido usados em trabalhos do tema abordado intrusão salina. Entretanto, nos trabalhos referentes à área de Tese, somente o primeiro método foi usado.

7.3.2 Prospecção Eletromagnética no Domínio das Frequências

7.3.2.1 Princípios Gerais

Os condutivímetros, também denominados *ground-conductivimeters*, são os instrumentos eletromagnéticos capazes de medir por indução a condutividade elétrica do terreno. Em geral, podem ser considerados como sistemas Slingram de bobinas emissoras e receptoras móveis, que operam no domínio das frequências ainda que apresente 3 diferenças significativas:

1. A frequência de emissão, para cada distância entre as bobinas é muito pequena, de forma que a profundidade efetiva ou *skin depth* é sempre significativamente maior que tal distância. Esta condição se conhece como operação abaixo do número de indução;
2. Assume-se que, cada resposta do terreno está enquadrada (componente imaginário) no sinal recebido;

3. O nível zero do sistema de medida da componente enquadrada está calibrado para medir diretamente a condutividade do terreno a uma determinada profundidade.

O número de indução N_B (adimensional) é a relação entre o espaçamento entre as bobinas e a profundidade efetiva.

$$N_B = \frac{S}{\delta} = S \sqrt{(\mu_0 \omega \sigma / 2)} \quad (32)$$

Quando $N_B \ll 1$,

$$\frac{H_s}{H_p} = i \mu_0 \omega \sigma s^2 / 4 = i N_B^2 / 2 \quad (33)$$

portanto a relação H_s/H_p é proporcional à condutividade elétrica do terreno:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \left[\frac{H_s}{H_p} \right] \quad (34)$$

Donde:

H_s é a amplitude do campo magnético secundário;

H_p é a amplitude do campo magnético primário;

μ_0 é a permeabilidade magnética do meio.

$\omega = 2\pi f$ (sendo f a frequência do campo EM).

σ é a condutividade aparente do terreno (mS/m)

Considerando a configuração da figura 7.7, onde uma bobina transmissora T_x está alimentada com uma corrente alternada de frequência f (Hertz), enquanto que outra bobina receptora R_x está localizada a uma distancia S da primeira. A corrente produzida pelo transmissor gera um campo magnético primário H_p que se propaga livremente abaixo e sobre a superfície de um terreno. Na presença de um corpo condutor, a componente magnética da onda induzida produz correntes parasitas que por sua vez geram também um campo magnético secundário H_s que se detecta no receptor. Deste modo, o instrumento converte o valor da voltagem diretamente a uma condutividade aparente medida em Milisemens por metro (mS/m).

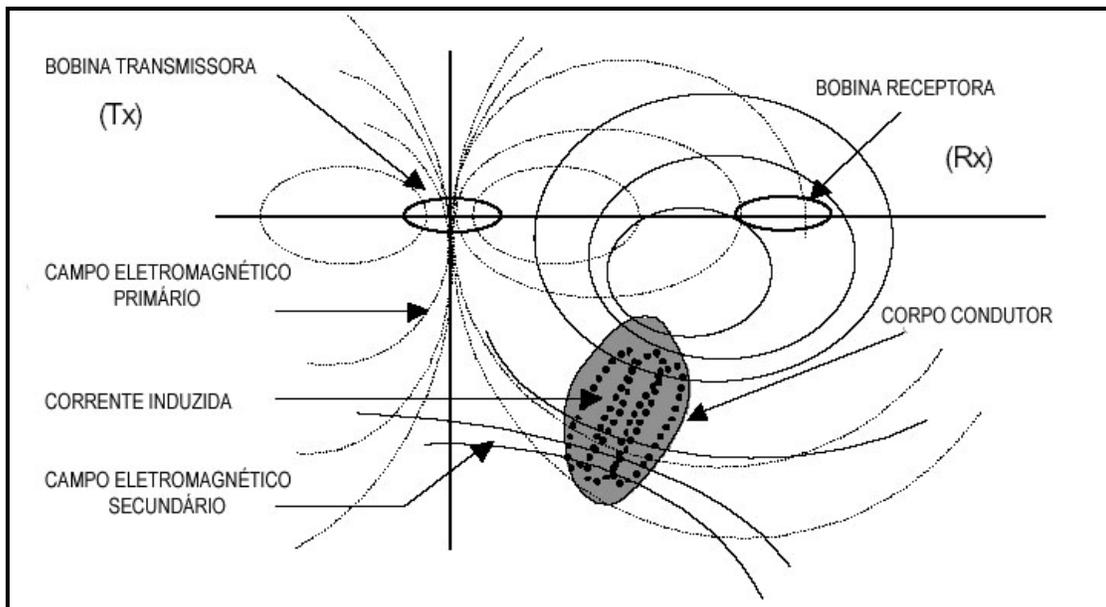


Figura 7.7 - Esquema geral do campo eletromagnético (Reynolds 1997)

O receptor detecta também o campo magnético primário que se desloca no ar, de maneira que o receptor representa o efeito resultante da combinação dos campos primário e secundário. Por conseguinte, o valor medido pelo receptor se diferencia tanto em fase como em amplitude no campo primário. Esta diferença pode proporcionar uma valiosa informação sobre a geometria, o tamanho e a condutividade elétrica dos terrenos condutores.

Em geral, o campo eletromagnético secundário é uma função complexa da separação entre bobinas (s) da frequência (f) e da condutividade elétrica σ do terreno.

7.3.2.2 Teoria Operacional sob Número de Indução

Considere as duas configurações de bobinas mostradas na figura 7.8. Para cada uma das configurações, pela bobina transmissora circula uma corrente alternada de frequência f em hertz. Quando as duas bobinas estão estendidas sobre um terreno homogêneo de condutividade σ , a quantidade medida é a relação entre o campo magnético secundário H_s na bobina receptora e o campo magnético primário H_p . A distância entre as bobinas é s em metros.

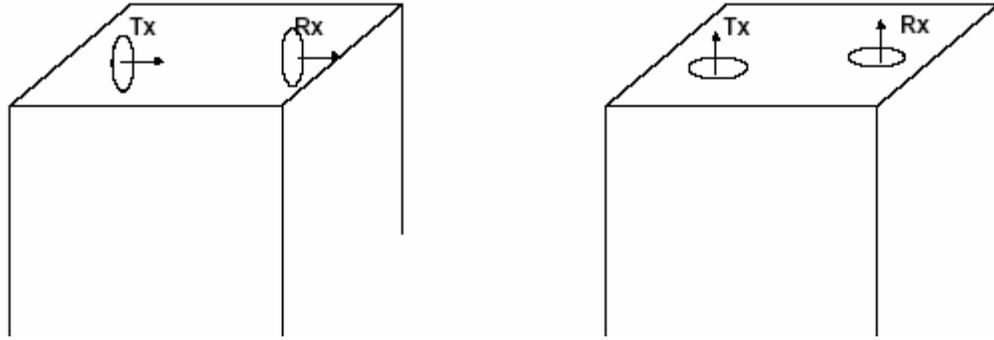


Figura 7.8 – Disposição das bobinas emissora e receptora

$$\left(\frac{H_s}{H_p}\right)_H = \frac{2}{(\gamma s)^2} \left[9 - \left[9 + 9\gamma s + 4(\gamma s)^2 + (\gamma s)^3 \right] e^{-\gamma s} \right] \quad (35)$$

$$\left(\frac{H_s}{H_p}\right)_V = 2 \left[1 - \frac{3}{(\gamma s)^2} + \left[3 + 3\gamma s + (\gamma s)^2 \right] \frac{e^{-\gamma s}}{(\gamma s)^2} \right] \quad (36)$$

Onde,

$$\gamma = \sqrt{i \omega \mu_0 \sigma}.$$

$$i = \sqrt{-1}.$$

como se assinalou anteriormente, se N_B é muito menor que a unidade ($\gamma s \ll 1$), se pode simplificar as equações (35 e 36) e obter:

$$\left(\frac{H_s}{H_p}\right)_V \approx \left(\frac{H_s}{H_p}\right)_H \approx i N_B^2 = \frac{i \omega \mu_0 s^2 \sigma}{4} \quad (37)$$

Neste caso, a magnitude do campo magnético secundário é diretamente proporcional à condutividade do terreno e a fase do campo magnético secundário adianta o campo magnético secundário em 90° .

Para se examinar as razões desta simplificação, se fixa à atenção na configuração do dipolo vertical representado na figura 7.9, que dada à simetria faz com que esta configuração fique mais fácil de se entender.

Considerando a bobina 1, a força eletromotriz primária que origina o deslocamento da corrente vem dada pela proporção do tempo de mudança do fluxo magnético primário do transmissor através dessa bobina (Lei de Faraday).

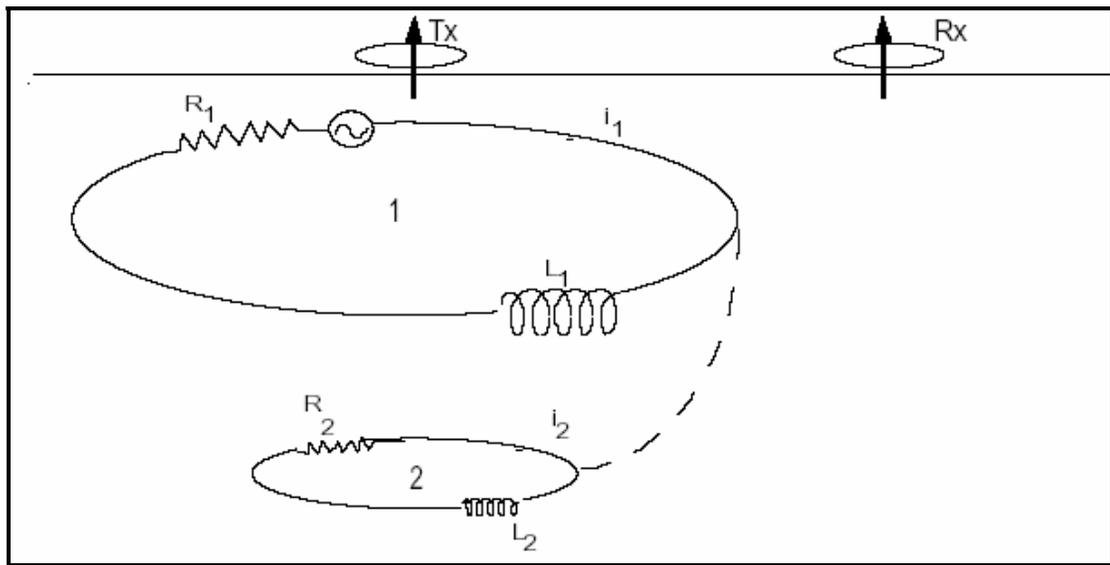


Figura 7.9 - Modelo elétrico da configuração dos dipolos verticais

Três impedâncias provocam que a corrente seja limitada:

- A resistência elétrica R_1 da bobina.
- O fato de que a corrente i_1 gera seu próprio campo magnético. Isto provoca uma variação de tempo do fluxo magnético secundário através da bobina injetora (indutância própria L_1);
- O fato de que qualquer corrente de outra bobina com i_2 gera seu próprio campo magnético que por sua vez causa uma variação de tempo do fluxo magnético para se unir com a bobina 1 (indutância mútua, M).

O circuito equivalente desta configuração deriva da teoria de um circuito elementar, cujos componentes são representados na figura 7.10.

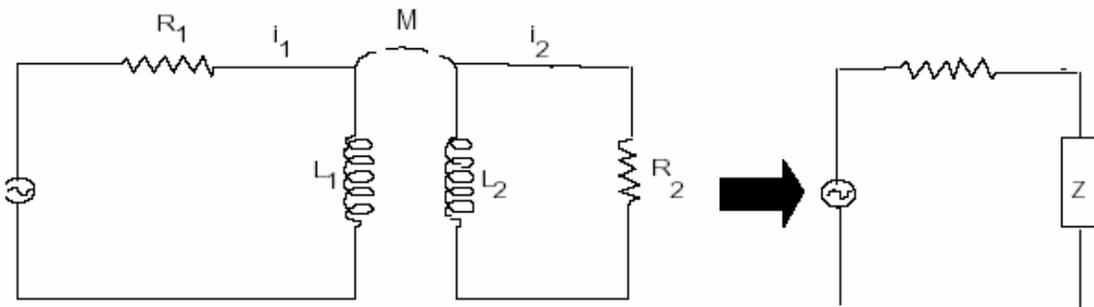


Figura 7.10 - Circuito equivalente do dipolo da figura 7.9

A impedância complexa Z incorpora todos os efeitos do acoplamento magnético entre a corrente da bobina 1 e qualquer outra corrente da bobina 2. Desta expressão, nota-se que Z pode se tornar arbitrariamente pequeno reduzindo $\omega = 2\pi f$ (sendo f a frequência de operação).

Quando Z é muito menor do que R_1 , a corrente que se desloca na bobina 1 vem dada por:

$$i_1 = \frac{e_p}{R_1} = \frac{i\omega \Phi_p}{R_1} = i\omega \Phi_p G_1 \quad (38)$$

onde Φ_p =: fluxo primário relacionado com a bobina 1

G_1 = condutividade da bobina 1, $= (1/R_1)$

Observa-se então que, a magnitude da corrente é linearmente proporcional à condutância da bobina, e que a fase da corrente primária adianta o fluxo do campo magnético primário em 90° .

Visto que, o campo magnético secundário gerado pela corrente i_1 na bobina receptora está em fase e é diretamente proporcional a i_1 isto lhe faz também diretamente proporcional a G e adianta o fluxo primário em 90° .

Portanto, tem a mesma dependência em frequência e condutividade do que a equação 21.

$$\left(\frac{H_s}{H_p} \right) \propto i\omega G_1 \quad (39)$$

A partir disso, deduzimos que a condição $N_B \ll 1$ é equivalente dizer que para todas as correntes das bobinas que afetam à receptora, a frequência de operação é muito pequena; de forma que se pode ignorar qualquer acoplamento magnético entre as bobinas.

Em consequência, a corrente que circula pelas bobinas é:

- Completamente independente da corrente que circula na outra bobina, já que não estão magneticamente acopladas;
- Unicamente uma função do fluxo magnético primário, relaciona esta bobina e a condutividade local do terreno.

A falta da interação entre as correntes das bobinas tem uma grande importância na simplificação do procedimento de redução dos dados. De igual importância é o fato de que, para qualquer valor de B , e para qualquer orientação dos dipolos magnéticos num semi-espaco uniforme ou num terreno horizontalmente estratificado, pode se observar que o deslocamento da corrente é horizontal.

Se nenhum fluxo de corrente cruza as interfases e se não há acoplamento magnético entre a corrente das bobinas, a variação da condutividade de qualquer camada de um terreno horizontalmente estratificado não altera a geometria do fluxo da corrente. Dessa forma, variando a condutividade de uma camada será variada, proporcionalmente, somente a magnitude da corrente desta camada. Para se calcular a resultante do campo magnético na superfície de algumas camadas horizontais, é necessário calcular simplesmente as contribuições independentes de cada camada, que é uma função de sua profundidade e de sua condutividade, depois somar todas as contribuições.

Finalmente, deve-se ter em conta que para uma dada frequência e uma dada separação entre bobinas, quando aumenta a condutividade do terreno, a aproximação da equação (21) pode ser adulterada então a leitura do instrumento pode não ser proporcional à condutividade do terreno. Este efeito está representado na figura 7.11, que mostra a relação entre a condutividade medida pelo instrumento e a condutividade aparente que deveria ser obtida para ambas configurações dos dipolos (DH) e (DV). No caso de dipolos horizontais, mostra uma linearidade nos valores mais altos de condutividade e isto é devido à limitada profundidade de penetração desta configuração.

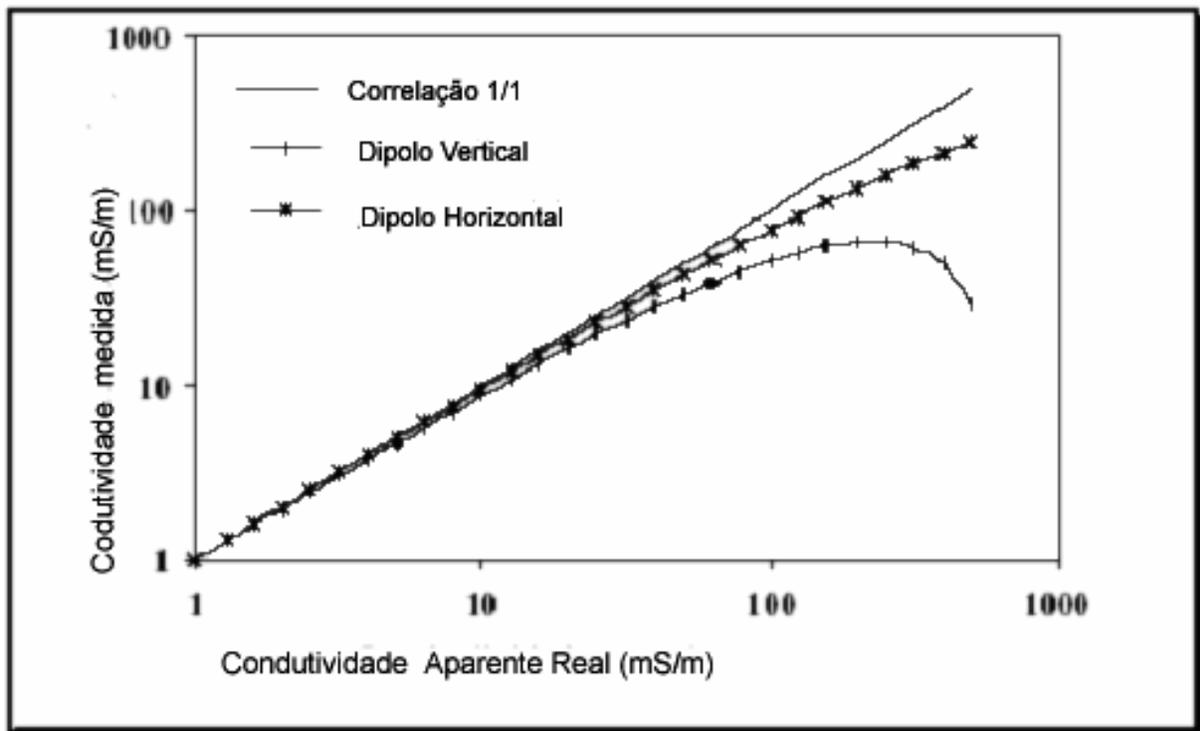


Figura 7.11 - Relação entre a condutividade aparente e a condutividade real

7.3.2.3 Condutímetro GEONICS Modelo EM34 - 3XL

Este instrumento fundamenta-se nos mesmos princípios expostos anteriormente e está constituído por:

- Duas bobinas: uma transmissora e outra receptora;
- Dos consoles eletrônicos: um transmissor e um receptor;
- Três cabos de separação entre bobinas de 10, 20 y 40 metros e dois cabos curtos que unem as bobinas com os consoles.

O equipamento é de fácil transporte e pode ser operado, por duas pessoas: uma controla o transmissor e a bobina transmissora; e a outra controla o receptor e a bobina receptora. O esquema geral do dispositivo e a relação entre seus diferentes componentes podem ser observados nas fotos 7.1, 7.2 e 7.3. Observa-se que, na primeira foto executam-se leituras em campo com a configuração de dipolos horizontais (bobina vertical) e nas últimas duas

fotos, a posição horizontal da bobina sobre o terreno configura a imagem de uma leitura com dipolo vertical.

A bobina transmissora tem dois pontos de conexão. O primeiro se conecta o cabo que une a bobina transmissora à bobina receptora e o segundo que une a bobina transmissora ao console transmissor. Este último tem alguns comandos que são:

- Um botão para ligar e desligar o console;
- Um visualizador do estado das pilhas (baterias);
- Um botão de orientação dos dipolos (HD: dipolos horizontais, ou VD: dipolos verticais).
- Um seletor de separação entre bobinas (10, 20 e 40 m).

A bobina receptora tem somente um ponto de conexão que o une ao console receptor. Este tem além dos comandos anteriormente assinalados no transmissor, outros comandos que são:

- Uma tela que controla a separação entre as bobinas, de maneira tal que se a agulha está na parte verde da escala, isto quer dizer que a separação é correta. Porém, se a agulha está situada nos extremos vermelhos da escala, a distância não é correta e devemos aumentá-la ou diminuí-la. Há que se ter em conta que, o ponto de atribuição da medida está sob a bobina emissora e para corrigir a separação entre bobinas é preferível deslocar somente a bobina receptora.
- Uma segunda tela permite fazer a leitura da condutividade elétrica aparente diretamente em mS/m;
- Um botão comutador permite mudar a escala de leitura. Assim, muito baixas condutividades, se usa a escala de 1, que permite medir as condutividades que oscilam entre 0 e 3 mS/m, enquanto que para condutividades altas usamos a escala de 100 que permite medir as condutividades que oscilam entre 100 e 300 mS/m.
- Um botão, converte valores “negativos” de condutividade a alguns valores positivos. (ver o princípio de operação abaixo num erro de indução).

Os cabos de referência têm três longitudes diferentes (10, 20, e 40 m). Assim, para cada distância usamos um cabo distinto. Para cada distância, utiliza-se uma frequência de

emissão distinta, uma vez que a profundidade de investigação depende da frequência, da distância entre as bobinas e sua orientação relativa.

A tabela seguinte resume a relação entre os diferentes parâmetros:

Tabela 7.1 Relação entre os diferentes fatores que afetam a profundidade de investigação.

Separação entre Bobinas (m)	Frequências Usadas (Hz)	Profundidade de investigação (m)	
		Dipolo horizontal (HD)	Dipolo vertical (VD)
10	6400	7.5	15
20	1600	15	30
40	400	30	60



Foto 7.1. Leituras com a configuração de dipolos horizontais (bobinas verticais) realizadas nas paleodunas, próximas ao Porto do Pecém, no Município de São Gonçalo do Amarante-Ce.



Foto 7.2 – Bobina Receptora e console do receptor (associado). A posição horizontal da bobina sobre o solo exemplifica nesta posição que o dipolo está na vertical.

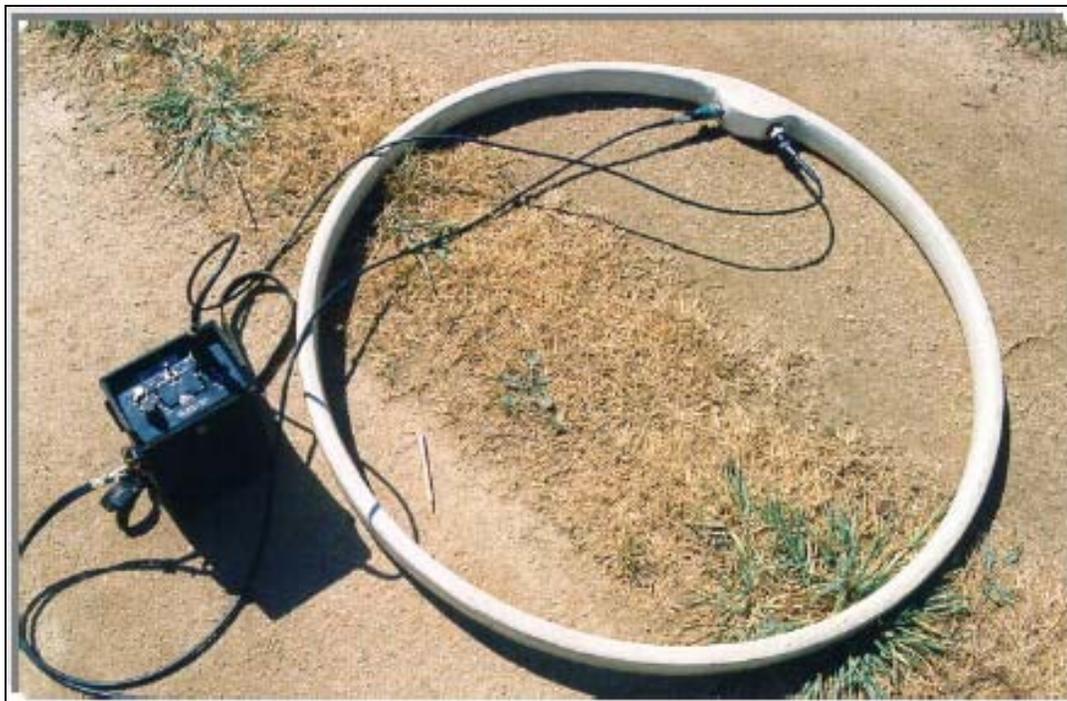


Foto 7.3 - Bobina transmissora e console do transmissor (associado). Bobina horizontal e dipolo vertical.

7.3.2.4. Resposta Instrumental em Função da Profundidade

Considere a superfície de um semi-espço homogêneo, no qual está instalado o equipamento eletromagnético Geonics modelo EM34-3, representado no desenho da figura 7.12. Se fixarmos nossa atenção numa camada delgada de espessura dz e situada a uma profundidade z , onde z é a profundidade dividida pela separação s entre as bobinas, é possível calcular o campo magnético secundário na bobina receptora que provém do fluxo da corrente dentro desta camada ou de qualquer outra camada horizontal e delgada.

O gráfico da figura referida acima, construído a partir da equação 40 descreve a contribuição relativa ao campo magnético secundário, que provém de uma camada delgada a qualquer profundidade z .

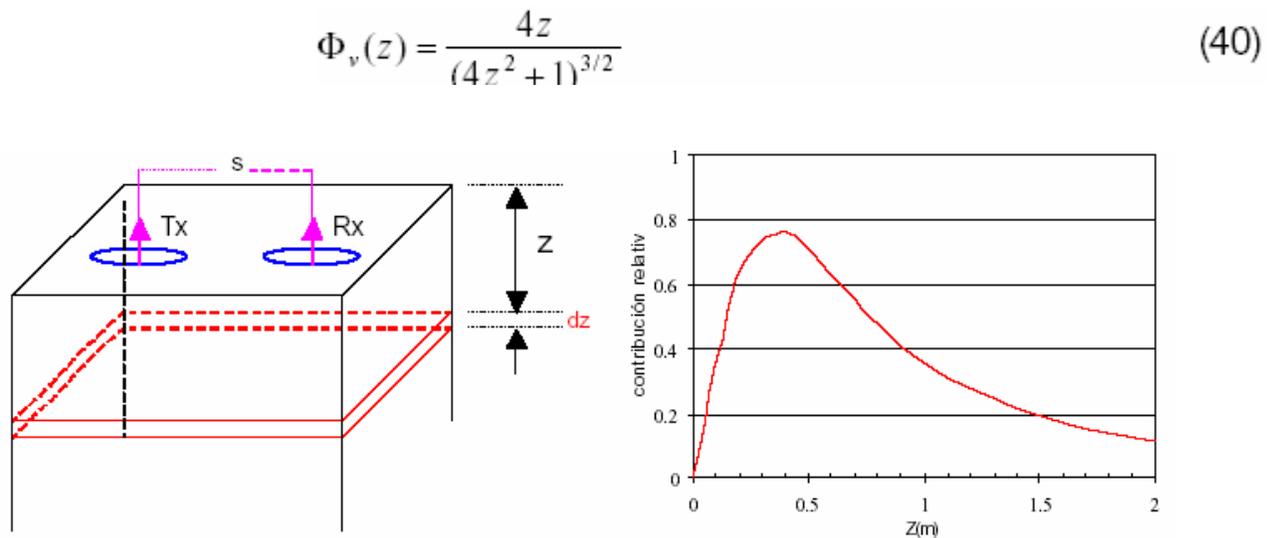


Figura 7.12 - Contribuição relativa ao campo magnético para dipolos verticais

A partir dos gráficos da figura 7.12 acima, envolvendo a condutividade relativa e numa profundidade determinada pelo método se observar que uma camada situada a uma profundidade aproximada de 0.4 s proporciona uma contribuição máxima ao campo magnético secundário, e que uma camada situada a uma profundidade 1.5 s ainda contribui significativamente. Cabe destacar que para $z = 0$, em nível superficial, sua contribuição ao campo magnético secundário é muito limitada e, portanto, a configuração

das bobinas com dipolos verticais (DV), é insensível às mudanças de condutividade superficial.

A figura 7.13 mostra o caso de um dipolo horizontal (DH), onde se declara de público que nesta configuração a contribuição relativa dos materiais superficiais é muito grande e decresce exponencialmente com a profundidade:

$$\Phi_H(z) = 2 - \frac{4z}{(4z^2 + 1)^{1/2}} \quad (41)$$

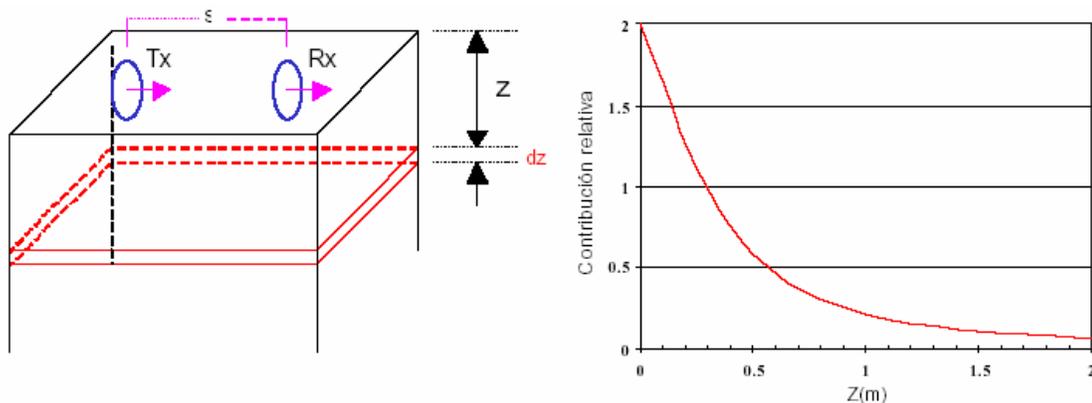


Figura 7.13 - Contribuição relativa do campo magnético secundário no caso do dipolo horizontal.

Como é fácil colocar o instrumento na configuração horizontal ou vertical, a resposta distinta de cada configuração é muito importante e serve para diagnóstico e/ou para definição de uma camada. A figura 7.13 mostra também que para profundidades superiores a 1 s, a contribuição relativa do dipolo vertical é aproximadamente o dobro da do dipolo horizontal.

Finalmente, como já foi visto, a definição de condutividade aparente é dada em termos do campo magnético secundário no receptor. As funções representadas na figura 7.13 dão também a contribuição relativa dos materiais situados a diferentes profundidades à condutividade aparente indicada pelo instrumento. A integral de ambas as funções de zero a infinito dá o campo magnético secundário total na bobina receptora, procedente de um semi-espço homogêneo que está diretamente relacionado com a condutividade aparente pelas equações (35 e 36). Portanto, é possível ter uma grande precisão da influência relativa dos materiais situados a diferentes profundidades a partir de condutividade aparentes medida pelo instrumento.

7.3.2.5. Limitações do Método

O método de prospecção eletromagnética, igual a qualquer método geofísico, apresenta algumas limitações que devem ser levadas em consideração:

- Em terrenos com valores de condutividade baixos é muito difícil induzir no terreno corrente suficiente para produzir um campo magnético detectável pela bobina receptora. Inversamente, para altos valores de condutividade a componente quadratura do campo magnético do receptor não é linearmente proporcional à condutividade do terreno;
- A capacidade de informação vertical está limitada somente a seis pontos de medida;
- É muito sensível às interferências magnéticas externas, sobretudo quando é medida com a configuração de dipolos verticais.

8. DELIMITAÇÃO GEOFÍSICA DA INTRUSÃO SALINA NA REGIÃO LITORÂNEA DE CAUCAIA E PECÉM-CE

8. DELIMITAÇÃO GEOFÍSICA DA INTRUSÃO SALINA NA REGIÃO LITORÂNEA DE CAUCAIA E PECÉM-CE

8.1 Introdução

Menos densa a água doce tende a fluir sobre o topo das vizinhanças ou da água salina subterrânea subjacente. Sob condições naturais, o limite entre a água doce e a água salgada mantém equilíbrio quase estável (Alley et al, 2000). Este limiar entre esses dois tipos de água possui, preferivelmente, uma zona com gradação de água doce para salgada, conhecida como zona de difusão ou mistura, zona de dispersão ou zona de transição, onde aleatoriamente pode produzir água salobra, conforme demonstra o modelo hipotético da figura 8.1, (Cooper, 1964). Quando bombeada dentro de um aquífero que contém ou está próximo da água salgada, a interface água doce / água salgada se move em resposta a esse bombeamento.

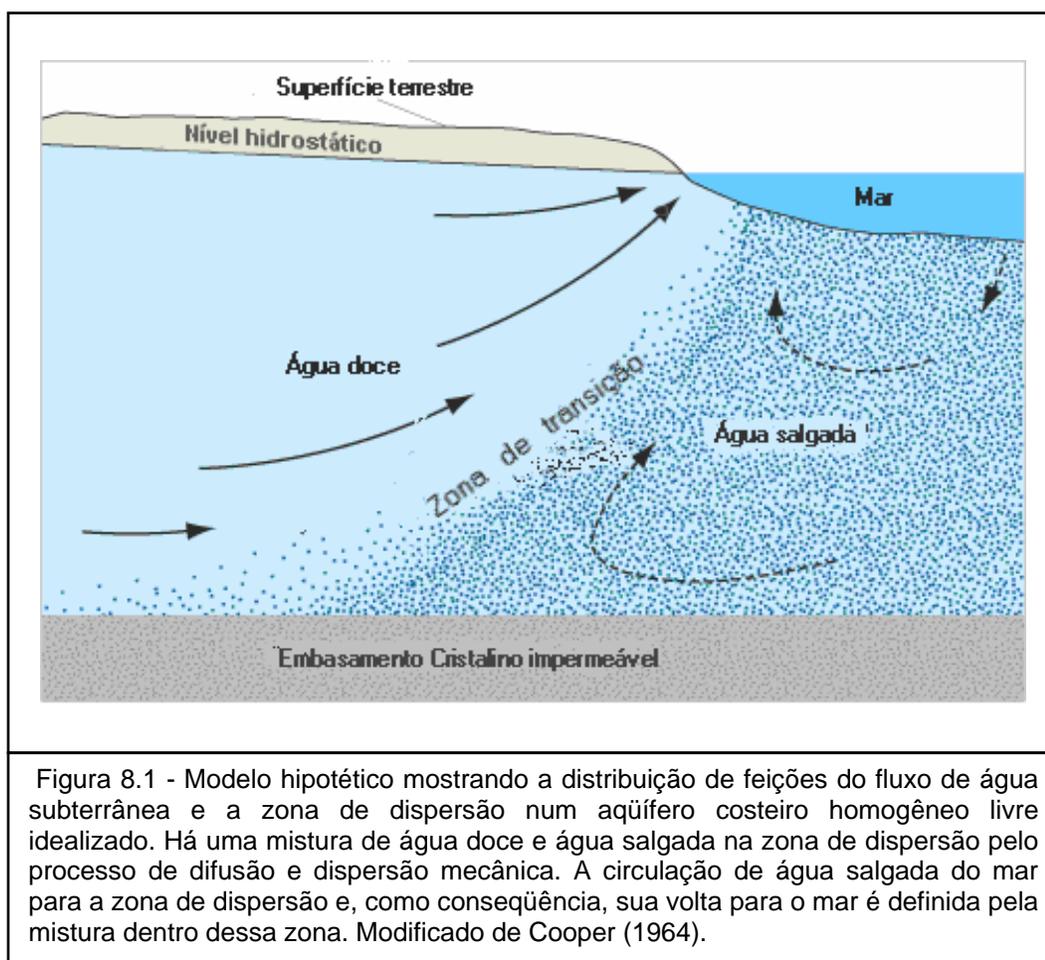


Figura 8.1 - Modelo hipotético mostrando a distribuição de feições do fluxo de água subterrânea e a zona de dispersão num aquífero costeiro homogêneo livre idealizado. Há uma mistura de água doce e água salgada na zona de dispersão pelo processo de difusão e dispersão mecânica. A circulação de água salgada do mar para a zona de dispersão e, como consequência, sua volta para o mar é definida pela mistura dentro dessa zona. Modificado de Cooper (1964).

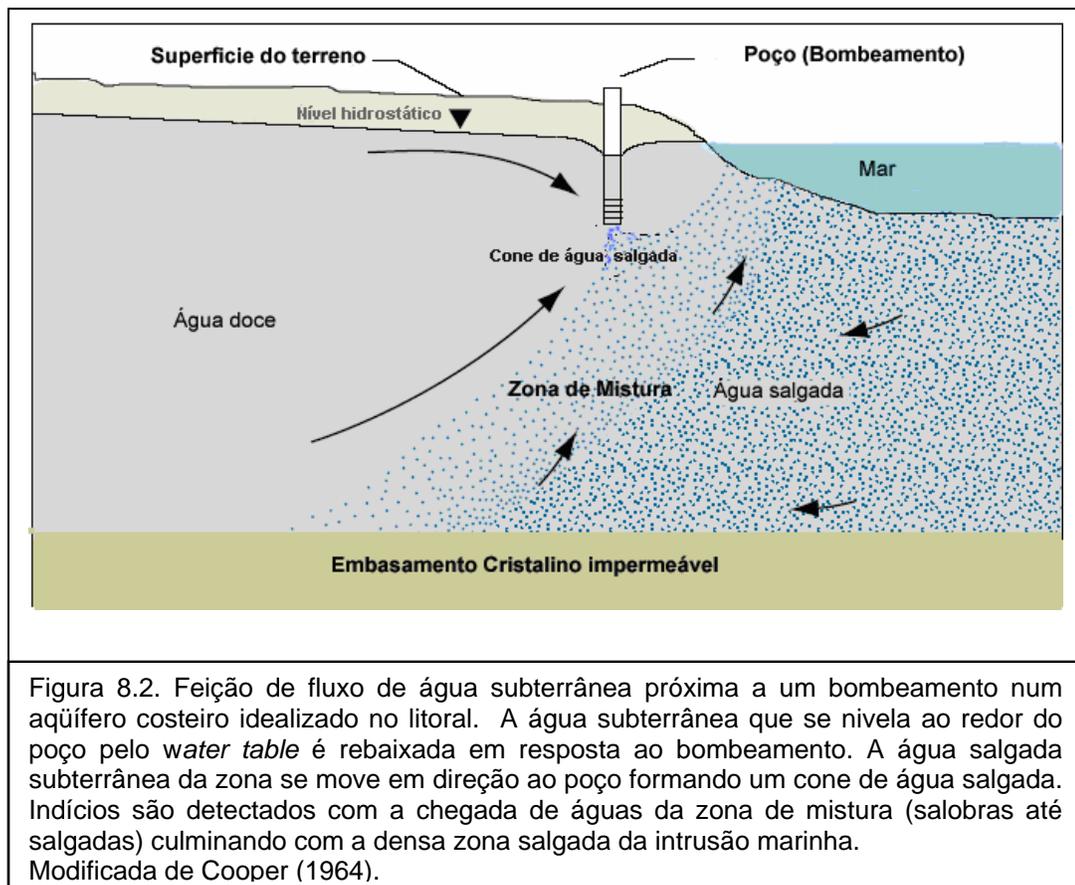
Os excessos dessa retirada poderão causar os mais diferenciados movimentos nessa interface. Caso o movimento dessa zona-limite seja bastante acentuado, alguns poços

tornar-se-ão salinos, contaminando assim o suprimento de água doce na região. A locação e a magnitude da retirada ou bombeamento, com respeito à localização da água salgada, determinam a rapidez e a quantidade dessa água que se move dentro do aquífero. O comportamento das feições de fluxo da água subterrânea idealizado ainda por Cooper (1964) através de um protótipo, demonstra que como consequência do bombeamento excessivo de água doce que se encontra sobre uma massa de água salgada se formará uma protuberância vertical denominada “Cone de Água Salgada” (Figura 8.2). Este cone representa a primeira fase do “movimento permanente ou temporal de água salgada, no subsolo, deslocando a água doce”, que se denomina “Intrusão Marinha”. O fluxo de água doce em direção ao mar é indispensável para evitar a contaminação do aquífero pela intrusão de água salgada (Henry, 1959).

Concentração de populações (residentes ou não residentes) e atividades humanas em torno da zona litorânea do Município de Caucaia e Pecém-Ce, tem apresentado consideráveis ameaças aos ecossistemas e recursos litorâneos, afetando: sua estrutura e função; qualidade e a quantidade de seus recursos naturais; zonas costeiras e paisagens naturais. O sistema Aquífero Dunas /Formação Barreiras, que ocorre nessa zona litorânea, tem sido alvo de constantes especulações sobre seu potencial aquífero, principalmente, no que se refere a sua qualidade e quantidade, em função da procura sempre crescente aliada a uma demanda técnica e cientificamente ineficaz ou quase inexistente.

O problema da salinização em aquíferos costeiros na zona litorânea de Caucaia tem aumentado, sobremaneira, aonde a excessiva exploração especulativa conduz a um acentuado rebaixamento do nível hidrostático e à contaminação destes aquíferos pela intrusão de água salgada e/ou por outros fatores, tais como, adubos e irrigações em zonas agricultáveis, etc. Este problema ambiental de caráter mundial está se tornando cada vez mais crescente em áreas costeiras agricultáveis ou com assentamentos populacionais urbanos, onde materiais de granulação fina de sedimentos detríticos desenvolvem uma espessa franja capilar por onde se infiltram os efluentes. Os efeitos negativos de atividades humanas têm sido registrados nos litorais de Cumbuco, Tabuba e Icaraí, ambientes balneários de maior frequência turística na Região Metropolitana de Fortaleza. No litoral do Pecém, a noroeste, próximo ao Porto do Pecém, observa-se que estes recursos hídricos ainda estão preservados, em função ainda de uma pequena procura. Porém, carece de um bom gerenciamento, pois há uma tendência de uma

iminente especulação imobiliária, em função do desenvolvimento futuro daquela zona portuária.



Em muitas áreas do mundo, este problema tem aumentado em áreas de pobres recursos de água, pela baixa precipitação e alta evapotranspiração, mau gerenciamento desses recursos ou em áreas com densas populações e alta faixa de consumo (Khair et al, 1994).

Menos densa a água doce tende a fluir sobre o topo das vizinhanças ou da água salina subterrânea subjacente. Sob condições naturais, o limite entre a água doce e a água salgada mantém equilíbrio quase estável (Alley et al, 2000). Este limiar entre esses dois tipos de água possui, preferivelmente, uma zona com gradação de água doce para salgada, conhecida como zona de difusão ou mistura, zona de dispersão ou zona de transição, onde aleatoriamente pode produzir água salobra, conforme demonstra o modelo hipotético da figura 8.1, (Cooper, 1964). Quando bombeada dentro de um aquífero que contém ou está próximo da água salgada, a interface água doce / água salgada poderá se mover em resposta a esse bombeamento.

Os excessos dessa retirada poderão causar os mais diferenciados movimentos nessa interface. Caso o movimento dessa zona-limite seja bastante acentuado, alguns poços tornar-se-ão salinos, contaminando assim o suprimento de água doce na região. A localização e a magnitude da retirada ou bombeamento, com respeito à localização da água salgada, determinam a rapidez e a quantidade dessa água que se move dentro do aquífero. O comportamento das feições de fluxo da água subterrânea idealizado ainda por Cooper (1964), através de um protótipo, demonstra que como consequência do bombeamento excessivo de água doce que se encontra sobre uma massa de água salgada se formará uma protuberância vertical denominada “Cone de Água Salgada” (Figura 8.2). Este cone representa a primeira fase do “movimento permanente ou temporal de água salgada, no subsolo, deslocando a água doce”, que se denomina “Intrusão Marinha”. O fluxo de água doce em direção ao mar é indispensável para evitar a contaminação do aquífero pela intrusão de água salgada (Henry, 1959).

Concentração de populações (residentes ou não residentes) e as atividades humanas em torno da zona litorânea do Município de Caucaia e Pecém, Estado do Ceará, tem apresentado consideráveis ameaças aos ecossistemas e recursos litorâneos, afetando: sua estrutura e função; qualidade e a quantidade de seus recursos naturais; e zonas costeiras e paisagens naturais. O sistema Aquífero Dunas /Formação Barreiras, que ocorre nessa zona, tem sido alvo de constantes especulações sobre seu potencial aquífero, principalmente, no que se refere a sua qualidade e quantidade, em função da procura sempre crescente aliada a uma demanda técnica e cientificamente ineficaz ou quase inexistente, no contexto referido.

O problema da salinização em aquíferos costeiros na zona litorânea de Caucaia tem aumentado sobremaneira, em face da excessiva exploração especulativa que vem rebaixando o nível hidrostático de modo acentuado e, subseqüentemente, conduzindo à contaminação destes aquíferos pela intrusão de água salgada e/ou por outros fatores, tais como, adubos e irrigações em zonas agricultáveis, etc. Este problema ambiental de caráter mundial está se tornando cada vez mais crescente em áreas costeiras agricultáveis ou com assentamentos populacionais urbanos, onde materiais de granulação fina de sedimentos detríticos desenvolvem uma espessa franja capilar por onde se infiltram os efluentes. Efeitos negativos de atividades humanas têm sido registrados nos litorais de Cumbuco, Tabuba e Icaraí, ambientes balneários de maior freqüência turística na Região Metropolitana de Fortaleza-Ce. No litoral do Pecém, a

noroeste, próximo ao Porto do Pecém, observa-se que estes recursos hídricos ainda estão sendo preservados. Porém, carecem de um bom gerenciamento, pois há uma tendência de uma iminente especulação imobiliária, em função do desenvolvimento futuro daquela zona portuária. Em muitas áreas do mundo, conseqüentemente, este problema tem aumentado em áreas de pobres recursos de água, pela baixa precipitação e alta evapotranspiração, mau gerenciamento dos recursos d'água ou em áreas com densas populações e alta faixa de consumo (Khair et al, 1994).

Conclui-se, finalmente, que a Intrusão de água salgada marinha é a principal ameaça aos recursos de água doce das áreas litorâneas, principalmente em climas semi-áridos, havendo três mecanismos primários pelos quais a água salgada contamina o reservatório de água doce de aquíferos não confinados superficiais da região: (1) movimento de água salgada de subsuperfície (ampla intrusão lateral); (2) infiltração de água salgada de canais relativos à maré e fluxos; e (3) movimento superior de água salgada cognata (água que permanece o tempo de testemunho) de formações detríticas mais rasas devido às retiradas em poços no campo. Todos esses mecanismos são ocasionados pelo rebaixamento de níveis de água doce no aquífero superficial. Verifica-se, porém, o efeito dos dois últimos mecanismos (infiltração e movimento superior) geralmente é limitado às regiões relativamente pequenas, considerando que a intrusão lateral afeta uma área muito maior da região do aquífero.

8.2 Obtenção e Tratamento dos Dados da Região de Caucaia e Pecém-Ce

Aqui se apresentam dados de levantamentos geofísicos efetuados em campo, através de sondagens de eletro-resistividade e de sondagens eletromagnéticas no domínio das frequências. Estes últimas sondagens, com a execução de 2 malhas de sondagem com EM-34 (Malha 01 e Malha 02), nas regiões litorâneas entre a Zona Portuária do Pecém, Barra do Cauípe e regiões urbanas da antepraia de Cumbuco, Tabuba e Icaraí, respectivamente. Nas sondagens elétricas foram executadas novas SEVs e reinterpretadas outras disponíveis na bibliografia, visando comprovar litologias e fenômenos pertinentes aos objetivos da prospecção geofísica executada. Neste mesmo contexto, foram também executados caminhamentos eletromagnéticos com EM-34, mais recentes, representados pelas simbologias PERFIL-1/NW e PERFIL-2/NW, com espaçamentos entre as leituras de sondagens de 40 m. A localização destes perfis, das

SEVs e das malhas citadas está projetada geograficamente no mapa de pontos amostrados (anexo, Área 1). Estes caminhamentos eletromagnéticos estão próximos à linha de costa na trajetória do Porto do Pecém até a Praia do Cauípe. A coleta foi sistematizada, com o objetivo de verificar e delinear eventualmente a interface da água salina nos aquíferos costeiros da região questionada.

Algumas sondagens eletromagnéticas de EM-31 e EM-34 de Vieira Filho (2002) (com simbologias de poços em coloração vermelha de, 1, 2,... 40, etc., no mapa de pontos amostrados na Figura 8.3 e em anexo, Área 1) existentes na região de Icaraí e com espaçamentos maiores foram reinterpretadas. Nesta distribuição, foi concebido para seus pontos de sondagem um caráter de semidetalhe tendo em vista as pequenas dimensões das áreas das malhas regulares (malha 01 e malha 02) escolhidas e levantadas, próximas às leituras anômalas ali detectadas.

As sondagens foram reinterpretadas em 50 estações de leitura na porção litorânea entre a praia do Cumbuco e Praia do Icaraí (figura 8.3), abrangendo uma superfície de aproximadamente 12 Km², com 4 medidas de EM-31, nas profundidades de 3, 4, 6 e 7 m e 2 medidas de EM-34 nas profundidades de 15 e 30 m. Os dados foram processados e interpolados por krigagem simples e calculados seus mapas previsionais de isocondutividade aparente a cada profundidade investigada, através da extensão de análise geoestatística existente no Software ESRI® ArcMapa™ 9.0, observados mais a diante. De acordo com a posição dos dipolos e profundidade de investigação foram estabelecidos critérios de simplificação, onde foram escolhidas três profundidades maiores e mais representativas na reinterpretação, resultando as interpretações demonstradas na figura 8.4_r, para cada tipo de dipolo:

- **[EM31_EM34]. [DH - 3 m de profundidade de investigação]:**

Corresponde ao mapa previsionais de isocondutividade calculado na profundidade de 3 m, apresenta uma distribuição de valores baixos indicando um aquífero livre de contaminação salina, numa faixa de 3,0 a 16,3 mS/m. Desobedecendo a este padrão geral ocorrem em dois pontos isolados, um ao sul da Região Litorânea da Praia de Icaraí, valores em torno de 44 mS/m e outro na desembocadura do Rio Juá (mapa geológico anexo) e valores maiores do que 25 mS/m.

Discute-se na literatura geológica a ligação desses valores da anomalia de condutividade aparente ao sul de Icaraí com a influência da contaminação pelas antigas salinas, Sabadia *et al.* (2000), que se estenderam [EM31_EM34]. [DH-3 m] até à região contígua da Praia do Pacheco. A anomalia condutiva na zona da desembocadura do Rio Juá está associada à contaminação do lençol freático interconectado pelas águas marinhas que circulam no estuário salinizado durante o inverno, atingindo lagoas e poços. A SEV 62 naquela localidade mostrou valores altos de condutividade desde as primeiras coberturas até mesmo dentro dos aquíferos fissurais do cristalino:

- **[EM31_EM34]. [DV-6 m de profundidade de investigação]:**

Nesta superfície, há um aumento nas condições de salinização dos aquíferos e um conseqüente acréscimo da condutividade aparente nos dois pontos citados, principalmente, a sul de Icaraí, mais ou menos no ponto de amostragem nº 28 do mapa (anexo 2), onde a salinização é mais acentuada. Neste, os valores máximos pela de interpolação atingem cerca de 76,0 mS/m. No contexto, uma elevação da condutividade aparente nessas duas profundidades de investigação ficou evidente.

Os conglomerados urbanos com as superquadras da Praia de Icaraí maximizaram o grau de ocupação do terreno, com um modelo especulativo de aproximadamente 1000 condôminos, numa frequência de 66% de saturação. Significa isto, 360 hab/hectare, semelhante a um consumo de 72.000 litros/dia/hectare. Esta demanda é muito superior à capacidade dos aquíferos da região que já se encontram com sobre-explorações causando a penetração acentuada da cunha salina.

- **[EM31_EM34]. [DH – 15 m de profundidade de investigação]:**

Na distribuição pertinente a esta profundidade, observa-se a mesma tendência de aumento nos valores de condutividade aparente adquiridos e um aumento da superfície de salinização nas três profundidades pesquisadas na região de Tabuba-Icaraí e também um acréscimo do próprio valor com valores máximos superiores a 102,0 mS/m.



Figura 8.3 - Mapa de localização das estações de levantamento geofísico Eletromagnético (EM31 e EM34). Recolhido de Vieira Filho (2002).

Por outro lado, observa-se que nesta profundidade a interpolação gera uma diminuição nos valores relativos de condutividade aparente com baixos valores motivados pela presença de dunas (cordão) no litoral noroeste de Icarai e na praia do Cumbuco (baixo índice de ocupação habitacional), o que poderá ser na seguinte interpretação:

[EM31_EM34]. [DV – 30 m de profundidade de investigação]:

Nesta distribuição, a 30 metros de profundidade, observa-se um aumento da salinização e uma diminuição dos valores relativos de condutividade. Conjetura-se a presença de 2 aquíferos na região, um superior mais arenoso permeável livre permitindo a circulação dos sais e outro inferior, argiloso ou semiconfinado resguardando-se da contaminação.

A existência das variações litológicas de fácies da Formação Barreira e o contraste dos valores de condutividade permitem pensar na presença de aquífero suspenso semiconfinado ou mesmo num substrato argiloso assentando seqüências superficiais de aquíferos de dunas e paleodunas característicos das zonas costeiras do Estado do Ceará. Os mapas de isocondutividade aparente das águas medidas nos poços da região guardam semelhanças com o mapa elaborado a partir do levantamento geofísico.

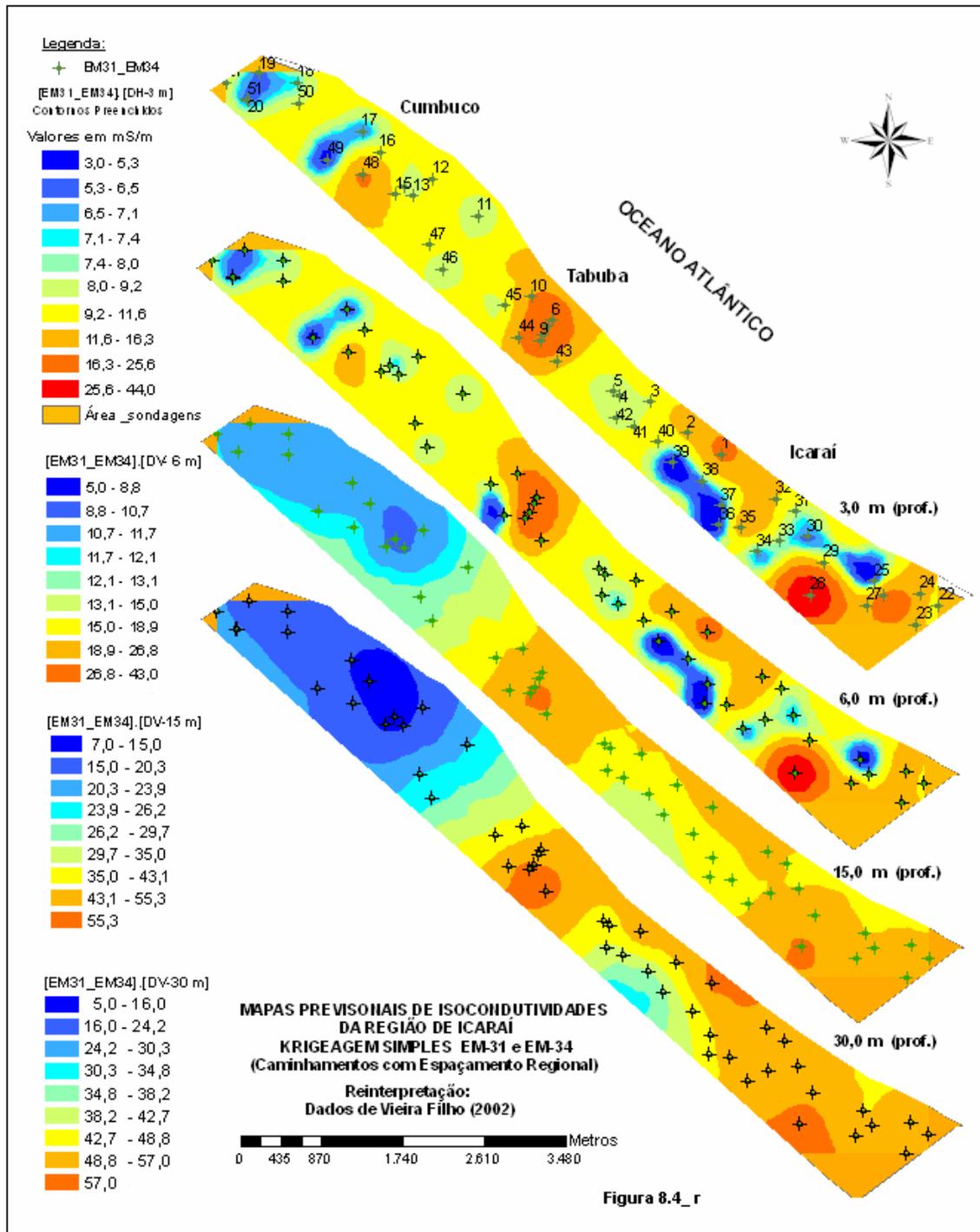
Apesar de existirem diferenças entre os coeficientes de correlação, pode-se admitir que assumindo o valor médio entre as 2 variáveis, a condutividade aparente determinada pelo levantamento elétrico, pode ser dada pela expressão:

$$Ca \text{ (mS/m)} = 63,4 * Cp \text{ (}\mu\text{S/m)}.$$

Ca = Condutividade aparente e Cp = Condutividade de poços

SEVs executadas dentro da zona litorânea da área e na Malha 02 foram reinterpretadas juntamente com outras existentes na bibliografia, nas proximidades dos caminhamentos, permitiram não só parametrizar as profundidades das malhas, mas também auxiliar na interpretação dos perfis geológicos-hidrogeológicos representados no mapa geológico (anexo).

Os estudos fazem parte de um pensamento, que procura contribuir com as ciências geológica e geofísica para ajudar a comunidade da região, na solução do problema salinização de água doce subterrânea na zona costeira de Caucaia e Pecém. Procura-se fazê-la, somando-se informações técnicas analisadas ou reinterpretadas de dados técnicos de empresas particulares, estatais que atuam na área, com novas com novas informações geradas através de novos levantamentos e estudos geofísicos nas zonas propensas ao fenômeno abordado.



Neste aspecto, Marinho *et al* (2002), na Bacia do Rio Cauípe, com 25 medidas de nível estático e condutividade elétrica em poços amazonas, através de SEVs assumiram espessuras saturadas desde quase nulas ao sul da área e de até de 40 m, nas encostas dos vales do Rio Cauípe.

As mesmas medidas indicaram uma zona mista de explorações de aquíferos sedimentar e fissural (do embasamento cristalino da região) com bom aumento de vazão. Ao lado deste acréscimo de volume de água há indicações de uma substancial contribuição salina deste último no aquífero da Formação Barreiras.

Com limitadas potencialidades de exploração de água subterrânea, o Aquífero Dunas apresenta-se como o mais promissor e a identificação de zonas fraturadas sob a cobertura sedimentar pode conduzir à exploração numa zona mista com aumento de vazão, porém possibilitando a ocorrência de um acréscimo de salinidade na Formação Barreiras.

No **PERFIL -1/NW**, iniciado em frente à Sede da Administração do Porto do Pecém na direção da Barra do Cauípe, com sondagens de EM-34, cujos resultados estão demonstrados pela figura 8.5, onde se observa incremento nos valores de condutividade aparente até a distância de 500 m da referida sede, seguindo uma linha paralela à linha praia, especificamente, com as leituras adquiridas com DH (dipolo horizontal) na profundidade de 30 m. Observa-se uma caída brusca nos valores de condutividade elétrica na distância de 600 m do Porto do Pecém, desde 18,0 mS/m ao valor de aproximadamente 3,0 mS/m para em seguida subir novamente até o valor de 20,0 mS/m na profundidade de 30 m.

Observa-se que esses valores anômalos não são repetidos para profundidades mais rasas e se repetem para outras profundidades mais acentuadas.

As linhas de condutividade DH-20 a 15 metros de profundidade possuem valores de condutividade mais altos nos trechos de 700 a 750 m do afastamento. Os maiores valores situam-se 14,0 e 16,0 mS/m. Os valores do dipolo vertical (DH-10) acompanham de maneira análoga os valores de DH-20, estabelecendo um paralelismo entre as curvas com um *déficit* 2,5 mS/m na profundidade de 7,5 m.

Para os dipolos verticais no mesmo caminhamento, na profundidade de 60 m (DV-40), as leituras no mesmo trecho indicaram também uma camada resistiva, porém a exemplo do arranjo com dipolos horizontais forneceram em seguida um aumento na condutividade atingindo valores entre 15,0 e 20,0 mS/m.

O DV-20 a 30 metros de profundidade de investigação, indica leituras semelhantes e obedece a um padrão geral no perfil, com valores de condutividade em torno de 15 e 18 mS/m e picos de leituras mais resistivas a 500 m do Porto.

As leituras do dipolo vertical (DV-10) alternam com leituras de 15,0 mS/m com leituras de 7,5 mS/m, para seguidamente manter uma média de 12,5 mS/m na profundidade de investigação de 15 m.

O **PERFIL-2/NW** – Caminhamento 02 é um perfil próximo à linha de praia dando continuidade ao perfil anterior, para complementar o caminhamento maior na trajetória Porto do Pecém até a Barra do Cauípe e resultados estão apresentados na figura 8.6.

Observa-se através das curvas obtidas, um acréscimo de condutividade a 7,5 metros de profundidade, representado pela curva pertencente às sondagens eletromagnéticas EM-34 com dipolo horizontal (DH-10), mantendo uma média de entre 7,0 e 13,0 mS/m de condutividade elétrica até 700 m na linha de extensão de afastamento do início do caminhamento 02, iniciado depois do primeiro perfil. Verifica-se um decréscimo de condutividade através dos valores representados pela curva, para no final deste percurso experimentar um novo acréscimo.

Os valores mais altos de condutividade encontram-se no início do perfil no levantamento com os dois tipos de dipolos nas profundidades correspondentes para cada arranjo.

As leituras com o DH-20 representadas pela coloração verde (mapa de pontos) mantêm-se com valores condutivos da salinidade, no afastamento de 100 metros com leituras de condutividade elétrica em torno de 24,0 mS/m nas profundidades de investigação de 15 e 30 metros, decaindo seus valores para o patamar de 14,0 mS/m. Há um aumento subindo progressivamente a partir de 750 m do afastamento do primeiro perfil, onde atinge valores de 25,0 e 30,0 mS/m e indica também a presença de água salina.

As curvas são análogas para os dados obtidos na abordagem com dipolos verticais, nas profundidades de 15, 30 e 60 metros de profundidade, respectivamente.

Observam-se valores iguais de condutividade no início das leituras no afastamento de 100 m. O valor de DV-10 (a 15,0 m de profundidade) é aproximadamente igual ao valor de DH-20 (a 15 m de profundidade) e os perfis são análogos.

Foram efetuadas 311 e 119 sondagens eletromagnéticas distribuídas regularmente em duas malhas de 800 m x 600m (Malha 01) e 600 m x 400 m (Malha 02), respectivamente nas áreas de Pecém-Cauípe e Icaraí, complementadas com caminhamentos eletromagnéticos já citados com espaçamento pontuais de 40 metros desde a zona portuária do Pecém até a Barra do Cauípe. Utilizou-se em ambas, o condutímetro eletromagnético Geonics Modelo EM34-3XL, com as profundidades de 7.5 m, 15 m, 30 m y 60 m.

Na parte superficial da planície costeira se localizam, substancialmente, valores de condutividade baixos a moderados. A área está caracterizada por baixos valores de condutividade aparente ligados aos terrenos secos. Os valores mais altos são detectados numa área pequena e restrita aos conglomerados urbanos (condomínios de apartamentos), balneários e um grupo de vivendas, na mesma faixa costeira, na zona da Lagoa do Poço e nas proximidades da Praia de Icarai.

A foto 8.1, com 311 pontos da malha 01 projetados, representando 1.866 leituras, dá idéia da execução do levantamento sistemático eletromagnético EM34 no litoral do Porto do Pecém, numa área onde não existe ainda especulação imobiliária e sem perfurações de poços profundos. Portanto, uma área pesquisada que servirá como referência de um estágio natural de intrusão salina afetada apenas por causas naturais. Os resultados estão projetados predictivamente nos mapas interpolados por Krigagem simples, resultando os mapa da região litorânea de Pecém / Cauípe e vistos nas figuras 8.1 H_a, 8.1H_b, 8.1H_c, 8.1V_a, 8.1V_b e 8.1V_c.

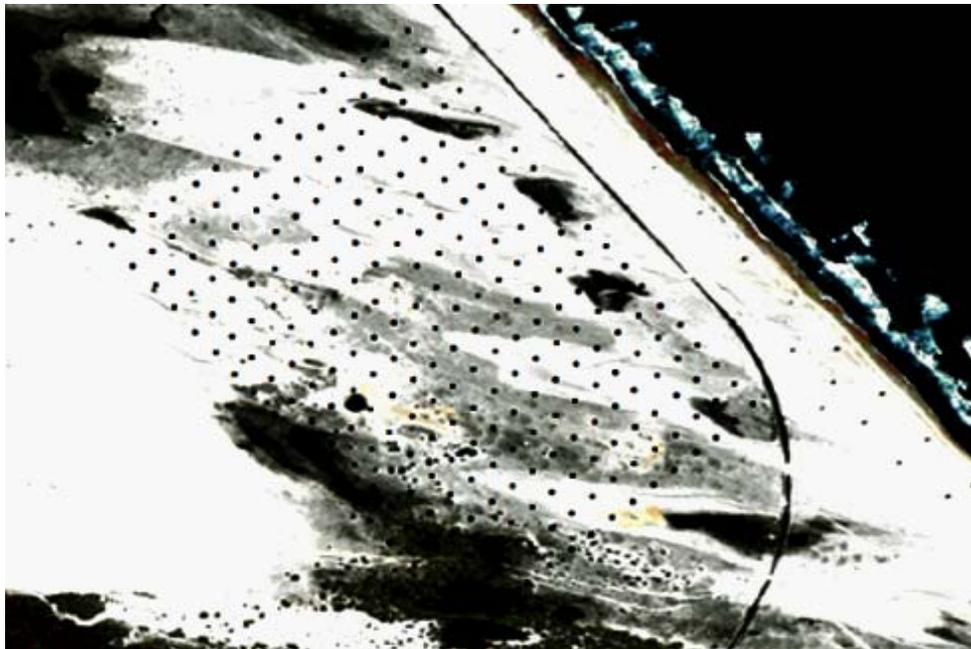


Foto 8.1 - Mostrando a projeção integrada dos pontos dos perfis de EM34 executados numa malha de 1.200m x 800m, com nós de 40 em 40m (Malha 01).

Localidade denominada Curva do Porto do Pecém (Estrada antiga) próxima à Lagoa do Cauípe-Ceará .(Imagem Quick Bird) com pixel de 60cm de resolução em fusão no Envi 4.2.

ESTAÇÃO	LONGITUDE	LATITUDE	DH-40	DV-40	DH-20	DV-20	DH-10	DV-10
0	521355	9608020	11,30	26,10	33,90	7,50	53,40	22,20
1	521372	9607984	5,60	27,20	14,40	25,80	22,10	33,20
2	521390	9607948	9,80	13,50	21,60	19,80	35,70	40,10
3	521407	9607912	10,60	20,90	21,80	30,60	28,10	39,70
4	521425	9607876	10,80	10,20	22,10	26,10	28,40	45,20
5	521442	9607840	17,50	4,90	38,10	30,60	45,00	68,00
6	521460	9607803	9,20	8,60	21,70	24,00	31,30	50,40
7	521477	9607767	5,30	8,80	13,90	21,90	22,50	51,20
8	521495	9607731	9,70	13,20	15,90	21,00	21,70	42,30
9	521512	9607695	15,20	3,90	23,20	24,80	25,90	49,40
10	521530	9607659	12,70	17,01	19,00	28,20	22,10	56,20
11	521547	9607623	12,30	17,10	16,40	27,10	17,40	36,00
12	521564	9607585	11,10	12,30	14,80	20,50	18,10	35,10
13	521581	9607547	7,40	8,50	14,30	26,80	15,20	32,00
14	521580	9607483	8,30	8,20	10,50	16,60	14,00	30,20
15	521598	9607445	1,30	5,70	6,00	6,30	8,60	6,90
16	521615	9607408	2,70	6,60	8,30	10,40	8,50	8,90
17	521633	9607370	3,50	7,20	4,70	3,20	5,40	7,50
18	521650	9607332	8,10	3,80	7,90	14,80	7,60	10,70
19	521668	9607295	19,50	10,40	19,10	25,70	13,10	14,00
20	521685	9607257	27,40	8,90	26,00	25,20	20,20	31,80
21	521703	9607220	22,90	8,70	26,30	27,20	27,20	56,10
22	521721	9607182	20,20	2,20	19,90	8,10	9,00	11,60
23	521738	9607144	18,10	0,30	21,80	20,70	12,60	18,00
24	521756	9607107	13,10	2,80	16,20	23,50	10,50	17,80
25	521773	9607069	9,80	2,10	12,30	14,10	16,20	29,40
26	521791	9607031	3,50	8,50	8,70	10,80	11,40	17,60
27	521808	9606994	1,90	1,80	8,00	9,20	9,30	8,10
28	521826	9606956	9,20	6,80	11,00	5,80	3,50	10,20
29	521844	9606919	7,80	4,60	10,60	12,10	8,10	11,70
30	521861	9606881	7,50	2,60	14,10	23,30	13,90	22,00
31	521879	9606843	13,50	2,80	18,60	27,60	19,30	27,90
32	521896	9606806	14,90	2,50	21,60	25,40	15,40	28,50
33	521914	9606768	14,90	4,50	20,80	26,60	16,60	30,50

No contexto, foram interpolados através de gráficos de dispersão no programa Microsoft Excel 2003 os perfis PERFIL-1/NW e PERFIL-2/NW (figuras 8.5 e 8.6). Foram determinados relacionando a correspondência das posições da bobina transmissora e os valores obtidos a cada profundidade convencional (7,5 metros, 15 m, 30 m e 60 m). A proximidade desses perfis com a Malha 01 (Pecém-Cauípe) e seu paralelismo corroboram com as interpolações adjacentes à zona de praia na primeira linha prospectada.

Por outro lado, complementando a interpretação da Malha 01 foram utilizadas as SEVs 100, 104, 110 e 111, conforme se observa nas interpretações gráficas das figuras 8.13, 8.14, 8.15 e 8.15, respectivamente. Nesse aspecto, procurou-se utilizar as interpretações das SEVs mais próximas da referida malha, no sentido de parametrizar as profundidades de investigação fornecidas pelo método EM-34, em superfícies tênues. A localização de todas as SEVs estão demonstradas na figura 8.12 e indicam suas proximidades tanto com a malha 01 como com a malha 02 projetadas e executadas na área e representam na incorporação de duas metodologias na solução do problema de interface de salinização.

Evidentemente, que com auxílio de perfis litológicos de alguns piezômetros implantados na área, chegou-se a aferir determinadas profundidades e níveis de saturação da água subterrânea tanto nas dunas como na formação Barreiras.

Tabela 8.4 - PERFIL - 2 /NW, em frente à Sede da Administração do Porto do Pecém-Ce, continuação do perfil anterior ou caminhamento 02. Distância entre as estações de medias - 40m

ESTAÇÃO	LONGITUDE	LATITUDE	DH-40	DV-40	DH-20	DV-20	DH-10	DV-10
0	521868	9606685	13,60	8,10	12,20	16,30	9,60	15,01
1	521922	9606622	11,40	10,60	13,01	15,70	9,60	15,60
2	521975	9606559	14,90	14,01	19,80	27,10	14,20	23,60
3	522029	9606496	21,70	24,90	21,60	30,40	14,10	22,50
4	522082	9606433	13,01	17,10	11,40	19,30	8,50	14,20
5	522136	9606370	10,10	7,80	13,10	14,30	10,80	16,01
6	522189	9606307	13,80	13,30	13,40	17,01	11,60	17,40
7	522243	9606244	9,50	12,50	11,01	16,01	9,40	14,70
8	522296	9606181	4,70	9,30	8,01	11,90	8,20	12,10
9	522350	9606118	14,60	8,50	16,50	19,60	12,60	20,20
10	522404	9606055	7,50	13,01	9,70	17,10	7,40	11,80
11	522457	9605992	15,20	13,10	17,30	27,20	12,60	17,20
12	522511	9605929	11,40	19,01	14,80	22,70	12,10	18,80
13	522564	9605866	14,20	15,80	13,90	22,01	10,20	16,40
14	522618	9605803	24,50	10,80	22,60	34,20	12,30	19,40
15	522671	9605740	24,50	30,60	21,10	30,90	10,70	16,80
16	522725	9605677	22,70	29,10	21,70	32,70	11,80	19,70
17	522778	9605614	23,30	28,01	19,80	35,01	10,10	17,90
18	522832	9605551	30,40	25,70	27,80	42,01	14,10	24,20
19	522885	9605488	20,90	19,10	22,01	33,10	14,30	23,60
20	522939	9605425	25,80	20,7	29,70	33,01	21,10	22,01

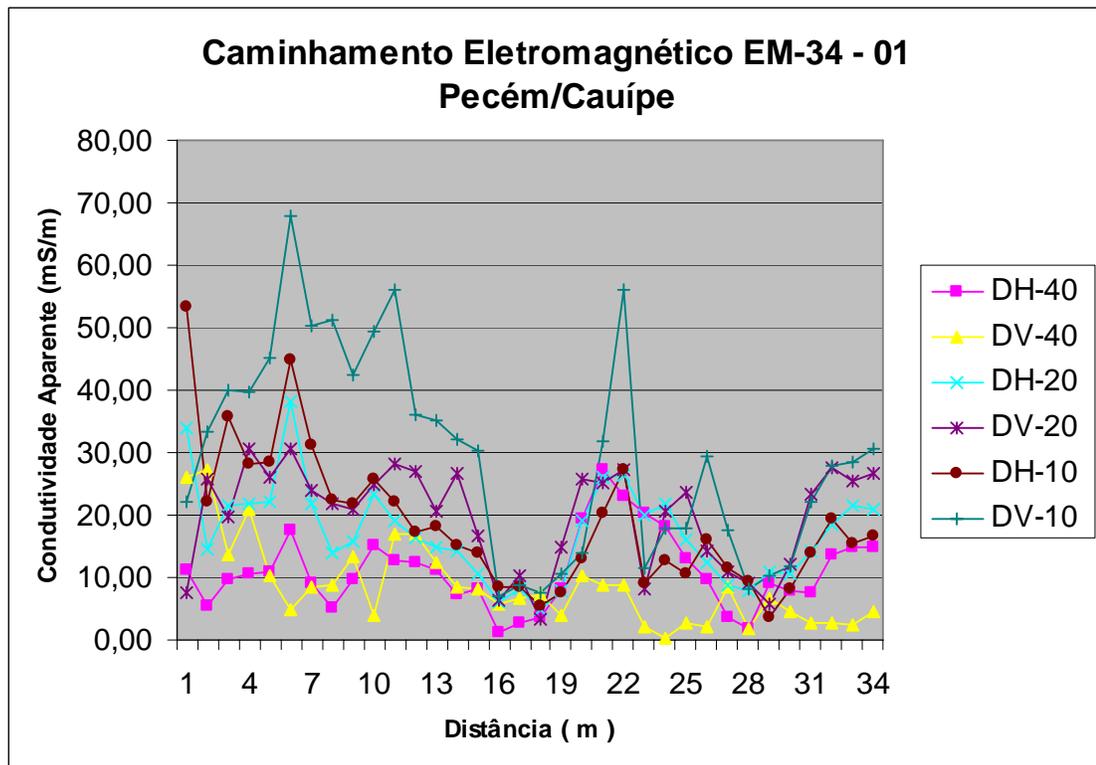


Figura 8.5 - PERFIL -1/NW, em frente à Sede da Administração do Porto do Pecém-Ce , paralelo à linha de praia no sentido da localidade denominada Cauípe, com profundidades de 7,5, 15,0, 30, e 60 metros.

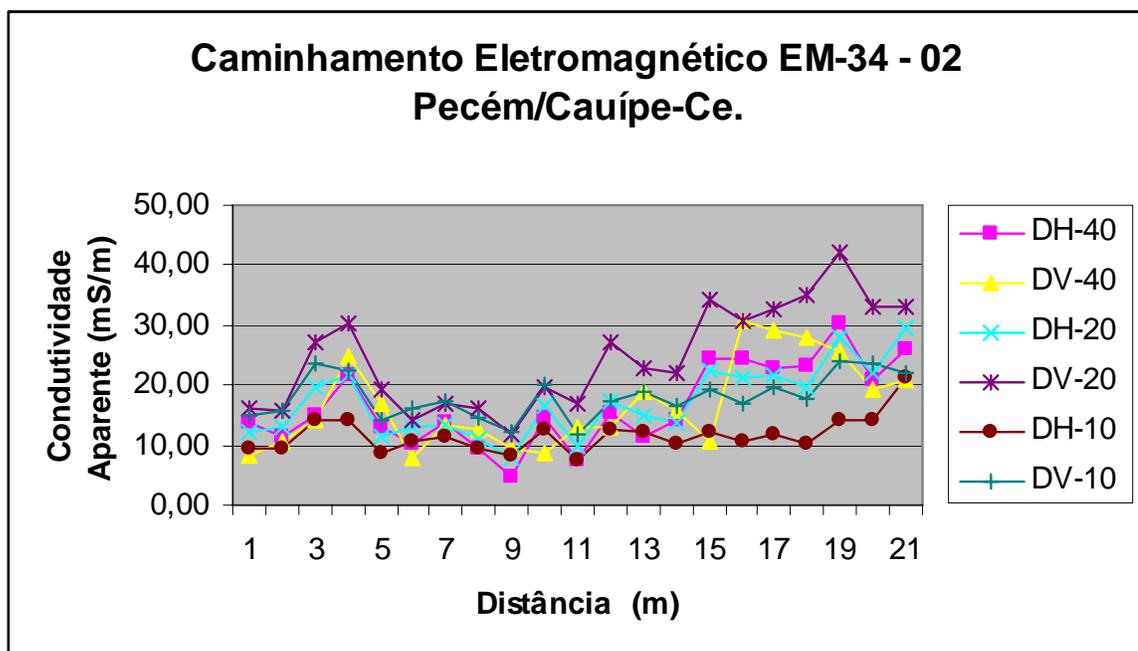


Figura 8.6 - PERFIL -2/NW, em frente à Sede da Administração do Porto do Pecém-Ce, dando continuidade ao caminhamento anterior, conservando o mesmo paralelismo e sentido da localidade denominada Cauípe, com profundidades de 7,5, 15,0, 30 e 60 metros investigadas.

Os dados obtidos do estudo geofísico efetuado através de levantamentos em campo com sondagens de eletro-resistividade e sondagens eletromagnéticas no domínio das

freqüências, no município de Caucaia-Ce, fazem parte da execução de uma nova malha de sondagem EM-34 (Malha 02), na zona da antepraia das localidades denominadas Cumbuco, Tabuba e Icaraí, respectivamente. Os dados podem ser observados na Tabela 8.2 - Medidas de Sondagens Eletromagnéticas no Município de Caucaia-Ce – Malha 02 (litoral de Icaraí). No conjunto das sondagens elétricas foram executadas novas SEV's e outras reinterpretadas da bibliografia, visando comprovar litologias e fenômenos pertinentes aos objetivos da malha geofísica executadas.

As 119 sondagens eletromagnéticas levantadas com 714 medidas de condutividade distribuídas regularmente numa malha de 600 m x 400 m (Malha 02), com espaçamento de 40 metros, especificamente na antepraia de Icaraí, dentro da zona litorânea do Município de Caucaia, praia de Icaraí, foram confrontadas com caminhamentos eletromagnéticos EM31 e EM34, tidos como de caráter regional ou semidetalhe, em função do nível de detalhe da Malha 02 empregada. Utilizou-se novamente o condutímetro eletromagnético Geonics Modelo EM34-3XL, com dipolos vertical e horizontal a 7.5, 15, 30 e 60 metros de profundidade de investigação.

Neste contexto, na parte superficial de planície costeira estudada se localizam, substancialmente, valores de condutividade aparente de baixos a moderados. A área está caracterizada por baixos valores ligados aos terrenos secos. Os valores mais altos foram detectados numa área pequena e restrita aos conglomerados urbanos (condomínios de apartamentos), balneários e um grupo de vivendas, na mesma faixa costeira, na zona da Lagoa do Poço e na proximidade da Praia de Icaraí.

Sondagens Elétricas Verticais realizadas ao longo do litoral do Município de Caucaia, sob os números 55, 54, 53, 52, 99 e 62 (figura 8.12), algumas mais próximas à área da Malha 02, conforme localização também locação inicial dos pontos de sondagens geofísicas levantados (Mapa da Area 1, anexo), onde estão plotadas as estações de sondagem, fornecem subsídios à interpretação do nível estático, das zonas saturadas e das litologias confirmadas em alguns poços executados. Estas SEV's executadas contribuíram também com subsídios para parametrizar os perfis litológicos dos poços, indicar camadas e auxiliar na interpretação do levantamento eletromagnético com EM-34.

O resultado final da prospecção está representado por mapas provisionais calculados de condutividade aparente e interpolados por krigagem simples (observe as figuras

8.2DH_a, 8.2 DH_b, 8.2 DH_c, 8.2 DV_a, 8.2 DV_b e 8.2 DV_c, estabelecidas na Malha 02 - Icaraí) nas diferentes profundidades convencionais já citadas.

Na maior profundidade (figura 8.2 DV_c) se reconhece um corpo resistivo que corresponde, possivelmente, ao topo do embasamento pelas análises observadas em perfis geológicos e em paredões de cacimbas (poços amazonas) na área. São rochas paraderivadas gnáissicas do Complexo Gnáissico Migmatítico com profundidades variáveis superiores a 40, 30, 15 e 7,5 metros de profundidade. A intrusão salina em correspondência na área está conspícua ao nível variável do topo do embasamento e à localização da espessura saturada na litologias subjacentes. Ocorrem também nas fissuras do cristalino e na exploração da água subterrânea de diferentes poços na zona costeira. Como a malha está vizinha à Lagoa da Tabuba, a condutividade sob a lagoa tende a diminuir, sinal da presença de níveis argilosos que impedem a água salgada de penetrar numa maior profundidade. A anomalia condutiva tende a se deslocar para noroeste. A maior profundidade todos os fenômenos declinados tendem a diminuir. Nas figuras citadas os máximos de condutividade são de intensidade e amplitude maiores nas zonas das superquadras populacionais, onde concentram maiores captações de água subterrânea dos sistemas Dunas /Paleodunas e Barreiras.

Para se analisar melhor a direção de onde provém a intrusão salina tem-se que traçar também, no futuro, mapas com aumento da condutividade, que podem ser calculados simplesmente a partir das diferenças entre os valores medidos com a configuração de bobinas de eixos verticais com relação às bobinas de eixos horizontais, nas mesmas profundidades, através de geoprocessamento. Nas figuras citadas se destaca que o incremento de condutividade se desenvolve na direção NW e se divide em duas plumas. Parece claro que isto é devido a sobre-exploração da água subterrânea.

Considera-se preocupante o acelerado aumento de condutividade para noroeste, provavelmente, por causa de bombeamentos para abastecimento de água potável por particulares e mesmo pela prefeitura de Caucaia desobedecendo a normas técnicas e sanitárias. A comparação dos dados de poços *in loco* confirma o fato mencionado. Normalmente, estes poços são abandonados e especulados outros mais adiante sem obediência às normas mencionada. As condutividades medidas nos poços demonstram uma salinidade crescente da água subterrânea e sempre mais próxima às zonas imediatas de antepraia em todo Litoral do Município de Caucaia-Ce.

Os dados das SEVs foram tratados através de um arquivo ASCII, com base nos dados de campo, como os termos $AB/2$, $MN/2$ e ρ_a . Dá-se entrada no software ATO de Zohdy e Bisdorf, 1989, que processam e interpretam resultando multicamadas, onde o número de camadas é igual ao número de pontos calculados na curva digitalizada. Em função das informações geológicas reduz-se o número de camadas para um modelo condizente com espessuras e resistividades. Dando seqüência utiliza-se o Programa RESIT de Vander Velpen, 1988, para interpretação final através de modelagem e inversão automática.

Na interpretação da SEV 53 se observa o caimento da curva de resistividade ao encontrar zonas saturadas e sua subida ao encontrar os corpos mais resistivos do embasamento.

Geralmente, os perfis litológicos apresentam uma pequena cobertura inicial não saturada para logo após na profundidade de aproximadamente 2,0 metros apresentarem areias saturadas, provavelmente, pertencentes às dunas. Na profundidade de 6 m encontra-se a Fm. Barreiras com sua fácies argilo-arenosa dando continuidade a saturação até entrar o cristalino a 21 metros de profundidade. A SEV 54 obedece ao um padrão análogo, tanto na curva de resistividade como na delimitação das camadas ou zonas saturadas da Fm. Barreiras e substrato cristalino. A interpretação da SEV 62 corrobora para o esclarecimento da penetração da cunha salina próxima a linha de praia, onde se observa no início da sondagem uma baixa resistividade dando lugar a uma alta condutividade, que permanece até no cristalino, onde normalmente o corpo é resistivo. Como se tem conhecimento de pequenas profundidades do embasamento nessa zona através de poços amazonas, entende-se que salinização possa atingir os aquíferos fissurais nessa localidade.

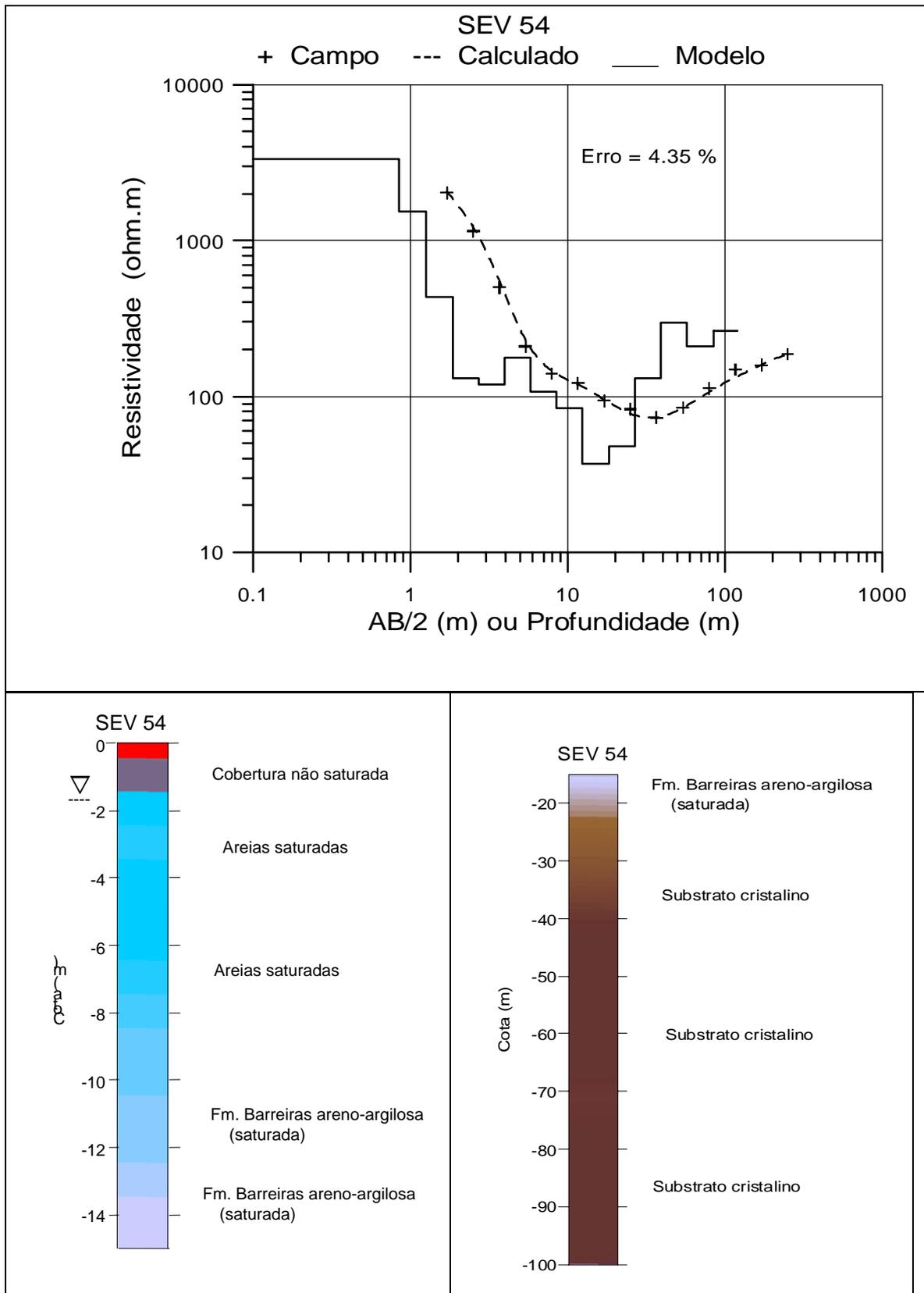
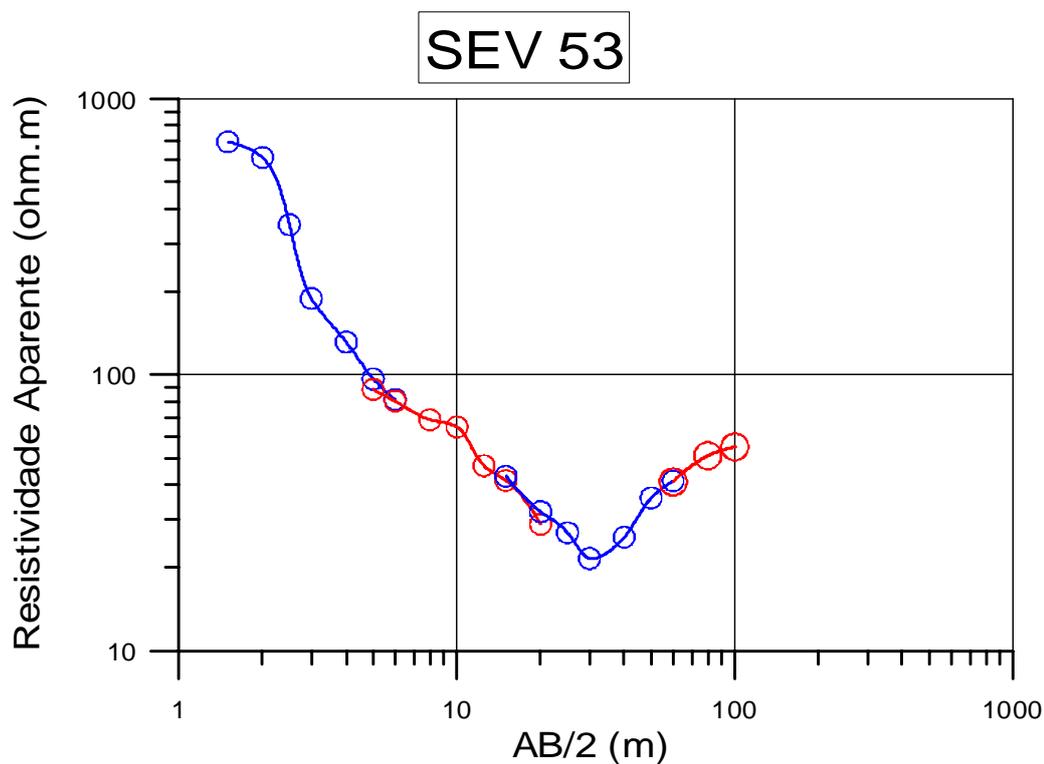


Figura 8.7 -SEV 54 - Perfil indicando a espessura da zona saturada em contato com cristalino.
 Tabela 8.5 - Dados de Campo da SEV 53.

Tabela 8.5 –Dados de campo da SEV 53.

AB/2 (m)	MN/2 (m)	Roa (ohm.m)		AB/2 (m)	MN/2 (m)	Roa (ohm.m)
1.5	0.3	698.3		15	3	42.9
2	0.3	613		20	3	31.9
2.5	0.3	350		25	3	26.8
3	0.3	189		30	3	21.6
4	0.3	131.2		40	3	25.8
5	0.3	96.6		50	3	35.8
6	0.3	81.3		60	3	41.2
5	1	88.4		60	10	40.9
6	1	80.2		80	10	50.9
8	1	68.7		100	10	54.8
10	1	64.7				
12.5	1	46.8				
15	1	41.4				
20	1	28.7				

**Figura 8.8 - SEV 53 – Dados de campo (Arranjo Schlumberger)**

Coordenadas UTM: 535.910 E / 9.594.504 S

:

Data: 25/06/1999

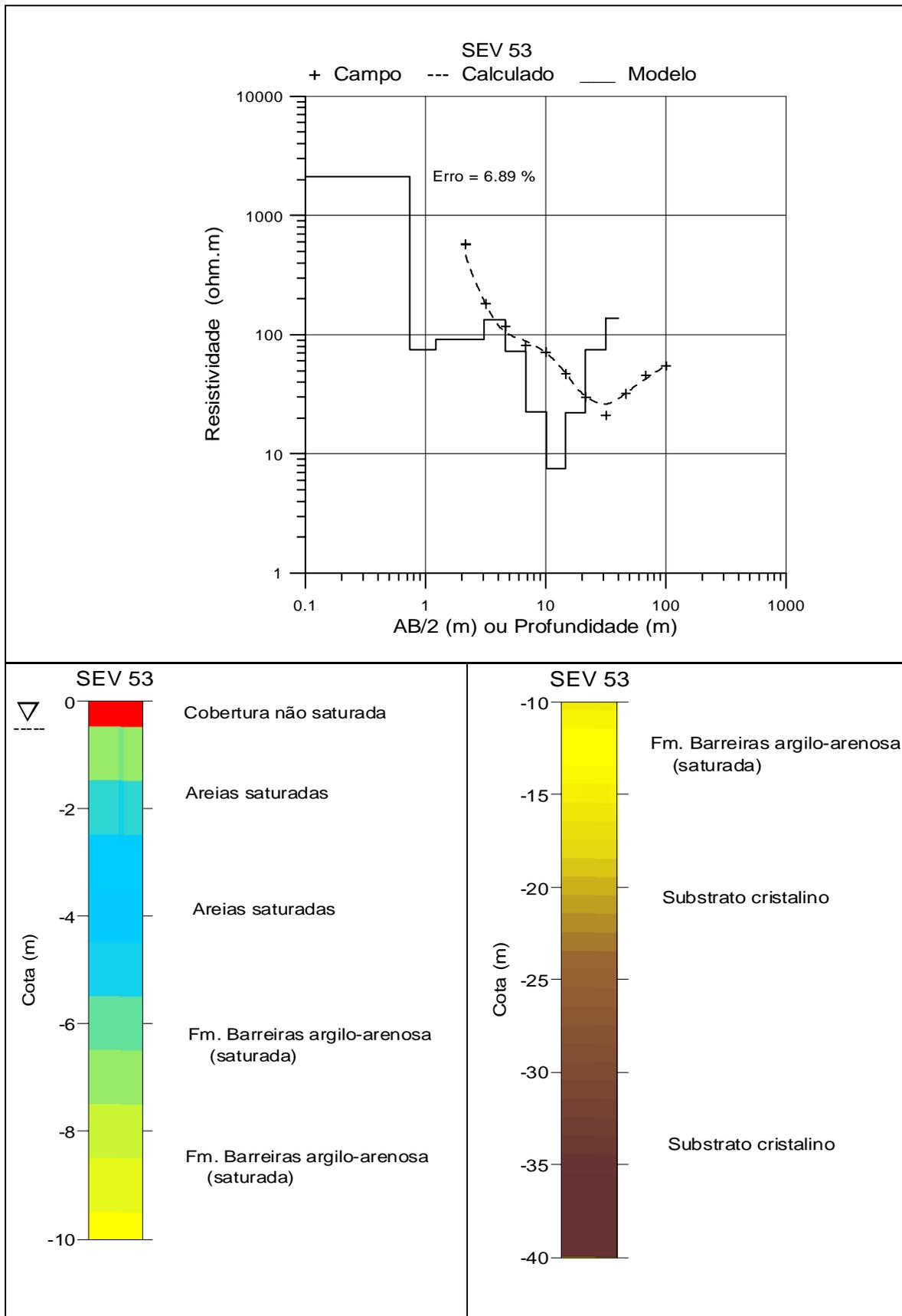


Figura 8.9 - SEV 53 – Mostrando regiões saturadas nas dunas e Formação Barreiras.

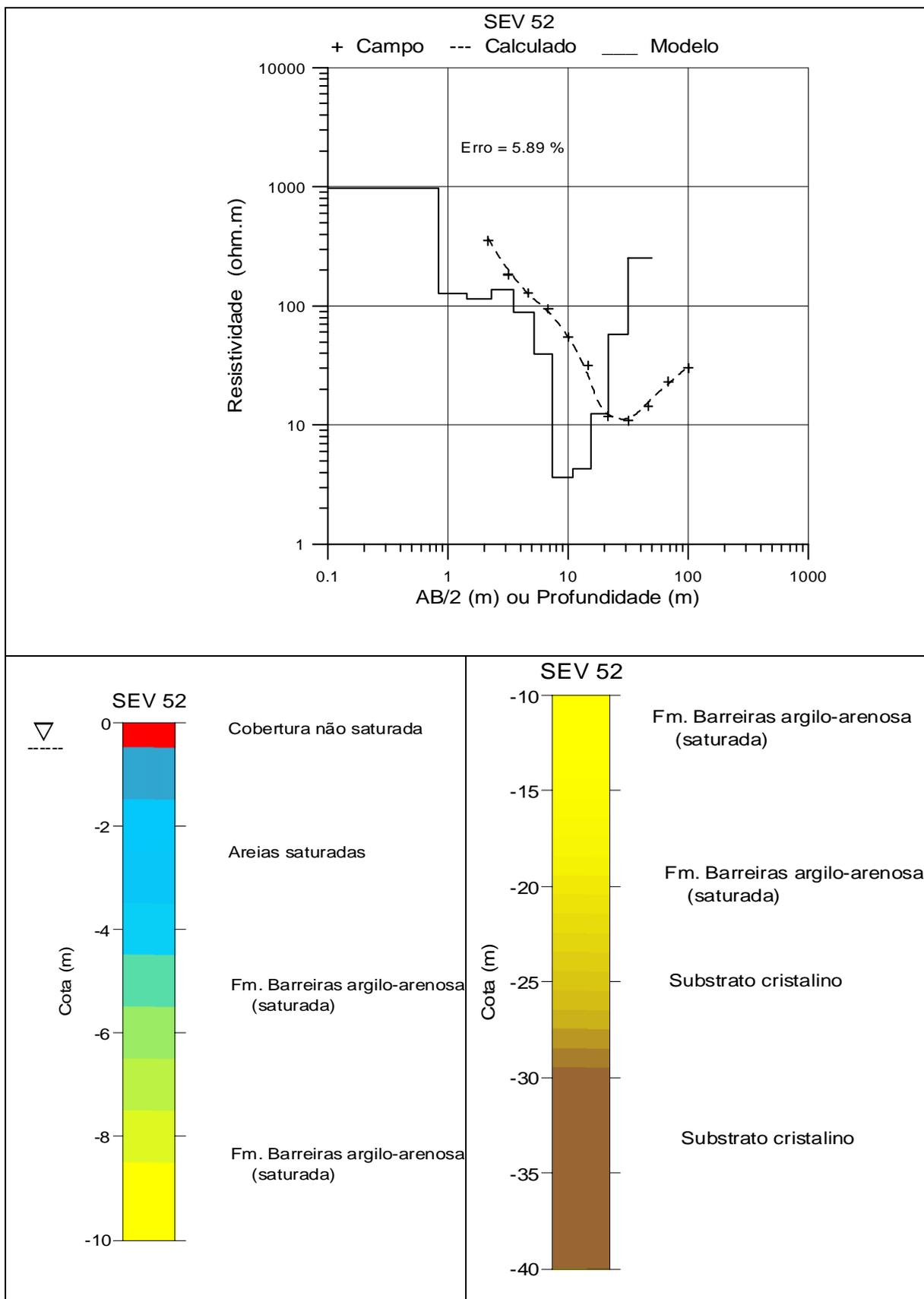


Figura 8.10 - SEV 52 – Dados de campo (arranjo Schlumberger)-.UTM: 538.247 E / 9.592.851 S
 Data: 25/06/1999 – Recolhida de Marinho (2000)

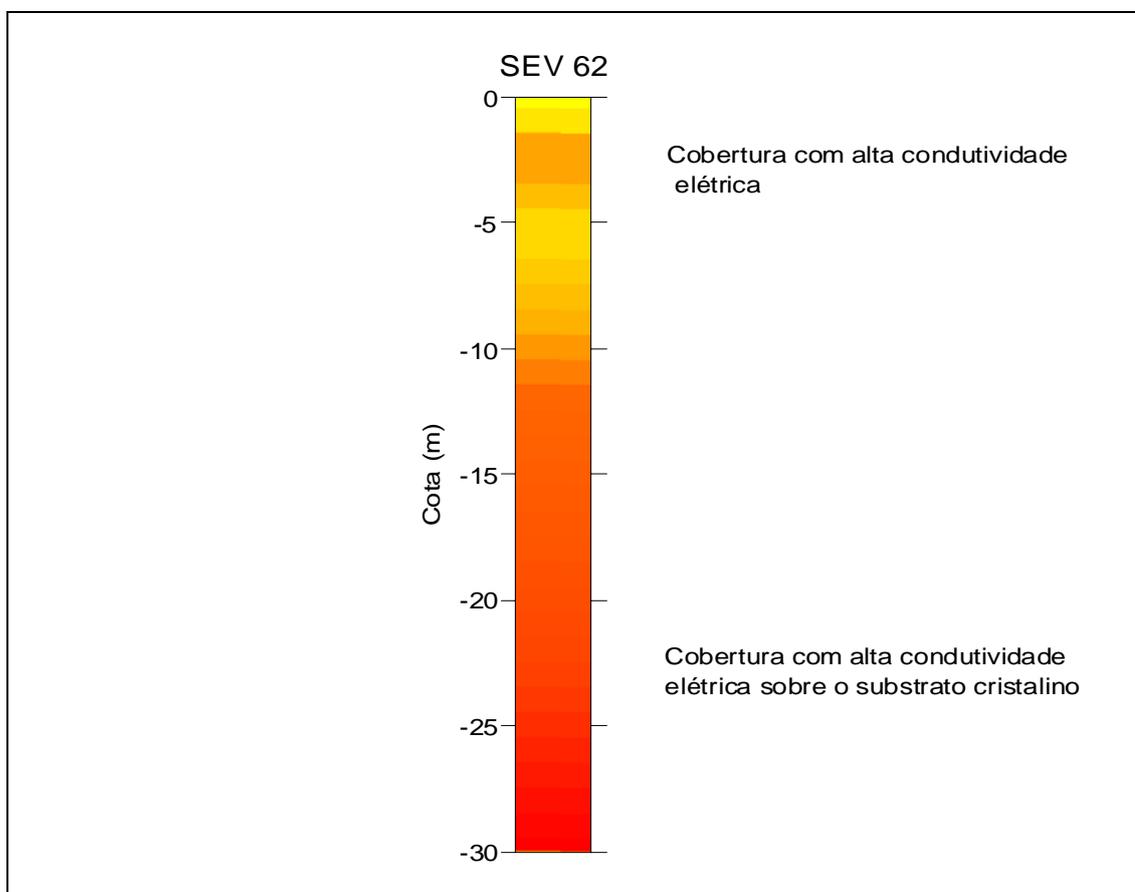
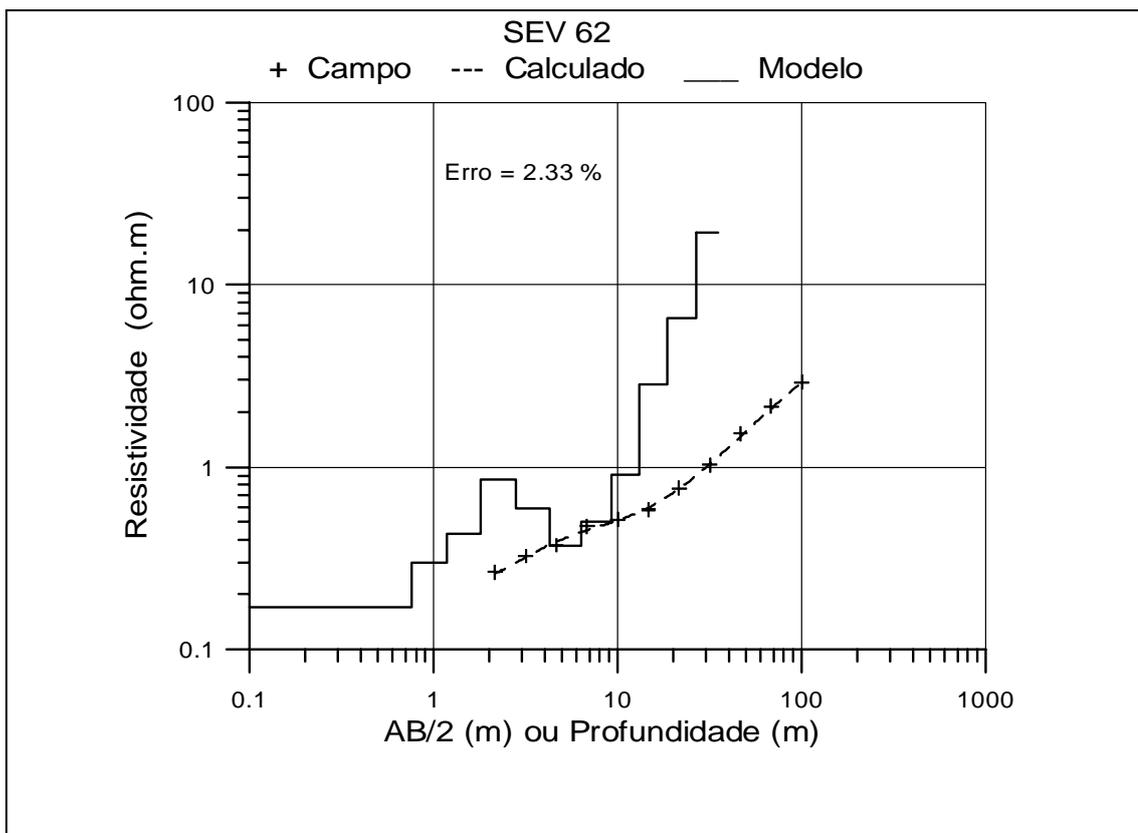


Figura 8.11 - SEV 62 - Interpretada. Recolhida de Marinho (2000), em Icarai, indicando alta condutividade e confirmando as leituras de condutividade aparentes altas obtidas na Malha 02.

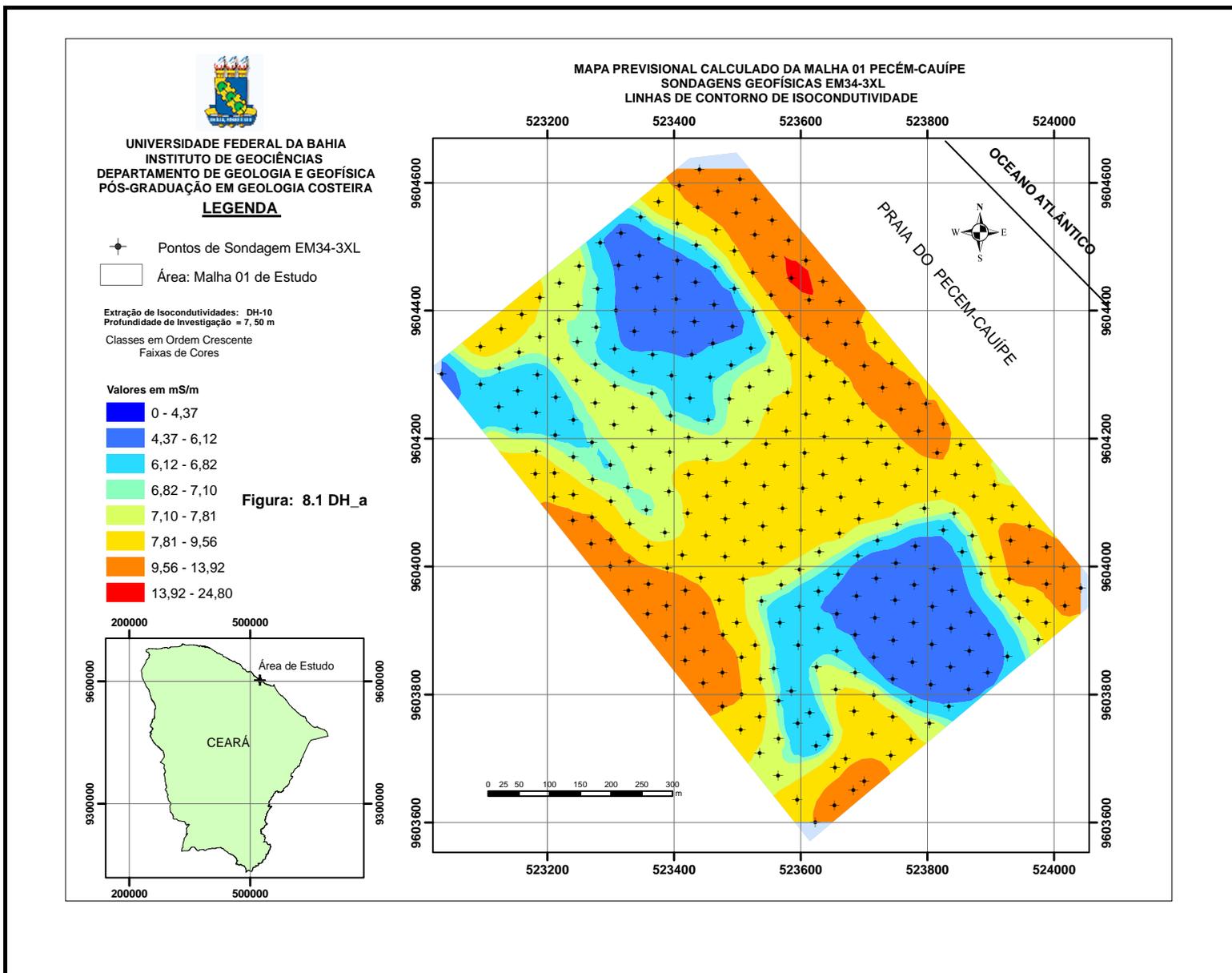
Tabela 8.1 - Medidas de Sondagens Eletromagnéticas no Litoral do Município de São Gonçalo do Amarante (Pecém/ Cauípe) - Estado do Ceará – Malha 01

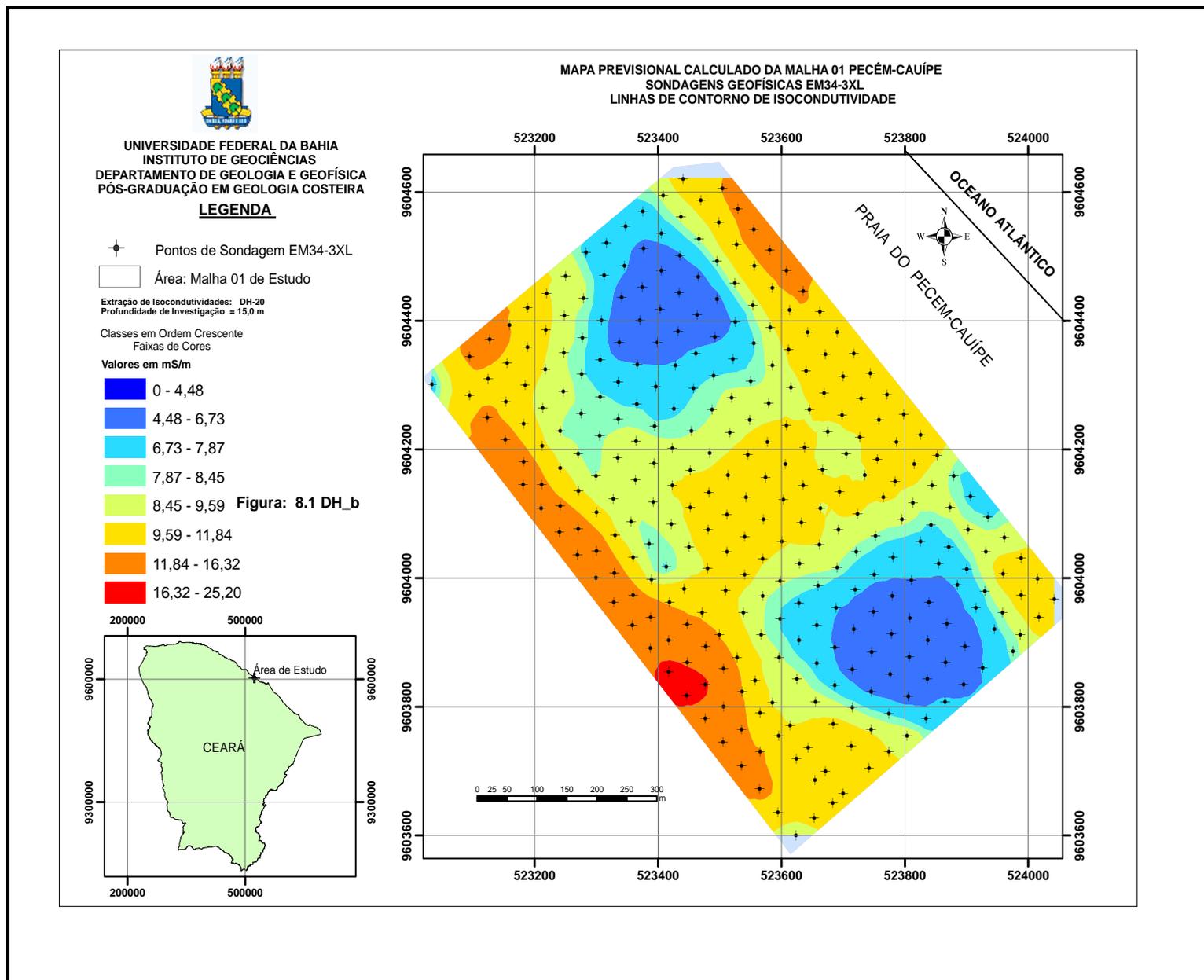
ESTAÇÃO	COORDENADAS UTM		DH40	DV40	DH20	DV20	DH10	DV10	ESTAÇÃO	COORDENADAS UTM		DH40	DV40	DH20	DV20	DH10	DV10
	X	Y								X	Y						
0	524042	9603968	6,89	3,61	9,28	10,21	10,34	15,02	31	523729	9604281	5,30	3,96	15,56	36,34	21,10	41,50
1	524015	9604000	5,89	2,55	8,86	11,30	9,89	15,14	32	523700	9604315	6,85	2,31	13,63	13,60	14,50	24,20
2	523988	9604032	6,60	1,50	9,39	11,40	9,33	15,31	33	523671	9604349	7,31	9,27	14,53	24,40	13,00	20,70
3	523961	9604064	5,16	1,85	6,92	9,54	7,32	12,41	34	523642	9604383	8,50	5,20	14,80	40,50	20,80	56,80
4	523934	9604096	6,22	4,11	4,16	6,10	5,46	7,63	35	523613	9604418	3,20	1,50	13,70	44,10	21,60	59,80
5	523906	9604128	5,86	8,03	3,75	7,02	4,26	6,81	36	523585	9604452	8,25	4,40	13,60	20,10	24,80	53,90
6	523879	9604160	9,86	8,50	4,60	7,29	4,81	7,68	37	523556	9604486	4,22	8,60	10,50	22,70	16,80	28,70
7	523852	9604192	9,08	1,48	10,33	15,48	8,91	15,16	38	523527	9604520	5,12	2,60	12,50	22,00	16,20	38,70
8	523825	9604224	9,05	6,85	12,20	16,13	10,41	16,47	39	523498	9604554	3,03	7,20	7,61	14,10	11,46	26,60
9	523798	9604256	16,34	1,30	11,24	16,26	6,84	14,29	40	523469	9604588	2,30	5,80	8,30	23,70	14,12	28,90
10	523771	9604287	11,80	9,90	9,82	16,13	6,84	11,90	41	523440	9604622	2,30	5,50	11,70	29,40	15,60	46,80
11	523744	9604319	19,00	14,50	9,10	15,50	6,50	11,80	42	523987	9603913	4,17	2,55	6,66	8,82	7,66	11,49
12	523717	9604351	11,00	13,80	7,90	14,59	5,95	9,82	43	523958	9603947	5,46	4,29	7,09	9,41	8,12	13,71
13	523690	9604383	19,02	19,00	7,50	15,16	6,42	10,53	44	523929	9603981	4,43	3,26	5,76	8,65	14,13	10,55
14	523662	9604415	16,00	10,43	10,98	14,38	9,89	15,89	45	523900	9604015	4,99	5,46	3,36	7,06	3,80	6,80
15	523635	9604447	1,80	16,32	12,82	17,70	12,23	14,14	46	523871	9604050	2,65	4,29	4,42	7,28	3,93	6,46
16	523608	9604479	19,33	9,76	11,78	13,43	9,90	16,16	47	523842	9604084	4,74	6,36	5,54	7,04	3,19	8,49
17	523581	9604511	6,29	19,36	16,34	15,70	14,93	17,21	48	523813	9604118	4,98	9,33	6,46	10,92	5,80	10,13
18	523555	9604543	7,51	6,02	14,13	19,41	13,33	16,48	49	523784	9604152	10,33	7,24	10,60	14,03	8,63	14,03
19	523529	9604575	10,47	19,40	14,40	13,95	12,08	14,03	50	523755	9604186	7,44	11,74	8,42	15,43	6,80	11,42
20	523504	9604607	19,49	19,34	15,02	16,53	12,53	17,13	51	523727	9604220	5,91	14,19	6,69	13,86	5,52	10,37
21	524017	9603940	7,90	17,53	14,93	14,46	14,98	18,76	52	523698	9604255	7,00	11,30	7,79	13,26	6,35	10,80
22	523988	9603974	9,71	4,15	12,18	16,04	6,40	6,00	53	523669	9604289	9,34	13,81	7,94	15,03	6,81	10,62
23	523959	9604008	13,49	4,33	17,33	19,13	17,22	19,29	54	523640	9604323	8,51	10,67	9,19	15,58	7,87	13,40
24	523931	9604042	12,07	0,35	12,64	12,72	16,06	19,17	55	523611	9604357	9,47	9,94	9,52	15,66	8,01	12,48
25	523902	9604076	11,10	3,15	14,30	19,49	14,80	19,64	56	523582	9604391	8,22	9,32	7,84	13,48	5,84	9,49
26	523873	9604111	10,00	8,50	13,61	19,66	14,88	19,86	57	523553	9604425	7,69	9,05	8,22	13,28	6,75	11,13
27	523844	9604145	7,49	8,00	11,54	19,55	13,68	42,10	58	523524	9604460	10,18	7,66	9,82	14,64	8,12	13,42
28	523815	9604179	0,77	4,31	9,79	29,00	10,80	34,00	59	523495	9604494	8,57	8,57	8,47	15,78	7,06	12,16
29	523786	9604213	0,20	4,46	13,51	31,10	13,61	51,00	60	523466	9604528	7,95	9,84	9,22	15,50	7,23	12,42
30	523758	9604247	3,10	5,00	12,84	29,90	16,84	42,00	61	523437	9604562	11,35	6,92	10,55	15,64	9,52	15,38

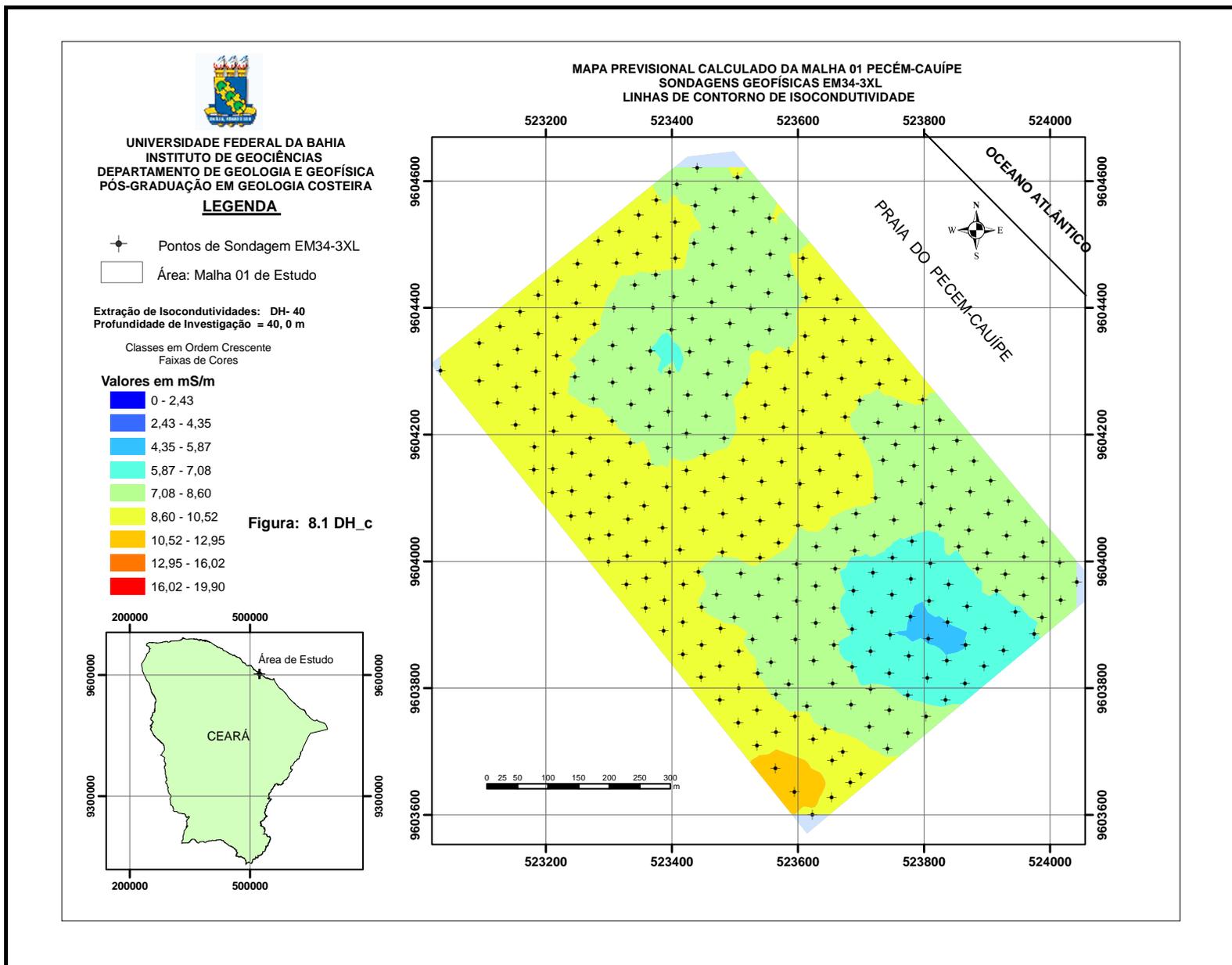
ESTAÇÃO	COORDENADAS UTM		DH40	DV40	DH20	DV20	DH10	DV10	ESTAÇÃO	COORDENADAS UTM		DH40	DV40	DH20	DV20	DH10	DV10
	X	Y								X	Y						
62	523408	9604596	6,88	11,10	8,92	11,81	7,04	11,58	95	523608	9604239	14,65	12,26	10,52	12,21	8,75	14,50
63	523975	9603887	6,88	7,26	8,25	12,78	7,29	11,93	96	523579	9604273	15,02	13,05	7,66	13,65	7,45	11,60
64	523945	9603921	6,89	8,97	7,35	11,88	6,58	10,93	97	523550	9604307	10,78	17,08	7,22	13,58	7,41	11,20
65	523915	9603955	8,25	9,35	6,75	11,77	5,70	8,72	98	523521	9604342	10,08	13,01	6,67	13,16	6,75	11,35
66	523885	9603990	7,70	10,37	6,46	11,87	5,36	8,58	99	523492	9604376	3,81	9,50	6,50	8,76	5,42	8,55
67	523855	9604024	8,12	7,02	8,13	13,33	6,78	11,10	100	523463	9604410	9,78	13,00	5,30	6,90	4,87	7,75
68	523825	9604058	8,37	10,84	7,05	14,13	5,79	9,09	101	523434	9604445	12,40	4,55	5,31	7,77	5,40	7,48
69	523795	9604092	8,44	7,12	10,20	14,65	8,46	13,81	102	523405	9604479	12,70	13,00	5,20	6,90	5,80	9,40
70	523765	9604127	7,55	6,54	11,39	14,90	9,48	15,00	103	523376	9604513	13,80	13,90	5,80	7,69	6,48	9,47
71	523735	9604161	9,58	9,22	8,94	14,77	8,14	13,34	104	523347	9604548	12,60	14,20	6,30	7,20	4,63	7,80
72	523705	9604195	9,49	11,35	8,64	15,19	7,47	12,63	105	523895	9603836	3,10	3,04	4,40	7,70	5,42	7,62
73	523675	9604229	7,70	6,13	9,75	14,15	8,18	13,99	106	523866	9603870	3,37	2,11	4,31	6,84	5,19	6,69
74	523645	9604263	9,09	6,33	9,26	14,91	7,76	13,10	107	523837	9603905	2,30	3,94	3,45	6,34	4,10	6,56
75	523615	9604298	9,35	11,51	9,03	15,24	7,66	13,72	108	523808	9603939	2,93	4,41	3,93	6,99	4,85	7,00
76	523585	9604332	5,60	3,60	8,84	14,54	7,65	12,89	109	523779	9603973	3,80	4,24	5,19	9,10	5,92	9,34
77	523555	9604366	8,42	2,78	6,39	10,14	5,29	9,10	110	523750	9604007	4,75	5,77	7,19	12,25	6,80	11,36
78	523525	9604400	5,49	10,00	5,30	8,98	5,30	8,40	111	523721	9604042	4,62	7,56	7,13	12,60	6,10	11,40
79	523495	9604435	3,45	9,17	3,75	7,02	4,56	8,24	112	523692	9604076	5,50	7,10	7,44	12,84	7,03	11,85
80	523465	9604469	6,55	3,40	4,48	6,77	5,23	8,72	113	523663	9604110	7,93	10,50	7,66	13,70	7,05	12,50
81	523435	9604503	3,43	13,43	5,32	9,35	6,27	9,85	114	523635	9604145	11,40	10,17	8,10	13,77	7,19	12,37
82	523405	9604537	14,33	5,39	6,52	8,85	7,23	14,95	115	523606	9604179	10,77	11,94	10,69	12,83	8,04	12,93
83	523375	9604571	3,72	7,64	5,71	2,34	13,62	9,56	116	523577	9604213	8,29	6,54	11,68	12,51	9,81	15,11
84	523926	9603861	6,25	13,08	6,35	10,82	5,38	8,17	117	523548	9604247	11,04	11,02	9,25	12,05	7,19	12,02
85	523897	9603895	2,24	12,92	6,60	11,91	5,50	8,70	118	523519	9604282	8,70	7,68	11,29	14,70	9,42	15,18
86	523868	9603930	10,45	2,54	6,29	12,29	5,50	9,75	119	523490	9604316	10,54	9,92	8,70	15,08	6,15	12,30
87	523839	9603964	3,50	2,85	8,06	12,80	6,30	10,01	120	523461	9604350	8,47	6,66	7,80	14,15	6,16	10,70
88	523810	9603998	14,94	5,30	8,25	13,80	5,70	13,33	121	523432	9604384	9,25	9,85	6,82	13,80	6,76	10,35
89	523781	9604033	2,80	10,16	5,59	12,35	3,48	10,34	122	523403	9604419	5,52	11,69	6,20	12,60	4,80	8,30
90	523752	9604067	2,65	8,34	8,22	13,40	8,39	12,40	123	523374	9604453	8,57	12,51	7,56	13,40	5,40	8,37
91	523723	9604101	18,73	10,49	11,76	14,85	10,75	13,65	124	523345	9604487	13,09	13,39	8,30	14,60	2,89	7,70
92	523694	9604136	12,04	9,47	11,07	12,78	9,62	11,47	125	523316	9604522	14,04	13,10	8,00	15,20	3,10	8,36
93	523666	9604170	9,98	8,71	9,54	14,11	9,48	12,68	126	523865	9603809	7,14	14,90	8,50	14,30	5,40	11,66
94	523637	9604204	9,48	14,95	10,28	13,07	8,51	14,32	127	523836	9603844	8,87	11,89	7,58	13,82	6,15	13,28

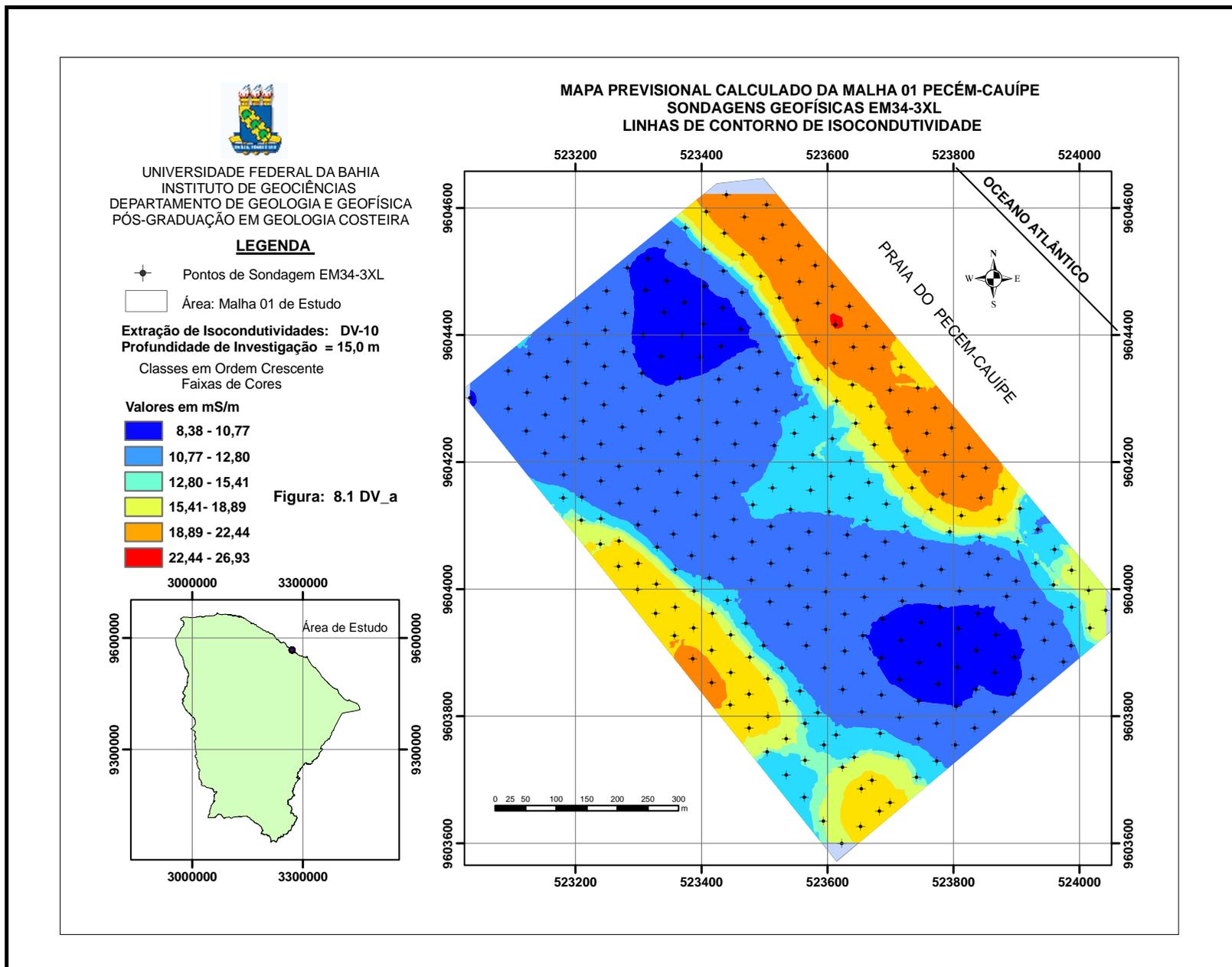
ESTAÇÃO	COORDENADAS UTM		DH40	DV40	DH20	DV20	DH10	DV10	ESTAÇÃO	COORDENADAS UTM		DH40	DV40	DH20	DV20	DH10	DV10
	X	Y								X	Y						
128	523807	9603879	6,12	13,01	8,32	10,22	5,03	11,66	161	523425	9604264	5,27	9,64	6,73	11,97	6,14	9,48
129	523778	9603914	5,67	10,57	8,40	14,28	7,83	11,28	162	523396	9604299	6,64	6,73	9,08	13,83	7,47	11,08
130	523749	9603949	3,32	8,66	6,00	11,96	3,29	5,50	163	523366	9604333	6,78	7,48	7,63	11,33	7,06	10,74
131	523719	9603983	8,01	9,00	6,18	13,15	1,32	9,11	164	523337	9604368	6,17	7,95	4,69	8,49	4,26	6,50
132	523690	9604018	8,98	9,60	10,29	14,31	5,90	11,00	165	523308	9604402	7,98	11,60	6,35	9,97	5,04	7,73
133	523661	9604053	8,10	7,39	12,08	15,85	10,00	13,61	166	523279	9604436	14,61	11,97	11,75	15,25	8,12	13,05
134	523632	9604088	12,01	6,32	12,63	13,71	12,05	13,68	167	523250	9604471	13,51	13,33	13,21	15,49	9,51	13,22
135	523603	9604123	10,11	5,35	11,68	13,76	9,63	14,12	168	523803	9603756	13,10	14,55	13,34	19,30	9,00	13,10
136	523574	9604158	8,45	9,96	9,55	12,48	8,36	11,01	169	523774	9603790	8,25	9,51	8,30	13,51	6,18	12,00
137	523545	9604193	8,21	6,46	10,31	14,22	7,10	14,29	170	523745	9603825	9,42	11,25	4,43	4,08	3,36	6,44
138	523516	9604228	8,38	13,50	8,21	13,11	7,78	12,12	171	523715	9603859	8,60	8,25	5,35	8,51	4,80	7,82
139	523487	9604263	5,12	9,49	7,89	13,26	7,25	12,07	172	523686	9603894	8,39	12,84	7,61	13,43	7,36	10,23
140	523457	9604297	6,47	5,82	8,22	13,43	7,75	12,13	173	523657	9603928	9,65	7,05	7,23	11,91	5,58	9,36
141	523428	9604332	6,21	7,16	5,31	9,34	4,48	8,88	174	523628	9603962	8,18	11,40	7,37	13,22	5,88	9,60
142	523399	9604367	5,27	4,97	5,14	8,40	5,65	8,26	175	523598	9603997	7,90	9,30	8,36	13,93	7,06	10,05
143	523370	9604402	4,59	5,17	4,80	6,51	5,08	7,64	176	523569	9604031	9,13	12,33	8,48	14,57	7,88	11,50
144	523341	9604437	2,86	3,92	4,33	7,55	5,16	7,58	177	523540	9604065	9,07	8,55	11,63	12,79	9,96	1,94
145	523312	9604472	3,20	3,14	5,88	5,76	6,25	7,62	178	523511	9604100	9,76	9,72	11,82	12,77	10,40	14,69
146	523283	9604507	3,26	4,50	5,45	8,24	6,18	7,70	179	523482	9604134	9,81	9,67	11,30	13,98	7,69	13,28
147	523834	9603783	2,37	3,83	4,11	6,06	4,87	7,40	180	523452	9604169	12,11	7,58	9,38	14,36	8,40	13,15
148	523805	9603817	1,65	4,41	3,91	7,20	4,15	7,16	181	523423	9604203	5,60	8,88	9,20	11,87	8,15	12,16
149	523776	9603852	1,12	7,34	3,17	7,08	3,33	5,96	182	523394	9604237	5,60	10,11	6,01	11,23	5,72	9,32
150	523746	9603886	2,80	8,13	4,40	8,12	4,40	6,76	183	523365	9604272	6,70	7,41	7,77	10,72	7,52	10,05
151	523717	9603921	4,30	7,22	6,05	9,89	5,28	8,83	184	523335	9604306	4,23	6,28	6,57	8,75	5,60	9,20
152	523688	9603955	5,04	9,17	6,18	11,12	5,45	9,10	185	523306	9604341	4,28	7,12	6,69	11,30	5,59	9,29
153	523659	9603989	6,06	6,38	7,85	11,47	6,90	10,64	186	523277	9604375	13,00	8,30	10,00	12,22	9,49	11,21
154	523629	9604024	6,25	12,63	8,31	13,31	7,19	10,92	187	523248	9604409	4,69	2,40	7,02	10,60	7,00	11,30
155	523600	9604058	6,30	6,51	8,01	12,83	7,15	11,62	188	523219	9604444	7,30	9,15	6,02	6,30	6,07	8,26
156	523571	9604092	8,31	8,03	10,22	13,87	8,28	11,84	189	523774	9603731	5,20	3,16	7,44	9,12	7,23	12,90
157	523542	9604127	10,26	8,76	12,07	15,20	9,15	14,60	190	523745	9603766	7,78	6,85	10,06	13,12	9,75	13,00
158	523513	9604161	8,32	11,05	10,29	15,12	8,67	13,68	191	523715	9603800	6,29	6,44	8,64	12,02	7,70	11,91
159	523483	9604196	7,36	11,56	8,26	14,12	6,54	9,58	192	523686	9603835	5,92	8,12	5,80	12,24	5,19	8,95
160	523454	9604230	8,58	10,26	8,25	14,01	4,69	10,43	193	523657	9603869	4,85	8,28	6,54	9,86	6,40	10,00

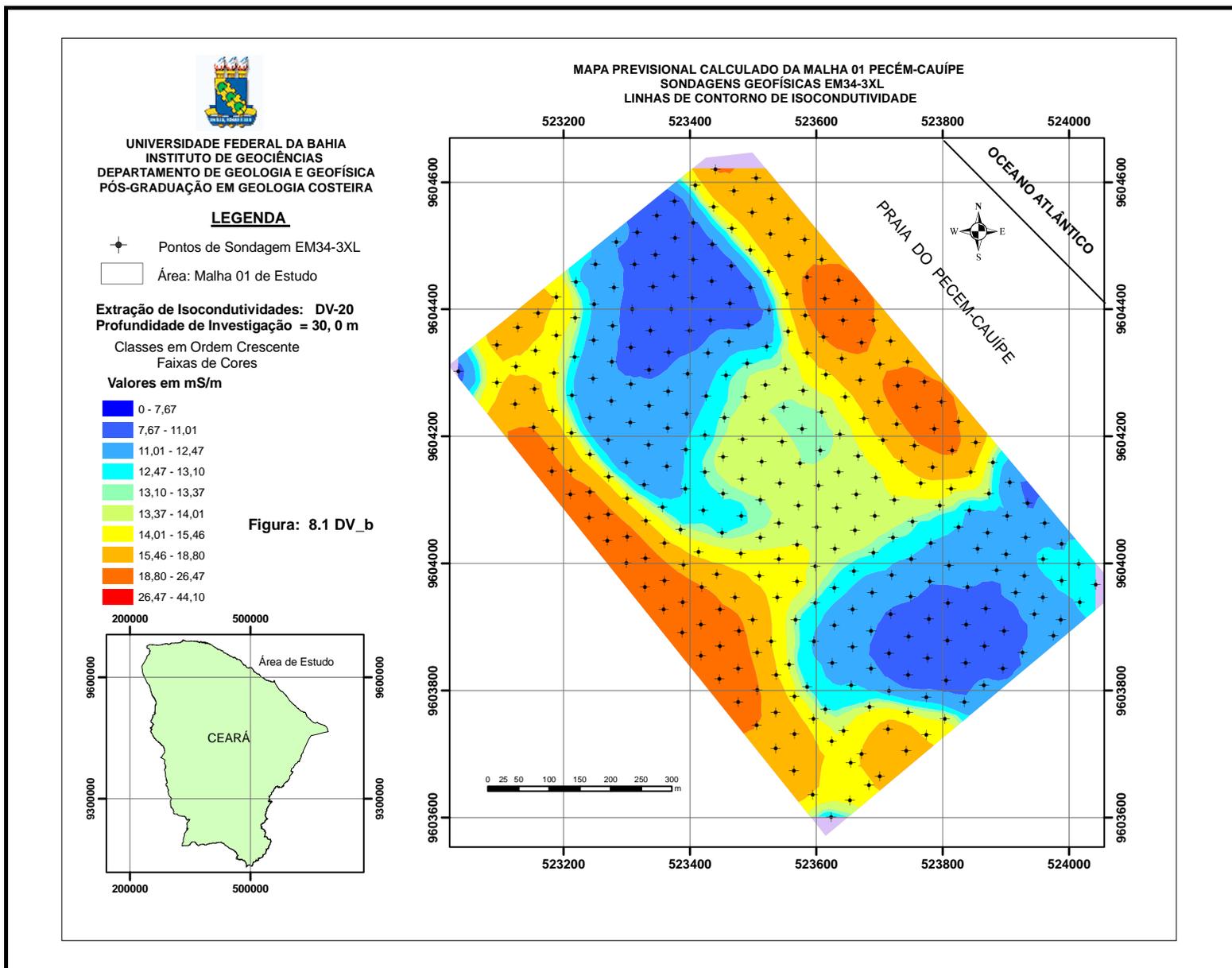
ESTAÇÃO	COORDENADAS UTM		DH40	DV40	DH20	DV20	DH10	DV10	ESTAÇÃO	COORDENADAS UTM		DH40	DV40	DH20	DV20	DH10	DV10
	X	Y								X	Y						
194	523628	9603904	4,87	7,62	5,96	11,30	6,55	10,27	227	523246	9604292	6,93	6,10	10,61	7,32	10,00	11,85
195	523598	9603938	7,59	7,18	7,52	13,12	6,23	10,19	228	523217	9604326	8,65	5,92	10,15	14,70	10,34	13,11
196	523569	9603973	8,51	10,51	8,18	17,77	8,83	13,40	229	523188	9604360	10,15	11,64	10,85	14,81	6,69	12,15
197	523540	9604007	12,20	10,70	13,44	15,07	10,03	13,07	230	523159	9604395	10,25	6,84	10,90	13,53	7,20	12,34
198	523511	9604042	11,31	8,58	13,54	13,65	13,03	12,27	231	523700	9603666	9,23	10,38	11,50	14,40	12,38	14,57
199	523481	9604076	9,32	8,02	10,90	11,62	7,20	14,25	232	523671	9603701	12,60	6,72	11,02	15,25	10,00	17,65
200	523452	9604111	8,93	13,31	7,84	12,88	6,58	11,34	233	523643	9603737	8,91	9,84	10,33	12,25	1,36	11,48
201	523423	9604145	7,10	12,32	9,61	13,69	9,27	12,33	234	523614	9603772	7,35	8,81	8,12	11,19	5,36	12,08
202	523393	9604180	8,11	12,80	7,73	13,04	5,94	10,84	235	523585	9603807	3,12	8,86	8,47	11,48	5,32	11,96
203	523364	9604214	8,73	10,86	11,14	12,17	8,38	14,96	236	523557	9603842	8,86	5,95	9,44	12,56	5,12	12,68
204	523335	9604249	9,66	9,48	7,99	13,58	7,45	10,46	237	523528	9603878	7,77	4,51	12,18	14,41	10,45	13,41
205	523306	9604283	8,38	7,61	8,12	12,12	7,22	11,40	238	523499	9603913	7,28	11,26	12,28	21,70	7,72	11,48
206	523276	9604318	10,82	10,22	7,17	11,50	6,08	8,68	239	523471	9603948	4,65	11,59	12,00	17,00	11,28	11,71
207	523247	9604352	7,26	12,62	7,03	9,51	5,15	8,23	240	523442	9603984	6,40	11,89	12,60	18,65	10,24	13,98
208	523218	9604387	19,18	13,75	10,71	15,70	6,59	11,24	241	523413	9604019	9,22	10,11	1,71	14,04	9,33	12,11
209	523188	9604421	17,12	10,95	13,48	20,70	8,30	11,24	242	523385	9604054	9,39	9,88	7,67	10,64	5,40	6,53
210	523742	9603706	8,00	7,09	11,31	26,90	9,00	12,10	243	523356	9604089	6,44	9,66	5,26	11,76	4,72	8,27
211	523713	9603740	7,35	10,50	12,80	22,20	7,10	13,40	244	523327	9604125	10,27	12,09	7,21	9,94	6,50	9,63
212	523684	9603775	4,50	13,84	12,15	13,15	17,40	15,45	245	523299	9604160	6,98	11,68	6,62	9,45	5,08	8,57
213	523655	9603809	8,40	11,94	9,44	13,95	8,58	12,12	246	523270	9604195	10,39	11,33	8,33	10,87	6,35	11,22
214	523625	9603844	9,13	10,63	11,20	13,73	10,18	13,70	247	523241	9604230	8,99	11,23	7,19	10,94	6,17	8,98
215	523596	9603878	7,89	5,08	9,13	12,64	4,00	8,99	248	523213	9604266	6,96	15,49	7,71	10,03	4,90	6,78
216	523567	9603913	8,73	11,70	6,53	9,89	4,35	8,99	249	523184	9604301	8,92	10,07	10,32	18,15	5,03	10,13
217	523538	9603947	9,47	8,70	8,45	12,91	4,65	11,46	250	523155	9604336	9,50	14,13	9,30	10,20	6,00	8,35
218	523509	9603982	9,48	11,36	7,27	13,20	5,87	9,53	251	523127	9604372	8,12	15,09	18,00	23,00	12,00	15,70
219	523480	9604016	5,81	13,68	7,19	13,28	4,14	11,58	252	523683	9603652	9,23	10,38	11,50	14,40	12,38	14,57
220	523450	9604050	13,34	10,84	10,41	10,81	7,82	13,57	253	523654	9603687	12,60	6,72	11,02	15,25	10,00	17,65
221	523421	9604085	9,76	13,33	11,06	14,49	9,93	13,44	254	523624	9603721	8,91	9,84	10,33	12,25	1,36	11,48
222	523392	9604119	11,31	5,45	11,33	13,40	8,26	10,98	255	523595	9603756	7,35	8,81	8,12	11,19	5,36	12,08
223	523363	9604154	7,51	7,26	12,53	11,02	9,58	12,07	256	523565	9603791	3,12	8,86	8,47	11,48	5,32	11,96
224	523334	9604188	11,00	7,50	9,40	12,73	9,00	10,10	257	523536	9603825	8,86	5,95	9,44	12,56	5,12	12,68
225	523305	9604223	12,00	9,32	8,42	10,75	8,50	10,92	258	523506	9603860	7,77	4,51	12,18	14,41	10,45	13,41
226	523275	9604257	6,15	10,18	8,90	12,13	8,27	13,10	259	523477	9603895	7,28	11,26	12,28	21,70	7,72	11,48

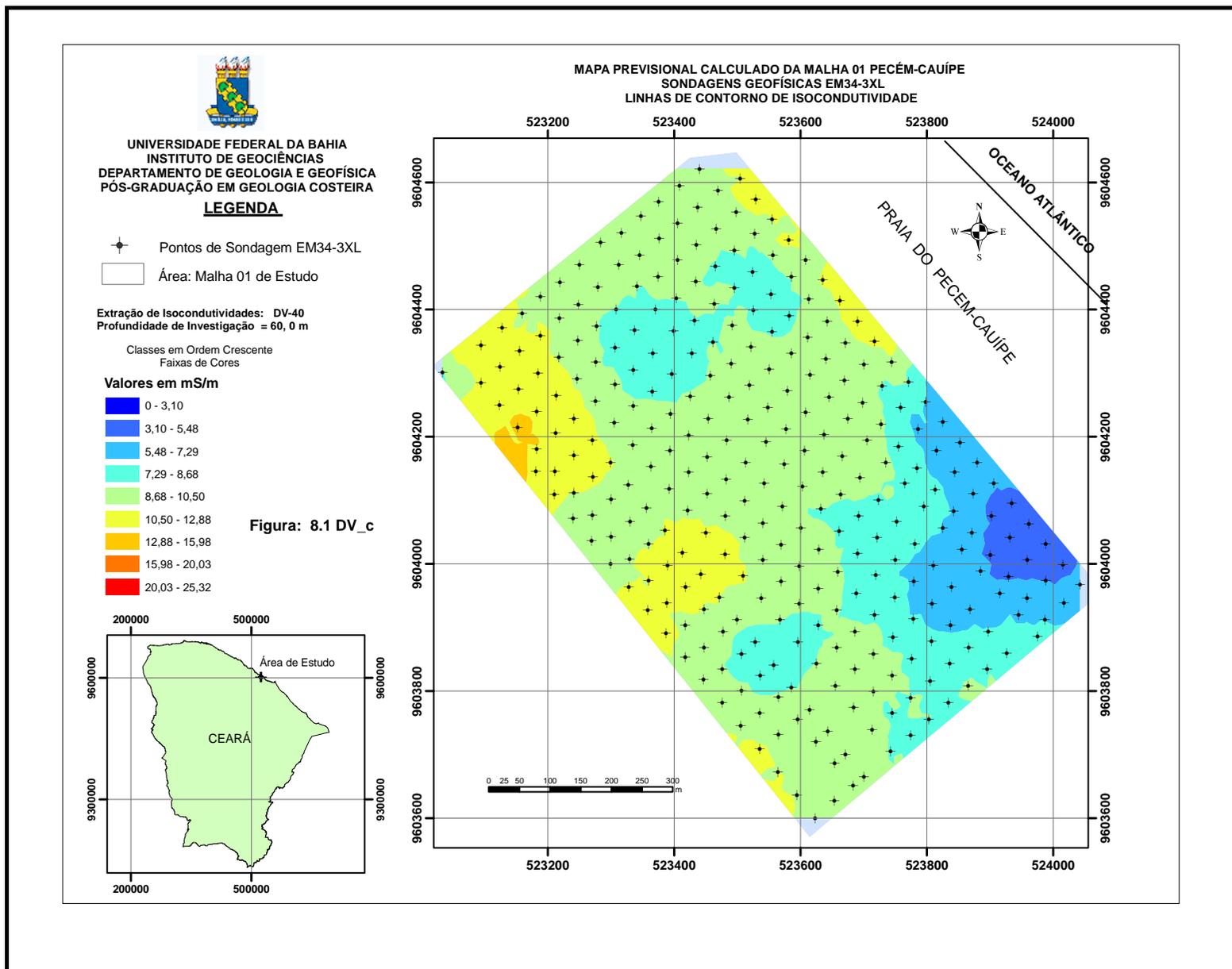












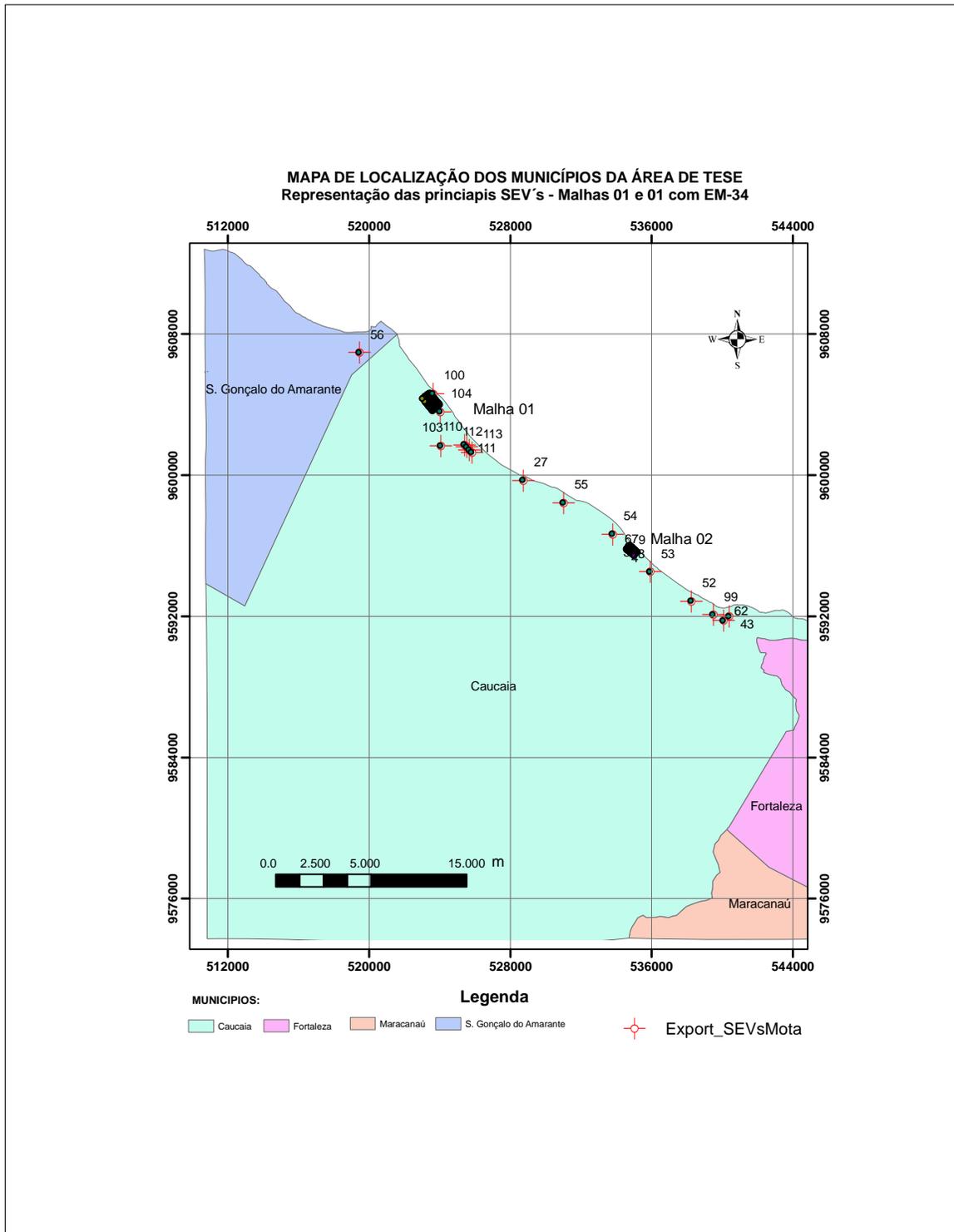


Figura 8.12 - Mapa mostrando localização das SEVs e suas proximidades com as malhas de levantamento geofísico, através do método eletromagnético EM-34, parametrizando as profundidades das camadas litológicas e superfícies de investigação no subsolo.

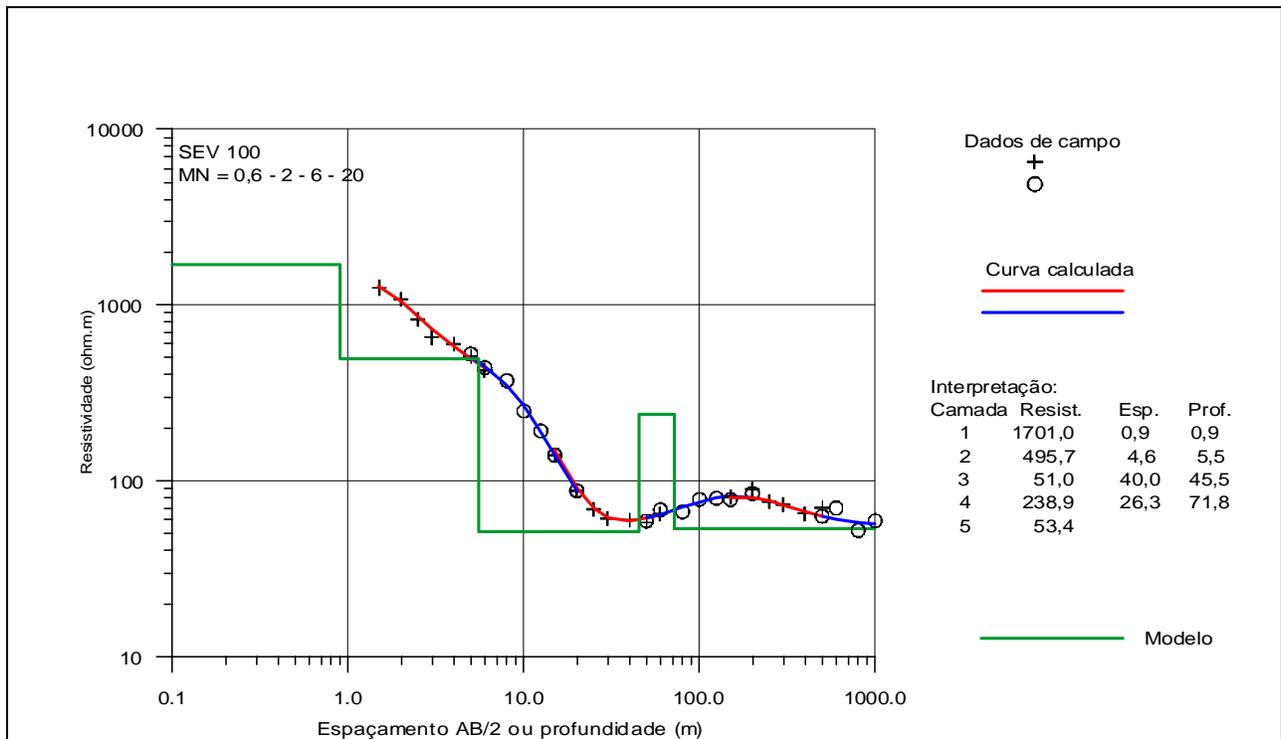


Figura 8.13 – SEV 100 próxima à Malha 01 perdurando um comportamento resistivo a 40m de profundidade e obedecendo a faixa sem aumento da resistividade.

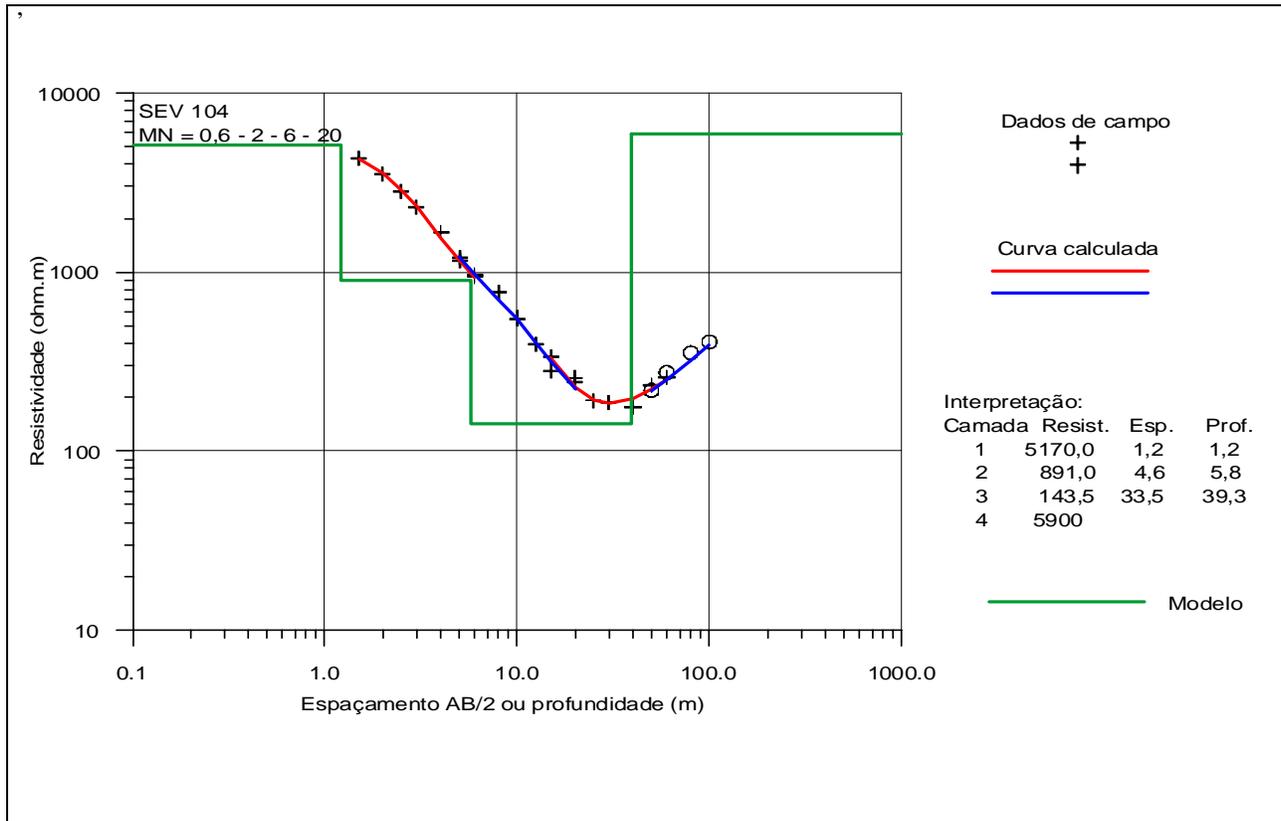


Figura 8.14 – SEV 104 indicando uma curva de comportamento normal na região, com subida dos valores resistivos após alcançar a camada 4.

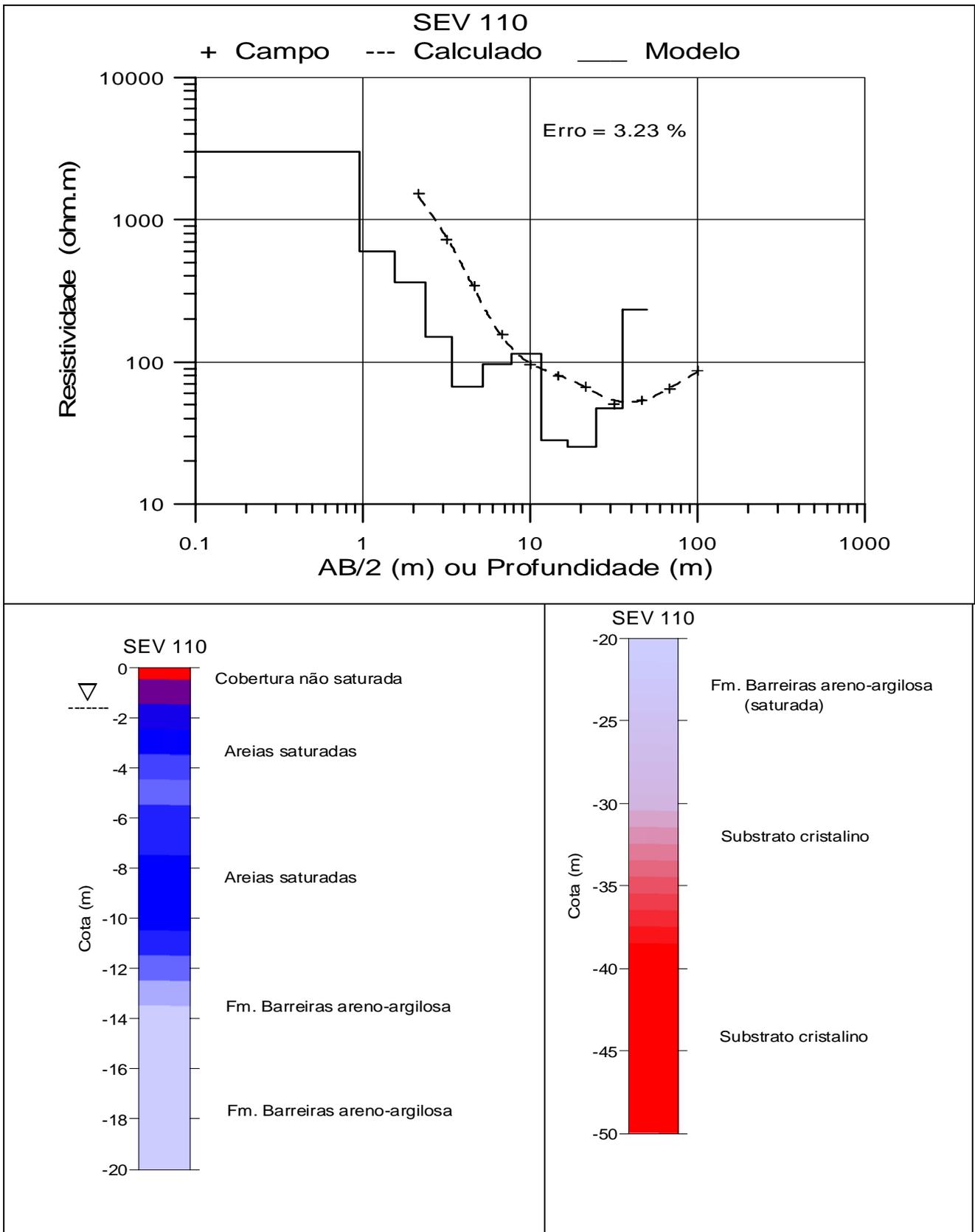


Figura 8.15 – SEV 110, mostra a curva de resistividade obtida e o perfil litológico interpretado. Recolhido e modificado de Marinho et al (2002).

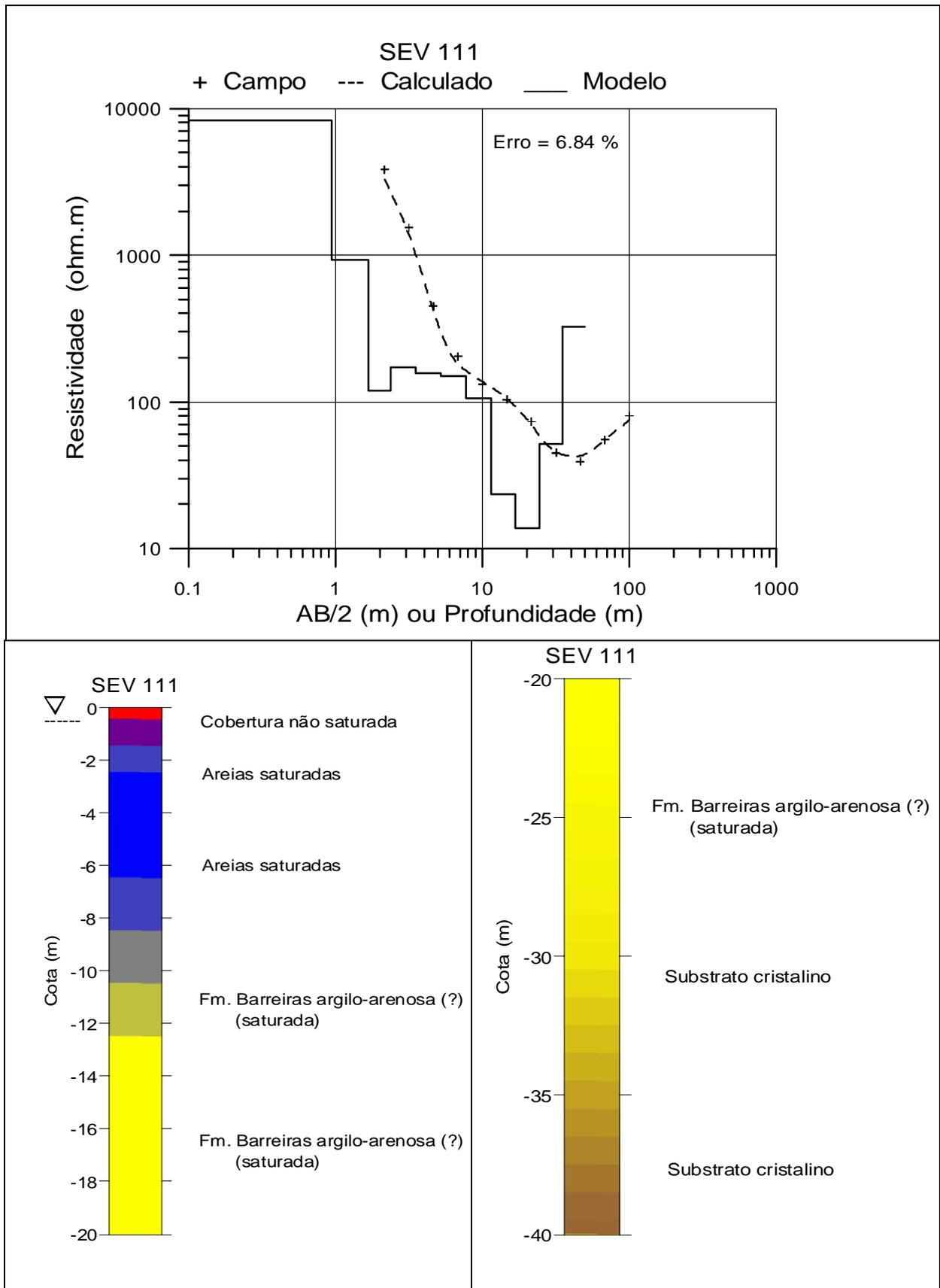


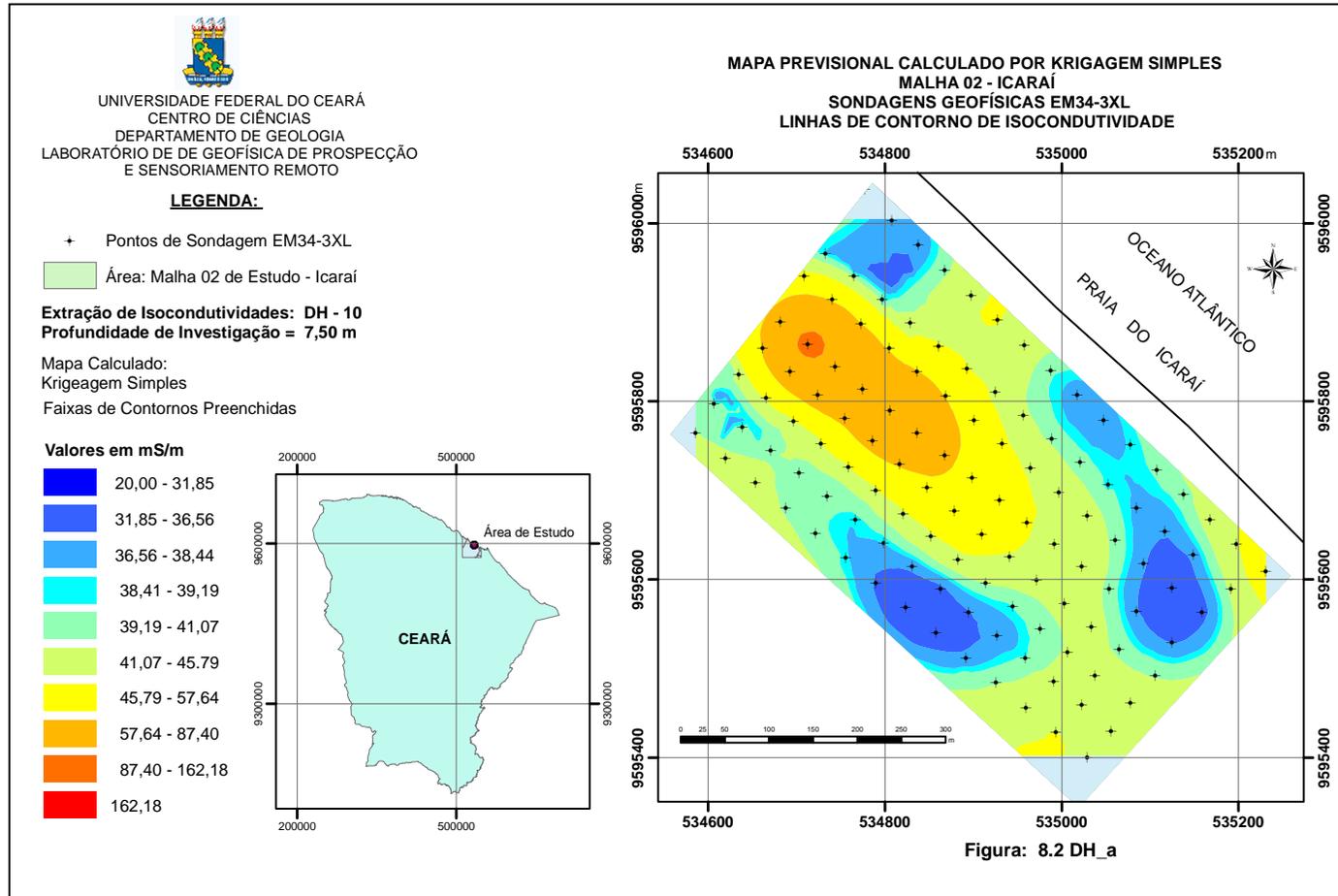
Figura 8.16 SEV 111, mostrando interpretações análogas com zonas saturadas, parte argilosas da Formação Barreiras saturada e substrato cristalino a 30 m de profundidade (Marinho et al, 2002)

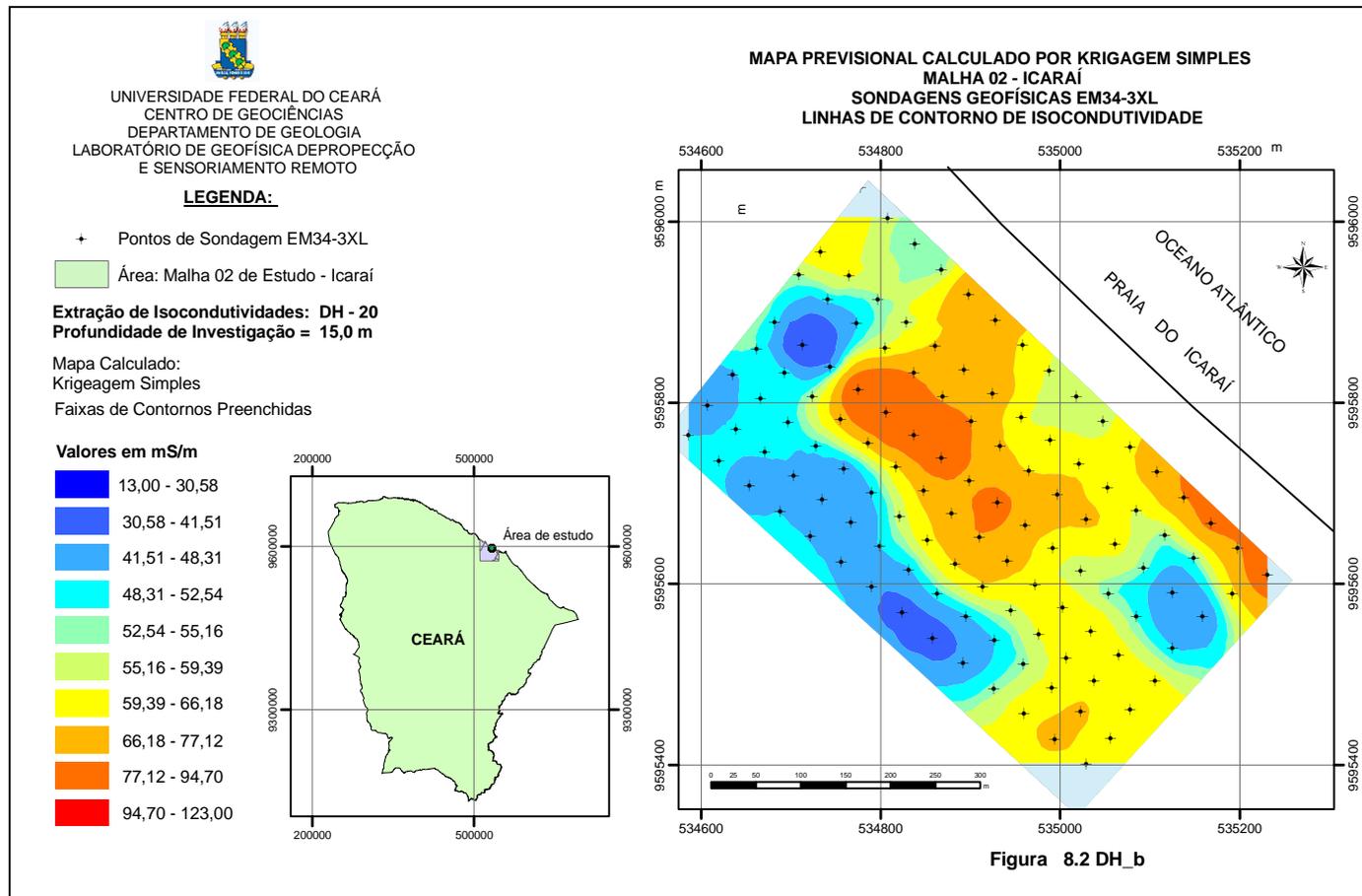
Tabela 8.2 - Medidas de Sondagens Eletromagnéticas no Município de Caucaia - Ce. Malha 02 (Litoral de Icaraí)

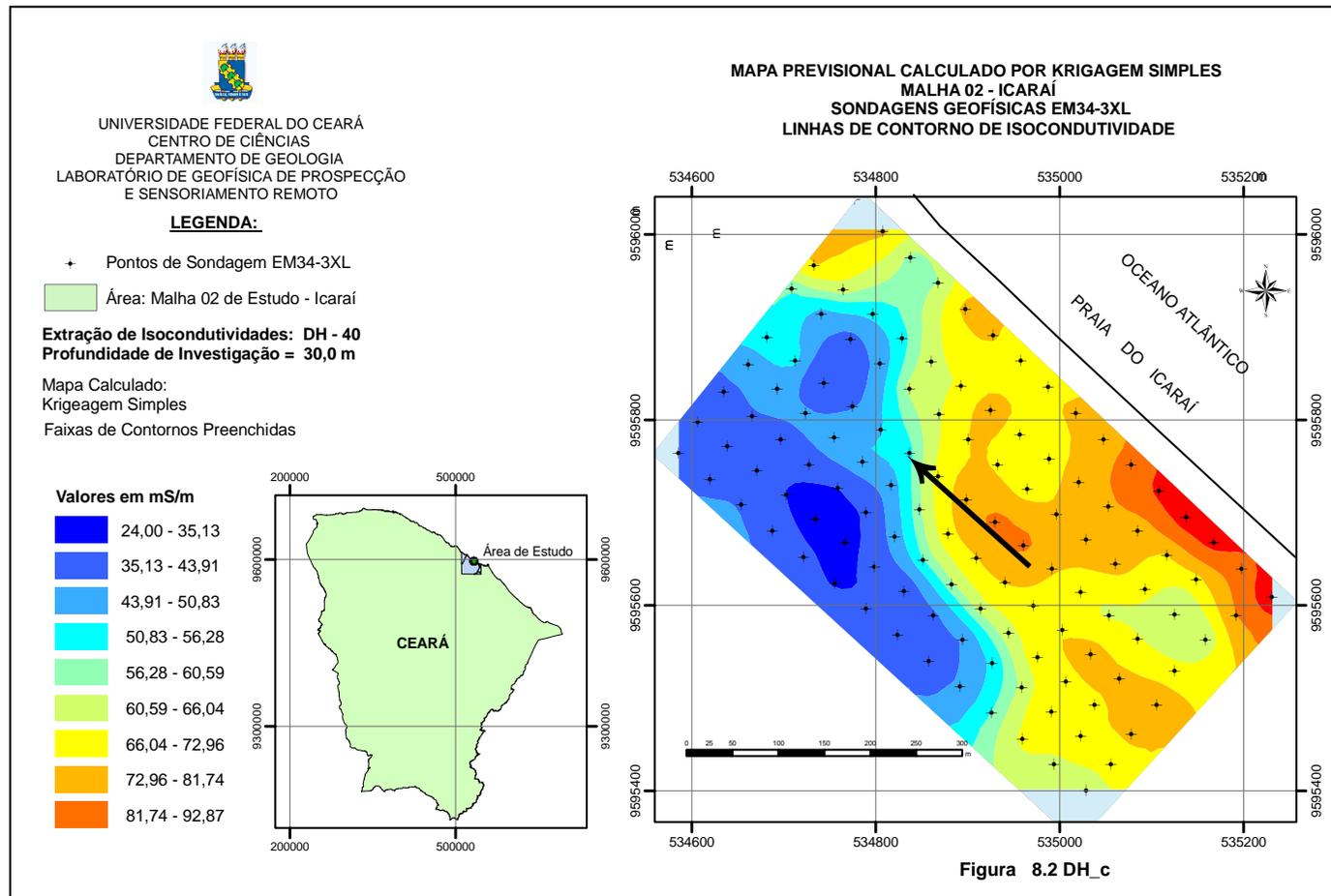
ESTAÇÃO	COORDENADAS UTM		DH40	DV40	DH20	DV20	DH10	DV10
	X	Y						
0	534808	9596005	78	61	57	78	24	38
1	534838	9595977	56	42	50	55	26	37
2	534868	9595949	58	44	46	56	31	48
3	534898	9595921	79	40	87	85	55	75
4	534928	9595893	77	41	77	46	52	47
5	534958	9595865	60	32	63	56	42	57
6	534988	9595837	73	66	59	75	31	47
7	535018	9595809	75	43	55	64	28	45
8	535048	9595781	74	69	55	56	27	37
9	535078	9595753	87	73	67	57	35	50
10	535108	9595725	98	87	77	77	40	52
11	535138	9595697	105	58	82	86	38	58
12	535168	9595669	104	55	94	64	48	59
13	535198	9595641	83	97	73	74	48	59
14	535231	9595611	107	54	100	104	71	131
15	534733	9595968	78	24	66	65	33	50
16	534765	9595942	66	54	62	54	34	51
17	534797	9595916	53	25	56	56	37	58
18	534829	9595890	54	29	60	62	39	64
19	534861	9595864	64	39	68	82	43	59
20	534893	9595838	64	52	59	72	37	64
21	534925	9595812	81	27	83	68	48	67
22	534957	9595786	68	37	55	54	37	50
23	534989	9595760	69	73	64	71	40	53
24	535021	9595734	78	46	65	66	38	50
25	535053	9595708	80	65	58	67	31	43
26	535085	9595682	72	72	53	64	29	40
27	535117	9595656	69	54	48	63	28	34
28	535149	9595630	68	64	48	61	28	38
29	535192	9595591	84	45	66	47	38	58
30	534709	9595943	54	56	53	69	30	41
31	534741	9595916	46	21	53	64	32	57
32	534773	9595889	40	28	47	46	32	51
33	534805	9595862	46	29	51	48	42	45
34	534837	9595835	66	35	76	55	53	57
35	534869	9595808	65	32	68	59	51	67
36	534901	9595781	74	36	79	57	50	65
37	534933	9595754	71	59	65	87	43	61
38	534965	9595727	64	57	62	58	43	63
39	534997	9595700	73	50	72	55	48	57
40	535029	9595673	83	53	74	63	46	65
41	535061	9595646	80	58	71	59	43	59
42	535093	9595619	71	50	58	54	36	51
43	535125	9595592	56	44	41	42	25	37
44	535159	9595565	57	92	35	61	20	31
45	534682	9595891	57	11	53	52	32	72
46	534713	9595866	58	40	13	26	350	39
47	534744	9595841	24	9	30	74	75	146
48	534775	9595816	42	33	123	135	119	133
49	534806	9595791	49	31	100	140	144	253
50	534837	9595766	53	12	104	121	109	166
51	534868	9595741	70	20	92	93	87	72
52	534899	9595716	79	41	71	58	46	57
53	534930	9595691	88	29	90	69	61	74
54	534961	9595666	87	57	70	75	44	70
55	534992	9595641	74	47	59	74	33	62
56	535023	9595616	61	85	49	61	61	45
57	535054	9595591	62	63	48	59	30	41
58	535085	9595566	66	50	52	62	28	42
59	535125	9595531	68	58	47	58	26	40
60	534662	9595861	45	20	55	51	41	59
61	534693	9595835	49	14	58	62	45	63

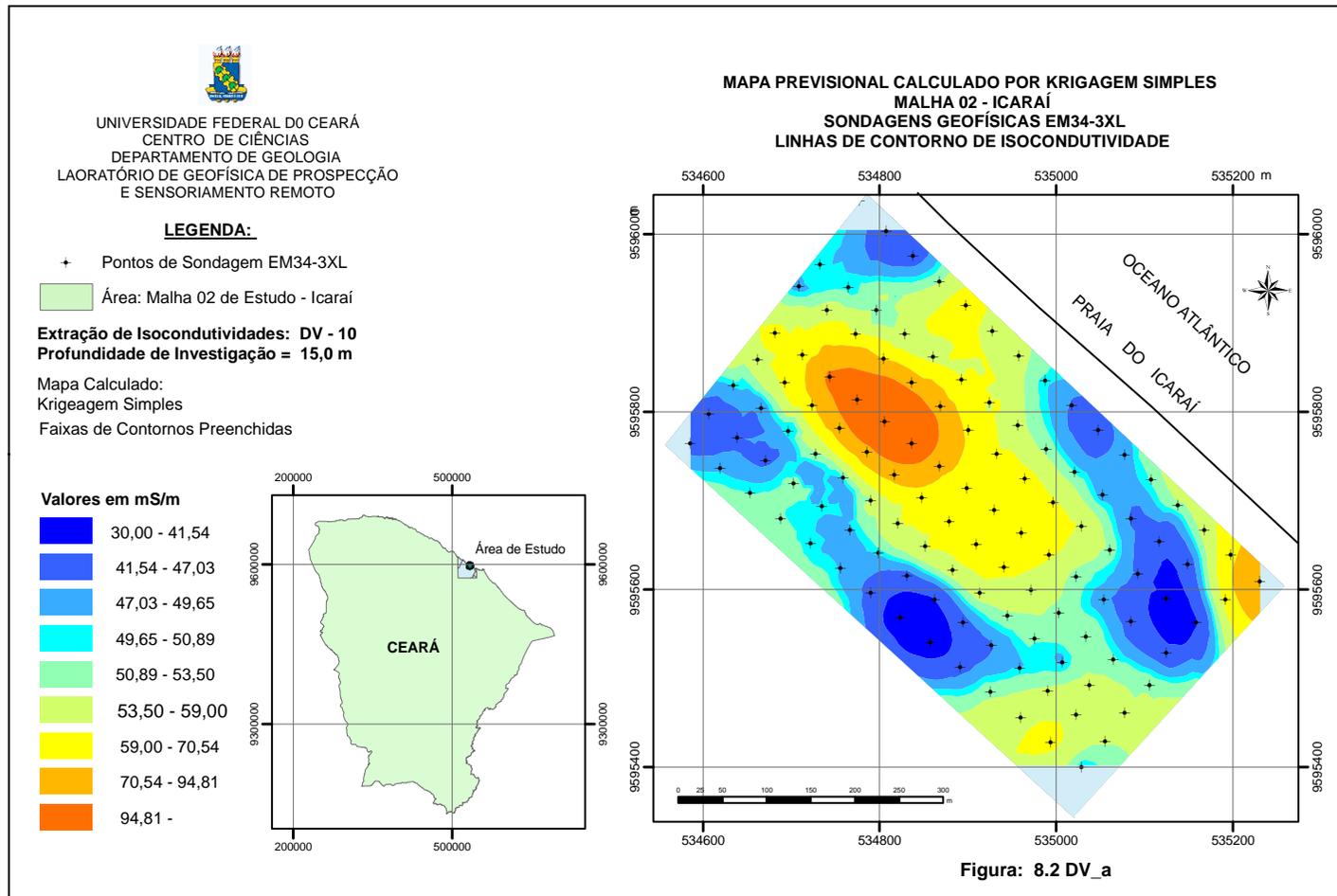
Tabela 8.2 - Medidas de Sondagens Eletromagnéticas no Município de Caucaia - Ce. Malha 02 (Litoral de Icarai). (cont.)

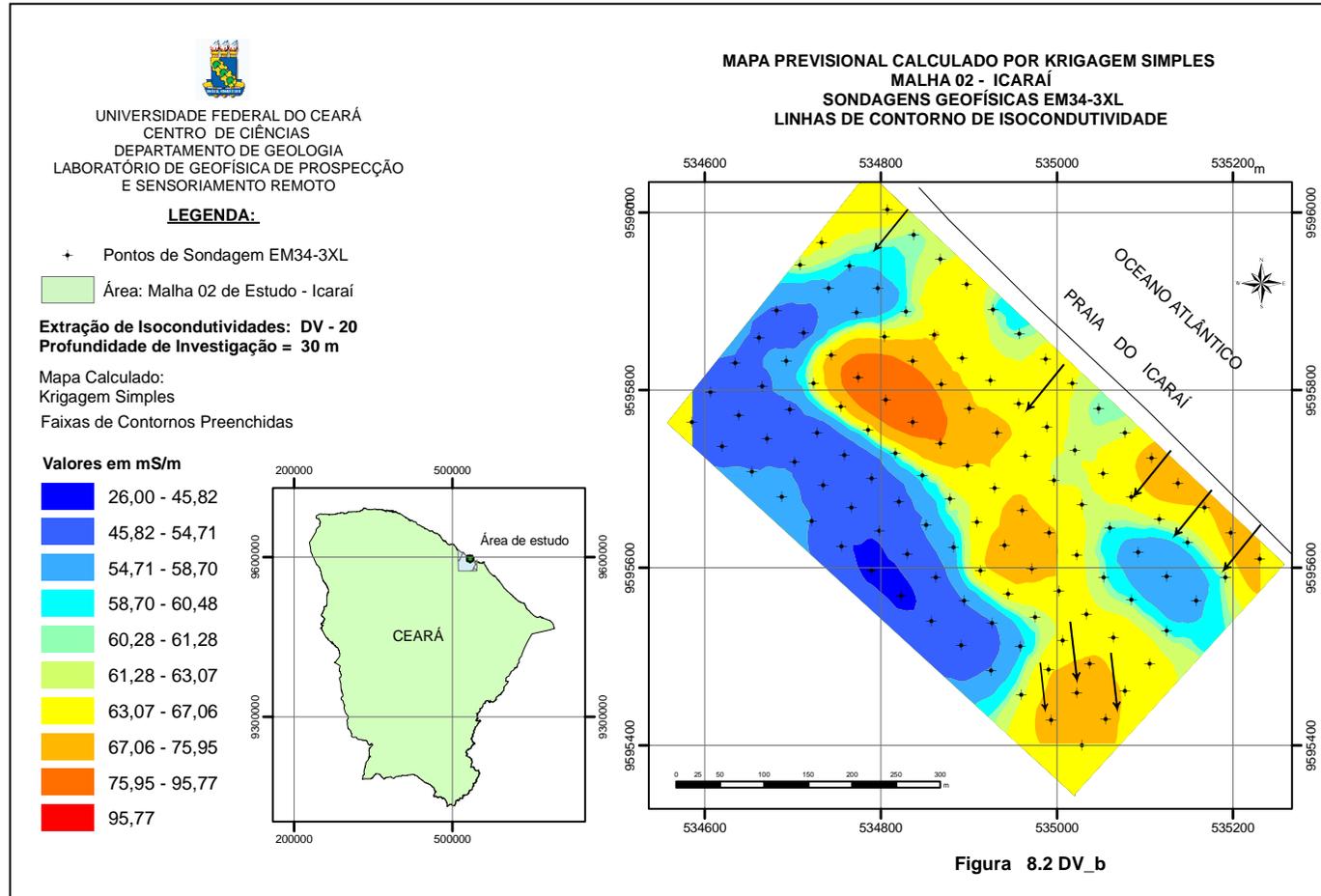
ESTAÇÃO	COORDENADAS UTM		DH40	DV40	DH20	DV20	DH10	DV10
	X	Y						
62	534724	9595809	47	40	55	63	45	55
63	534755	9595783	55	22	69	51	53	62
64	534786	9595757	54	16	66	34	62	56
65	534817	9595731	47	11	60	41	53	64
66	534848	9595705	60	45	69	51	54	64
67	534879	9595679	71	37	72	67	53	59
68	534910	9595653	72	44	79	65	56	61
69	534941	9595627	74	58	70	69	50	58
70	534972	9595601	69	48	65	72	39	57
71	535003	9595575	74	51	68	73	44	54
72	535034	9595549	79	52	71	61	51	63
73	535065	9595523	75	53	63	74	40	50
74	535106	9595494	80	64	63	67	41	54
75	534635	9595832	42	38	44	52	32	46
76	534666	9595806	44	23	50	59	34	46
77	534697	9595780	41	30	49	52	39	49
78	534728	9595754	38	15	50	40	43	57
79	534759	9595728	33	39	39	55	33	45
80	534790	9595702	35	20	49	52	44	57
81	534821	9595676	48	27	58	55	46	62
82	534852	9595650	59	33	66	59	53	67
83	534883	9595624	62	43	69	44	57	61
84	534914	9595598	66	41	69	85	40	62
85	534945	9595572	65	53	56	69	33	53
86	534976	9595546	72	51	61	60	36	53
87	535007	9595520	69	73	58	59	38	39
88	535038	9595494	70	41	63	68	42	55
89	535078	9595463	76	33	67	66	45	53
90	534607	9595799	37	27	41	51	31	41
91	534639	9595773	41	33	50	36	37	51
92	534671	9595747	37	18	52	53	42	36
93	534703	9595721	34	15	48	57	38	57
94	534735	9595695	30	27	42	45	36	49
95	534767	9595669	31	27	36	46	29	45
96	534799	9595643	39	15	50	36	32	48
97	534831	9595617	33	34	44	55	29	41
98	534863	9595591	41	43	53	52	20	34
99	534895	9595565	42	30	46	56	36	47
100	534927	9595539	51	35	47	44	35	42
101	534959	9595513	60	62	52	54	32	48
102	534991	9595487	76	55	62	78	39	55
103	535023	9595461	71	51	69	70	44	60
104	535056	9595431	68	51	59	71	36	55
105	534586	9595766	37	18	46	37	38	37
106	534620	9595738	43	19	54	53	42	51
107	534654	9595710	45	24	34	53	40	51
108	534688	9595682	41	12	49	54	37	49
109	534722	9595654	38	41	48	60	39	49
110	534756	9595626	33	22	45	38	37	49
111	534790	9595598	37	22	41	34	31	46
112	534824	9595570	40	37	35	33	20	31
113	534858	9595542	40	47	33	33	24	30
114	534892	9595514	44	39	41	44	29	43
115	534926	9595486	56	53	54	54	40	55
116	534960	9595458	69	48	64	56	49	53
117	534994	9595430	63	40	70	79	51	71
118	535029	9595402	63	66	63	77	48	39

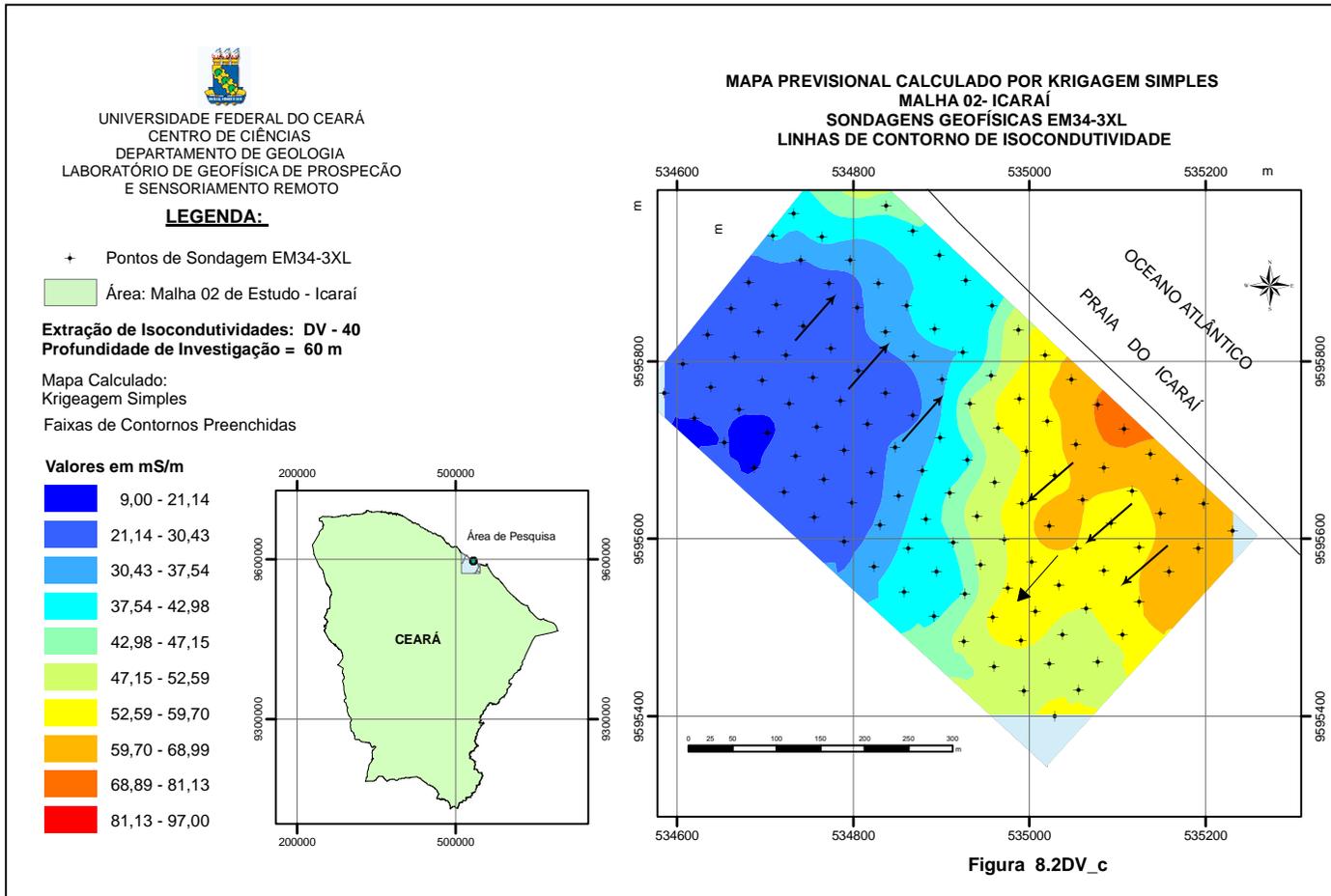












8.3 Discussão dos Resultados das Malhas 02 e 01.

As SEVs efetuadas por Marinho *et al.* (2003) determinaram em média 4 camadas para região litorânea da área, as quais foram parcialmente verificadas através de perfis litológicos de poços tubulares perfurados nas regiões litorâneas do Porto do Pecém, Cumbuco, Tabuba e Praia do Icaraí, o que permitiu *a priori* inferir alguns dados e colocá-los como ponto referenciais para interpretação e parametrização dos dados obtidos pelos perfis eletromagnéticos e malhas executadas na região costeira abordada.

O resultado da prospecção está representado por mapas previsionais de condutividade aparente com interpolações por krigagem simples, vistos nas figuras 8.1DH_a, 8.1DH_b, 8.1DH_c, 8.1DV_a, 8.1DV_b e 8.1DV_c, estabelecidas na Malha 01-Pecém_Cauípe e 8.2DH_a, 8.2DH_b, 8.2DH_c, 8.2DV_a, 8.2DV_b e 8.2DV_c. na Malha 02-Icaraí e nas diferentes profundidades estimadas pertinentes a cada método escolhido.

Fazendo ainda parte do contexto, foram interpolados através de gráficos de dispersão no programa Microsoft Excel 2003 os perfis PERFIL-1/NW e PERFIL-2/NW (figuras 8.5 e 8.6). Foram determinados levando-se em conta a correspondência das posições da bobina transmissora e os valores obtidos a cada profundidade convencional (7,5 metros, 15 m, 30 m e 60 m).

À maior profundidade (mapa da figura 8.2DV_c) se reconhece um corpo resistivo que corresponde talvez ao topo do embasamento e pelas análises observadas em perfis geológicos e em paredões de cacimbas (poços amazonas) na área, são rochas paragnáissicas do Complexo Gnáissico Migmatítico do Embasamento com profundidades variáveis superiores a 40, 30, 15 e 7,5 m de profundidade. A intrusão salina em correspondência na área é conspícua ao nível variável do topo do embasamento e da localização litológica da espessura saturada e ocorrem também nas fissuras do cristalino na exploração da água subterrânea de diferentes poços na zona costeira. Como a malha está vizinha à Lagoa da Tabuba, a condutividade sob a lagoa tende a diminuir, sinal da presença de níveis argilosos que impedem a água salgada de penetrar numa maior profundidade ou abranger uma área maior. A anomalia condutiva tende a se deslocar até o noroeste. Na profundidade maior, todos os fenômenos descritos tendem a diminuir. Nas figuras citadas, os máximos de condutividade aparente, todavia, têm maior intensidade e amplitude nas zonas das superquadras populacionais, onde se concentram grandes captações de água dos sistemas Dunas /Paleodunas e Barreiras.

Para analisar a direção de onde provém a intrusão salina tem-se que traçar também, no futuro, mapas com análise do aumento da condutividade, que podem ser identificados simplesmente a partir das diferenças entre os valores medidos em épocas diferentes com a configuração de bobinas recomendadas. Nas figuras citadas se observa que o incremento de condutividade se desenvolve na direção NW e se divide em duas plumas e que isto é devido a uma sobre-exploração da água subterrânea na área da Malha 02.

Considera-se preocupante o acelerado aumento de condutividade até o noroeste, provavelmente, por causa do bombeamento para abastecimento de água potável nas residências particulares e da prefeitura de Caucaia. As condutividades medidas nos poços demonstram uma salinidade crescente da água subterrânea nesta zona litorânea.

Levantamentos eletromagnéticos, EM-34, pertinentes às Malhas 01 e 02 correspondem a 311 e 119 pontos (ou estações) de medidas em cada malha com 1.988 e 1.114 leituras com a utilização de dipolos horizontais e verticais, respectivamente. Essas medidas foram levantadas através de arranjos com dipolo horizontal e dipolo vertical com espaçamentos de 40 metros entre as estações, perfazendo as dimensões de 800 m x 600 m na Malha 01 e 600 m x 400 m na Malha 02 e não foram observadas leituras fora do contexto regional.

Para comprovação das medidas de semi-detalle de EM-31 e EM-34 na região de Caucaia, foram interpretados, inicialmente, os dados da malha 02 por estarem inseridos no contexto das informações reinterpretadas. Seguindo-se a observação dos dados nessa malha, os mesmos foram processados e interpolados também por krigagem simples, onde seus mapas previsionais de isocondutividade calculados a cada profundidade investigada segundo a metodologia, através da análise geoestatística (vizinho mais próximo) do Software ESRI® ArcMapa™ 9.1, os quais poderão ser observados nas figuras correspondentes, 8.2 DH_a, 8.2 DH_b, 8.2 DH_c, 8.2 DV_a, 8.2 DV_b e 8.2 DV_c, indicaram similaridade com as medidas levantadas por Vieira,(2002). As projeções dos pontos da malha estão na foto 8.2.

Análises dos dados obtidos através da malha de pontos de leitura, realizada por levantamento eletromagnético com EM-34, na região litorânea de Icaraí, município de Caucaia-Ce, foi a primeira a ser analisada para ser confrontada com o levantamento de semi-detalle:

Malha 02

- **[EM-34]. [DH - 10 /7, 50m de profundidade de investigação]**

Mapa previsional exposto na figura 8.2 DH_a

Área: 600m x 400m – Icaraí

Nesta superfície de interpolação, a distribuição dos valores inseridos na faixa entre 20,00 e 32,85 mS/m corresponde aos valores tidos com os mais resistivos, em função da presença de dunas e paleodunas na área. As faixas de valores compreendidas desde 31,85 até o valor de 87,40 mS/m obedecem a intervalos irregulares, porém com um aumento progressivo nos valores de condutividade aparente, abrangendo uma grande superfície de salinização na área da malha e com valores mais concentrados no limite superior próximo à linha de costa da região de Icaraí-Cumbuco e indica uma maior penetração da cunha salina nessa profundidade.

- **[EM-34]. [DH - 20 /15,00m de profundidade de investigação]**

Mapa previsional exposto na figura 8.2 DH_b

Área: 600m x 400m – Icaraí

Concerne a um mapa previsional semelhante, calculado na profundidade de 15,00m, com uma superfície de distribuição contendo valores de baixos a moderados na faixa de 13,00 a 30,58 mS/m , o que indica um aquífero livre ainda de contaminação salina. Contudo, o aumento progressivo nos valores de condutividade aparente gera faixas mais altas de salinização, que estão compreendidas entre os valores 48,31 e 66,18 mS/m e chegam a valores bem superiores (162,18 mS/m) na parte central da área, onde se concentra a maior salinidade do aquífero e crescem anisotropicamente até à linha de costa. Neste aspecto, observa-se uma situação análoga à profundidade de 15,00m verificada na superfície gerada com as medidas com DV-10.

- **[EM-34]. [DH - 40 /30,00m de profundidade de investigação]**

Mapa previsional exposto na figura 8.2 DH_c

Área: 600m x 400m – Icaraí

Esta superfície apresenta um aumento dos valores resistivos, em relação aos da análise anterior. Entretanto, apresenta um aumento progressivo nos valores de condutividade no início da parte sudeste, abrangendo uma área de salinidade que divide a malha, diagonalmente, em duas áreas: uma mais resistiva e outra menos resistiva. A faixa compreendida entre os valores de 60,59 a 66,04 mS/m apresenta superfícies insipientes de salinização, enquanto que as faixas entre valores mais altos contribuem para formação de uma superfície maior de salinização em direção da malha em direção à linha de costa. Depreende-se desses fatos, uma lateralidade mais acentuada nas superfícies relativas à salinização da porção aquífera da área e uma movimentação para noroeste condicionada por um corpo resistivo, devido à variação lateral de fácies da Formação Barreiras.

- **[EM-34]. [DV - 10 /15,00m de profundidade de investigação]**

Mapa previsional exposto na figura 8.2 DV_a

Área: 600m x 400m – Icaraí

A exemplo da superfície gerada pela interpolação dos dados de isocondutividade nas leituras anteriores com dipolo DH-20, essa superfície gerada com dipolo vertical DV-10m na mesma profundidade de investigação, guarda grande semelhança na sua área de abrangência e nas faixas de valores de condutividade aparente, com faixas de valores simultâneos de 59,00 a 79,54 mS/m e 77,12 a 94, m/Sm. As superfícies com valores mais resistivos situam-se nos limites nordeste e sudoeste na área da malha.

- **[EM-34]. [DV - 20 /30,00m de profundidade de investigação]**

Mapa previsional exposto na figura 8.2 DV_b

Área: 600m x 400m – Icaraí

Nesta distribuição, a 30 metros de profundidade de investigação, observa-se um aumento da quantidade de valores relativos à salinização e de valores pertinentes às camadas mais resistivas. O caráter diagonal verificado, anteriormente, com as leituras em DH-40 se apresenta de maneira menos incisiva na área da malha nessa superfície de investigação, entretanto ainda delinea superfícies opostas de baixas e altas condutividades aparentes. Este fenômeno pode ser atribuído à variação lateral e vertical

de fácies da Formação Barreiras ou a alguma camada impermeável separando armazenamentos diferentes de águas salinas. Nesse contexto, pressupõe-se também a presença de dunas e paleodunas que permitam a circulação de fluidos salinos de modo heterogêneo.

À título de análise, pode-se dizer que os valores iniciais vão da faixa de 26,00 a 45,85 mS/m, progressivamente, até aos valores da faixa entre 58,70 a 60,48 mS/m, guardam a mesma semelhança nos valores e na forma da superfície de interpolada. Os valores que vão desse ponto até aos valores situados entre a faixa de 95,77 a 140,00 MS/m, complementam a similaridade dos dados obtidos.

Os mapas de interpolação de condutividade aparente das águas medidas nos poços, anteriormente, selecionados para hidrogeologia guardam grande semelhança com os mapas elaborados através de levantamentos geofísicos com EM-34 e SEVs.

- **[EM-34]. [DV - 40 /60,00m de profundidade de investigação]**

Mapa previsional exposto na figura 8.2 DV_c

Área: 600m x 400m – Icaraí

O mapa de isocondutividade aparente gerado na superfície situada a 60,00 m de profundidade de investigação reflete mais, nitidamente, a divisão repetida de modo diagonal das áreas interpoladas é verificadas no levantamento DH-40. A interpolação se inicia com valores menores de condutividade aparente numa faixa entre 9,00 a 21,14 mS/m indicando serem os mais resistivos daqueles já analisados.

Observando-se o progressivo aumento de condutividades aparentes nas áreas de salinização interpoladas do aquífero próximo à linha de costa, conclui-se que em todas as condutividades adquiridas e analisadas, há salinizações mais agudas nas porções sudeste e noroeste nas superfícies até então interpoladas na área da malha.

As análises dos valores adquiridos e interpolados, das extensões tanto laterais como verticais atingidas, indicam a existência de uma intrusão salina acentuada em processo de evolução sob a forma de cunha e de ocorrências acidentais.

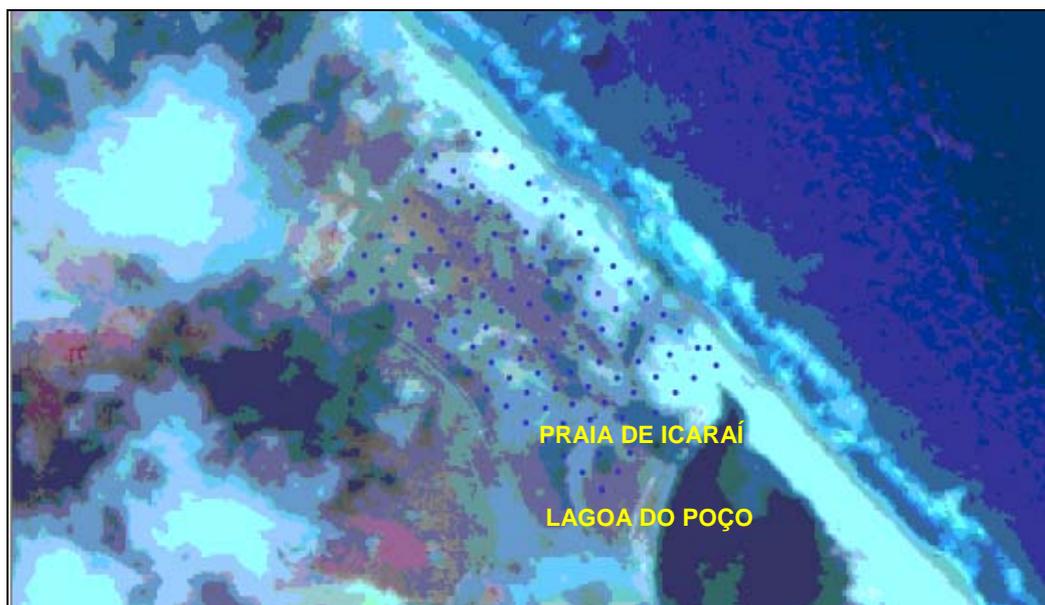


Foto 8.2 – Projeção dos pontos de controle da Malha 02 com pontos de 40 x 40 m com EM34 numa área de 600 m x 400 m executados n região litorânea de Icarai-Ce.

Malha 01

Posterior à análise dos dados adquiridos nos levantamentos da Malha 02, segue-se as observações dos dados da Malha 01, empregando a mesma metodologia de interpolação, através de krigagem simples. Procedeu-se um novo processamento dos dados, sem a influência de bombeamentos de poços e alterações da interface água doce / água salgada por causas antropogênicas. Neste aspecto, tem-se uma análise de dados levantados por eletromagnetismo EM-34, que poderão servir de referência inicial ou de parametrização para futuras pesquisas nessa área litorânea. Os dados estão dispostos na foto 8.1 e demonstram a distribuição regular das estações de leituras de EM-34, na localidade denominada curva do Pecém. A importância desta malha se prende ao fato de ser pioneira em mostrar a situação atual do comportamento da interface água doce / água salgada na região do Porto do Pecém e se situar nas proximidades de uma área que, futuramente, será muito utilizada pela população. A foto 8.4 exemplifica a posição do empreendimento na chamada “Ponta do Pecém”, no município de São Gonçalo do Amarante-Ce.

Os dados foram processados e seus mapas previsionais de isocondutividade aparente foram calculados a cada profundidade investigada, segundo a metodologia já utilizada através de geoestatística limitando a 6 classes de interpolação, cujos mapas poderão ser

observados nas figuras 8.1 DH_a, 8.1 DH_b, 8.1 DH_c e 8.1 DV_a, 8.1 DV_b, 8.1 DV_c, correspondentes.

A escolha dessa área para execução dessa malha teve como fatores principais, a inexistência da interferência elétrica no procedimento dos trabalhos de levantamento e ausência de grandes aglomerados urbanos (conforme demonstra a foto 8.3) e proximidades do Porto do Pecém, onde brevemente serão implantados grandes estruturas industriais e armazenamentos destinados ao comércio exterior (foto 8.4).

Antes da execução dos mapas de isocondutividades aparentes levantados com EM-34 na Malha 02 (próximo à Lagoa do Poço), em primeiro plano, já existia informações empíricas de uma maior contaminação da intrusão salina a sul de Icaraí, seguida por incipientes e acidentais ocorrências de intrusão salina, demonstradas de poços abandonados na região e localizados a partir de reconhecimentos geofísicos por sondagens eletromagnéticas no domínio das frequências e sondagens elétricas verticais, costumeiramente utilizadas no Estado do Ceará.



Foto 8.3 - Emprego do equipamento EM-34-3XL, sobre as dunas recentes, num arranjo com DH-10, espaçamento de 10 metros em ambos lados e profundidade de 7,50m.



Foto 8.4 - Complexo Industrial e Portuário do Pecém, recém construídos e próximos à área de levantamentos geofísicos com EM-34 e SEVs, da Malha 01, situados na curva e pontal do Pecém. Recolhida de Cordeiro (2002).

Análise dos dados obtidos através da malha e estações realizadas por levantamentos eletromagnéticos na região de Pecém-Cauípe:

- [EM-34]. [DH - 10 /7,50 m de profundidade de investigação]

Mapa previsional exposto na figura 8.1 DH_a

Nesse nível de interpolação mais superficial, observa-se uma distribuição de valores menores de condutividade aparente, na parte central da área da malha, contrapondo-se aos valores mais altos encontrados na região de trabalho nesse nível de profundidade de investigação, numa área um pouco mais afastada do litoral do Pecém-Cauípe. Os valores mais resistivos de 4,98 a 8,87 mS/m abrangem um área maior, porém nos limites desta, valores crescentes de condutividade aparente compreendidos entre 8,87 e 14,71 mS/m, parecendo estabelecer um início quase acidental de intrusão

- [EM-34]. [DH - 20 /15,00 m de profundidade de investigação]

Mapa previsional exposto na figura 8.1 DH_b.

Neste nível de investigação na malha, na profundidade de 15,00 m, observa-se uma distribuição semelhante dos valores mais resistivos ao nível anterior e que estão compreendidos entre 5,56 e 10,18 mS/m. Entretanto, nota-se nesse nível de exame, ainda um avanço maior em termos de abrangência dos valores resistivos e os valores de condutividade aparente de 10,18 a 17,46 mS/m acentuando a salinidade abaixo das dunas e no nível da Formação Barreiras mais abaixo. Na realidade, observa-se que nesse nível já se encontra uma área de salinização mais extensa em confronto com uma área maior de valores mais resistivos nesse nível de exame.

- **[EM-34]. [DH - 40 /40,00 m de profundidade de investigação]**

Mapa previsional exposto na figura 8.1 DH_c

Esta superfície continua aportando aumento dos valores mais resistivos que vão de 4,62 s 8,89 mS/m, em relação aos demais dados analisados anteriormente. Contudo, demonstra um aumento progressivo nos valores de condutividade na parte sudeste, aumentando levemente sua abrangência no nível de influência observada. Os valores compreendidos entre 8,89 e 14,25 mS/m se comportam de modo análogo às pequenas superfícies de interpolação ditas salinizadas e anteriormente verificadas. A área maior correspondente aos valores resistivos, a exemplo do nível anterior, ainda predomina nesse nível de investigação. Observa-se que há uma tendência de aumento da salinidade em níveis mais profundos e superiores a 30 metros.

- **[EM-34]. [DV - 10 /15,00 m de profundidade de investigação]**

Mapa previsional exposto na figura 8.1 DV_a

Na superfície gerada a 15,00 m de profundidade de investigação pela interpolação geoestatística de valores de condutividade aparente, apresenta-se uma área acentuada e maior com valores resistivos da ordem de 8,38 a mS/m. Porém, faixas que compreendem valores que vão de 15,41 a 18,89 mS/m aparecem sob a forma de áreas mais estreitas, iniciando um acréscimo de superfície próximo à linha de costa e mais próxima ao mar e que corresponde ao lado norte-noroeste da malha e cujos valores vão de 18,89 a 26.93m mS/m. Este comportamento se coaduna com aqueles observados

com os dipolos DH-10 e DH-20, onde aparecem as superfícies de salinização próximas à linha de costa.

- **[EM-34]. [DV - 20 /30,00 m de profundidade de investigação]**

Mapa previsional exposto na figura 8.1 DV_b

Neste nível de profundidade de 30 metros, a superfície de interpolação contém um procedimento quase constante em relação às demais analisadas, no que se refere às suas áreas de abrangência e valores de condutividade aparente. Suas faixas se iniciam com valores de condutividade que vão de 8,86 a 12,01 mS/m e se somam a outras faixas de valores maiores compreendidas entre 12,01 e 16,82 mS/m, com intervalos de 2,00 mS/m, até atingirem a faixa de valores maiores entre 20,97 e 24,05 mS/m.

- **[EM-34]. [DV - 40 /60,00 m de profundidade de investigação]**

Mapa previsional exposto na figura 8.1 DV_c

O mapa de interpolação de isocondutividade aparente gerado na superfície de investigação a 60,00 metros, continua com o aumento progressivo dos valores de condutividade aparente e abrange a quase totalidade da superfície do nível da malha examinada corresponde ao dipolo utilizado. Entretanto, algumas superfícies com valores resistivos aparecem no lado este da área da malha e encerram condutividades nas faixas que vão desde 3,07 a 8,82 mS/m, para logo em seguida englobarem novas faixas de valores no intervalo entre 8,82 e 14,18 mS/m, significando um aumento bastante acentuado da intrusão salina na área de abrangência desse nível de profundidade.

As observações destacadas dos valores de interpolação por krigagem simples permitem concluir que, através das interpretações de mapas previsionais calculados e das linhas de isocondutividade aparente num meio tido como homogêneo, há um intrusão salina natural, cujas superfícies de interpolação adquiridas retratam a distribuição aleatória da salinidade na zona de transição entre a água doce e a água salgada e reforçam a existência de um maior volume de intrusão salina em profundidades maiores. Nesse sentido reforçam também uma diminuição progressiva da salinidade continente adentro.

8.4 Justificativas do Método EM-34 e SEV

No exame das leituras tem-se que levar em conta a Profundidade de Investigação e a Profundidade de Penetração, para verificar a validade das leituras e interpretações. A primeira pode ser considerada, sem erros significativos, dependentes do espaçamento e da orientação das bobinas. No modo dipolo horizontal (DH), isto é, com o eixo da bobina na vertical, a profundidade de investigação é de aproximadamente 0,75 vezes o espaçamento das bobinas. No modo dipolo vertical (DV), isto é, com o eixo da bobina na horizontal, a profundidade de investigação é de 1,5 vezes o espaçamento das bobinas.

O EM34-3XL (Geonics, Ltda.), equipamento utilizado nesta pesquisa, permite três espaçamentos inter-bobinas: 10, 20 e 40 m. Em condições ideais (meio homogêneo) é possível investigar profundidades de aproximadamente 7,5, 15 e 30m no modo DH e 15, 30 e 60 m no modo DV (Figura 8.1). Em termos práticos, podem-se considerar as Dunas e a Formação Barreiras como meios geofísicos quase homogêneos para aplicação do método em questão. No EM34-3XL, o modo dipolo vertical atinge duas vezes a profundidade de investigação do modo DH e é mais sensível às variações laterais de condutividade (Goldstein *et al.*, 1990). No entanto, é altamente susceptível ao desalinhamento das bobinas (Mcneill, 1980a). No modo dipolo horizontal, os materiais terrestres acima da profundidade efetiva alcançada pelo instrumento contribuem em cerca de 70% da resposta (Stewart & Bretnall, 1986). A profundidade de penetração pode ser entendida como sendo a profundidade realmente investigada neste tipo levantamento e, assim, é diretamente controlada pelo meio. Em condições ideais de operação (baixos conteúdos de argila e água) a profundidade de penetração será igual a profundidade de investigação do equipamento (Dunas sobre os sedimentos da Fm. Barreiras), caso contrário tenderá a ser menor. O método EM permite realizar sondagem e caminhamentos eletromagnéticos, com procedimentos semelhantes ao método elétrico de corrente contínua (Mendes, 1987). Os dados estão apresentados nos mapas concernentes, através de curvas de isocondutividade para as quatro profundidades de investigação e em perfis e/ou pseudoseções verticais. Considerando a litologia geral da Formação Barreiras na área com baixos teores de argila (areno-argilosos) e conteúdos mais arenosos têm-se delimitado aquíferos saturados suspensos entre 15 e 30 metros de profundidade e não saturados em diversas profundidades e até 60 metros.

9. CONCLUSÕES

9. CONCLUSÕES

Dentro do contexto da importância Geológica e Hidrogeológica de cada elemento participante do sistema costeiro ecológico e dinâmico, das diversidades temáticas voltadas ao nosso principal bem mineral, as conclusões foram sistematizadas numa seqüência lógica individual dos eventos na área. Iniciando-se pela sua origem e indo até aos arcações dos mecanismos implantados, no que se referem ao acúmulo até certo ponto imponderável de água em cada aquífero e das conseqüências de suas explorações futuras.

• Caracterização Geológica

Estudos concernentes à distribuição das litologias e à estruturação do embasamento cristalino forneceram evidências importantes no condicionamento dinâmico dos fluidos hidráulicos nas seqüências litológicas e nas feições geoestruturais implantadas no embasamento cristalino da área.

A geologia regional acrescenta substancial informação hidrogeológica, no que se refere à circulação dos grandes fluxos regionais de água subterrânea e suas interligações com fluxos locais. A área está inserida nos Terrenos do Ceará Central, limitada a NW pela Zona de Cisalhamento Sobral-Pedro II e a SE pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu e recebem toda a influência hidrodinâmica regional destes segmentos, influências do Domínio do Baturité e de seus *inselbers* resultantes.

A configuração tectônica do embasamento cristalino (Ciclo Brasileiro) está representada na parte central da área, por um grande arqueamento antiformal basculado, que controla nas suas abas as maiores expressões hidrológicas que estão representadas pelos Rios Ceará, Cauípe e Juá, encaixados nos vales sinformes contíguos, onde os cursos fluviais obedecem a direções quase retilíneas no sentido nordeste até desembocar no Oceano Atlântico. Nas grandes fraturas, estão assentados não só os grandes fluxos superficiais, mas também aquíferos de importância na área estudada.

Os sistemas de aquíferos costeiros são alimentados pelo escoamento e infiltração pluviométrica nas unidades cristalinas e finalizam conjuntamente com penetração em todo complexo sedimentar da Formação Barreiras e depósitos mais recentes. A recarga principal se dá nos meses de inverno e sua exploração é bastante acentuada, tendo em vista a significativa área que ocupa na faixa costeira do Município de Caucaia (Icaraí) e zona do Estuário do Rio Ceará e litoral do Pecém.

A hidrodinâmica da intrusão marinha se associa aos modelos simples de relação entre as variações piezométricas e o movimento da água salgada, com maior ou menor grau de desenvolvimento da zona de mistura no litoral da região de Pecém e Caucaia-Ce.

A variação vertical e lateral de fácies da Formação Barreiras e das subseqüentes unidades sedimentares do quaternário, tais como paleodunas, dunas móveis e recentes (novas gerações de dunas), influenciam os aquíferos na quantidade e qualidade.

A fácies areno-argilosa possui características de aquífero e, a arenosa, dentro de certos limites hidrodinâmicos, pode ser considerado aquífero. A fácies argilosa ocorre, sob a forma de tênues camadas, às vezes, em extensões consideráveis e são responsáveis pela ocorrência de aquíferos suspensos, nas unidades mais espessas da Formação Barreiras, próximas à Cidade de Caucaia e da Praia do Cumbuco.

As regiões litorâneas com praias dissipativas formadas pelos promontórios de quartzitos no baixo estrutural, principalmente, na região do Pecém e Cumbuco, são responsáveis sistemas de aquíferos rasos da Formação Barreiras. Poços perfurados nas zonas de antepraia apresentam interfaces salinas rasas e não permitem grandes bombeamentos devido a sua vulnerabilidade à intrusão salina. A presença de paleocanais nas zonas estuarinas e as Interações da água com seus sedimentos são fatores limitantes à boa qualidade dos aquíferos.

As geofaturas associadas ao Vulcanismo Terciário na direção NE, possuem extensões nas áreas provenientes das manifestações do Vulcanismo Alcalino do Arquipélago de Fernando Noronha e, hidrogeologicamente, fornecem dois aspectos importantes: o primeiro refere-se ao seu condicionamento de circulação da água obedecendo ao *trend* geral dos principais lineamentos estruturais da região e da área; e, o segundo, refere-se a presença de aquíferos de boa qualidade e com boas vazões dentro desses condutos estruturais.

Fluxos hidráulicos intermediários e superficiais, características de armazenamento das unidades aquíferas na porção sedimentar da área estão localizadas em dois sistemas aquíferos passíveis de intrusão salina costeira: as dunas e os níveis arenosos da Formação Barreiras.

Das formações e/ou unidades geológicas distribuídas na área de pesquisa, as dunas encerram melhores reservatórios hídricos subterrâneos e podem contribuir para abastecer as comunidades litorâneas locais. Representam os aquíferos superiores livres e se desenvolvem ao longo do litoral, formando um cordão paralelo à costa, dispostos sobre a Formação Barreiras. Devem ser monitoradas as explorações de suas águas subterrâneas principalmente na região sul de Icaraí (presença de antigas salinas) e no trecho subsequente da Praia de Tabuba, onde se encontra um forte indicativo de intrusão cunha salina, cuja amostragem em cada poço indica que, acima do limite médio de 500 mg/l de STD, significa o início da salinização.

As medidas das variações de condutividades elétricas das águas coletadas dos poços, no ambiente hidrogeológico da área, demonstram que os aquíferos da área nos trechos mais habitados estão contaminados pela penetração da intrusão salina quer seja pelo aporte das águas das salinas bombeadas do aquífero marinho quer seja pelo aporte de recarga de aerossóis marinhos. Tais alterações resultam do número expressivo de poços profundos nessas áreas e, principalmente, devido aos excessos de bombeamento desses poços em função de uma demanda crescente e sem controle técnico-científico.

Os resultados das análises de isótopos estáveis de oxigênio-18 e deutério na região de Caucaia indicaram que os cloretos encontrados são provenientes de aerossóis marinhos Aguiar *et al*, (2000) e não da contribuição direta do mar. Evidentemente não invalida a presença de intrusão marinha, uma vez que, o monitoramento dos poços restantes não foi complementado (comunicação verbal).

Comumente, a elevada inércia dos aquíferos detriticos costeiros, nos quais os processos de difusão podem ser significativos, condiciona que as salinizações gerais de intrusão marinha, em particular, operem de maneira lenta, ainda que a manifestação do processo possa indicar o contrário, Custódio & Lamas, (1976). Analogamente, devido

às mesmas causas a regeneração desses aquíferos baseada na diminuição da exploração e/ou na aplicação de recarga artificial se manifesta possível e eficaz ainda que, naturalmente, lenta e custosa.

- **Caracterização Geofísica**

O caráter de semidetalhe das sondagens eletromagnéticas EM-34 e EM-31 na região de Icaraí (Vieira, 2002), corrobora com os resultados obtidos nas Malhas 01 e 02 e com os dos perfis executados com EM-34, acentuando valores anômalos na Malha 02, que ocorrem em função de grande bombeamentos na região da citada malha.

Sondagens eletromagnéticas com EM-34 nas áreas das malhas 01 e 02, no litoral Pecém-Cauípe e de Caucaia-Icaraí-Ce forneceram respostas distintas:

Analisando-se a distribuição de condutividade aparente para 15 e 30 metros de profundidade investigada, observa-se uma tendência no aumento da condutividade. Nas três zonas ocorre aumento de salinização e do valor da condutividade com máximos superiores a 70 mS/m. Apesar desse fato, observa-se a presença de baixos valores correspondentes às dunas de Icaraí e no litoral mais a noroeste, à Praia de Cumbuco. Após esses valores, há uma diminuição acentuada dos valores relativos de condutividade aparente. O fato pode estar associado à presença de dois aquíferos na região, um mais superior, arenoso e livre, mais vulnerável à contaminação de sais e outro argiloso ou semiconfinado protegendo de certa forma sua contaminação.

A Malha 01, executada no litoral de Pecém-Cauípe, representa um modelo natural ainda intacto, cujas interpolações de isocondutividade aparente nessa área de trabalho são pioneiras, cuja variação da condutividade deve-se a presença de correntes de advecção ou faixas de transição de valores de salinidade na água.

A prospecção eletromagnética no domínio das frequências permitiu observar, através dos mapas de isocondutividade elaborados, a distribuição da condutividade em toda planície da Formação Barreiras em Caucaia e Pecém, com valores mais altos na parte costeira (antepraia) e na zona central, onde diminui e aumenta até à parte este de Cumbuco e Icaraí. O resultado do conjunto dos mapas tem sido muito semelhante a

distribuição de salinidade (íon cloro e condutividade elétrica) obtidos a partir das análises químicas das águas subterrâneas comentadas.

As pseudo-seções de condutividade aparente e os diagramas de variação da condutividade para as distintas configurações dipolares, em relação à distância da costa permitiram observar a variação tanto lateral como vertical da condutividade. Nas zonas distintas de Pecém-Cauípe e Icaraí-Pacheco, em particular, se observam aumentos da condutividade em função da profundidade. Entretanto, na faixa entre 45 e 50 metros, esta condutividade aparente diminui substancialmente na presença de corpos mais resistivos (Migmatitos ou gnaisses).

A zona de maior gradiente, quer dizer, onde mais rapidamente aumenta a condutividade em função da distância horizontal se interpreta como a posição da interface água doce / água salgada. Esta zona se encontra próxima da costa, nas localidades acima mencionadas. Observando-se que nas primeiras zonas o processo ainda está no estágio natural, pois não possuem poços perfurados e nem tampouco contêm bombeamentos (dados da Malha 01).

Na Malha 02, o processo é diferente, pois além da ocupação desordenada do meio físico e da crescente expansão imobiliária, ocorre bombeamento mais intenso dos poços que exploram água subterrânea dessa região. Nela, observam-se várias concentrações de altos valores de condutividade, com poços abandonados localizados dentro da malha em virtude da salinização total, onde as interpolações de condutividade aparente indicam plumas de contaminação e possível rompimento do limite da zona de interface água doce / água salgada. Evidencia-se que, neste caso, o modelo natural da interface foi alterado e o risco de poluição dos aquíferos costeiros por intrusão da cunha salina, tornou-se efetivo.

Corroboram com esta afirmação os mapas de isocondutividade aparentes levantados com EM-34 na Malha 02 (próximo à Lagoa do Poço), nos quais se verificam que existe maior contaminação da intrusão salina a sul de Icaraí, seguida por incipientes e acidentais ocorrências de intrusão salina, demonstradas nos mapas das figuras: 8.2H_a, 8.2H_b, 8.2V-a e 8.2V_b, localizadas e delimitadas a partir de reconhecimentos geofísicos por sondagens eletromagnéticas no domínio das frequências.

Estes resultados estão em concordância com as informações preliminares aportadas pela hidroquímica de poços, porém se necessita de delimitar mais precisamente a extensão da área atingida em cada sistema de aquífero no litoral afetado pela salinização. Os resultados mostram um preocupante e desordenado avanço em direção ao continente de altos valores de condutividade demonstrados pelos levantamentos através dos métodos aplicados e indicam uma salinização progressiva. Faz-se necessário, uma especial atenção na interpretação dos dados em face das variações litológicas da Fm. Barreiras, sua conexão com as dunas e, às vezes, com suas sobreposições ao embasamento.

Dentre as idéias abordadas, os métodos geofísicos de eletromagnetismo e de eletrorrestividade, medidas de parâmetros hidrodinâmicos na investigação de sistemas aquíferos razoavelmente rasos e posicionamento de arcabouços favoráveis à captação de água subterrânea na região costeira pesquisada, mostraram grande eficiência na delimitação da interface água doce / água salgada na região.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab' Saber, A.N., 1969, Participação das Superfícies Aplainadas nas Paisagens do Nordeste Brasileiro. *Boletim Paulista de Geomorfologia*, São Paulo (19) 1- 36.
- Aguiar, R.B. – 1999 – Impacto da Ocupação Urbana na Qualidade das Águas Subterrâneas na Faixa Costeira do Município de Caucaia-Ce. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará.
- Aguiar, R.; Santiago, M.F.; Filho, J. M & Frischkorn, Horst, 2000, Origem dos sais nas águas subterrâneas dos aquíferos costeiros no Município de Caucaia-Ceará. 1st Joint World Congress on Groundwater, Fortaleza-Ceará-Brazil – Pub. 11^o Abas- 5^o ALHSUD. CD-ROM / ABASTECE. Paper 175
- Alheiros, M.M.; Lima Filho, M.F. 1991. A Formação Barreiras. *Revisão Geológica da Faixa sedimentar Costeira de Pernambuco, Paraíba e Parte do Rio Grande do Norte*. UFPE. Série B (Estudos e Pesquisas) 10: 77-88
- Alheiros, M.M.; Lima Filho, M.F.; Monteiro, F. A. J. & Oliveira Filho, J.S. 1988. Sistemas deposicionais na Formação Barreiras no Nordeste oriental. In: SBG, Cong. Bras. de Geologia, 35, Belém, *Anais*. SBG, Belém, 2:753-760.
- Allen, J.R.L., 1983. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Borders. *Sediment. Geol.*, 3: 237-293.
- Alley, W.M., Reilly, T. E., & O. L. Frankie. 2000, Sustainability of Ground-Water Resources. Publication Team – U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey, U. S. Geological Survey Circular 1186 – pp6-7.
- Almeida, F. F. M; Hasui, Y; Brito Neves, B.B.; Fuck, R. 1977, Províncias estruturais brasileiras. In SBG/Núcleo Nordeste, Simpósio de Geologia do Nordeste, 7, Campina Grande, Pb. *Atas* 269 -272.
- Almeida, F. F. M. de, 1958, Geologia e Petrologia do Arquipélago de Fernando de Noronha Div. Geol. Mineral, Rio de Janeiro, (13): 181p.
- Almeida, F. F. M. de, 1967, Origem e Evolução da Plataforma Brasileira Div. Geol. Mineral, Rio de Janeiro, (241): 36p.
- Amador, E.S. 1980a. Considerações sobre as fases de sedimentação dos depósitos continentais pleistocênicos. In: Cong. Bras. Geol. 31. *Anais*. 1: 530-541.
- Andrade, G.O. 1958. A superfície de aplainamento pliocênica do Nordeste do Brasil. *Anais da Associação Geogr. Brasileiros*, 10(1):31-56.

- Andrade, G.O. & Lins, R.C. 1965. Introdução à morfoclimatologia do Nordeste do Brasil (2ª ed, revisada). Inst. Ciênc. da Terra, Univ. Recife, 3/4:17-28.
- Araujo, J. R. & Azevedo, S. G. 1986. Comportamento hidrogeológico do aquífero Barreiras na área do complexo ALBRÁS/ALUNORTE-Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. ABAS, 4º. Anais Brasília;. p. 27-38.
- Archie G. E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans.A.I.M.E.*, 146: 389-409.
- Arthaud, M.H.; Almeida, A.R.; Andrade, J.R.; Maranhão, C.L.L.; Nogueira Neto, J.A.; Parente, C.C.; Sidrim, A.C.G.; Souza, J.V.; Torquato, J.R.F. 1987. A utilização dos critérios rotacionais em zonas de cisalhamento dúctil: O exemplo do Complexo Granítico de Quixadá-Quixerabobim – Ceará. In: SBG, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos , 1, Salvador. Boletim de Resumos, 45-47.
- Arthaud, M.H.; Nogueira Neto, J.A.; Torquato, J.R.F. 1988b. A deformação do granito Serra Branca, Complexo Granítico de Quixadá-Quixerabobim – Ceará. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, Anais, 3: 1015-1027.
- Astier J. L., 1971. *Géophysique appliquée à l'hydrogéologie* . Masson. Paris.
- Barlow, Paul M, 2003. Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast-Circular n. 1262. U.S.G.S - Water Supply Paper 1613-C, p.1-12.
- Beltrão, A. E. de A., 1970. Inventário hidrogeológico do Nordeste folha nº6, Fortaleza-Ce. Recife, SUDENE. 141p. (Brasil. SUDENE. Hidrogeologia 28).
- Beltrão, A E. de A & Manoel Filho, J., 1973. Recursos de Águas Subterrâneas na Cidade de Fortaleza–Ce. Recife, SUDENE. Divisão de Documentação, 1973. Mapas, tabelas (Brasil. SUDENE, Hidrogeologia, 44). 293 p.
- Bezerra, E. C. 1997. Balanço Hídrico. IPLANCE. Atlas do Ceará. IPLANCE, Fortaleza, p.20
- Bianchi, L; Padilha, N. W. M. & Texeira, J. E. E. M., 1984, Recursos de água Subterrânea na R.M.F. Fatores Condicionantes. In: AUMEF. Plano de Aproveitamento dos Recursos Hídricos na R.M.F. – Fase I. Fortaleza.
- Bianchi, L. & Morais, J.B.A .& Gurgel, J.B.J., 1986. Plano de aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos na região metropolitana de Fortaleza-CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. ABAS, 4º. Anais. Brasília; p. 39-48.
- Bigarella, J.J. 1975. The Barriers Group in Northeastern Brazil. *Anais da Acad. Bras. Ciências(Suplemento)*, 47:365-393.

- Bigarella, J.J. & Andrade, G.O. 1964. Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozóicos em Pernambuco (Grupo Barreiras). Universidade do Recife, *Arquivos Inst. Cienc. Terra*, 2:2-14.
- Blatt, H.; Middleton, G.; Murray, R., 1980. *Origin of Sedimentary Rocks*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 782 pp.
- Brandão, R.L., 1995. Projeto SINFOR: Mapa Geológico da Região Metropolitana de Fortaleza. Texto Explicativo. Série Cartas Temáticas, 1, 34 p.
- Braga, A.P.G.; Moraes, A.M.V de.; Passos, C.A.B.; Souza, E.M. de & Medeiros, M.F., 1977. Projeto Fortaleza, Relatório final. Recife, DNPM/CPRM, v. 1 e 2.
- Braga, A.P.G.; Passos, C.A.B.; Souza, E.M.; França, J.B.; Medeiros, M.F; Andrade, V.A. 1981. Geologia da Região Nordeste do Estado do Ceará. Projeto Fortaleza. DNPM/CPRM, Brasília, MME, 115-123 p. il.
- Branner, J.C., 1902. The stone reefs of Brazil, their geological and geographical relations, with a chapter on the coral reefs. *Bull. Mus. Comp. Zool.*, 44:
- Branner, J.C., 1904. The stone reefs of Brazil, their geological and geographical relations with a chapter on coral reefs. *Mus. Comp. Zool. Bul.*, Harvard College, Cambridge, **44** (7).
- Brito Neves, B.B. (1975). Regionalização geotectônica do Pré-cambriano Nordestino. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências/Universidade de São Paulo, 180p.
- Caby, R. & Arthaud, M., 1986. Major precambrien nappes of the Brazilian belt, Ceará, Northeast Brazil. *Geology* 14: 871-874
- CAGECE, 1974. Divisão de Bacias Hidrográficas da Região Metropolitana de Fortaleza. Relatório Interno. Publicação da Companhia de Águas e Esgotos do Ceará -. Vol 1.
- Cardona, A; Del Conde, J. P. & Carrillo-Rivera, J. Joel. , 2000. Salinización del agua subterránea en un acuífero costero de zona árida del noroeste de México: fuentes, mecanismos e reacciones químicas. 1st Joint World Congress on Groundwater, Fortaleza-Ceará-Brazil, Pub. 11^o Abas- 5^o ALHSUD. CD-ROM / ABASTECE. 13-17
- Carvalho, A.M., & Maia, L.P., 1990. Estudos dos sedimentos Cenozóicos da região de Paracuru, Ceará, Brasil. *Relatório de Graduação*. Universidade Federal do Ceará. Dep. Geol. Fortaleza. 86p.
- Carvalho, A.M., & Maia, L.P., 1991. Contribuição ao estudo dos recifes da região costeira cearense. In: *Simpósio de Geologia do Nordeste*, Recife. Atas. SBGNE. Bol. 12. Recife. P. 82-85.

- Carvalho, A.M., 1994. Mapeamento Geológico, História Evolutiva e Avaliação Ambiental da Região de Aquiraz-CE. *Dissertação de Mestrado*, Recife, 107p
- Carvalho, A.M., 2003. Dinâmica Costeira entre Cumbuco e Matões – Costa NW do Estado do Ceará. Ênfase nos Processos Eólicos. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia.
- Carvalho, A.M.; Coutinho, P.N.; Morais, J.O., 1994. Dune characterization in the Aquiraz region, Ceará state, northeast Brazil. In: International Sedimentological Congress, 14, Recife-PE, Brazil, 1994. *Proceeding...* Recife: IAS. D-23.
- Carvalho, A. M. & Dominbuez, J.M.L., 1999. Contribuição ao estudo da atividade eólica na costa cearense entre as localidades de Pecém e Enseada de Patos (noroeste do Ceará) (*Arquivo: VII ABEQUA-ZCP066.PDF*)
- Carvalho, J.B.; Lessa, G.C.; Bittencourt, A.C.S.P. & Azevedo, A.E.G., 1999. Sedimentação estuarina e influência neotectônica na Evolução da Baía de Iguape – BA. (submetido ao VII Congresso da ABEQUA)
- Castro, L.C. & Castelo Branco, R.M.G., 1999. Contribuição da gravimetria na prospecção de água subterrânea no litoral norte do Ceará, Brasil. Sixth International Congress of the Brazilian Geophysical Society. SBGf00699.
- Cassirage, E.F. y Gómez J. (1996) Relación entre parámetros geofísicos y Hidrogeológicos. Una revisión de literatura. Depto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. 60 págs.
- Castany, G. 1975. *Prospección y explotación de las aguas subterráneas*. Barcelona: Ediciones Omega. 738 p.
- Cavalcante, I. N. & Sabadia, J. B., 1992, Potencial Hídrico Subterrâneo: um Bem Mineral Ameaçado de Poluição Antrópica. Ver. Geologia-DEGEO-UFC. Fortaleza, 5 p115-116.
- Cavalcante, I.N.; Rebouças, A.C.; Veríssimo, L.S., 1996. Águas Subterrâneas do Município de Fortaleza. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS, 9º. Anais, Salvador. p53 –57.
- Cavalcante, I.N.; Rebouças, A.C.; Veríssimo, L.S., 1998. Aspectos qualitativos das águas subterrâneas na região metropolitana de Fortaleza -CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. ABAS, 10º. *Anais São Paulo*;
- Cavalcante, I.N., 1998, Fundamentos Hidrogeológicos para Gestão Integrada de Recursos Hídricos da Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará. - Tese de Doutorado na USP, São Paulo Publ. USP, 164 p.

- Cavalcante, J.C.; Ferreira, C.A.; Armesto, R.C.G.; Medeiros, M. de F.; Ramalho, R.; Braun, O.P.G.; Baptista, M.B.; Cunha, H.C. da S. 1983. Mapa Geológico do Estado do Ceará; Escala 1:500.000. MME-DNPM/MI-SUDENE/Governo do Estado do Ceará, Fortaleza.
- Cavalcante, J.C., 1999. Limites e Evolução Geodinâmica do Sistema Jaguaribenho, Província Borborema, Nordeste Brasileiro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do R. G. do Norte. Natal – RN, p. 6-9.
- Ceará, Secretaria de Recursos Hídricos, 1992, Plano Estadual de Recursos Hídricos. Publ. Gov. Estadual - Fortaleza, 1992 4 v.
- Claudino Sales, V. 2002. *Évolution Géomorphologique de la Zone Cotiere de L'Etat du Ceará, Nord-Est du Brèsil: Du Long Terme au Court Terme. Thèse de Doctorat en Géographie. Université Paris-Sorbonne.*
- Coelho, J.M.; Morais, J.B.A. & Robero, F.C., 1984, Hidrogeologia e Controle nas Perfurações de Poços Tubulares no Município de Fortaleza-Ce. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS, 3^o. Anais Fortaleza; p225-238.
- GOGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. Secretaria de Recursos Hídricos – SRH. 1999. Serviços de Campo para Avaliação do potencial de águas subterrâneas e de lagoas das Bacias Hidrográficas da Região Metropolitana de Fortaleza, Relatório final. Programa de Desenvolvimento urbano e gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará – PROURB-CE.
- Goldstein, N. E.; S. M. Benson & D. Alumbauch. 1990. Saline groundwater plume mapping with eletromagnetics. *In: Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. II: Environ. and Groundwater, S. H. Ward (Ed.), p. 16-25.*
- Cooper, H.H., 1964. A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in coastal aquifer; U. S. Geological Survey Water-Supply Paper, 1613-C, p. 1-12.
- Cordeiro, W. & Gonçalves, J.Y.B. & Holanda, C.H.N., 1984. Sinopse da hidrogeologia do Estado do Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. ABAS, 3^o. Anais Fortaleza; p. 407-420.
- Costa, W.D Costa Filho, W.D. 2000. Caracterização hidrogeológica do Estado de Pernambuco. In: Joint World Congress on Groundwater, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ABAS/ALHSUD/IAH. CD-ROM. 19 p. jul-ago/2000. Cd-rom.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2000. Atlas dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Estado do Ceará – Residência de Fortaleza – RFO, CD-ROM.

- CPRM - Serviço Geológico do Brasil & Secretaria de Recursos Hídricos, 2003. Atlas Digital de Geologia e Recursos Mierais do Ceará, mapas na escala 1:500.000. CD-ROM, Residência de Fortaleza - RFO.
- Cressie, N., 1991, *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, New York. 900 pp.
- Custodio, E. 1967. Études geohydrochimiques dans le delta du Llobregat Barcelona, Espagne.1968,. Asociación Internacional de Hidrología Científica. Asamblea General Berna967.Bruxelas, 19. ágs.35-155.
- Custódio, E. & Lamas, M. R., 1976. *Hidrologia Subterrânea*, 2 v. Ediciones Omega-Barcelona, p.135-136.
- Dobrin M. B., Savit, C. H. 1988. *Introduction to geophysical prospecting*. McGraw-Hill, New York.
- Dobrin, D. (1961) *Intoduction to Geophysical Prospecting*. Mc Graw Hill.
- Dote, Sá, F. 1998. RIMA das Pedreiras de Itaitinga.- Relatório Interno da Empresa GEOCONSULT S.A. Fortaleza-Ce. pg 80-90.
- Feitosa, F.A.C., & Manuel Filho, J., 2000. *Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações*. CPRM-LHABID-UFPE. 391 p.
- Ferreira, J.M. & Assumpção, M.S., 1983. Sismicidade do Nordeste do Brasil. *Rev. Bras. Geof.* 1: 67-88.
- Fitterman, D.V. and Stewart M.T. (1986) Transient electromagnetical sounding for groundwater. *Geophysics*, 51(4): 995-1005.
- Flanzenbaun. 1986, *Evaluation of Saltwater intrusion into Coastal Aquifer of Southern Virginia*. MSc Thesis, University of Virginia, 141 pp.
- FUNCEME / DATEN. 1998. Relatórios internos, dados meteorológicos de 1976 a 1998.
- FUNCEME. 2002. Relatórios internos inéditos.
- FUNCEME / DATEN. 2004. Relatórios internos. Seqüência de imagens NDVI (Índice de Vegetação) no Estado do Ceará..
- Gava, A.; Pires, J. de L. & Teixeira, W., 1981. Mapeamento Regional. Projeto RADAMBRASIL-Levantamento de Recursos Naturais, Folha S.A.24 Fortaleza. Rio deJaneiro, 21: 27-212.
- GeoENV I, 1996. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation* by Goovaerts Pierre Oxford University Press (ISBN: - *Geostatistics for Environmental Applications* edited by Amílcar Soares, Jaime Gómez-Hernandes & Roland Froidevaux, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, ISBN 0-7923-4590-8).

- Geonics, 1996. Ground Conductivity Meters for Environmental, Mine-waste and engineering Problems. *Geonics LTD.*, Ontario (Canada)
- Geonics, 1997. Ground Conductivity Meters for Environmental site evaluation; *Geonics LTD.*, Ontario (Canada).
- Glenne, K.W., 1970. *Desert Sedimentary Environments. Developments in Sedimentology*. Elsevier, Amsterdam.14: 222p.
- Goldstein, N. E.; S. M. Benson & D. Alumbauch - 1990 - Saline groundwater plume mapping with eletromagnetics. *In: Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. II: Environ. and Groundwater, S. H. Ward (Ed.)*, p. 16-25.
- Greenhouse, J.P. and Slaine, D.D., 1986. Geophysical modeling and mapping of contaminated ground water around three waste disposal sites in southern Ontario: *Canadian Geotechnical Journal*, 23, 372-384.
- Guerra, P.A.G., 1988. Geoestatística operacional, Min. das Minas e Energia DNPM - Brasília - 145 pp.
- Guimarães, A. Jr. & Baptista Filho, R. M., 2001. Estudo geológico e geofísico das unidades cenozóicas da região de Lagoinha-Paraipaba-Ce. *Relatório de Graduação*, Univ. Fed. Ceará. Fortaleza. 85p.
- Henry, H.R. 1959. "Salt intrusion into freshwater aquifers". En: *Journal of Geophysical Resources*, Vol. 64, pp. 1911-1919.
- Holanda, J.L.R.; Vasconcelos, S.M.S. & Maia, L.P. 2003. Aspectos hidrogeológicos da região costeira do município de Caucaia-Ceará. *Revista de Geologia*, Vol. 16, nº 1, 7-18. Disponível: www.revistadegeologia.ufc.br
- Howard, A.D. 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 51 (11): 2246-2259.
- INTERPEX Ltda. 1989. EMIX34-Plus, *Software* "Inversão de dados eletromagnéticos no domínio da freqüência", Mississauga, Canadá.
- IPLANCE, 1995. Fundação Instituto de Planejamento do Ceará. Ranking dos Municípios: Indicadores Selecionados, Fortaleza, 132p.
- IPLANCE, 1999. Informações Básicas dos Municípios do Estado do Ceará, Fortaleza – 1999.
- Jacob, C.E., 1963. Recovery method for determining the coefficient of transmissibility. Water Supply Paper 15361, U. S. Geological Survey, Washington
- Kegel, W., 1957. Contribuição ao estudo da bacia costeira do Rio Grande do Norte. *Bol.* 170 DNPM/DCM, Rio de Janeiro, 32p.

- Keller, G.V. and Frischknecht, F.C., 1970. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press. N. York, USA.
- Kelly, S.B. & Olsen, H. 1993. Terminal fans – a review with reference to Devonian examples. *Sediment. Geol.* 85: 339-374.
- Koefoed, O., 1979, *Resistivity Sounding Measurements*. In: *Geosounding Principles*, 1. Netherlands, Elsevier Scientific Publishing Company, 276 pp.
- Kophout, F.A., 1964, *The Flow of fresh water and salt water in Biscayne aquifer of the Miami area, Florida*: U. S. Geological Survey Water-Supply Paper, 1613-C, p. 1-13.
- Koppen, W. – 1948 – *Climatologia com un estudo de los climas de la Tierra*. Version de Hendrichs, P. R. México. Fondo de Cultura Econômica. 478p.
- Khair, K., Aker, A., Haddad, F., Jurdi, M. and Hachach, A., 1994, "The Environmental Impacts of Humans on Groundwater in Lebanon," *Air Water and Soil Pollution*, 78, 37-49.
- Khair, K. and Skokan, C., 1998. A model study of the effect of salination on groundwater resistivity: *Journal of Environmental an Engineering Geophysics*, 2, p223-231.
- Leite, C.E.S. & Möbus, G., 1998. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da região de rochas sedimentares da Bacia do rio Mundaú / Ceará. In: *Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS, 10^o. Anais São Paulo*.
- Lopez-Geta, J. A; Dios Gomez de, J; Orden de la, J. A; G. Ramos y L. Rodríguez, eds. 2003. *Tecnologia de la intrusion de agua de mar en acuíferos costeros; países mediterrâneos*. Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeologia y Águas Subterrâneas, nº 8. ISBN: 84-7840-471-6 (Tomo II) Madrid. 169 – 187.
- Lowe, D.R. 1982. Sediment gravity flows:II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *J. Sediment. Petrol.*, 52: 279-297.
- Mabesoone, J.M.; Campos E.; Silva, A. and Beurlen, K., 1972. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. *Rev. Bras. Geociencias*, v. 2, p. 173-190.
- Mabesoone, J.M. 1984(a). Cenozóico Nordeste: Sistemas e seqüências deposicionais. XI Simp. Geol. Nordeste, Atas, SBG-NE. 142-150.
- Mabesoone, J.M. 1984(b). Episódios tectônicos, seqüências deposicionais e sua integração, com exemplos do Nordeste brasileiro. XXXIII Cong. Bras. Geologia, *Anais*, SBG, Rio de Janeiro, 2:918-933.

- Mabesoone, J.M. (Coordenador), 1987. Revisão geológica da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, e do seu embasamento. *Relatório interno*. FINEP/PADCT.60p.
- Mabesoone, J.M. 1994. *Sedimentary Basins of Northeast Brazil*. Spec. Pub. 2, geology. Dep. Fed. Univ. Pernamb. 310pp.
- McNeill, J.D., 1990a. Use of electromagnetic methods for groundwater studies. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, SEG, 1: 191-218.
- McNeely, R.N.; Neimans, V.P. & Dwyer, L., 1979. *Water Quality Sourcebook; a guide to Water Qualities parameters*, Ottawa, Canada. 89p.
- McNeill, J.D., 1980. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. TN-6, Geonics Inc., Mississauga, Ontario, 15pp.
- McNeill J. D. 1994. Principles and application of Time Domaine Electromagnetic techniques for resistivity sounding. Geonics Ltd. Tecnical Note TN-27.
- Maia, L.P., 1993. Controle tectônico e Evolução Geológica/Sedimentar da Região da desembocadura do Rio Jaguaribe. Dissertação de mestrado. UFPe. 144pp.
- Maia, L.P., 1998. Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): Implicações para una gestión adecuada de la zona litoral. Universitat de Barcelona. Facultat de Geologia. Dep. D'Estratigrafia i Paleontologia. *Tesis Doctoral. Barcelona*. 269p.
- Maia, L.P.; Sabadia, J.A.; Freire, J.S.S. & Serra, J., 1997. Caracterização geoquímica e diagenética da cimentação carbonática dos bechrocks e eolianitos da região costeira do Ceará. *Bol. XVII Simp. Geol. Nord*. 177-181.
- Manoel Filho, J., 1970. *Inventário hidrogeológico do nordeste*. Folha 10: Jaguaribe-Ne, Recife, SUDENE, Div. de Documentação. (Brasil/ SUDENE , Série Hidrogeologia, 30). 343 p.
- Manoel Filho, J.; Gomes, S.V.; Barbalho Jr., C.P. & Lafayette, K.P., 2000, Dinâmica e evolução da salinização no aquífero Cabo, Planície do Recife-Pe. 1st Joint World Congress on Groundwater, Fortaleza-Ceará-Brazil – Pub. 11^o Abas- 5^o ALHSUD. CD-ROM / ABASTECE.Pp 13-15.
- Marinho, J.M.L., 1997. Inversões de sondagens de eletrorresistividade com aplicação ao estudo de aquíferos clásticos na região Acaraú - Itarema, Ceará. Tese de Doutorado, UFBA, Salvador, 173 p.
- Marinho, J.M.L. & Vasconcelos, S.M.S., 2000. Estudos geoétricos/hidrogeológicos da zona costeira da Bacia do Rio Cauípe, Caucaia, Ceará, Brasil. I Congresso Mundial

- Integrado de Águas Subterrâneas. ABAS/ALHSUD/IAH, Fortaleza, CD-ROM, Paper 174.
- Marinho, J.M.L. & Vasconcelos, S.M.S., 2003. Bacia Costeira do Rio Cauípe,, Caucaia, Ceará,: Levantamentos Geométrico e Hidrogeológicos. *Revista de Geologia, da UFC*, Vol. 17. 22-37. Fortaleza-Ceará. www.revistadegeologia.ufc.br.
- Mascarenhas, J. F. & Pedreira, A. J. C. L. & Seixas, S. R. M. & Filho, M. A. S. 1979. Geologia da região centro oriental da Bahia. Projeto Bahia 11. In: Relatório Integrado. Série Geologia, n. 11, Seção Geologia Básica, n. 8. Brasília.
- Matoso, S. de Q. & Robertson, F.S. 1959. Uso Geológico do Termo "Barreiras". *Bol. Tec. Petrobrás*, Rio de Janeiro, 2(3): 37-43.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988, A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model. U.S. Geological Survey techniques of water resources investigations.
- McNeely, R.N.; Neimans, V.P. & Dwyer, L, 1979. *Water Quality Sourcebook; a guide to Water Qualities parameters*, Ottawa, Canada. 89p.
- McNeill, J.D., 1980. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. TN-6, Geonics Inc., Mississauga, Ontario, 15pp.
- McNeill, J.D., 1990. Use of electromagnetic methods for groundwater studies. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, SEG, 1: 191-218.
- McNeill J. D. 1994. Principles and application of Time Domaine Electromagnetic techniques for resistivity sounding. Geonics Ltd. Technical Note TN-27.
- Meireles, A..J.A., 1991. Mapeamento geológico-geomorfológico do Quaternário costeiro de Icapuí - Extremo leste do Estado do Ceará. *Dissertação de Mestrado*. UFPE. 133p. Recife.
- Mendes, I.A.; Dantas, M.; Bezerra, L.M.M. 1981. Geomorfologia. In: Projeto RADAMBRASIL. Folha SE 24, RIO DOCE. Geologia, Pedologia, Vegetação, Uso Potencial da Terra. Rio de Janeiro, 546 p. Levantamento de Recursos Naturais, 34: 173-228.
- Mendes, J. M. B. 1987 - Técnicas geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição de águas subterrâneas. Tese de Doutorado. IG-USP.
- Miall, A.D. 1996. *The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology*. Springer-Verlag Berlin, Heiderberg, New York 582pp.

- Montenegro, S.M.G.; Montenegro, A de A; Lima, E. S.; Demétrio, J.G.A; Cabra, L.J.S.;Morais, J.O., 1968. Contribuição ao estudo dos "beach-rocks" do Nordeste do Brasil. *Trab.Oceanog. Univ. Fed. Pe.*, Recife, 9 (11): 79-94.
- Montenegro, S.M.G.: Montenegro, A de A ; Lima, E. S.; Demétrio, J.G.A; Cabra, L.J.S.; Manoel Filho, J.; Gomes, S.V.; Barbalho Jr., C.P. & Lafayette, K. P., 2000, Dinâmica e evolução da salinização no aquífero Cabo, Planície do Recife-Pe. Pub. 11^o Abas - 5^o ALHSUD. 1st Joint World Congress on Groundwater, Fortaleza-Ceará-Brazil – Pub. 11^o Abas- 5^o ALHSUD. CD-ROM / ABASTECE. Pp 13-15
- Morais, J.O., 1970. Contribuição ao estudo de "beach-rocks" do Nordeste do Brasil. *Trabalhos Oceanográficos*. Recife. **9**(11), 16p.
- Morais, J.O. & Sousa, J.V., 1971. Transporte e sedimentação de dunas no município de Fortaleza (Ceará-Brasil). *Est. Sed. UFRN*. 1(1): 73-81.
- Morais, J.O., 1980. Aspectos da Geologia Ambiental Costeira do Município de Fortaleza-Ceará – Aproved Thesis for Professoship at the Departament of Geology
- Morose, Ali A; Herrick's, Stephen B. & Henderson, Peter, 1999, saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey. *Journal of Applied geophysics*. 42 p1-9. Elsevier Science Ltd.
- Mota, R.F. 1998. Geologia e Diagnóstico Geoambiental da Região das Pedrerías de Itaitinga, Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geologia – UFC. Publicação Interna.
- Nascimento, D.A.; Gava, A.; Pires, J.L.; Teixeira, W. (1981). Geologia. IN: Projeto RADAMBRASIL, Folha Fortaleza, Volume 21: 23 - 112. DNPM/MMM, Brasília
- Nowroozi, .A. A. & Hoorocks, S. B.; Henderson, P., 1999, Saltwaterintusion into Freshwater Aquifer in the Eastern Shore of Virginia: a Reconnaissance Electrical Resistivity Survey *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, London, 22pp.
- Oliveira, A.I. & Leonardos, O.H., 1940. Geologia do Brasil. Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, 813p.
- Orellana, E. 1972 - *Prospeccion geoeletrica en corriente continua*. Ed. Paraninfo, Madrid, 523 pp.
- Paiva, I.O., & Viana, M.S.S., 1985. Mapeamento geológico da região do Iguape Aquiraz-Ceará-Brasil) *Relatório de Graduação*. UFC. Fortaleza 101p.
- Lopez-Geta, J. A; Dios Gomez de, J; Orden de la, J. A; G. Ramos y L. Rodríguez, eds. 2003. Tecnologia de la intrusion de agua de mar en acuíferos costeros; países

- mediterrâneos. Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeologia y Águas Subterrâneas nº 8. ISBN: 84-7840-471-6 (Tomo II) Madrid
- Parasnis, D. S., 1986. Principles of Applied Geophysics, Chapman and Hall, London and N. Y. 402p.
- Passos, C.A.B. & Gomes, F.E.M., 1979. Projeto Alcalina de Salgado; Relatório Final. Recife, DNPM/CPRM, 1979, V II.
- Peulvast, J.P.; Claudino Sales, V. 2000. Dispositivos morfo-estruturais e evolução morfotectônica da margem passiva transformante do Nordeste brasileiro. III Simp. Nacional de Geomorfologia, Campinas, 3 p.
- PIVOT / GOLDER ASSOCIATES, 2001. Projeto de monitoramento/gestão de água subterrânea de micro-áreas estratégicas Região Metropolitana de Fortaleza.
- RADAMBRASIL. Ministério das Minas e Energia. 1981. *Levantamento dos recursos naturais*. Folha AS.24- Fortaleza. Rio de Janeiro. 488p. il.
- Reynolds, John M., 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, England. 796p.
- Ribeiro, A.G.; Gonçalves, R. N. 1981. Climatologia. IN: Projeto RADAMBRASIL, Folha Fortaleza 21:458-475, MME, Brasília
- Ribeiro, J.A.P., 2001. Caracterização sedimentar e hidrogeológica da faixa costeira leste da Região Metropolitana de Fortaleza. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – Ce, 120p.
- Roy, S. Sorenshein. 1955. Delineation of Saltwater Intrusion in the Biscainy Aquifer, Eastern Dade County Florida U. S. Department of the Interior – U. S. –Water – Resources Investigations Report 96-4285.
- Sá, Tadeu Dote. (1998). Avaliação de Impactos Ambientais na Mineração Britaleza – EIA e RIMA – SEMACE (Relatórios Internos)
- Saadi, A. & Torquato, J.R. 1992. Contribuição à neotectônica do Estado do Ceará. *Rev. Geol.* 5: 5-38.
- Sabadia, J.A.B.; Casas, A.; Maia L.P. & Himi, M., 2002. Salinização dos aquíferos da Praia do Pacheco – Município de Caucaia – Região Metropolitana de Fortaleza-Ce. 1st Joint World Congress on Groundwater, Fortaleza-Ceará-Brazil – Pub. 11^o Abas- 5^o ALHSUD. CD - ROM / ABASTECE.Paper 034.
- Salim, J.; Souza, C.J.; Muniz, G.C.B. and Lima M.R., 1975. Novos subsídios para a elucidação do episódio “Barreiras” no Rio Grande do Norte. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 7. Fortaleza. Atas... Fortaleza, SBG. 1975. p. 149-158.

- Santos, E. J. dos. et al., 1972. Mapa geológico preliminar do estado do Ceará, Recife, CPRM, Escala 1:500.000.
- Santos, E. J. dos. 1996. Ensaio sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província da Borborema. Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Salvador, Anais, &:47-50.
- Santos, E.J. dos & Brito Neves, B.B., 1984. Província Borborema. In: Almeida, F.F.M. de & Hasui, Y. (Coords.). O Pré-Cambriano do Brasil. Edgard Blucher, São Paulo, 123-186.
- Schoeller, H., 1956. *Geochemie des eaux souterraines. Application aux eaux des gisements de petrole.* Soc. Ed. Techinp Paris, 213 p.
- SEPLAN. 1994. Projeto Áridas: grupo de trabalho 1, recursos naturais e meio ambiente. Fortaleza: v.2.
- Sharma, P., 1997. *Environmental and engineering geophysics.* Cambridge University Press, XXIV, 475 págs.
- Shobbenhaus, C.; Campos, D. A.; Derze, G. R.; Asmus, H. E. (1984). Geologia do Brasil. Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da área Oceânica Adjacente incluindo depósitos minerais. Escala 1:2.500.000. DNPM, Brasília, 501p.
- Short, A.D. & Hesp, P. A. 1982. Wave, beach and dune interections in the Southeastern Australia. *Marine Geology*, 48: 25-284.
- Shultz, A.W. 1984. Subaerial debris flow deposition in the Upper Paleozoic Cutler Formation, Western Colorado. *J. Sediment. Petrol.*, 54: 759-772.
- Sidrim et al 1987
- Silva, A.B. da & Silva, F.A.C., 1970. Inventário hidrogeológico do Nordeste. Folha no5 – Fortaleza. SUDENE. *Série Hidrogeologia*, p. 27. 161.
- Silva Junior, G.C.; Lowsby, M.G.; Alves, M.G; Ferrucio, P.L.; Monteiro, A.C. & Almeida, R.R., 2000. A problemática da intrusão salina nos aquíferos costeiros do Leste Fluminense: um estudo de caso – A região oceânica de Niterói. 1st Joint World Congress on Groundwater, Fortaleza-Ceará-Brazil – Pub. 11^o Abas- 5^o ALHSUD. CD-ROM / ABASTECE. Pp 13-14.
- Siqueira, L., 1967. Contribuição da Geologia à Pesquisa de água subterrânea no cristalino. *Água Subterrânea*, 9, p.1-29.
- Souza, D.C.; Jardim de Sá, E.F.; Matos, R.M.D.; Oliveira, D.C., 1999. Deformação sin e pós Formação Barreiras na região de Ponta Grossa (Ipacuí-CE), litoral ocidental da Bacia Potiguar. In: Simp. Nac. Est. Tect. 7, Lençóis. *Anais*. Sessão 4: 90-93.

- Souza, M.J.N., Lima, F.A.M. & Paiva, J.B., 1979. Compartimentação topográfica do Estado do Ceará. *Ciê. Agrônômica*. Fortaleza, 9 (1-2): 77-86.
- Souza, M.J.N., 1983. O Estado do Ceará: Geomorfologia ambiental e problemas conservacionistas. Tese para concurso de professor titular. Universidade Federal do Ceará. Departamento de Geociências. Fortaleza – Ceará.
- Souza, M.J.N., 1988. Contribuição ao estudo das unidades morfo-estruturais do Estado do Ceará. *Revista de Geologia*. Imprensa Universitária --UFC. Fortaleza – Ceará. v1, no1. p73-91.
- Stamford, W.J.P., 1986. Hidrogeologia da Região Metropolitana de Fortaleza-Ce. In: Congresso Brasileiro de Água Subterrânea. 4^o. Anais Brasília; 303-314.
- Stewart, M. & R. E. Bretnall 1986 - Interpretation of VLF resistivity data for ground water contamination studies. *Ground Water Monitoring Review*, Vol. 6, n^o. 1, p. 71-75.
- Theis, C.V., 1935. The lowering of the piezometer surface and the rate and discharge of a well using ground-water storage. *Transactions, American Geophysical Union*, 16:519-24.
- Vandoros, P.; Oliveira, M.A.F. 1968. O fonólito de Messejana-CE. *Academia Brasileira de Ciências*, 203-206, RJ
- Walker, T. R., 1979. Red color in dune sand. In: McKee, E.D. ed. *A study of global sand seas*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1052. p. 61-81.
- Winsauer, W.; Perkins, F.M. & Brannon, H.R. 1956. Interrelation of resistivity and potencial of shaley reservoir rock. *Journ. Petrol. Technol.* 6 (8): 28-34.
- Vieira Filho, Elísio. 2002. Relações água doce/ água salgada na Região Metropolitana de Fortaleza, Implicações para gestão adequada dos aquíferos costeiros. Dissertação de Mestrado no Departamento de Geologia da UFC, 100pp.
- Zarroca, M. 1980. Aplicaciones de la geofísica eléctrica al estudio de la hidrogeología de formaciones aluviales. Tesis Doctoral Universidad Autónoma de Barcelona.

ANEXOS
