



Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências - IG

***DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE INTRÍNSECA À
POLUIÇÃO E TRANSPORTE DE CONTAMINAÇÃO: UMA
FERRAMENTA PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS
SUBTERRÂNEOS NA ÁREA DO PORTO DO PECÉM, CE***

LUCIANO SOARES DA CUNHA

Tese de Doutorado

Nº 95

2009

Luciano Soares da Cunha

***DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE INTRÍNSECA À
POLUIÇÃO E TRANSPORTE DE CONTAMINAÇÃO: UMA
FERRAMENTA PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS
SUBTERRÂNEOS NA ÁREA DO PORTO DO PECÉM, CE***

Prof. José Elói Guimarães Campos
(Orientador)

Prof. Raimundo Mariano G. C.Branco
(Co-Orientador)

Banca Examinadora:

Prof.Dr. José Elói Guimarães Campos - IG/UnB

Prof.Dr. Augusto César B. Pires - IG/UnB

Prof.Dr. Luiz Parente Maia - LABOMAR/UFC

Prof.Dr. Chang Kiang - UNESP

Profa.Dra. Noris Costa Diniz - IG/UnB

Brasília – 2009

...o segundo leva uma eternidade para deixar de sê-lo!
A. Einstein

AGRADECIMENTOS

...às pessoas que, de várias formas, contribuíram para a realização deste trabalho.

- Ao Lab. de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto da Univ. Federal do Ceará (LGP/UFC), na pessoa do Prof. Mariano Castelo Branco, por não medir esforços para a viabilização dessa pesquisa. Muito Obrigado!!

- Ao Prof. José Elói G. Campos por sua paciência, amizade e disciplinar orientação. Muito Obrigado!!

- À você minha rainha que sempre me incentivou e proporcionou todas as condições ideais para que isso acontecesse. Além de presentear com a nossa anjinha dourada de cabelo cacheado. Eternamente grato!!

- Agradeço à Universidade de Brasília e ao Instituto de Geociências pela oportunidade e infraestrutura cedida.

- Ao CNPq pela concessão da bolsa de doutorado.

- Aos bolsistas e também amigos do LGP/UFC, em especial ao Geól. Mauro S. Lisboa, Geól. Tércyo R. Pino, Geól. Carlos Eduardo Santos e Geól. Jackson A. Martins por auxílios sem os quais essa pesquisa não seria possível. Muito Obrigado!!

- Aos Amigos Ricardo M. Geremias, Eduardo Zaniboni e Rodrigo Vaz por incontáveis estadias gratuitas em suas residências oficiais ao longo dos trabalhos de campo. Muito Obrigado!!

- Aos funcionários do Instituto de Geociências da UnB por proporcionar uma passagem menos burocrática ao longo do doutorado.

- Aos companheiros da pós-graduação por todos os momentos de contribuição profissional e pessoal. Em especial a Tati de Almeida, Tatiana, Lara Nigro e Paulo Henrique.

- Aos professores do IG que ao longo desses anos sempre contribuíram de forma especial entre eles Henrique Roig, Paulo Meneses, Augusto Pires, Elton Dantas e Detlef Wade.

SUMÁRIO

<u>DEDICATÓRIA</u>	<i>iii</i>
<u>AGRADECIMENTOS</u>	<i>iv</i>
<u>SUMÁRIO</u>	<i>v</i>
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	<i>vii</i>
<u>LISTA DE TABELAS</u>	<i>xii</i>
<u>SIGLAS E ACRÔNIMOS</u>	<i>xiv</i>
<u>RESUMO</u>	<i>xv</i>
<u>ABSTRACT</u>	<i>xvi</i>
<u>CAPÍTULO I:</u>	
INTRODUÇÃO	01
1.1 - JUSTIFICATIVA	01
1.2 – OBJETIVOS	02
1.3 – ÁREA DE PESQUISA, LOCALIZAÇÃO E ACESSO	03
<u>CAPÍTULO II:</u>	
MATERIAIS E MÉTODOS	04
2.1 – MATERIAIS	04
2.2 – MÉTODOS	06
<u>CAPÍTULO III:</u>	
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	11
3.1 – CLIMATOLOGIA	11
3.2 – PRECIPITAÇÃO	13
3.3 – VEGETAÇÃO	16
3.4 – GEOMORFOLOGIA	17
3.5 – PEDOLOGIA	22
3.6 – HIDROLOGIA	27
3.7 – GEOLOGIA	30
3.8 – GEOFÍSICA	38
<u>CAPÍTULO IV:</u>	
PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS	57
4.1 – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	57
4.2 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	60

4.3 – CAPACIDADE ESPECÍFICA	72
4.4 - NÍVEL ESTÁTICO	74
4.5 – RECARGA	79
4.6 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO	83

CAPÍTULO V

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS AQÜÍFEROS: UMA ANÁLISE CRÍTICA

5.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	89
5.2 - MÉTODOS PARAMÉTRICOS OU INDEXADORES	91
5.3 - PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS	94
5.4 - PROPOSIÇÃO DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO	110
5.5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	115
5.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	122

CAPÍTULO VI

MODELO QUANTITATIVO DE FLUXO SUBTERRÂNEO

6.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	123
6.2 - EQUAÇÕES GOVERNANTES DO FLUXO	123
6.3 - MÉTODOS NUMÉRICOS	128
6.4 – MODELO QUANTITATIVO DE FLUXO SUBTERRÂNEO	133
6.5 - MODELO PREVISIONAL DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES	144

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

157

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 – Localização e via de acesso à área de doutorado contida na área do projeto do LGPSR/UFC.	3
Figura 2.1 – Distribuição e organização dos materiais utilizados nesta pesquisa convergindo para a estruturação de um banco de dados e, por conseguinte para os produtos temáticos.	4
Figura 3.1 - Circulação observada no Oceano Pacífico Equatorial em anos sem a presença do El Niño ou La Nina (CPTEC/INPE).	12
Figura 3.2 Padrão de circulação observada em anos de El Niño na região equatorial do Oceano Pacífico (CPTEC/INPE).	12
Figura 3.3a- Zona de Convergência Intertropical visualizada em imagens do satélite METEOSAT-7 em maio de 1998.	12
Figura 3.3b- Máxima atividade convectiva da ZCIT (FUNCEME, http://www.funceme.br).	12
Figura 3.4 – Distribuição geográfica dos postos pluviométricos próximos ao Complexo do Pecém e detalhe ressaltando o posicionamento dos pluviômetros instalados na área de interesse.	14
Figura 3.5 – Séries históricas entre os anos de 1977 a 2006 para os postos pluviométricos	15
Figura 3.6 – Caracterização do período de déficit e excesso hídrico através do monitoramento da precipitação entre julho/2005 a julho/2006 dentro da área de pesquisa.	15
Figura 3.7 Comparação da pluviosidade total do período monitorado em 06 locais evidenciando a redução acentuada da precipitação com o aumento da distância do litoral.	15
Figura 3.8 – Formas de ocupação das espécies arbustivas sobrepostas aos neossolos quartzarênicos das dunas semi-fixas (a) e arbóreas atuando no processo de pedogênese em dunas fixas (b).	17
Figura 3.9 a) – Exposição da espécie Copernicia prunifera (carnaúba) exemplo de tipos lenhosos da Classe III. B) Iresine portucaloides (bredinho de praia) representante arbustivo da Classe IV e V.	17
Figura 3.10 – Resultado NDVI e as relações espaciais entre as classes I a V, ordenadas em sentido horário.	18
Figura 3.11 – Modelo Digital de Elevação ressaltando as principais unidades geomorfológicas e demais feições fisiográficas da região da área de pesquisa.	19
Figura 3.12 – Imagem do sensor Quickbird (out/2000) ressaltando a morfodinâmica do campo de dunas ao sul da localidade de Taíba, município de São Gonçalo do Amarante. A direção E, ESE e SE	20
Figura 3.13 – Vista para sul da área indicando a zona de transição da planície litorânea (depósitos eólicos) com os glaciais pré-litorâneos e os maciços residuais inseridos na depressão sertaneja ao	22
Figura 3.14 – Mapa pedológico em escala 1:100000 na região da área de pesquisa.	27
Figura 3.15 – Rede hidrográfica da região da área de pesquisa ressaltando o comportamento das principais drenagens existentes e os limites de suas respectivas bacias e micro bacias.	29
Figura 3.16 – Compartimentação geológica-geomorfológica para o litoral do Estado do Ceará (Maia, 1998).	30
Figura 3.17 – Mapa geológico da região do Pecém em escala 1:100000 (CPRM/ 1995) e em escala 1:50000 da região do plano diretor do CIPP (Nogueira & Augusto, 2004).	31
Figura 3.18 – Serra do Mineiro com exposição do anfíbólio-biotita gnaisse no extremo sul da área. Esse material foi utilizado no arrocamento do Porto do Pecém	32

Figura 3.19 - Quartzitos expostos durante a maré baixa de sizígia, localizados próximo à ponte de acesso do Porto do Pecém.	32
Figura 3.20 – Contato superior do Grupo Barreiras com neossolos quartzarênicos sobrepostos na região centro-sul da área de pesquisa.	34
Figura 3.21 – Área de empréstimo de areia expondo a parte superior do Grupo Barreiras na parte central da área de pesquisa.	34
Figura 3.22 – Vegetação arbustiva atuando na fixação das cristas de dunas de 2ª geração.	35
Figura 3.23 – “Braços” de uma duna de 2ª geração sendo fixado pela vegetação gramínea à esquerda e arbustiva à direita.	35
Figura 3.24 - Eolianitos com cerca de 10,0m de altura com depósitos tabulares suavemente inclinados. Localizado no limite oeste da área, próximo à Taíba.	36
Figura 3.25 - Eolianitos em níveis milimétricos, mostrando a presença de bioturbações (em forma de dutos) cortando a estratificação.	36
Figura 3.26- Avanço do campo de dunas por sobre um coqueiral e a consequência de uma ocupação urbana desordenada.	37
Figura 3.27 - Superfície de deflação (<i>blow out</i>) expondo sedimentos da segunda geração de dunas, próximo ao porto.	37
Figura 3.28 – Berma com 40,0 cm de espessura com estratificações cruzadas tabulares. Diferença de coloração nos níveis milimétricos deve-se a variação na granulometria das areias.	38
Figura 3.29– Extensão elevada e baixa declividade da Zona de Intermaré.	38
Figura 3.30 – Distribuição das Sondagens Verticais Elétricas e localização dos perfis geoeletricos na região da área de pesquisa.	39
Figura 3.31 – Curva típica de resistividade elétrica <i>versus</i> AB/2 para a área de pesquisa e etapas do processamento realizado com os dados obtidos.	41
Figura 3.32 – Coluna geoeletrica típica ressaltando as diferenças físicas entre os materiais terrígenos em profundidade.	42
Figura 3.33 – Perfil geoeletrico 1 obtido com o resultado das inversões dos dados das SEVs executadas na parte leste da área de pesquisa.	43
Figura 3.34 – Perfil geoeletrico 2 elaborado com o resultado das inversões dos dados das SEVs executadas na parte leste da área.	44
Figura 3.35 – Perfil geoeletrico 3 orientado paralelo ao litoral e elaborado com o resultado das inversões dos dados das SEVs.	44
Figura 3.36 – Mapa de localização da área de pesquisa e perfis geofísicos de Cavalcante (2006).	45
Figura 3.37 – Pseudo-Seções e mapas de isocondutividade elétrica para abril/2005	47
Figura 3.38 – Pseudo-Seções e mapas de isocondutividade elétrica para outubro/2005	48
Figura 3.39 - Mapas de Isocondutividade. a) Dh10; b) Dh20; c) Dh40; d) Dv10; e) Dv20; f) DV40	50
Figura 3.40 – Bloco diagrama ressaltando as relações conceituais interdisciplinares para as unidades encontradas na área de pesquisa.	52
Figura 3.41 – Cacimba escavada no embasamento cristalino para captação de água subterrânea próxima à BR-222. No canto superior esquerdo, detalhe da parede interna e do nível d'água.	53

Figura 3.42 – Saprólito típico no qual uma grande parte das cacimbas do aquífero fissural é escavada.	53
Figura 3.43 – Ponto de descarga de água subterrânea oriunda do campo de dunas formando lagoa interdunar no centro-sul da área.	55
Figura 3.44 – Técnica manual empregada na construção de poços para captação de água subterrânea no Aquífero Dunas.	55
Figura 3.45 – Modelo Hidrogeológico Conceitual para a região da área de pesquisa.	56
Figura 4.1 - Distribuição da condutividade hidráulica vertical por ordem de grandeza.	58
Figura 4.2 - Distribuição da condutividade hidráulica horizontal por ordem de grandeza.	59
Figura 4.3 - Localização dos pontos amostrados para análise granulométrica.	61
Figuras 4.4a e 4.4b - Distribuição Granulométrica para amostras coletadas entre 0 – 1m de profundidade e à direita, para o Poço 01.	64
Figuras 4.5a e 4.5b - Distribuição Granulométrica para o Poço 02 e à direita, para o Poço 03.	65
Figuras 4.6a e 4.6b - Distribuição Granulométrica para o Poço 05 e para o Poço 06.	65
Figuras 4.7a e 4.7b - Distribuição Granulométrica para o Poço 07 e à direita, para o Poço 08.	65
Figuras 4.8a e 4.8b - Distribuição Granulométrica para o Poço 09 e à direita, para o Poço 10.	66
Figuras 4.9a e 4.9b - Distribuição Granulométrica para o Poço 11 e à direita, para o Poço 12.	66
Figuras 4.10a e 4.10b - Distribuição Granulométrica para o Poço 13 e à direita, para o Poço 14.	66
Figura 4.11 - Distribuição granulométrica em relação à condutividade hidráulica evidenciando uma ausência de correlação para as ordens de grandeza 10^{-1} cm/s e 10^{-2} cm/s.	67
Figura 4.12 - Distribuição granulométrica em relação à condutividade hidráulica evidenciando uma ausência de correlação para as ordens de grandeza 10^{-1} cm/s e 10^{-2} cm/s.	67
Figura 4.13 - Resultados obtidos para a Equação I: (a) Relação entre os dados observados e simulados. (b) Ajuste das três equações para cada ponto analisado.	71
Figura 4.14 – Localização dos pontos de monitoramento do NE dentro da área de pesquisa quanto em sua adjacência.	75
Figura 4.15 – Variação do nível estático monitorado no Aquífero Barreiras.	76
Figura 4.16– Variação do nível estático monitorado no Aquífero Barreiras.	76
Figura 4.17 – Variação do nível estático monitorado Aquífero Dunas.	77
Figura 4.18 – Variação do nível estático em parte do Aquífero Dunas.	77
Figura 4.19 – Componentes ativos de um balanço hídrico onde a recarga representa a quantidade de água efetiva que alcança a zona saturada (Oliveira, 2000).	79

Figura 5.1 - Relação dos parâmetros utilizados pelos métodos de avaliação de vulnerabilidade intrínseca. Os diversos parâmetros específicos estão representados por “X”.	94
Figura 5.2 – Grau de importância relativa dos condicionantes: atenuação, resistência vertical e transporte de contaminantes na conceituação da vulnerabilidade intrínseca.	110
Figura 5.3 - Parâmetros hidrogeológicos considerados para cada condicionante.	111
Figura 5.4 - Mapa de Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero obtido com o método DRASTIC.	118
Figura 5.5 - Mapa de Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero obtido com o método SINTACS.	119
Figura 5.6 - Mapa de Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero obtido com o método GOD.	120
Figura 5.7 – Mapa de Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero obtido com o método SORETO, aplicando peso aos parâmetros com maior resolução de informação.	121
Figura 6.1 - Ponto de vista conceitual: a) unidades geológicas; b) abordagem de aquífero (a distribuição da carga é calculada apenas para o aquífero confinado); c) visto como um sistema de fluxo (as propriedades hidráulicas são determinadas para todas as camadas e a carga calculada nas três camadas) (adaptado de McDonald & Harbaugh, 1988).	124
Figura 6.2 - Volume Elementar Representativo (REV) utilizado na derivação da equação governante. O componente do fluxo (q_y) ao longo do eixo y está em evidência (adaptado de McDonald & Harbaugh, 1988).	126
Figura 6.3 - Molécula computacional de diferença finita tri-dimensional (Adaptado de Anderson, 1992).	129
Figura 6.4 - <i>Grid</i> do tipo bloco-centrado para um modelo bi-dimensional de um aquífero livre (Adaptado de Anderson, 1992).	130
Figura 6.5 - Diagrama esquemático de um modelo tri-dimensional. Todas as unidades estratigráficas estão representadas por uma ou mais camadas (Adaptado de Anderson, 1992).	131
Figura 6.6 - <i>Grids</i> bi-dimensionais de diferenças finitas: a) domínio do problema; b) <i>grid</i> de diferença finita do tipo bloco-centrado onde o contorno do tipo fluxo-nulo é localizado na borda do bloco (célula) e o contorno do tipo rio é localizado sobre os nós; c) <i>grid</i> de diferença finita do tipo rede-centrada onde os contornos localizam-se sobre os nós (Adaptado de Anderson, 1992).	132
Figura 6.7 - Principais condições de contorno encontradas no modelo de fluxo subterrâneo (Anderson, 1992).	133
Figura 6.8 - Domínio e discretização considerados para o modelo de fluxo hídrico subterrâneo da área de influência do Porto do Pecém.	135
Figura 6.9 – Zonas de condutividade hidráulica delimitadas com base nos dados pontuais de carga variável.	136
Figura 6.10 – Principais tipos de condições de contorno utilizados no modelo de fluxo.	137
Figura 6.11 - Distribuição dos pontos de observação cujos valores de nível d’água foram medidos entre março de 2005 e julho de 2006, utilizados na calibração do modelo no estado estacionário.	138
Figura 6.12 - a) Relação gráfica entre os valores calculados e observados para o nível d’água para o modelo de fluxo com um RMS de 4,08% e um coeficiente de correlação de 0,991. b) Histogramas de resíduos com comportamento bem ajustado ao padrão gaussiano.	139
Figura 6.13 - Mapa potenciométrico para a área modelada ressaltando o fluxo principal em direção ao oceano e, localmente, as principais drenagens.	140
Figura 6.14 - Distribuição dos poços tubulares utilizados nos cenários atual e previsual.	142

Figura 6.15 - Zonas de captura produzidas após 1760 dias evidenciadas pela utilização de partículas envolta de alguns poços tubulares e nas áreas que terão atividades potencialmente poluidoras no CIPP.	143
Figura 6.16 - Mapa potenciométrico para o cenário do aumento de 50% na vazão de exploração dos poços tubulares. Obs.: No canto esquerdo inferior, detalhe do reduzido rebaixamento próximo a um conjunto de poços.	144
Figura 6.17 – Mapa potenciométrico para o cenário do aumento de 100% na vazão de exploração dos poços tubulares. Obs.: No canto esquerdo inferior, detalhe do reduzido rebaixamento próximo a um conjunto de poços.	145
Figura 6.18 – Comportamento advectivo de uma hipotética pluma contaminante de Benzeno na região prevista para a instalação de uma refinaria de hidrocarbonetos.	151

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 3.1 – Classes NDVI e as relações espaciais denotadas por suas áreas de exposição.	16
Tabela 3.2 - Correlação entre classes de solos segundo os critérios antigos e novos. Classes de solos mapeados e caracterizados na área de estudo até o terceiro nível categórico da classificação.	23
Tabela 4.1 - Apresenta os resultados obtidos para a Análise Granulométrica. Obs.: Silte (% Silte) não foi detectado em nenhuma amostra.	62
Tabela 4.2 - Funções de pedotransferência multiparamétrica para a condutividade hidráulica.	72
Tabela 4.3 – Valores de Capacidade Específica (Sy) em função da distribuição granulométrica (Johnson, 1967 In Healey & Cook, 2002).	73
Tabela 4.4 - Dados de do nível estático monitorados entre março de 2005 a julho de 2006. Obs.: a) Dados em negrito foram excluídos da análise direta por terem ausência de medida (NM) em algum mês de monitoramento. b) CS = Cacimbas no aquífero misto que secaram. c) X= Poço de Monitoramento depredado.	78
Tabela 4.5 – Classificação das metodologias de quantificação de recarga (Scalon, et al., 2002).	80
Tabela 4.6 – Valores de Recarga Líquida obtidos com a utilização da Equação 5.9.	83
Tabela 4.7 – Valores de Temperatura média e Precipitação pluviométrica para o período 2004 a 2006.	86
Tabela 4.8 – Resultados obtidos para a Evapotranspiração potencial para os anos entre 2004 a 2006.	87
Tabela 4.9 – Balanço Hídrico para o ano de 2004 considerando uma CAD de 100,0mm.	87
Tabela 4.10 – Balanço Hídrico para o ano de 2005 considerando uma CAD de 100,0mm.	88
Tabela 4.11 – Balanço Hídrico para o ano de 2006 considerando uma CAD de 100,0mm.	88
Tabela 5.1 - Resumo dos Fundamentos e Equações de alguns métodos paramétricos.	94
Tabela 5.2 - Relação dos parâmetros utilizados na avaliação da vulnerabilidade.	95
Tabela 5.3 - Índices e Peso DRASTIC para o tipo de aquífero.	96
Tabela 5.4 - Índices e Peso SINTACS para o tipo de aquífero.	97
Tabela 5.5 - Índices GOD para o tipo de material predominante do aquífero.	97
Tabela 5.6 - Índices e Peso DRASTIC para a recarga e para a infiltração do método SINTACS.	98

Tabela 5.7 - Técnicas de quantificação da recarga (Scalon <i>et al.</i> , 2002).	99
Tabela 5.8 - Índices e Peso DRASTIC para a declividade.	99
Tabela 5.9 - Índices e Peso DRASTIC e SINTACS para o solo.	102
Tabela 5.10 - Índices DRASTIC e SINTACS para o parâmetro condutividade hidráulica.	104
Tabela 5.11 - Valores de condutividade hidráulica utilizados pelo método AVI para os principais materiais terrígenos.	104
Tabela 5.12 - Índices DRASTIC e SINTACS para o impacto da zona vadosa na avaliação de vulnerabilidade.	105
Tabela 5.13 - Índice GOD para a zona vadosa considerando a consolidação e tipo predominante do material.	107
Tabela 5.14 - Índices DRASTIC e SINTACS para a profundidade do nível estático/potenciométrico.	108
Tabela 5.15 - Índice GOD para a profundidade do nível d'água.	108
Tabela 5.16 - Fatores de normalização para o nível estático/potenciométrico do Índice de Atenuação do Solo (SAI).	108
Tabela 5.17 - Fatores de normalização para o conteúdo de argila e de carbono orgânico do Índice de Atenuação do Solo (SAI).	109
Tabela 5.18 - Fatores de normalização para a capacidade de troca catiônica e pH do Índice de Atenuação do Solo (SAI).	109
Tabela 5.19 - Tabela de índices de potencial poluidor dos parâmetros do método SORETO.	113
Tabela 6.1 – Valores de condutividade hidráulica utilizados no modelo de fluxo.	136
Tabela 6.2 - Balanço Hídrico para o modelo calibrado para a área de pesquisa.	140
Tabela 6.3 - Balanço Hídrico para o cenário atual de exploração dos recursos hídricos subterrâneos pelos poços.	143
Tabela 6.4 - Balanço Hídrico para o cenário com exploração dos recursos hídricos subterrâneos pelos poços tubulares.	146

SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABAS - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas.

ANA - Agência Nacional de Águas.

ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

CPTEC - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto de Pesquisas Espaciais.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos.

JPL/NASA - *Jet Propulsion Laboratory*.

LABOMAR - Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará.

LGPSR - Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Ceará.

LABSR – Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento da Universidade de Brasília.

LABSOLO – Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal do Ceará.

NASA - National Aeronautics and Space Administration of United States of America.

SETECO - Secretaria dos transportes, energia, comunicação e obras. Governo do Ceará.

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission.

RESUMO

Esta pesquisa trata da avaliação da sensibilidade dos métodos semi-quantitativos indexadores e dos modelos matemáticos de fluxo e transporte na determinação da vulnerabilidade do aquífero à poluição em zonas costeiras. Diversos dados como mapeamento geológico e pedológico, levantamento geofísico elétrico e eletromagnético, ensaios de condutividade hidráulica e análises granulométricas foram obtidos na área de influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém no Ceará para auxiliar na elaboração do modelo hidrogeológico conceitual. A quantificação de recarga foi realizada pela associação dos resultados granulométricos obtidos com o método de variação do nível estático. Já a evapotranspiração real foi calculada pelo método Thornthwaite. Todos os dados obtidos serviram de base para a análise crítica dos parâmetros hidrogeológicos e sua hierarquização pelos principais métodos de avaliação da vulnerabilidade à poluição do aquífero. Com base nesses resultados foi proposta uma nova hierarquização dos parâmetros os quais foram sintetizados em um novo método de avaliação da vulnerabilidade. Além disso, os dados primários subsidiaram a elaboração de um modelo tri-dimensional do fluxo subterrâneo e do transporte de contaminantes com o intuito tanto de avaliar a aplicação desses modelos matemáticos no gerenciamento de recursos hídricos costeiros como determinar o grau de sensibilidade dos métodos indexadores por uma confrontação de resultados. Considerou-se o embasamento cristalino, o Grupo Barreiras, os depósitos eólicos e de praia, e aluviões como as unidades litológicas no modelo conceitual. O sistema aquífero compreende: aluviões, aquífero livre dos depósitos eólicos e de praia, aquífero livre do Grupo Barreiras. O embasamento cristalino sotoposto pelo Grupo Barreiras e pelos depósitos eólicos e de praia serve de base impermeável para os sistemas aquíferos.

Com base na integração de dados pode-se concluir que: (1) A recarga na área de pesquisa calculada com base no método de variação do nível estático onde para a região litorânea apresenta valores da ordem de 100 mm/ano, enquanto para os sedimentos arenosos quaternários e para os sedimentos areno-argilosos terciários apresentam valores da ordem de 300 e 200 mm/ano, respectivamente. (2) A evapotranspiração real determinada para a área de pesquisa pelo método de Thornthwaite aponta para valores regionais da ordem de 700 mm/ano, mas, aparentemente superestimados quando comparados com os dados obtidos com o modelo matemático de fluxo que indicam valores 50% menores. (3) As condutividades hidráulicas vertical e horizontais apresentam a mesma ordem de grandeza independente do material terrígeno analisado onde foi possível identificar três regiões homogêneas e isotrópicas compostas por valores com ordem de grandeza de 10^{-5} cm/s, 10^{-3} cm/s e 10^{-1} cm/s, respectivamente, Grupo Barreiras, depósitos eólicos / de praia e aluviões. (4) A reorganização e a incorporação de novos parâmetros tendem a realçar da melhor forma possível o conceito mais aceito de vulnerabilidade. Os pesos utilizados pelos métodos DRASTIC e SINTACS não são eficazes para delimitar áreas com diferentes graus de vulnerabilidade sem sofrer influências excessivas de algum parâmetro hidrogeológico. O método GOD tende a superestimar em classes de alta e muita vulnerabilidade. A melhor resposta com o método SORETO foi obtida quando somente os parâmetros com alta resolução espacial foram ponderados. (5) Premissas aplicadas ao modelo hidrogeológico conceitual foram confirmadas considerando o modelo de fluxo que apresenta um erro RMS de 4%. Esse modelo matemático também demonstra que para os dois cenários avaliados: situação de bombeamento atual e poços explotando o dobro da vazão (com relação à atual) há uma grande disponibilidade hídrica subterrânea ainda disponível na área de pesquisa. (5) A área prevista para a instalação de uma refinaria é considerada como adequada com relação às considerações e premissas advectivas adotadas nos modelos de fluxo e transporte de contaminantes avaliados.

ABSTRACT

This research deals with the evaluation sensitivity of the semi-quantitative index methods and mathematical models of flow and transport to determining the vulnerability of the aquifer to pollution in coastal areas. Several data such as geological and soil mapping, electrical and electromagnetic geophysical surveys, tests of hydraulic conductivity and grain size analysis were obtained to the area of influence of the Industrial and Harbor Complex of Pecém, Ceará State Brazil, to assist the preparation of the hydrogeological conceptual model. The quantification of recharge was carried out by the association of granulometric results obtained with the method of variation of the static level. The actual evapotranspiration was calculated by the Thornthwaite method. All data obtained served as the basis for critical analysis of hydrogeological parameters and their ranking by the major methods for assessing vulnerability to pollution of the aquifer. Based on these results it was proposed a new ranking of the parameters which were summarized in a new method for assessing vulnerability. Furthermore, the primary data support the development of a three-dimensional groundwater flow and transport model of contaminants in order both to assess the application of mathematical models in coastal water resources management, and determine the degree of sensitivity of methods and the comparison of results. The basement, the Barreiras Group, the Aeolian and Beach deposits, and alluvium were considered as the lithological units in the conceptual model. The aquifer system includes: the alluvium, the Beach, and the Barreiras unconfined aquifers. The Crystalline Basement under the Barreiras Aquifer, the Aeolian and Beach deposits and the Alluvium is considered the basis for the aquifer system.

Based on the data integration it can be conclude: (1) The recharge for the search area estimates on the static level variation method for the coastal region which presents values of the order of 100 mm/year while the sandy sediments and the sandy-clayey Tertiary deposits show values around 300 and 200 mm/year, respectively. (2) The actual evapotranspiration for the area determined by the Thornthwaite method shows regional values of the order of 700 mm/year, apparently overestimated when compared with data obtained with the mathematical model that indicate values 50% lower. (3) The vertical and horizontal hydraulic conductivity show the same order of magnitude independent of the terrigenous material examined where it was possible to identify three regions of homogeneous and isotropic values with order of magnitude of 10^{-7} m/s, 10^{-5} m/s and 10^{-3} m/s, respectively, Barreiras Group material, Beach deposits and Alluvium. (4) The reorganization and incorporation of new parameters tend to highlight the best way possible the most accepted concept of vulnerability. The weights used by the DRASTIC and SINTACS methods are not effective to delimit areas with different degrees of vulnerability without incurring excessive influence of some hydrogeological parameter. The GOD method tends to overestimate classes of high and very high vulnerability. The best response with the SORETO method was obtained only when the parameters with high spatial resolution have been considered. (5) Premises applied to the hydrogeological conceptual model was confirmed considering the type of flow that gives a RMS error of 4%. This mathematical model also shows that the two scenarios evaluated: current pumping situation of wells and double pumping rates flow, show that there is great groundwater availability in the region. (5) The area specified to the installation of a refinery is considered appropriate with regard to the considerations and advective assumptions adopted in the flow and transport models of contaminants.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - JUSTIFICATIVA

O gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil, a nível federal, foi iniciado na última década com a promulgação da Lei 9433 em 1997 instituindo a Política Nacional dos Recursos Hídricos e implementando novos princípios como, por exemplo, que a água é um bem de domínio público; que a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico e, que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas. Esses princípios e outros instrumentos incluídos na Lei 9433/97 desencadearam a criação de uma estrutura organizacional que tem o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a Secretária de Recursos Hídricos (SRH), os Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos e a Agência Nacional de Águas (ANA) como seus principais agentes e Comitês de Bacias Hidrográficas.

Dentre os instrumentos de gestão disponíveis a essas entidades e autarquias estão a outorga do direito de uso, as licenças ambientais, a cobrança pelo uso da água e o monitoramento qualitativo e quantitativo dos recursos hídricos. Em sua maior parte, as outorgas e as licenças vinculadas ao uso de recursos hídricos superficiais e/ou atividades industriais sobre aquíferos estão sendo baseadas nos monitoramentos quantitativos e qualitativos realizados por uma rede de monitoramento fluviométrico instalada no país.

Devido à complexidade em quantificar os recursos hídricos subterrâneos disponíveis e sua qualidade, a grande maioria das outorgas e licenças ambientais estaduais e federais só está substanciada por informações de superfície. Tal fato, pode comprometer as reservas hídricas subterrâneas no que concerne à vulnerabilidade à poluição e a falta de gerenciamento. Esse quadro agrava-se quando se trata da zona costeira devido a sua fragilidade intrínseca condicionada em sua maioria por aquíferos livres rasos, situados em uma região que concentra um quarto da população brasileira, aproximadamente 45 milhões de pessoas e, em franco crescimento industrial e populacional.

Os meios orientativos que estão sendo utilizados em licenciamentos e comitê de bacias, normalmente, quando existentes, baseiam-se em análises de mapas temáticos que ressaltam a vulnerabilidade à poluição dos aquíferos através de índices relativos. Tais produtos são oriundos de métodos semi-quantitativos, também denominados de indexadores, que computam a vulnerabilidade a partir do cruzamento de mapas temáticos de determinados parâmetros hidrogeológicos com importâncias diferenciadas no processo (ponderação). A escolha empírica dos parâmetros hidrogeológicos bem como seu grau de importância quando comparado aos

demais parâmetros pode criar subjetividades que geram questionamentos à confiabilidade de tais produtos.

Alternativas aos índices de vulnerabilidade têm sido a elaboração e utilização de modelos de fluxos subterrâneos e de transporte de contaminantes baseados em métodos numéricos que exigem um maior número de parâmetros e, assim, aparentemente implicam em um maior grau de confiabilidade.

A forma apresentada nessa pesquisa para dirimir melhor tal condição é a avaliação crítica tanto dos principais métodos indexadores de determinação da vulnerabilidade à poluição comparada à utilização integrada com um método quantitativo de fluxo subterrâneo e de transporte de contaminantes.

1.2 - OBJETIVOS

Os principais objetivos desta pesquisa são:

- a validação dos métodos indexadores de determinação da vulnerabilidade intrínseca à poluição de aquíferos;
- a integração desses resultados com um modelo quantitativo tri-dimensional de fluxo subterrâneo e de transporte de contaminantes como um método de determinação da vulnerabilidade específica à poluição de aquíferos costeiros.

Para complementar a esta estrutura final as seguintes metas deverão ser atingidas:

- Determinar quais parâmetros hidrogeológicos caracterizam a vulnerabilidade à poluição de um aquífero costeiro;
- Avaliar o grau de importância de cada parâmetro nos principais métodos indexadores;
- Analisar a resolução espacial mínima de distribuição dos parâmetros hidrogeológicos na caracterização da vulnerabilidade;
- Caracterizar o aquífero costeiro na área de influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Ceará;
- Elaborar e calibrar um modelo quantitativo de fluxo subterrâneo baseado no modelo hidrogeológico conceitual da área;
- Identificar as fontes de poluição potenciais pontuais e difusas;
- Simular o transporte de contaminantes para os cenários atual e futuro;
- Comparação e análise dos mapas temáticos de vulnerabilidade à poluição com o modelo de fluxo e de transporte de contaminantes;
- Determinação de áreas mais susceptíveis à poluição na área de influência do CIPP;
- Proposição de procedimentos para a implementação de atividades industriais e de áreas urbanas em zonas costeiras.

1.3 - ÁREA DE PESQUISA, LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A presente tese de doutorado contempla os principais objetivos de um projeto de pesquisa do Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Ceará (LGPSR/UFC) intitulado “Monitoramento de áreas contaminadas através de métodos geofísicos” que integra a Rede de Pesquisa 5 do edital 6 do Programa de Redes Cooperativas (CTPETRO/FINEP). Por questões de cronograma, logística e objetividade, a área específica de doutoramento tem dimensões reduzidas quando comparada a área do projeto, mas, ao longo do texto a maioria dos dados obtidos é apresentada para a área total do projeto sendo os processamentos mais específicos concentrados somente à área de tese.

A área de pesquisa com cerca de 200 km² localiza-se na porção litorânea oeste da Região Metropolitana de Fortaleza, Estado do Ceará, na divisa entre os municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante. Seus limites são determinados pelas coordenadas geográficas UTM-E 515.000, 525.000 e UTM-N 9.590.000, 9.612.000 (Figura 1.1).

O acesso rodoviário mais utilizado, a partir da cidade de Fortaleza, faz-se pela rodovia federal BR-222 no sentido da Praia de Icará até o entroncamento com a rodovia estadual CE-085, por onde se segue até o vilarejo de Coité, limite leste da área de pesquisa. A partir do qual se passa a trafegar pela rodovia estadual CE-348 até o Porto do Pecém, extremo norte da área.

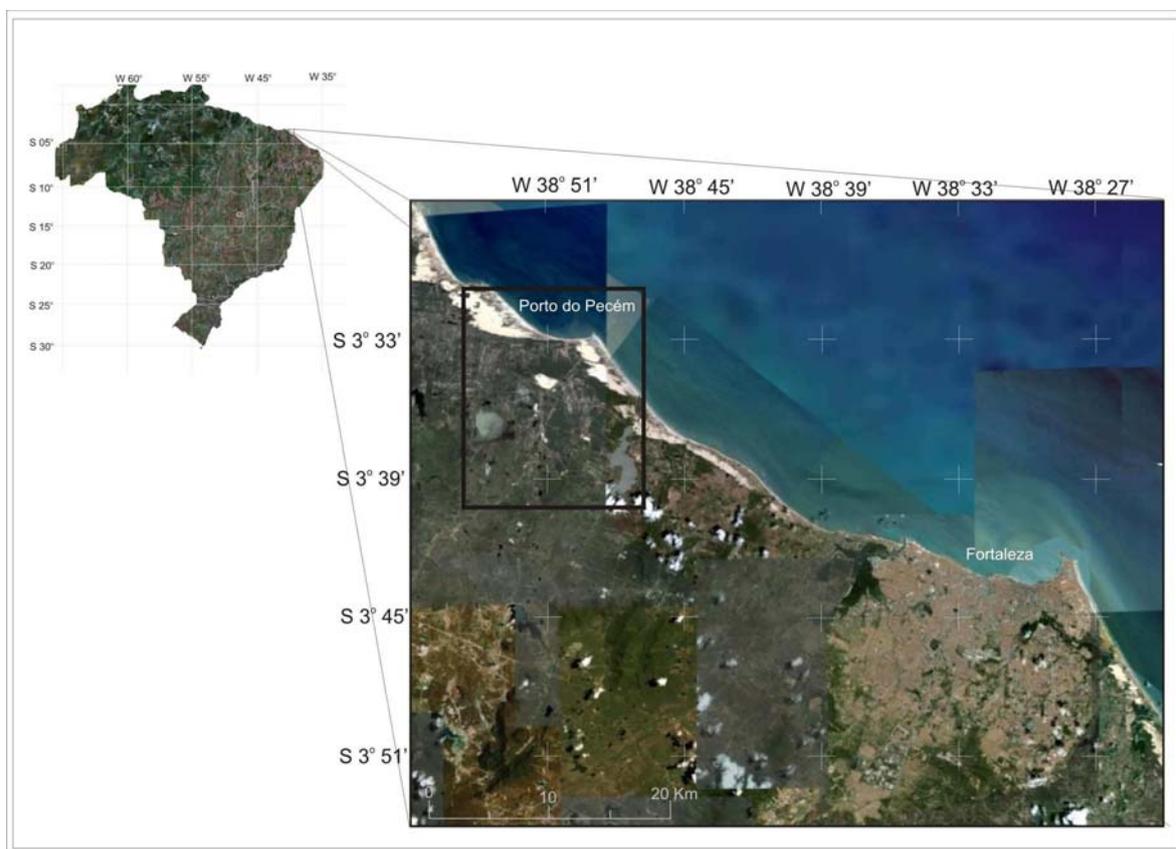


Figura 1.1 - Localização e via de acesso à área de doutorado contida na área do projeto do LGPSR/UFC.

CAPÍTULO II

MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - MATERIAIS

Os materiais empregados nesta pesquisa podem ser agrupados em três grupos básicos: Pré-existentes, Indiretos e Diretos (Figura 2.1).

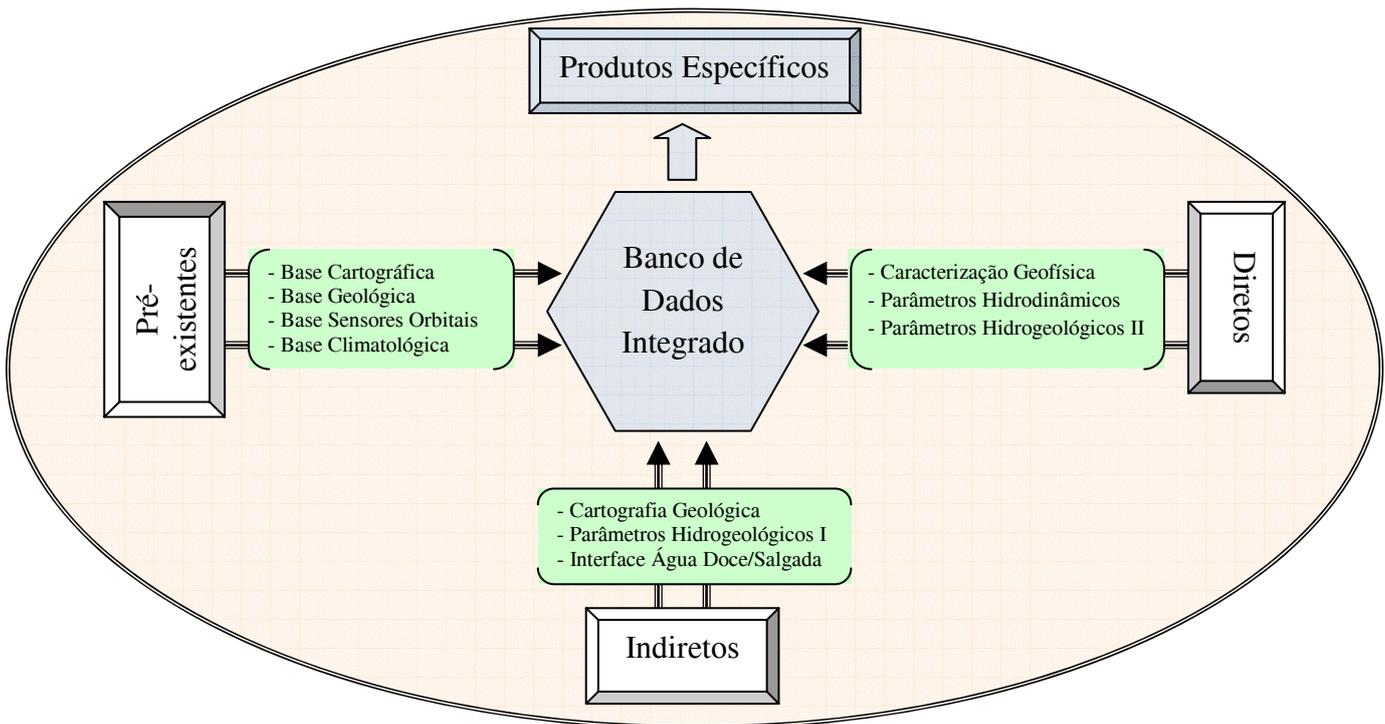


Figura 2.1 - Distribuição e organização dos materiais utilizados nesta pesquisa convergindo para a estruturação de um banco de dados e, por conseguinte para os produtos temáticos.

O primeiro grupo é constituído pelos dados e informações obtidos em órgãos governamentais e instituições de pesquisa para compor a:

- **Base Cartográfica Inicial:** composta pela carta plani-altimétrica 1:100.000 (SA.24-Z-C-IV) disponibilizada pelo IBGE contendo os planos de informação digitais: rede de drenagens, malha rodoviária, sedes municipais, etc. Dados plani-altimétricos da região do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) com curvas de nível espaçadas de 5,0 m foram fornecidos pelo LABOMAR;

- **Base Geológica Inicial:** mapa geológico do Estado do Ceará 1:500.000 em formato digital (Cavalcante, 2003) e mapa geológico da Região Metropolitana de Fortaleza 1:100.000 impresso, elaborado no Projeto SINFOR (Brandão, 1995);

- **Base de Sensores Orbitais:** imagem multiespectral do satélite Landsat 7 sensor ETM⁺ contendo as bandas 1, 2, 3, 4, 5,7 referente a agosto/2001 e do satélite Terra sensor ASTER

referente a outubro/2000 com os subsistemas VNIR e SWIR disponibilizados pela JPL/NASA através da *homepage* <http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer> e <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/>, respectivamente. Dados plani-altimétricos oriundos do programa SRTM com resolução de *grid* de 90 m x 90 m disponibilizados pela NASA pelo portal <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>;

- **Base Climatológica Inicial:** dados de precipitação pluviométrica, ventos, temperatura média mensal e da área de interesse e adjacências disponibilizados pela FUNCEME.

Os materiais denominados de **Indiretos** foram produzidos por outras pesquisas na área de interesse, mas com a co-participação do autor desta tese sendo:

- Cartografia Geológica em 1:50.000 e 1:25.000, elaboradas em relatório final de graduação (Nogueira & Augusto, 2004);

- Análise granulométrica de sedimentos terciários e quaternários, parte integrante do relatório final do Zoneamento Ecológico Econômico do litoral do Estado do Ceará (SEMACE, 2005).

- Caracterização geofísica da interface água doce/água salgada com técnicas eletromagnéticas, realizada em dissertação de mestrado (Cavalcante, 2006) e tese de doutorado (Mota, 2005) totalizando 21 km de Caminhamento Eletromagnético;

Já relacionados aos subprodutos desta tese encontram-se os materiais denominados Diretos:

- Caracterização geolétrica através do processamento de 50 Sondagens Elétricas Verticais;

- Cartografia Pedológica em escala 1:100.000 da área de pesquisa;

- Condutividade hidráulica vertical de 30 amostras e horizontal de 30 amostras avaliadas em laboratório sendo 12 coletadas em sedimentos terciários, 13 em sedimentos quaternários e 04 em regolitos;

- Distribuição granulométrica de amostras obtidas de poços de monitoramento construídos em sedimentos quaternários e de amostras superficiais dos sedimentos terciários, totalizando 83 amostras da área de influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém;

- Pluviosidade na área de influência através da implementação e monitoramento de uma micro-rede pluviométrica durante julho de 2005 a julho de 2006 contendo 09 pluviômetros;

- Variação anual do nível estático na área de pesquisa através da implementação de uma rede de 17 poços de monitoramento nos sedimentos quaternários e medição em 11 poços escavados localizadas nos sedimentos terciários e 07 em argissolos;

- Condutividade hidráulica dos sedimentos quaternários nos poços de monitoramento a partir da aplicação de ensaios do tipo *Slug*.

2.2 - MÉTODOS

Devido ao caráter multidisciplinar desta pesquisa o detalhamento dos métodos utilizados será apresentado em anexo. Já o desenvolvimento científico adotado foi assim definido:

1ª Etapa - Revisão Bibliográfica:

- do tema geral avaliando-se o estágio atual do gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil;
- do tema específico identificando os métodos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos costeiros;
- da área de pesquisa com ênfase em seus aspectos físicos, uso e ocupação e histórico do Complexo Industrial e Portuário do Pecém;
- dos métodos de quantificação de parâmetros hidrogeológicos e/ou hidrodinâmicos tanto os determinados *in situ* quanto em laboratórios;

2ª Etapa - Estruturação e organização dos materiais pré-existentes e indiretos em um sistema de informação geográfica através do *software* ARCGIS 9.2 (licença LABSR/UnB) com:

- análise de consistência das informações dos planos de informação (PI);
- transformação e normatização do *datum* dos PI's em SAD-69;
- avaliação espacial preliminar das informações disponíveis;

3ª Etapa - Processamento digital e interpretação de imagens multiespectrais dos sensores Landsat 7/ETM⁺, ASTER e IKONOS com o intuito de realçar a vegetação, corpos d'água, litologias e/ou solos, uso e ocupação, bacias hidrográficas, redes de drenagens, geomorfologia, atividades industriais. Para tanto, os seguintes processamentos foram realizados nos *softwares* ER Mapper 6.0 (licença LGPSR/UFC) e Envi 4.2 (licença LABSR/UnB):

- análise de consistência do georeferenciamento e da cobertura de nuvens das imagens disponíveis. Devido ao alto índice de nuvens existentes nas imagens Landsat 7 não foi possível realizar qualquer processamento impedindo a utilização desse material nesta pesquisa;
- razão entre bandas como o **NDVI** (índice normalizado da diferença da vegetação) cujo algoritmo padrão é: $NVDI = (NIR-Red)/(NIR+Red)$.

- composições coloridas falsa-cor ressaltando-se os aspectos gerais e padrões texturais. Os melhores resultados foram obtidos com as composições RndviG1B3, R2G3B1 e R3G2B1;

- geração do Modelo Digital do Terreno: o êxito na elaboração do modelo a partir dos dados plani-altimétricos cedidos pelo LABOMAR forneceu o padrão de rede de drenagens, divisores d'água, áreas de recarga e descarga, além dos aspectos geomorfológicos gerais;

- geração do Modelo Digital de Elevação: a partir dos dados de altimetria contidos na banda 3C do sensor ASTER e dos dados do programa SRTM. Ambos não apresentaram resultados satisfatórios devido a altimetria com erros exagerados em regiões dentro e próximos a corpos d'água como o Oceano Atlântico, Lagoa do Gereraú e Lagamar do Cauípe.

4ª Etapa - Planejamento e aquisição de dados referentes à Geologia e Hidrogeologia:

- estruturação geológica subsuperficial da área de influência por associação indireta da aplicação de métodos elétricos e eletromagnéticos;

- construção dos poços de monitoramento e seleção das cacimbas em domicílios rurais para acompanhamento da variação anual do nível estático;

- instalação e monitoramento da rede pluviométrica em pontos próximos ou coincidentes aos locais de monitoramento do nível estático;

- monitoramento de pH e condutividade elétrica nos poços de monitoramento e cacimbas selecionadas;

- coleta de amostras indeformadas para análise granulométrica e ensaios de carga variável (condutividade hidráulica) dos sedimentos terciários, quaternários e argilossolos em pontos próximos aos poços de monitoramento e as cacimbas. As análises granulométricas foram realizadas pelo Laboratório de Oceanografia Abiótica do Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR/UFC) e os ensaios de carga variável realizadas pelo LABSOLO/UFC).

5ª Etapa - Processamento de dados e análise preliminar Geofísica Terrestre:

- as Sondagens Elétricas Verticais submetidas a uma seqüência de processamento desenvolvida por Castelo Branco (2000) onde o objetivo principal reside na obtenção, através de método inverso, de um correspondente modelo geológico àquela variação de resistividade em profundidade;

- os caminhamentos eletromagnéticos do domínio da frequência processados em sua forma mais simples não sendo obtidos modelos inversos, mas somente imagens interpoladas no *software* Surfer 8.0 (licença UFC) e perfis do tipo Condutividade Elétrica *versus* Ponto Medido elaborados no *software* Excell (licença UFC);

- o comportamento do nível estático e pluviosidade, avaliado em gráficos binários do tipo Parâmetro *versus* Mês Monitorado elaborados no *software* Excell (licença UFC) considerando-se suas relações com a litologia;

- os resultados das análises granulométricas utilizados em comparação direta aos valores obtidos de condutividade hidráulica através de gráficos binários para avaliar a influência do conteúdo de argila na diminuição da velocidade linear média do fluxo subterrâneo subsuperficial;

6ª Etapa - Produção de mapas de isovalores de parâmetros hidrogeológicos no SIG para serem incorporados tanto nos métodos indexadores quanto no modelo de fluxo onde:

- mapas de isovalores de condutividade hidráulica horizontal e vertical foram elaborados para a área de pesquisa através do método de interpolação do tipo *krigagem* simples;

- mapas de isovalores do nível estático para os meses de maior e menor pluviosidade e, para os meses de nível mais alto e mais baixo também foram obtidos para a área de influência do Complexo do Pecém. O método de interpolação do tipo *krigagem* simples também foi utilizado devido à distribuição irregular dos dados utilizados;

- mapas de isovalores de espessuras das camadas geoeletricas identificadas utilizando o método de interpolação do tipo *krigagem*;

7ª Etapa - Geração e interpretação dos mapas de vulnerabilidade com os métodos indexadores:

- DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) que considera 07 parâmetros na avaliação do potencial poluidor sendo D (nível estático), R (recarga efetiva), A (tipo de aquífero), S (tipo de solo), T (declividade), I (zona vadosa) e C (condutividade hidráulica). Cada mapa de isovalores dos parâmetros hidrogeológicos é reclassificado tanto em termos de intervalos no caso de valores contínuos (p.ex., declividade), quanto em tipos significantes no caso de parâmetros temáticos (p.ex., tipos de solo) considerando seu impacto de potencial poluidor. O intervalo típico do indexador adotado na reclassificação é de 1 a 10, mínimo a máximo potencial. Pesos específicos são usados em cada mapa reclassificado para balancear e realçar a importância relativa de cada parâmetro. O índice final de vulnerabilidade (D_i) é a soma ponderada dos 07 parâmetros onde os maiores valores indicam uma maior vulnerabilidade e pode ser computado utilizando a fórmula:

$$D_i = \sum_{j=1}^7 W_j \times R_j$$

W_j = Peso do parâmetro j ;

R_j = Indexador do parâmetro j ;

• GOD (Foster & Hirata 1991) é um método que define a vulnerabilidade do aquífero baseado na capacidade de impedimento apresentada pela zona vadosa. O acrônimo é derivado da ocorrência de água subterrânea (G - *groundwater*), litologia predominante do aquífero ou aquitarde (O - *overall*) e profundidade do nível estático (D - *depth*). A divisão em intervalos uniformes dos valores obtidos para o índice determina as classes de vulnerabilidade que expressam o potencial natural do aquífero contra a infiltração de poluentes (Draui *et al.*, 2007). O índice de vulnerabilidade é calculado pela fórmula:

$$I_{GOD} = I_G \times I_O \times I_D$$

I_G , I_O e I_D representam os indexadores dos três parâmetros usados pelo método.

• SINTACS que pode ser considerado até um desmembramento do DRASTIC por apenas substituir o parâmetro recarga líquida por infiltração efetiva (Civita, 1994; Civita & De Maio, 2004). Apresenta diferenças estruturais que disponibilizam ao usuário maior flexibilidade na escolha de índices (P) e pesos (W). O produto final aponta os resultados em 6 classes de vulnerabilidade.

$$I_S = \sum P_{(1,7)} \times W_{(1,n)}$$

8ª Etapa - Elaboração e calibração do modelo tri-dimensional do fluxo subterrâneo considerando:

- o modelo hidrogeológico conceitual com base nas informações obtidas e interpretações a partir das seções geológicas/geoelétricas;
- o domínio do modelo além dos limites de área de pesquisa para evitar problemas não-convergência de solução devido a proximidades com as condições de contorno;
- a discretização horizontal feita em malha regular quadrática sendo o espaçamento reduzido de 200 x 200 m para 50 x 50 m em áreas de interesse (interface água doce/água salgada, poços de captação, atividades industriais, etc.);
- a discretização vertical tendo como ponto focal 04 unidades hidrogeológicas principais identificadas sendo a zona vadosa, aluviões, o Aquífero Dunas e o Aquífero Barreiras, mas ao final sendo ativamente modelada essas últimas camadas;
- rios, drenos, limites laterais, recarga e poços como as condições de contorno adotadas de acordo com o modelo conceitual;

- a calibração avaliada em termos qualitativos, comparando-se as equipotenciais medidas e as calculadas pelo modelo e, também quantitativamente, através de análise gráfica do tipo carga hidráulica modelada *versus* carga medida;

- a análise de sensibilidade realizada pela variação brusca positiva e negativa de parâmetros hidrogeológicos/hidrodinâmicos como a condutividade hidráulica, a recarga e a altura do embasamento cristalino com o intuito de verificar o grau de influência de tais parâmetros;

9ª Etapa – Simulação da zona de captura da situação de bombeamento atual:

- o efeito do bombeamento no comportamento do nível estático cenário atual);
- o mesmo efeito para um aumento de 50% e 100% de poços tubulares instalados (cenário previsional);

10ª Etapa – Simulação de transporte de contaminantes para as áreas destinadas aos derivados de hidrocarbonetos com a integração e análise dos resultados considerando os resultados obtidos nas etapas anteriores.

CAPÍTULO III

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 - CLIMATOLOGIA

As interações entre sistemas meteorológicos de meso e macro escalas, posicionados sobre o Nordeste do Brasil, resultam em alta variabilidade temporal e espacial no campo de precipitação (Calheiros *et al.* 2006). Dentre os mais importantes desses sistemas estão o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

O ENOS representa de forma mais genérica um fenômeno de interação atmosfera-oceano, associado a alterações dos padrões normais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e dos ventos alísios na região do Pacífico Equatorial, entre a Costa Peruana e no Pacífico oeste próximo à Austrália. Outra forma de quantificar tal fenômeno é através do Índice de Oscilação Sul (IOS) que é calculado pela diferença entre a pressão ao nível do mar entre o Pacífico Central (Taiti) e o Pacífico do Oeste (Austrália). Valores negativos e positivos do IOS são indicadores da ocorrência do El Niño e La Niña, respectivamente (Oliveira 2001).

A Figura 3.1 esquematiza a circulação observada no Oceano Pacífico Equatorial em anos sem a presença do El Niño ou La Niña, ou seja, anos normais. A denominada célula de Walker representa a movimentação ascendente de ar no Pacífico Central/Ocidental, descendente no oeste da América do Sul, ventos alísios de leste para oeste próximos à superfície e, de oeste para leste em altos níveis da troposfera. Nessas condições normais a relação termodinâmica observada é a Termoclina, superfície que separa águas mais quentes (tons rubros) sobrepostas a águas mais frias (tons celestes), mais rasa junto a costa oeste da América do Sul e mais profunda no Pacífico Ocidental. Essa condição induz a formação de nuvens no oeste do Pacífico e a ressurgência de águas frias em sua porção leste (CPTEC, <http://www.cptec.inpe.br>).

Em anos que há mudança nesse padrão de circulação com a diminuição da ação dos ventos alísios todo o Oceano Pacífico Equatorial começa a aquecer e formar nuvens com intensas chuvas principalmente no Pacífico Equatorial Central e Oriental, caracterizando o fenômeno El Niño (Figura 3.2). Quando ocorre o aumento da ação dos ventos alísios proporcionando um resfriamento acentuado das águas oceânicas na região entre o Pacífico Oriental e Central caracteriza-se o fenômeno La Niña. Precipitações pluviométricas acima da média no leste da Amazônia e na região nordeste do Brasil estão associadas com a ocorrência do fenômeno La Niña vinculados a um deslocamento para sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), proporcionado por temperaturas acima da média no Atlântico Tropical Sul e abaixo da média no Atlântico Tropical Norte (FUNCEME, <http://www.funceme.br/DEPAM>).

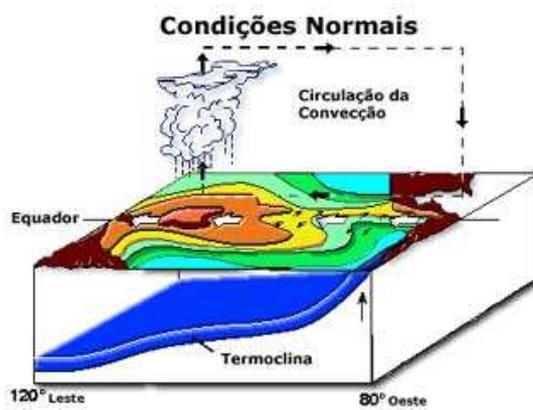


Figura 3.1 - Circulação observada no Oceano Pacífico Equatorial em anos sem a presença do El Niño ou La Niña (CPTEC/INPE).

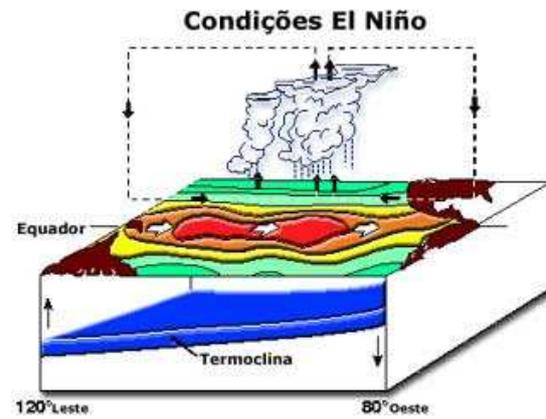


Figura 3.2 - Padrão de circulação observada em anos de El Niño na região equatorial do Oceano Pacífico (CPTEC/INPE).

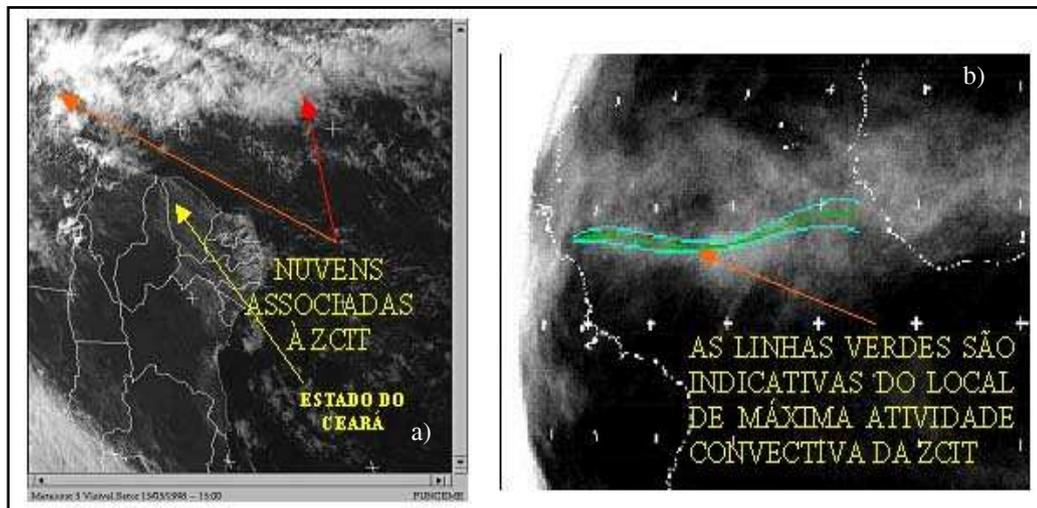


Figura 3.3: a) Zona de Convergência Intertropical visualizada em imagens do satélite METEOSAT-7 em maio de 1998. b) Máxima atividade convectiva da ZCIT (FUNCEME, <http://www.funceme.br>).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é uma faixa de nuvens que circunda a região equatorial do globo terrestre sendo formada principalmente pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul (Figuras 3.3a-b) e tem grande influência da ZCIT na definição da qualidade do período chuvoso sobre o setor norte do Nordeste do Brasil. De maneira geral a convergência dos ventos faz com que o ar, quente e úmido ascenda, carregando umidade do oceano para os altos níveis da atmosfera ocorrendo a formação das nuvens nessa região (Mendes *et al.*, 2000, in FUNCEME, <http://www.funceme.br/DEPAM>).

3.2 - PRECIPITAÇÃO

O reflexo da interação e influência dos sistemas e mecanismos meteorológicos atuantes na região nordeste pode ser visualizado pelo comportamento e sazonalidade da precipitação em pequena escala através da análise de séries históricas de postos pluviométricos circunvizinhos e da série da rede pluviométrica local (Figuras 3.4 a 3.6). A análise da distribuição pluviométrica ao longo de três décadas, 1977 a 2006 (Figura 3.4), evidencia um caráter cíclico com intervalos de cerca de 10 anos entre os anos de máximas precipitações (≈ 2.000 mm) e antecidos de anos que registram reduções de até 400% nas precipitações (≈ 500 mm) como pode ser observado entre 1983 a 1984/1985 e 1993 a 1994. A precipitação média é cerca 1.300 mm/ano concentrando-se ao longo da faixa litorânea como pode ser observada pela comparação das precipitações totais onde o Posto São Gonçalo do Amarante, situado a cerca de 20 km do litoral, registrou uma redução de 30% com relação aos demais postos, localizados próximos à praia (Figuras 3.4 e 3.6).

Uma comparação simples entre anos de ocorrência dos fenômenos *El Niño* e *La Niña* e a série histórica pode ser observada na Figura 3.5 onde se observa, aparentemente, pouca correlação entre esses parâmetros com a presença de anos com precipitações acima da média durante a presença do *El Niño* e de *La Niña*. Diferenças na intensidade desses fenômenos associados à intensidade dos outros parâmetros que têm função importante na distribuição pluviométrica a níveis continentais e regionais explicam a falta de correlação direta (Figura 3.5).

Os resultados obtidos com o monitoramento pluviométrico em 09 pontos entre jul/05 a jul/06 (Figuras 3.6) ratificam aquelas observações onde a precipitação é concentrada ao litoral, mas com ordem de grandeza maior, pois decresce cerca de 150% nos primeiros 15 km da faixa litorânea (Figuras 3.4 e 3.7), além de ressaltar o regime hídrico com períodos de excesso (março a junho) e escassez (agosto a dezembro).

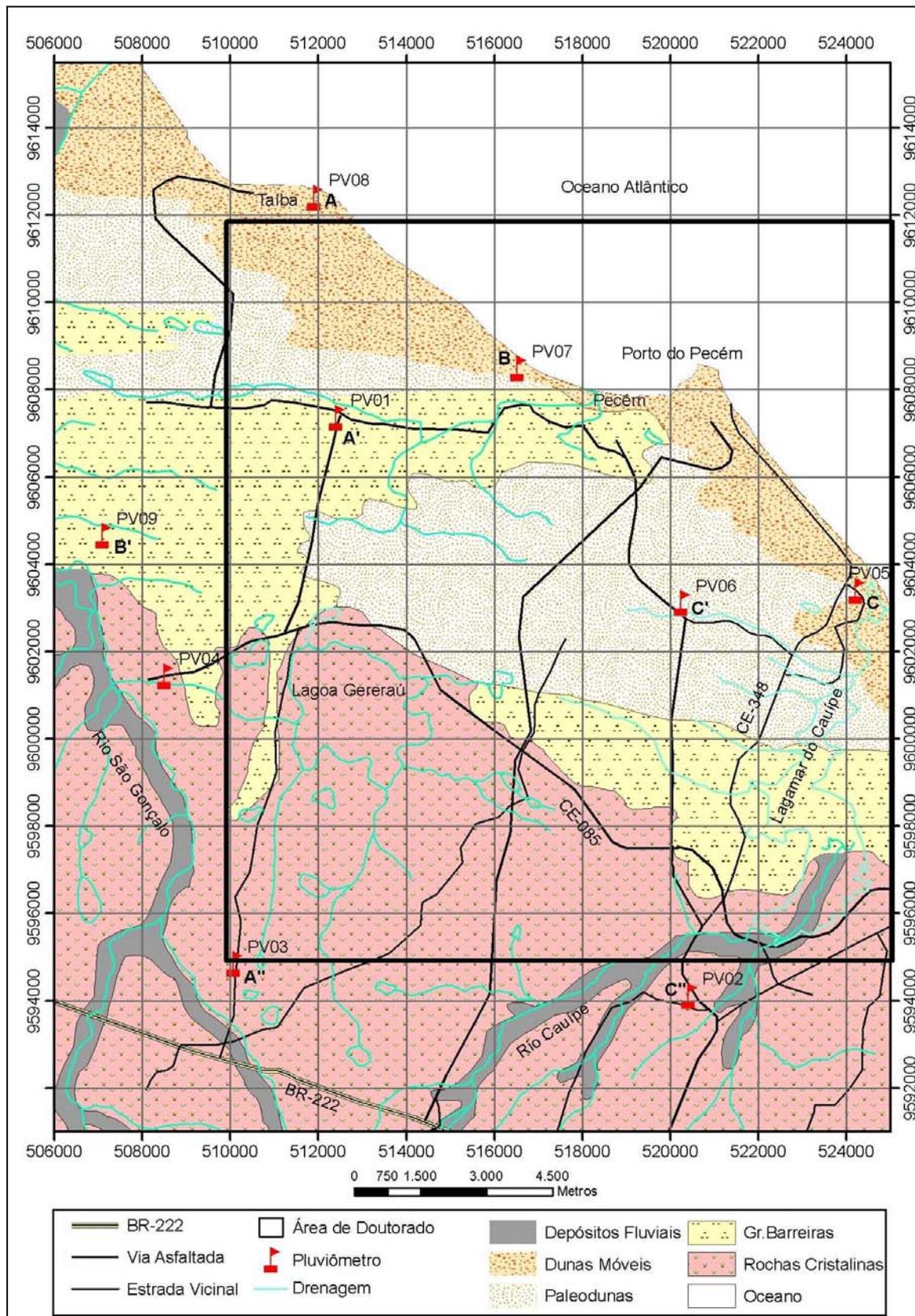


Figura 3.4 - Distribuição geográfica dos postos pluviométricos próximos ao Complexo do Pecém e detalhe ressaltando o posicionamento dos pluviômetros instalados na área de interesse.

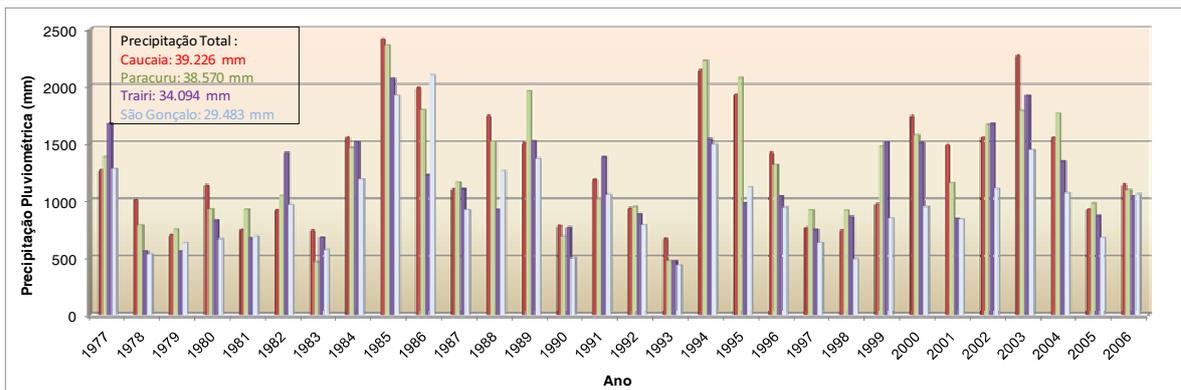


Figura 3.5 - Séries históricas entre os anos de 1977 a 2006 para os postos pluviométricos circunvizinhos à área de pesquisa.

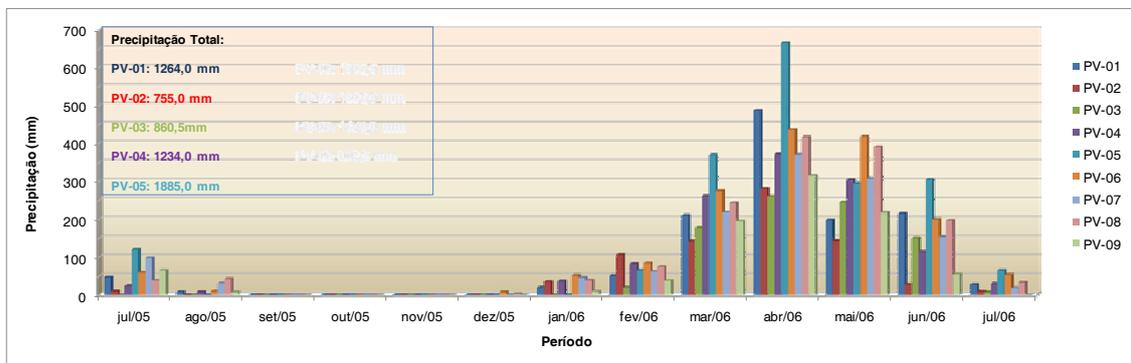


Figura 3.6 - Caracterização do período de déficit e excesso hídrico através do monitoramento da precipitação entre julho/2005 a julho/2006 dentro da área de pesquisa.

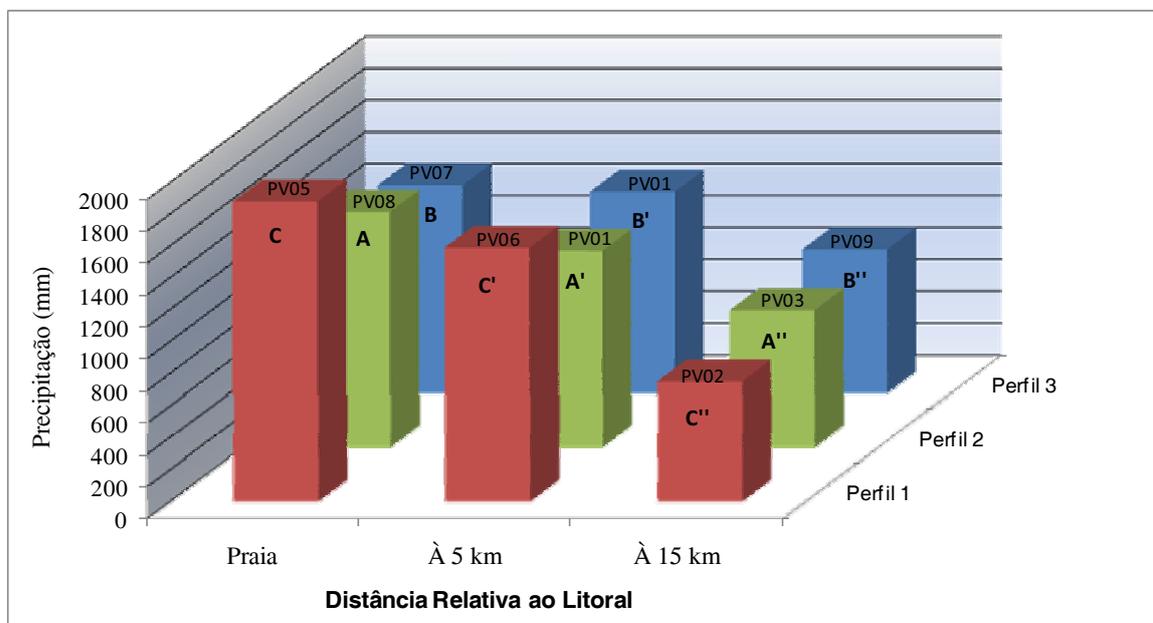


Figura 3.7 - Comparação da pluviosidade total do período monitorado em 06 locais evidenciando a redução acentuada da precipitação com o aumento da distância do litoral.

3.3 - VEGETAÇÃO

Como um importante fator no ciclo hidrológico, o padrão de cobertura vegetal tem atuação direta nos processos de recarga e evapotranspiração. Para identificar os principais tipos que compõem o complexo vegetacional na área de pesquisa e suas relações espaciais foram utilizadas técnicas de transformações de imagens orbitais do tipo razão entre bandas. Através da divisão entre bandas de intervalos espectrais em que a vegetação tem forte absorção (vermelho \equiv 0,6610 μm) com bandas em que há alta reflectância (infravermelho próximo, \equiv 0,8070 μm) é possível obter um índice de vegetação simples onde áreas de vegetação terão altos valores.

Um dos índices de vegetação mais aplicados é o **NDVI** (índice normalizado da diferença da vegetação) cujo algoritmo padrão é: $\text{NDVI} = (\text{Infravermelho} - \text{Vermelho}) / (\text{Infravermelho} + \text{Vermelho})$. Os resultados válidos situam-se entre -1 e +1.

Os valores obtidos de -0,51 a +0,66 foram divididos em 05 (cinco) intervalos, após a etapa de interpretação dos resultados, compreendendo 01 classe com ausência de vegetação e 04 classes com tipos vegetacionais (Tabela 3.1 e Figura 3.10).

A Classe I que representa $\frac{1}{4}$ da área total de pesquisa inclui os campos de dunas móveis, estradas e corpos de água superficiais. A Classe II compreende tanto a vegetação herbácea que ocorre de forma esparsa na faixa praial, nas dunas semi-fixas e na interface com a caatinga quanto nas áreas de plantios nos tabuleiros. Eventualmente há espécies de porte arbustivo e mesmo arbóreo (Figuras 3.8 e 3.10).

Tabela 3.1 - Classes NDVI e as relações espaciais denotadas por suas áreas de exposição.

Classes	Intervalos NDVI	Área (km ²)	Representatividade (%)
I - Ausência de Vegetação	< 0,1000	51.736,00	25,16
II - Herbáceas	0,1000 – 0,2138	25.530,00	12,41
III - Herbáceas + Arbustivas	0,2138 – 0,3276	42.227,00	20,53
IV - Arbustivas	0,3276 – 0,4415	46.055,00	22,39
V - Arbóreas + Arbustivas	0,4415 – 0,6691	40.110,00	19,50
Total		205.658,00	100,00

A Classe III caracteriza-se como uma interface entre as classes II e IV onde tipos herbáceos e arbustivos estão inclusos. Nessa classe a vegetação herbácea/arbustiva da caatinga está mais ressaltada (sul da área). Entre as principais espécies lenhosas se encontram o murici (*Byrsonima crassifolia*), cajueiro (*Anacardium occidentale*) e a carnaúba (*Copernicia prunifera*), com maior esine portucaloides (bredinho de praia) representante arbustivo da Classe IV e V.

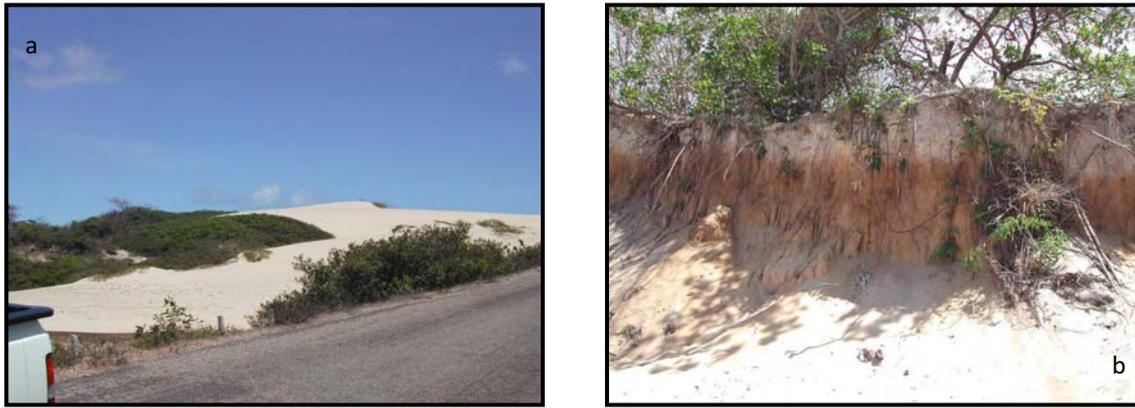


Figura 3.8 - Formas de ocupação das espécies arbustivas sobrepostas aos neossolos quartzarênicos das dunas semi-fixas (a) e arbóreas atuando no processo de pedogênese em dunas fixas (b).

Com predomínio de tipos arbustivos e representatividade de 22% a Classe IV tem como espécies mais comuns, nos tabuleiros e faixa litorânea, a salsa de praia (*Ipomoea pescapre*), salsa (*Ipomoea asarifolia*) e bredinho de praia (*Iresine portucaloides*). O padrão de ocorrência principal está associado ao bordejamento dos tipos vegetacionais integrantes da Classe V. As áreas arbustivas mais preservadas contendo uma densidade maior de espécies arbóreas estão associadas diretamente à Classe V (Figura 3.9b e 3.10).



Figura 3.9 a – Exposição da espécie *Copernicia prunifera* (carnaúba) exemplo de tipos lenhosos da Classe III. **b** - *Iresine portucaloides* (bredinho de praia) representante arbustivo da Classe IV e V.

3.4 - GEOMORFOLOGIA

As características geomorfológicas locais estão compreendidas entre as unidades da planície litorânea, da planície fluvial, do Glacis pré-litorâneo e da depressão sertaneja.

Planície Litorânea

Expõe-se continuamente entre a foz do Lagamar do Cauípe até a foz do Rio São Gonçalo com uma largura média de 1,5 km. Devido à ação intensa de processos morfodinâmicos apresenta diversas feições morfológicas, tais como: faixa praial, campos de dunas móveis e fixas, planície flúvio-marinha, planície lacustre e flúvio-lacustre e promontórios (Figura 3.11).

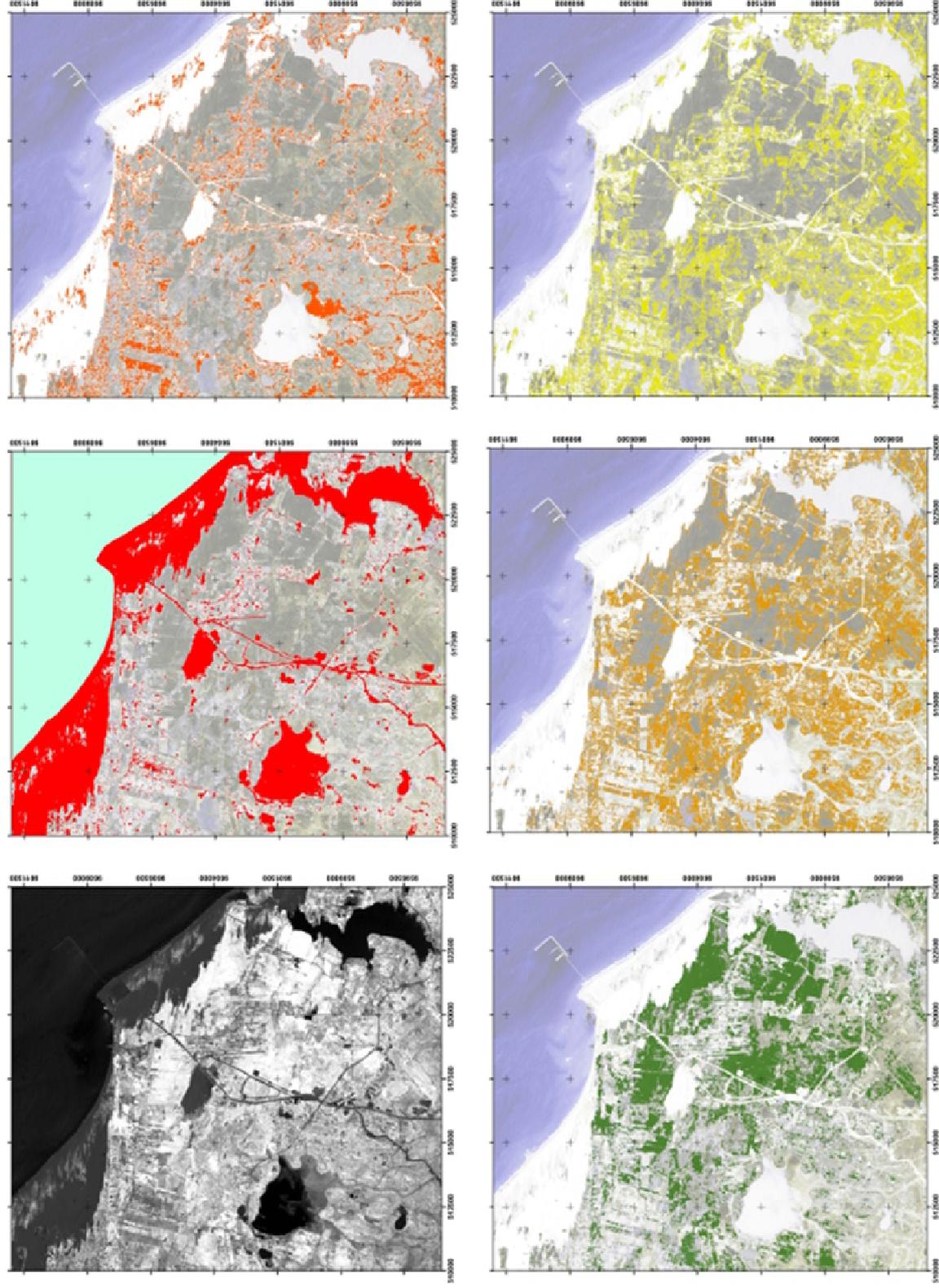


Figura 3.10 - Resultado NDVI e as relações espaciais entre as classes I a V, ordenadas em sentido horário.

A faixa praial forma uma superfície arenosa, com largura média de 500 m, acumulada pelas ações marinhas e fluviais com aclives suaves na alta praia em direção à base do campo de dunas. Interno à praia baixa encontram-se os “*beach rocks*” ou rochas de praia que estão expostos nas praias do Pecém e da Taíba de forma descontínua em afloramentos decamétricos na faixa de arrebentação (Figura 3.11).

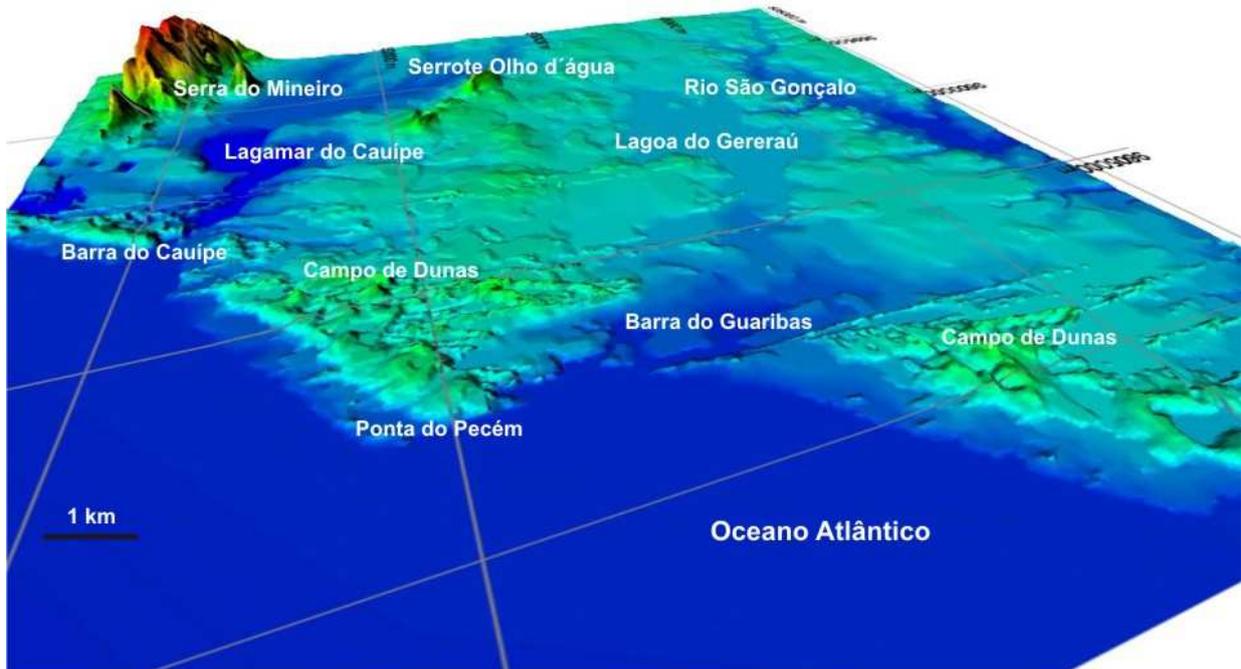


Figura 3.11 - Modelo Digital de Elevação ressaltando as principais unidades geomorfológicas e demais feições fisiográficas da região da área de pesquisa.

Os campos de dunas que atingem uma largura de até 2,5 km têm unidades móveis e semi-fixas. As feições que ocupam a porção interior do campo de dunas têm formas transversais (barcanas) que são assimétricas com formas em crescente e se dispõem de modo perpendicular em relação ao deslocamento dos ventos dominantes (SETECO, 1996). A morfodinâmica dos campos de dunas é influenciada, em essência, pela ação dos processos eólicos com ventos de E, ESE, SE e SSE (Figura 3.12). Ao sul do campo de dunas móveis e semi-fixas da Praia do Pecém, verifica-se a ocorrência de um corpo de dunas fixas com largura média de 1,5 km e comprimento aproximado de 9,0 km com processos pedogenéticos atuantes e densa cobertura vegetal arbórea-arbustiva impedindo a ação eólica.

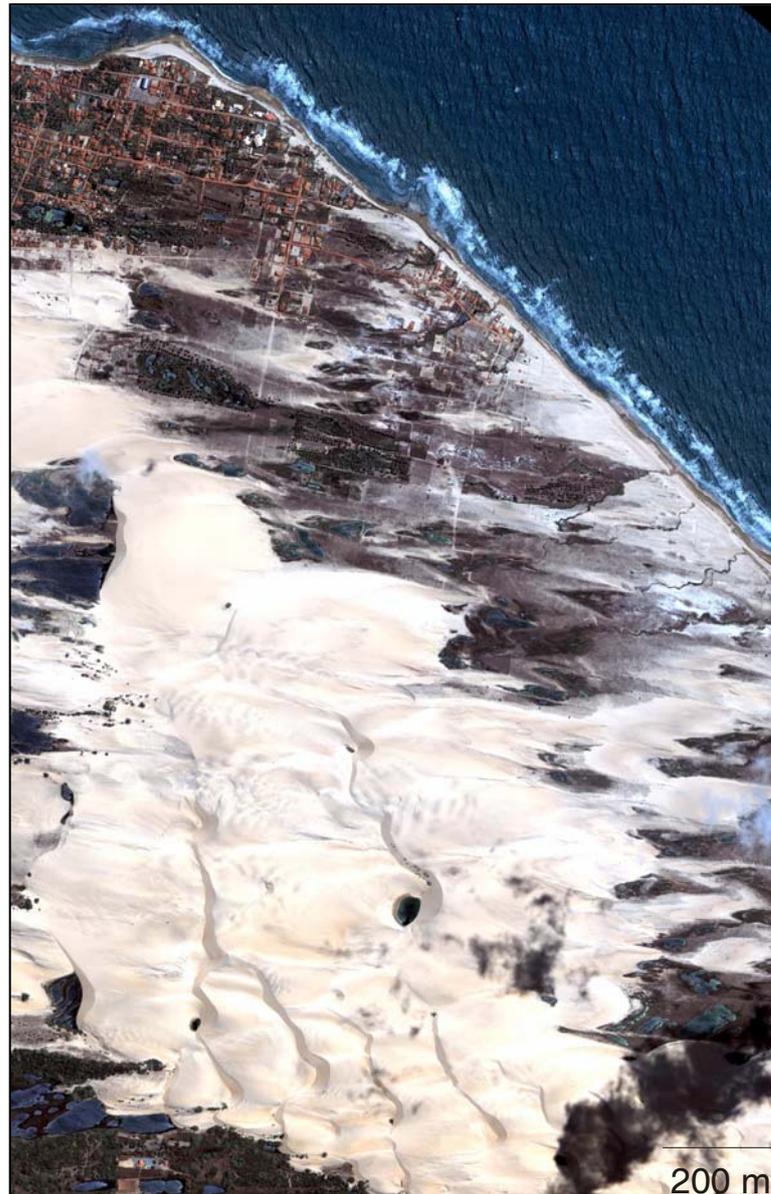


Figura 3.12 - Imagem do sensor Quickbird (out/2000) ressaltando a morfodinâmica do campo de dunas ao sul da localidade de Taíba, município de São Gonçalo do Amarante. A direção E, ESE e SE dos ventos está refletida na orientação de caminhamento das dunas. Obs.: A imagem está orientada ao norte.

A planície flúvio-marinha formada pelo riacho Guaribas na Praia do Pecém tem a desembocadura em forma de estuário e contém material rico em finos e durante a preamar o fluxo da maré dificulta o escoamento fluvial deslocando a água doce para montante. A força mecânica da maré e a difusão da água salgada na água doce, somados à sedimentação de limos e vasos garantem a fixação das margens (SETECO, 1996).

As planícies lacustres e flúvio-lacustres se desenvolvem às margens de lagoas resultantes do barramento do fluxo hídrico fluvial, pluvial ou freático pelo campo de

dunas. As dimensões dessas lagoas estão vinculadas à origem do seu fluxo hídrico. A maioria com pequeno porte ocupa as depressões interdunares rasas e origina-se da ascensão do nível estático em período chuvoso não sendo perenes e, o restante continua a ser abastecida após as chuvas pela descarga do campo de dunas situadas em depressões mais profundas. As de grande porte são associadas a fluxos fluviais perenes, como é o caso do Lagamar do Cauípe (Figura 3.11).

A denominada Ponta do Pecém é um promontório rochoso que ocorre na faixa praias sendo constituído por quartzitos e gnaisses que se projetam para o mar, dentro da zona de maré.

Planície Fluvial

Estas planícies se desenvolvem nas porções laterais dos cursos d'água, sendo resultantes da deposição de sedimentos aluviais de textura fina.

As planícies fluvias representativas na área estão associadas aos rios Cauípe e São Gonçalo (Figuras 3.11) e aumentam em dimensão quando tais rios deixam os terrenos do embasamento cristalino e penetram na área de sedimentos inconsolidados do Grupo Barreiras (SETECO, 1996).

As aluviões contêm material mal selecionado onde a maior parte do material acumulado é representado por clásticos finos, além de matéria orgânica em decomposição.

Glacis Pré-litorâneo

Os sedimentos areno-argilosos do Grupo Barreiras podem ser individualizado como um domínio geomorfológico característico que se comporta como um glacis de acumulação com distribuição uniforme ao longo de toda a costa e extensão variável para o interior com relevo tabular (SETECO, 1996). Sua espessura é variável devido ao substrato ondulado do embasamento, onde os sedimentos foram depositados em discordância erosiva. Os níveis altimétricos variam no interior entre 30 e 80 m, diminuindo na direção do mar de forma quase imperceptível, com inclinação inferior aos 5°. As espessuras que são variáveis devido a ondulações no substrato irregular do embasamento e a distância com o litoral não ultrapassam 80 m.

Depressões Sertanejas

Compõem a superfície de erosão de diversos tipos de rochas cristalinas que constituem o embasamento local. A morfologia dessa área apresenta relevo com declives suaves com sentido aos vales fluviais e em direções ao litoral (Figura 3.13).



Figura 3.13 - Vista para sul da área indicando a zona de transição da planície litorânea (depósitos eólicos) com os glaciais pré-litorâneos e os maciços residuais inseridos na depressão sertaneja ao fundo.

3.5 - PEDOLOGIA

As coberturas de solos tem uma grande importância do ponto de vista de manutenção da vida na Terra e à regulação dos ciclos hídricos superficial e subterrâneo.

A camada de regolito (solo + saprolito) tem fundamental papel na regularização das vazões dos cursos d'água superficiais, de forma que sua espessura e condutividade hidráulica apresentam relação direta com a vazão específica dos cursos fluviais. Por exemplo, regiões com predominância de latossolos apresentam drenagens perenes, com elevadas vazões específicas, em decorrência de sua grande espessura e de serem distribuídos em áreas planas de baixa declividade. Neste caso o desempenho da função reguladora do aquífero é facilitada. Por outro lado, áreas com solos rasos, como as associadas a neossolos litólicos e cambissolos, têm rede de drenagem intermitente devido a dificuldade da infiltração das águas de precipitação.

Outro parâmetro que destaca a grande importância dos solos é o fato de a maior parte das zonas não saturadas dos sistemas aquíferos ser associada às coberturas

pedológicas. Neste caso, a função filtro do aquífero é desenvolvida pelos diversos tipos de solos. A capacidade filtrante é diretamente proporcional à concentração e tipo de argilominerais, à espessura e ao teor de matéria orgânica dos solos e inversamente proporcional a sua condutividade hidráulica.

Assim, qualquer análise que envolva os recursos hídricos subterrâneos a deve considerar os tipos de solos, sua espessura e sua condutividade hidráulica.

Na área de pesquisa foram identificadas as seguintes classes: Neossolo Litólico Eutrófico, Neossolo Flúvico Psamítico e Neossolo Quartzarênico Órtico A fraco, Argissolo Acinzentado Distrófico e Planossolo Háptico Sáfico (Figura 3.14 e Tabela 3.2). As seis classes de solos que podem ser discriminadas em mapa em escala 1:50.000 foram denominadas segundo os critérios de classificação brasileira dos solos (EMBRAPA 2006), sendo que os nomes relacionados à antiga classificação são apresentados na Tabela 3.2. As classes são apresentadas com a classificação contendo os nomes do primeiro, segundo e terceiro níveis categóricos.

Tabela 3.2 - Correlação entre classes de solos segundo os critérios antigos e novos. Classes de solos mapeados e caracterizados na área de estudo até o terceiro nível categórico da classificação.

CLASSIFICAÇÃO ATUAL	CLASSIFICAÇÃO ANTIGA
Neossolo Litólico Eutrófico	Solos Litólicos eutróficos
Neossolo Flúvico Psamítico	Solos aluvionares ou Solos aluviais arenosos
Neossolo Quartzarênico Órtico A fraco	Areias quartzosas distróficas
Argissolo Acinzentado Distrófico	Podzólico Acinzentado Distrófico
Planossolo Háptico Sáfico	Planossolo

Neossolos

Segundo Embrapa (2006), estes solos são discriminados por possuir um perfil raso e/ou pouco desenvolvido pedogeneticamente. Assim, o horizonte “B” é ausente e não existe nenhum outro horizonte diagnóstico, predominando as características do material de origem.

Em segundo nível categórico os neossolos são classificados em Quartzarênicos, Flúvicos, Litólicos e Regolíticos, sendo que na região em estudo ocorrem as classes de Neossolo Litólico Eutrófico (RLe); Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e Neossolo Flúvico Tb Distrófico (RYq). Em função da escala do mapeamento os contatos entre estas classes de solos cartografados são considerados aproximados.

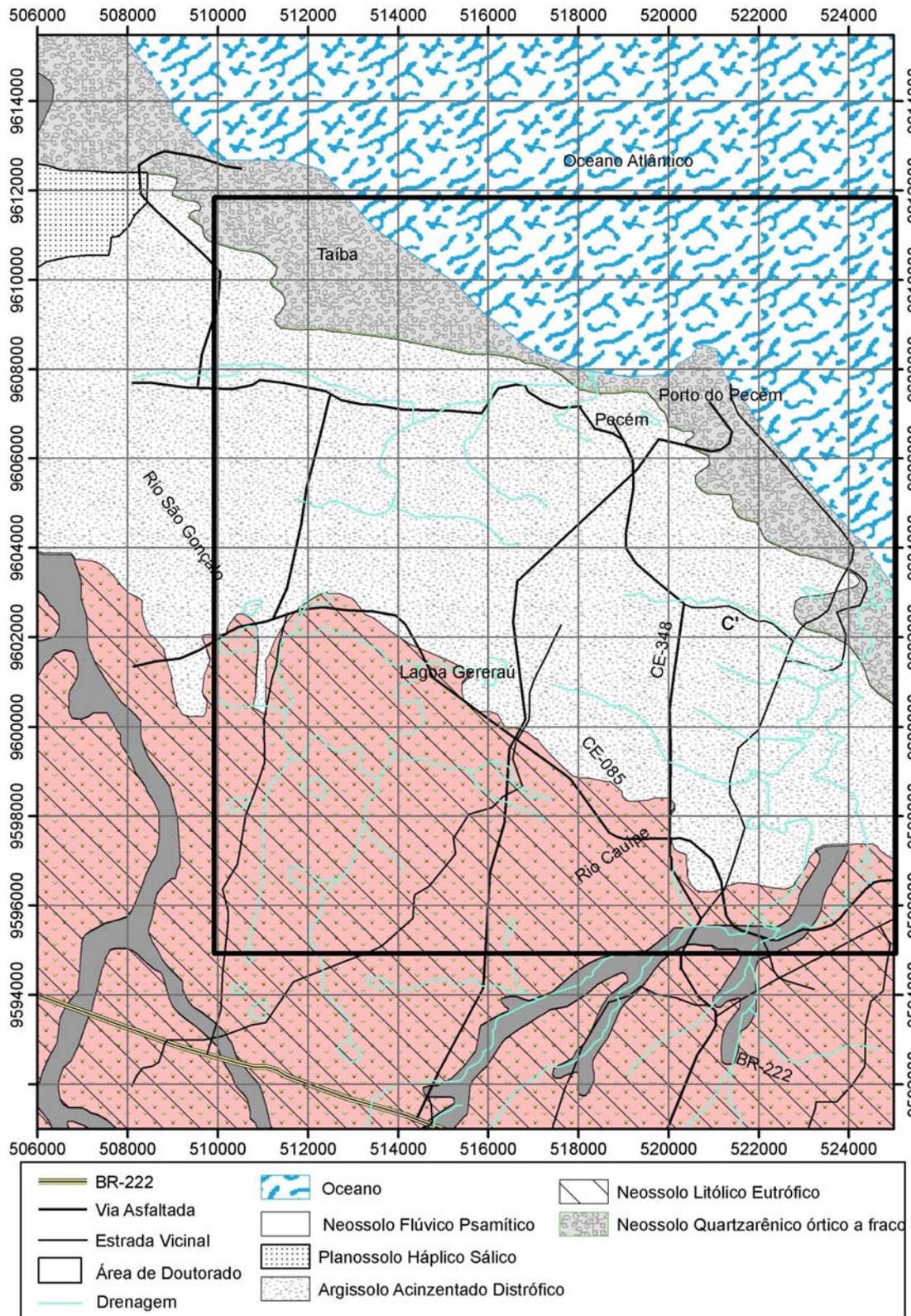


Figura 3.14 - Mapa pedológico em escala 1: 100.000 na região da área de pesquisa.

Neossolo Litólico Eutrófico

Classe de solo que ocorre em ampla porção da área estudada e inclusive em intensa associação Neossolo Quartzarênico nas transições entre dunas e arenitos do Grupo Barreiras.

Apresenta seqüência de horizonte A-C-R ou A-R (contato lítico direto), sendo que o horizonte superficial é em geral do tipo A Fraco. Pode ocorrer sobre qualquer tipo de substrato, sendo mais comumente observado sobre rochas do embasamento.

São rasos, não hidromórficos, possuindo horizonte A sobreposto à rocha matriz ou sobre um horizonte C pouco espesso, parcial a ligeiramente intemperizado e com muitos minerais primários. Têm pedregosidade e rochosidade na superfície e as condições de fertilidade são boas quando derivados das rochas do embasamento cristalino.

A rochosidade é umas das feições mais marcantes dessa classe de solo na área estudada, sendo representada por grandes blocos de granitos, além de grandes exposições rochosas na forma de lajedos. A paisagem associada é denominada, de forma geral, de zona de transição entre a porção costeira mais úmida para a porção mais seca em direção ao continente.

Neossolo Quartzarênico Órtico A fraco

Na área ocorre em grandes manchas mapeáveis na escala do trabalho, sendo mais comuns na porção central associada aos campos de dunas e à porção litorânea. Foram genericamente classificados como Neossolo Quartzarênico Órtico A fraco, entretanto, também foram observados de forma isolada manchas de Neossolo Quartzarênico Hidromórfico. Além da típica seqüência de horizontes A-C, estes solos apresentam menos de 15% da fração argilosa além de serem muito pobres em matéria orgânica.

Os neossolos quartzarênicos ocorrem associados às areias dos campos de dunas móveis e aquelas de retrabalhamentos marinhos. Em geral são solos pouco espessos, de coloração esbranquiçada, amarela até avermelhada e com textura arenosa em grãos individuais. Esses solos têm alta porosidade que é refletida na elevada condutividade hidráulica do material.

Como a concentração total da fração argila é inferior a 15%, não há formação de estrutura nesse tipo de solo sendo a textura arenosa atribuída a grãos individuais de quartzo. Por isso, essa classe de solo apresenta alto potencial erosivo, baixo poder de atenuação de cargas contaminantes, além da restrita fertilidade natural.

O uso preferencial para estes solos é a preservação ambiental, já que as atividades

de pecuária e agricultura necessitam de solos com maior fertilidade natural e maiores teores de argila.

Neossolo Flúvico Psamítico

Os neossolos flúvicos psamíticos (solos aluviais arenosos) são formados principalmente em algumas faixas de terrenos mais arrasados na planície de inundação das principais drenagens (principalmente rios Cauípe e São Gonçalo), uma vez que em função da intermitência da maioria das drenagens há restrita acumulação de material aluvial.

Constituem solos com desenvolvimento incipiente, oriundos de deposições fluviais, nas áreas das planícies fluviais. Normalmente tem horizonte superficial A1 fraco seguido de camadas estratificadas que não têm relações pedogenéticas, sendo predominante a fração arenosa em todos os horizontes (SINFOR 1999).

A composição desses solos é associada aos processos sedimentares fluviais, não existindo relações pedogenéticas entre os solos e o substrato rochoso imediatamente sotoposto. Os neossolos flúvicos por se constituírem de materiais arenosos inconsolidados apresentam alta permeabilidade.

Como ocorrem nas áreas de proteção permanentes dos cursos d'água, em geral a vegetação nativa de matas galerias e de veredas é preservada ou pouco degradada.

Planossolo Háptico Sálico - SXs

Estes solos ocorrem nas localidades onde a oscilação do lençol freático associada à translocação de argila proporcionam a formação do horizonte plânico que é caracterizado pela mudança brusca do gradiente textural ao longo de uma superfície horizontal bem definida. Comumente apresenta mosqueados de plintita na base do perfil. Constitui-se em um tipo de solo de intemperismo avançado, pouco profundo e com baixa permeabilidade.

Rasos a moderadamente profundos, distribuídos em relevos planos das planícies fluviais, flúvio-lacustres e áreas inundáveis da depressão sertaneja. Têm seqüência A, Bt e C de horizontes e o horizonte B textural tem argilas com alta atividade. Com baixa permeabilidade, são susceptíveis às ações erosivas, sobretudo aos processos ligados ao escoamento difuso (SINFOR 1999).

De forma geral apresentam textura arenosa fraca nos horizontes superficiais e textura muito argilosa no horizonte plânico.

Estes perfis apresentam tonalidades acinzentadas em função do ambiente redutor a que são submetidos. Esta feição é mais pronunciada quando observada em cupinzeiros e

outras estruturas orgânicas que amostram a porção mais profunda do perfil (formigueiros, cupinzeiros, etc).

Esta classe pedológica apresenta um horizonte plânico com possibilidades de ocorrência nos primeiros 40 cm do perfil ou dentro dos 200 cm caso esteja sotoposto ao horizonte A ou E. De maneira geral, os planossolos ocorrem associados a relevo local plano a suave ondulado, sob campos limpos e em áreas com drenagem deficiente.

Argissolo Acinzentado Distrófico - PACd

São solos com seqüência com horizontes A, Bt, C e, normalmente, profundos e moderadamente drenados, com presença comum de cerosidade.

As ocorrências de argissolos são associadas às áreas de exposição dos sedimentos do Grupo Barreiras e sobre paleodunas em porções a sudeste e a noroeste da poligonal em amplas extensões em áreas de declividades moderadas a elevadas. Em geral ocorrem em transição com neossolos litólicos e quartzarênicos, sendo desenvolvidos exclusivamente de sedimentos areno-argilosos.

Em função dos processos de formação com acumulação de argila no horizonte B oriunda de iluviação dos horizontes superficiais e, aliado ao fato de serem desenvolvidos sobre rochas com importante contribuição arenosa, esses solos são distróficos.

Em campo estes solos podem ser discriminados dos demais pelas seguintes feições: maior diferenciação entre os horizontes, maior quantidade de argila presente nos horizontes mais profundos e maior facilidade de desenvolvimento de estruturação média grossa granular a prismática, nos horizontes mais rasos.

São preferencialmente usados para pecuária extensiva, entretanto, em função da maior quantidade de argila são observadas pequenas culturas anuais de subsistência (milho, feijão e arroz), além de pequenos pomares.

Como ocorrem em áreas com declives moderados apresentam risco erosivo natural considerável. Esse risco é ampliado com a supressão da vegetação arbórea nativa e com a concentração do fluxo superficial. Mesmo presentes em pequenas áreas as práticas conservacionistas devem ser consideradas para evitar o desenvolvimento de processos instabilizatórios.

3.6 - HIDROLOGIA

A associação de fatores climáticos com aspectos geológicos condiciona as características hidrográficas da região litorânea do Estado do Ceará. O escoamento fluvial é temporário para os cursos d'água inseridos no embasamento cristalino durante a quadra chuvosa. Para os cursos dessas drenagens sobre ou com nascentes nos terrenos sedimentares terció-quaternários o fluxo d'água é permanente.

A área de pesquisa está localizada na parte ocidental da Bacia Hidrográfica Metropolitana (IPLANCE, 2007) sendo a Lagoa do Gereraú, riacho Guaribas e Lagamar do Cauípe as unidades de maior expressão hídrica superficial sendo parte integrante da bacia hidrográfica do rio São Gonçalo, micro bacia Guaribas e bacia hidrográfica do rio Cauípe, respectivamente (Figura 3.15).

Tanto o rio São Gonçalo quanto o rio Cauípe têm suas nascentes localizadas fora da área de pesquisa por sobre os terrenos de rochas cristalinas exibindo um padrão de drenagem com baixa densidade de tributários no embasamento, mas de médio porte e grande extensão. Quando esses rios adentram os terrenos sedimentares aumenta consideravelmente a densidade de tributários, mas, reduz-se suas extensões. O sentido principal do curso d'água no rio São Gonçalo é SSE- NNW até o limite com os sedimentos quaternários que muda seu sentido para NE. Já o rio Cauípe tem o seu fluxo d'água com sentido N-S no embasamento cristalino mudando gradualmente para E-W ao aproximar-se dos terrenos sedimentares passando deste ponto a ter novamente um sentido N-S. Uma análise nos dados de fluviometria do rio São Gonçalo para o período de 1984 a 2006 fornecidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e Agência Nacional de Águas (ANA) não encontrou um nível satisfatório de consistência que fosse possível tecer comentários coerentes sobre a ordem de grandeza na vazão desse rio. A ausência recorrente de informações de vazão ao longo de períodos chuvosos na região foi o primeiro indicativo da inconsistência, além de vazões máximas diárias em ordem de grandezas incoerentes.

A Lagoa do Gereraú inserida em neossolos sobre o embasamento cristalino no contato com os sedimentos areno-argilosos do Grupo Barreiras apesar de ter uma de área entorno de 150 ha. caracteriza-se por uma reduzida lâmina d'água < 1,0 m. Devido a essa espessura da lâmina d'água e a intensa evaporação, durante os meses de novembro a janeiro antecedendo o quadriênio chuvoso há uma grande redução de sua área de exposição (Figuras 3.15).

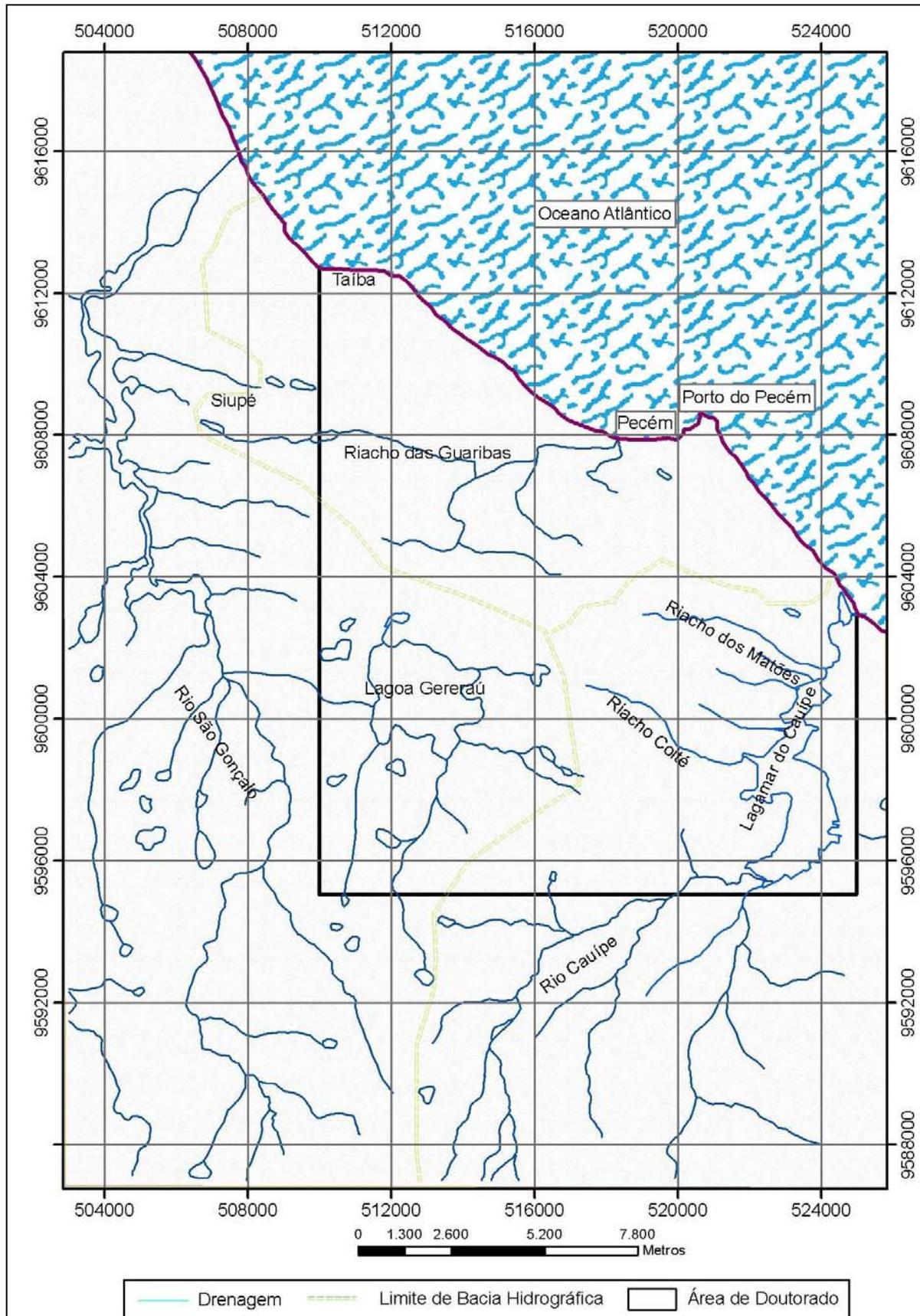


Figura 3.15 - Rede hidrográfica da região da área de pesquisa ressaltando o comportamento das principais drenagens existentes e os limites de suas respectivas bacias e micro bacias.

O riacho das Guaribas é o curso principal da micro bacia que tem sua nascente situada na localidade de Siupé, região de contato dos sedimentos quaternários com os sedimentos do Grupo Barreiras, ao sul da localidade de Taíba (Figura 3.15). Em seu trecho principal tem orientação E-W, obedecendo à principal orientação de avanço das dunas, mas, mudando o sentido para norte na sua foz, no distrito de Pecém (Figura 3.15).

O Lagamar do Cauípe originado pelo barramento do baixo curso do rio Cauípe pelos sedimentos arenosos quaternários com forma alongada na direção N-S recobre também o tabuleiro pré-litorâneo e parte do embasamento cristalino (Figura 3.15). Os riachos dos Matões e Coité são seus principais tributários tendo orientação E-W também condicionados por dunas e paleodunas. A espessura da lâmina d'água em parte central em momentos de maré alta atinge cerca de 5,0 m (LABOMAR, comunicação verbal).

3.7 - GEOLOGIA

Em termos regionais a área pesquisada insere-se na Faixa de Dobramentos Jaguaribeanos onde paragneisses, ortogneisses, metabásicas e metacalcários são os principais litotipos do embasamento cristalino, com níveis distintos de metamorfismo-migmatização (Brandão, 1995). Subordinadamente incluem-se ortogneisses ácidos, rochas metabásicas, gnaisses dioríticos, metagabros, metaultramáficas, quartzitos e metacalcários. Nos terrenos sedimentares terciários, os arenitos argilosos de tonalidade variegada com leitos conglomeráticos e nódulos lateríticos na base são associados ao Grupo Barreiras (Cavalcante, 2003).

A área propriamente dita abrange uma zona de transição entre uma unidade Pré-Cambriana (Complexo Gnáissico-Migmatítico) e as unidades Tércio-Quaternárias constituídas pelos depósitos sedimentares do Grupo Barreiras, coberturas colúvio-eluviais e, as unidades Quaternárias representadas pelos depósitos eólicos, de praia, flúvio-marinhos e fluviais (Figuras 3.16 e 3.17).

Embasamento Cristalino (Complexo Gnáissico-Migmatítico)

O Complexo Gnáissico-Migmatítico é composto por anfibólio-biotita gnaisses migmatizados, muscovita-quartzitos e quartzitos. Esta unidade está posicionada estratigraficamente no Paleoproterozóico e sofreu retrabalhamento nos ciclos Transamazônico e Brasileiro intenso apresentando aspectos texturais e mineralógicos que evidenciam diferenciados processos metamórficos e deformacionais (Cavalcante, 2003). A

orientação principal das estruturas rúpteis observadas em sensores orbitais é N-NE e, subordinadamente, NW.

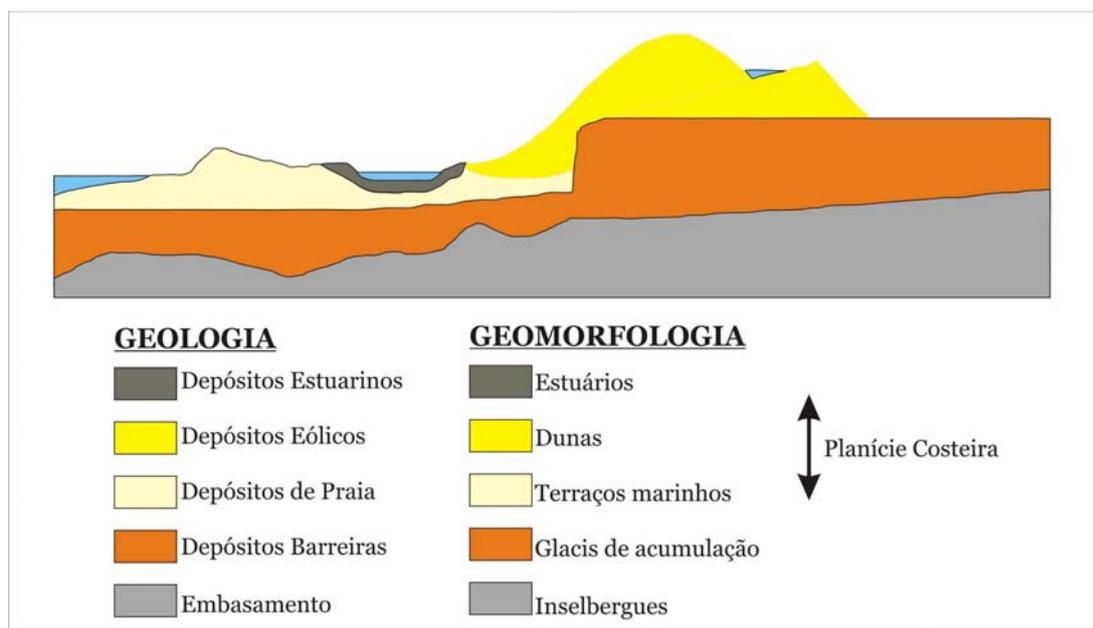


Figura 3.16 - Compartimentação geológico-geomorfológica para o litoral do Estado do Ceará (Maia, 1998).

Na área, essa unidade pode ser observada principalmente em dois locais. No litoral próximo ao porto do Pecém (Ponta do Pecém) e em corte de estrada na CE-085. Em ambos locais, é possível observar o anfibólio-biotita gnaisse migmatizado com intercalações de quartzitos. Uma foliação penetrativa foi identificada com direção N60W/30NE e forte fraturamento paralelo à foliação.

Nos dois locais onde afloram as rochas do embasamento os quartzitos mostram características semelhantes com granulação grossa e pouco friável. Nos afloramentos próximos ao porto do Pecém (Figura 3.18) e no serrote Olho d'água uma foliação marcante de direção N15W/15°NE e famílias de fraturas de direção N25E/subvertical e N40E/subvertical na forma de pares conjugados podem ser observadas (Figura 3.19). Em algumas porções do afloramento, é comum observar conjuntos de fraturas paralelas entre si. Veios de quartzo de espessura em torno de 15,0 cm encontram-se discordantes da foliação.

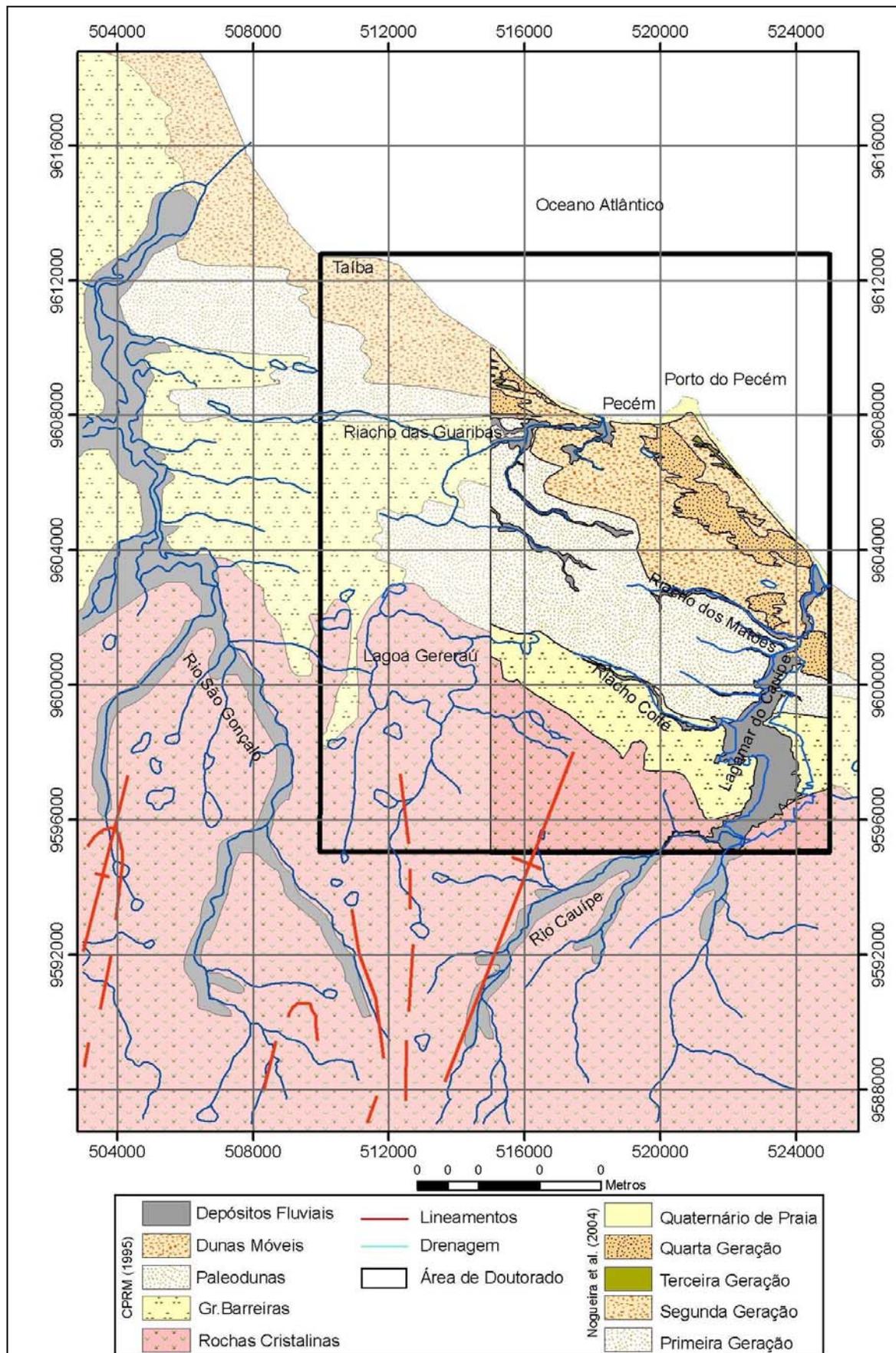


Figura 3.17 - Mapa geológico da região do Pecém em escala 1:100.000 (Brandão, 1995) e em escala 1:50000 da região do plano diretor do CIPP (Nogueira & Augusto, 2004).



Figura 3.18 - Quartzitos expostos durante a maré baixa de sizígia, localizados próximo à ponte de acesso do Porto do Pecém.

Figura 3.19 – Serra do Mineiro com exposição do anfíbólio-biotita gnaiss no extremo sul da área. Esse material foi utilizado no enrocamento do Porto do Pecém.

A presença de exposições de rochas do embasamento proterozóico em restritas áreas litorâneas é interpretadas como função de blocos escalonados por falhas normais neotectônicas responsáveis pela manutenção de compartimentos elevados e rebaixados.

Grupo Barreiras

As características sedimentológicas do Grupo Barreiras na zona de estudo apresentam pequenas variações sendo definido de forma simplificada como uma sucessão de leques aluviais depositados em dois eventos bem diferenciados. O primeiro evento e mais antigo, é responsável pela deposição da camada inferior formado principalmente por material argilo-arenoso, enquanto que no segundo evento responsável pela deposição da camada superior, predominam os sedimentos arenosos (Brandão, 1995).

A camada inferior consiste de um conjunto de fácies aluviais, formadas por lamas e areias lamosas com coloração variando de cinza a vermelho alaranjado, presença de seixos e grãos angulosos a sub-angulosos de quartzo e lentes de argila. As condições hidrodinâmicas do meio deposicional ficaram registradas na forma de estratificações gradacionais plano paralelas e cruzadas.

A estratificação gradacional é incipiente e mostra uma diminuição da fração grossa para o topo. Os níveis conglomeráticos marcam a presença de estratificações cruzadas de tamanho variado correspondendo a um depósito residual de canal (Brandão, 1995).

Os sedimentos da seqüência superior são constituídos predominantemente por areias avermelhadas de granulometria média a fina, não consolidadas, com intercalações de níveis conglomerático,s pobre a moderadamente selecionados, subarredondados a angulosos. O contato inferior vem marcado por estruturas sedimentares pré-deposicionais,

formadas por canais erosivos (paleocanais) e níveis de seixos. Esta seqüência apresenta características de um ambiente fluvial entrelaçado, com intercalações de barras longitudinais (Nogueira & Augusto, 2004) (Figura 3.20 e 3.21).



Figura 3.20 - Contato superior do Grupo Barreiras com neossolos quartzarênicos sobrepostos na região centro-sul da área de pesquisa.



Figura 3.21 - Área de empréstimo de areia expondo a parte superior do Grupo Barreiras na parte central da área de pesquisa.

Unidades Quaternárias

Depósitos Eólicos

Estes depósitos são os de maior exposição na área de pesquisa sendo representados em sua maioria pelas dunas de primeira e segunda geração (Nogueira & Augusto, 2004) (Figuras 3.22 e 3.23). Dentre as várias classificações existentes sobre esses tipos de depósitos no litoral do Estado do Ceará (p.ex. Brandão, 1995; Maia, 1998; Carvalho, 2003) optou-se por adotar uma combinação de critérios (morfologia, grau de litificação, cor dos sedimentos, cobertura vegetal e disposição geográfica) adotados por Maia (1998) e Carvalho (2003).

- Primeira e Segunda Geração de Dunas

Esses depósitos têm características muito semelhantes. Diferenciam-se principalmente na morfologia e disposição geográfica, onde a primeira geração está posicionada mais distante do mar com uma maior área de ocorrência. São depósitos descontínuos, de baixo relevo, compostos por areias de cor amarelada, enquanto que a segunda geração de dunas está mais próxima ao litoral, com relevo mais elevado, às vezes recoberto por dunas móveis, compostas por areias de coloração branca e amarelada com área mais restrita de ocorrência. As dunas ocorrem de forma isolada ou em campos de dunas compostos, onde se somam em tamanho, gerando geometrias irregulares com dimensões que podem chegar até 5,0 km de comprimento e 1,0 km de largura em seus pontos mais extensos (Figuras 3.22 e 3.23).

O alcance máximo desses depósitos a partir da faixa de praia é aproximadamente de 8,0 km para a primeira geração e 5,0 km para segunda geração.

As dunas da primeira geração transversalmente são planas (achatadas), altura máxima de 8,0 m, apresentando superfícies de inclinações suaves, diferentemente da segunda geração que são tanto mais inclinadas como mais elevadas, podendo alcançar mais de 30,0 m.



Figura 3.22 - Vegetação arbustiva atuando na fixação das cristas de dunas de 2ª geração.



Figura 3.23 - “Braços” de uma duna de 2ª geração sendo fixado pela vegetação gramínea à esquerda e arbustiva à direita.

Ambos os depósitos apresentam a formação de solos com vegetação arbustiva de grande porte. Esses solos exibem espessura que variam em torno de 30,0 cm, ricos em matéria orgânica e de cor cinza escuro. Abaixo desse nível existe uma camada de areia esbranquiçada com espessura em torno de 60,0 cm, totalmente infiltrada por raízes e furos de organismos.

Nestas gerações, os sedimentos são compostos principalmente de grãos de quartzo e como acessórios minerais pesados. Também se observou algumas ocorrências de raros fragmentos biogênicos carbonáticos, a exemplo de carapaças e algas. As areias, no geral, possuem granulometria de fina a média, bem a moderadamente selecionadas.

O contato basal desses depósitos com a Formação Barreiras ocorre na primeira geração de dunas de forma discordante em pontos distantes do litoral. Já as dunas da segunda geração, mostram um contato irregular com as dunas da primeira geração as sobrepondo. Em toda a área, o topo destes depósitos está sendo recoberto pela migração do campo atual de dunas móveis.

- Terceira Geração de Dunas

A ocorrência desse depósito é distinguível na área, pelo aspecto morfológico característico e diferenciado em termos de litificação. Estão distribuídos ao longo de toda costa da área de modo descontínuo, exposto unicamente na área de deflação onde exibe um relevo destacável, formando elevações resistentes à erosão eólica, e são frequentemente denominados como Eolianitos (Figuras 3.24 e 3.25).

Os eolianitos são definidos como depósitos eólicos formados a partir de areias quartzosas cimentadas a partir da precipitação de carbonato de cálcio. Essa unidade é constituída por corpos tabulares às vezes inclinados, extremamente estratificados, de cor cinza, granulometria variando de média a grossa, bem selecionada. Mostra um acamamento com atitudes variáveis entorno de N45W/09NE. Esses pacotes são formados por níveis que se apresentam friáveis a fortemente litificados, com espessura milimétrica de 3,0 a 5,0 mm.

Os sedimentos desse depósito são compostos por areias quartzosas, minerais pesados, feldspatos e fragmentos carbonáticos orgânicos. Os minerais pesados ocorrem em níveis milimétricos alternados, bem definidos e ainda disseminados com outras partículas em níveis mais quartzosos.



Figura 3.24 - Eolianitos com cerca de 10,0m de altura com depósitos tabulares suavemente inclinados. Localizado no limite oeste da área, próximo à Taíba.



Figura 3.25 - Eolianitos em níveis milimétricos, mostrando a presença de bioturbações (em forma de dutos) cortando a estratificação.

- Quarta Geração de Dunas

Essa geração é representada pelos depósitos eólicos que se formam atualmente e compõem os campos de dunas móveis. Estão incluídos nesses depósitos, tanto aqueles formados pelo retrabalhamento de dunas mais antigas, como os desenvolvidos diretamente pelo fornecimento de sedimentos transportados na face de praia atual.

Esses depósitos ocorrem na maior parte do litoral da área, localizados principalmente entre uma estreita área de deflação próxima ao mar e o campo de dunas da segunda geração (porção continental). Possuem uma largura variável, podendo chegar até 3,0km no extremo oeste da área, próximo à praia de Taíba. Caracterizam-se pela ausência de vegetação ou pela fixação de um revestimento pioneiro, o qual atenua os efeitos da dinâmica eólica responsável pela migração das dunas (Figuras 3.26 e 3.27). É muito comum nestes campos de dunas, o soterramento de drenagens ou a formação de barramentos, que obstruem parcial ou totalmente as desembocaduras dos rios, gerando lagoas costeiras.

Superfície de Deflação

Esta superfície caracteriza-se por uma área disposta geralmente paralela a linha de costa, situando-se entre os campos de dunas frontais e os grandes campos de dunas móveis atuais, separando os depósitos eólicos intimamente relacionados à praia, daqueles localizados em porções mais interna no continente.



Figura 3.26 - Avanço do campo de dunas por sobre um coqueiral e a consequência de uma ocupação urbana desordenada.

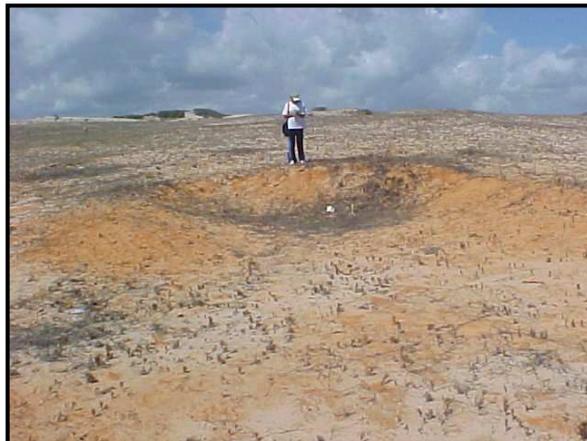


Figura 3.27 - Superfície de deflação (*blow out*) expondo sedimentos da segunda geração de dunas, próximo ao porto.

Caracteriza-se predominantemente por processos de deflação, onde também ocorre o transporte de sedimentos para o interior do continente, compondo uma zona de ligação entre áreas fonte de sedimentos e as dunas ativas. Nessa zona é comum a exposição de sedimentos de unidades mais antigas como, por exemplo, a segunda geração de dunas e principalmente a terceira geração composta por eolianitos (Figura 3.27).

Depósitos de Praia

Refletindo as características da hidrodinâmica local os sedimentos dos depósitos de praia na área de pesquisa apresentam-se dispostos ao longo de todo o litoral na forma de bancos de areias horizontais (Berma) e depósitos planares inclinados em direção ao mar, zona intermaré (Figuras 3.28 e 3.29). Domina a areia média, predominantemente quartzosa com grãos subarredondados, polidos e de esfericidade média. Observa-se que as características granulométricas apresentam modificações espaciais e temporais, com o diâmetro médio variando de areias grossas a areias muito finas. O coeficiente de seleção apresenta pouca variação, estando presentes em maior proporção às areias moderadamente selecionadas e em alguns pontos específicos as areias bem selecionadas.



Figura 3.28 - Berma com 40,0 cm de espessura com estratificações cruzadas tabulares. Diferença de coloração nos níveis milimétricos deve-se a variação na granulometria das areias.

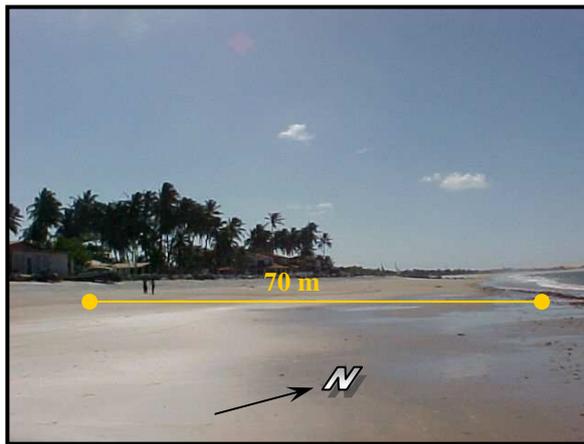


Figura 3.29 - Extensão elevada e baixa declividade da Zona de Intermaré.

3.8 - GEOFÍSICA

O arcabouço geológico utilizado na caracterização do sistema aquífero está diretamente associado à integração dos produtos obtidos no levantamento geofísico por eletrorrestividade e a cartografia geológica em escalas de 1:100.000 e 1:50.000. Já o comportamento geoeletrico da interface água doce/água salgada foi obtido pela aplicação de técnicas geofísicas eletromagnéticas do domínio da frequência na região do Porto do Pecém (Figura 3.30).

3.8.1 - Eletrorrestividade

Um total de 50 Sondagens Elétricas Verticais (SEV) executadas tanto na área de influência do CIPP quanto em suas adjacências foram utilizadas na caracterização geoeletrica (Figura 3.30). O objetivo específico foi o de avaliar a variação de espessura dos estratos geoeletricos. As sondagens utilizadas são um somatório de dados adquiridos em alguns projetos de pesquisa do LGPSR, inclusive esse no qual a tese de doutoramento é parte integrante. O arranjo utilizado foi o Schlumberger com AB/2 (1-300m) e MN/2 (0,3-50m).

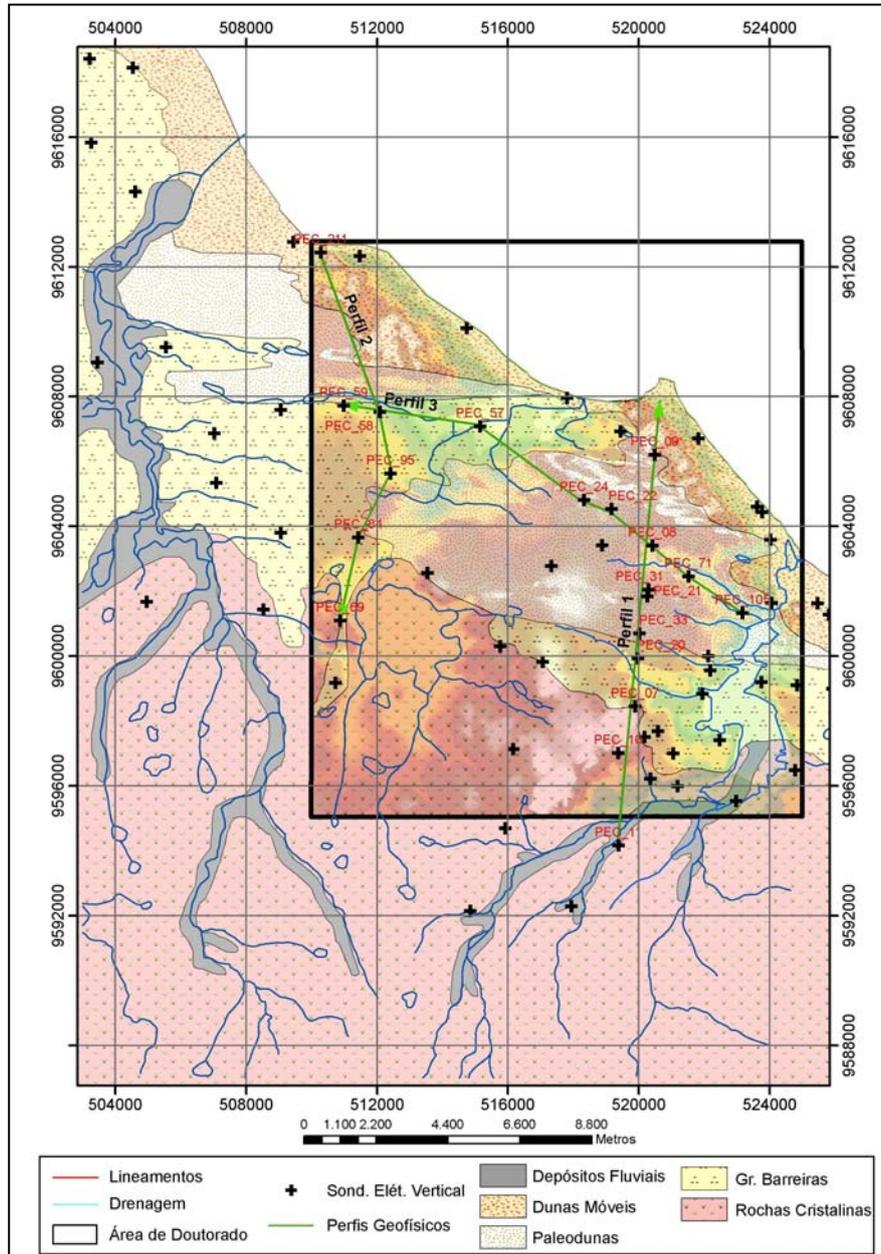


Figura 3.30 - Distribuição das Sondagens Elétricas Verticais e localização dos perfis geofísicos na região da área de pesquisa.

Processamento dos Dados

Uma vez que a resistividade aparente medida em campo não é uma propriedade física da subsuperfície, é necessário utilizar técnicas de interpretação que transforme os valores obtidos pelas sondagens verticais em resistividade “real”.

As curvas de campo das SEV's foram interpretadas através da seguinte metodologia (Figura 3.31):

1. Inicialmente os dados de campo foram processados através do *software* ATO versão 1.82 (Zohdy & Bisdorf, 1989) onde, basicamente, cada ponto de medida é considerado como uma camada geométrica distinta com dois parâmetros associados, resistividade e espessura;
2. A segunda etapa consiste em agrupar camadas que possuem comportamento geométrico semelhantes, utilizando as informações geológicas locais disponíveis;
3. Após as etapas 1 e 2, os dados são novamente processados (invertidos) no *software* RESIST versão 1.0 (Vander Velpen, 1988), com a introdução de um modelo inicial de n-camadas com suas respectivas, resistividades e espessuras, obtido da primeira etapa de interpretação.

O método de inversão, segundo Ward (1990), consiste em calcular uma curva teórica e compará-la com a curva de campo. A comparação é feita, utilizando a técnica de mínimos-quadrados, entre os valores observados de ρ_a versus $AB/2$ (curva de campo) e os valores calculados de ρ_a devido a um arranjo geométrico determinado de 4 eletrodos sobre n-camadas (curva teórica). Este método possibilita que a cada tentativa de comparação, o erro convirja para valores menores até um limite aceitável, geralmente menor que 5%.

Detalhes teóricos do método, práticos da aquisição e seqüência de processamento dos dados podem ser consultados no item B1 (Anexos).

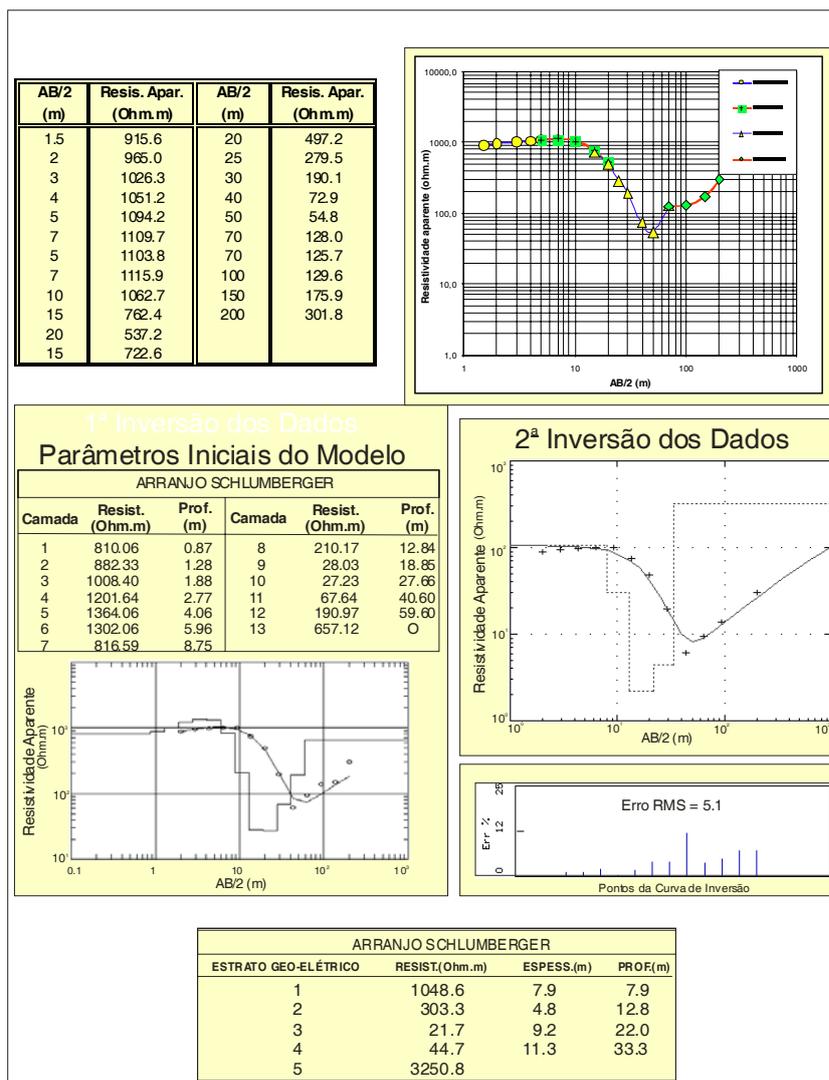


Figura 3.31 – Curva típica de resistividade elétrica *versus* AB/2 para a área de pesquisa e etapas do processamento realizado com os dados obtidos.

Após o processamento dos dados de campo a coluna geoeletrica padrão para a área apresentou cinco camadas que podem ser associadas às unidades litoestratigráficas locais (Figura 3.32).

As Figuras 3.33 a 3.35 apresentam 03 perfis geoeletricos que ressaltam a variação de espessuras do pacote sedimentar e da profundidade do topo do embasamento cristalino. Os perfis 1 e 3 estão orientados perpendicularmente a linha de costa e o perfil 3 está paralelo ao litoral (Figura 3.35). Devido a reduzida espessura dos estratos geoeletricos 1 e 4 quando comparada à extensão dos perfis, optou-se por representar os estratos 1 e 2 como sendo apenas uma única camada e não representar a presença do estrato 4.



Figura 3.32 - Coluna geoeétrica típica ressaltando as diferenças físicas entre os materiais terrígenos em profundidade.

3.8.2 – Eletromagnético Indutivo

Nas zonas costeiras a água subterrânea continental menos densa encontra-se em contato com a água subterrânea marinha através de uma zona de transição denominada interface água doce/água salgada. A superexploração nessa região dos recursos hídricos subterrâneos pode provocar a movimentação não-natural em direção ao continente dessa interface promovendo a contaminação pelo o avanço da denominada cunha salina.

Com vistas a avaliar o comportamento geoeétrico natural da interface água doce/água salgada na região do Porto do Pecém até próximo a foz do Rio Cauípe o LGPSR vem desenvolvendo algumas pesquisas de mestrado e doutorado com aplicações de técnicas eletromagnéticas do domínio da frequência e do tempo. Essas últimas mais recentes ainda estão em fase de aquisição de dados, mas as do domínio da frequência já possuem resultados bastante representativos como os apresentados por Cavalcante (2006) e Mota (2006). Detalhes teóricos do método, práticos da aquisição e seqüência de processamento dos dados podem ser consultados no item B2 (Anexos).

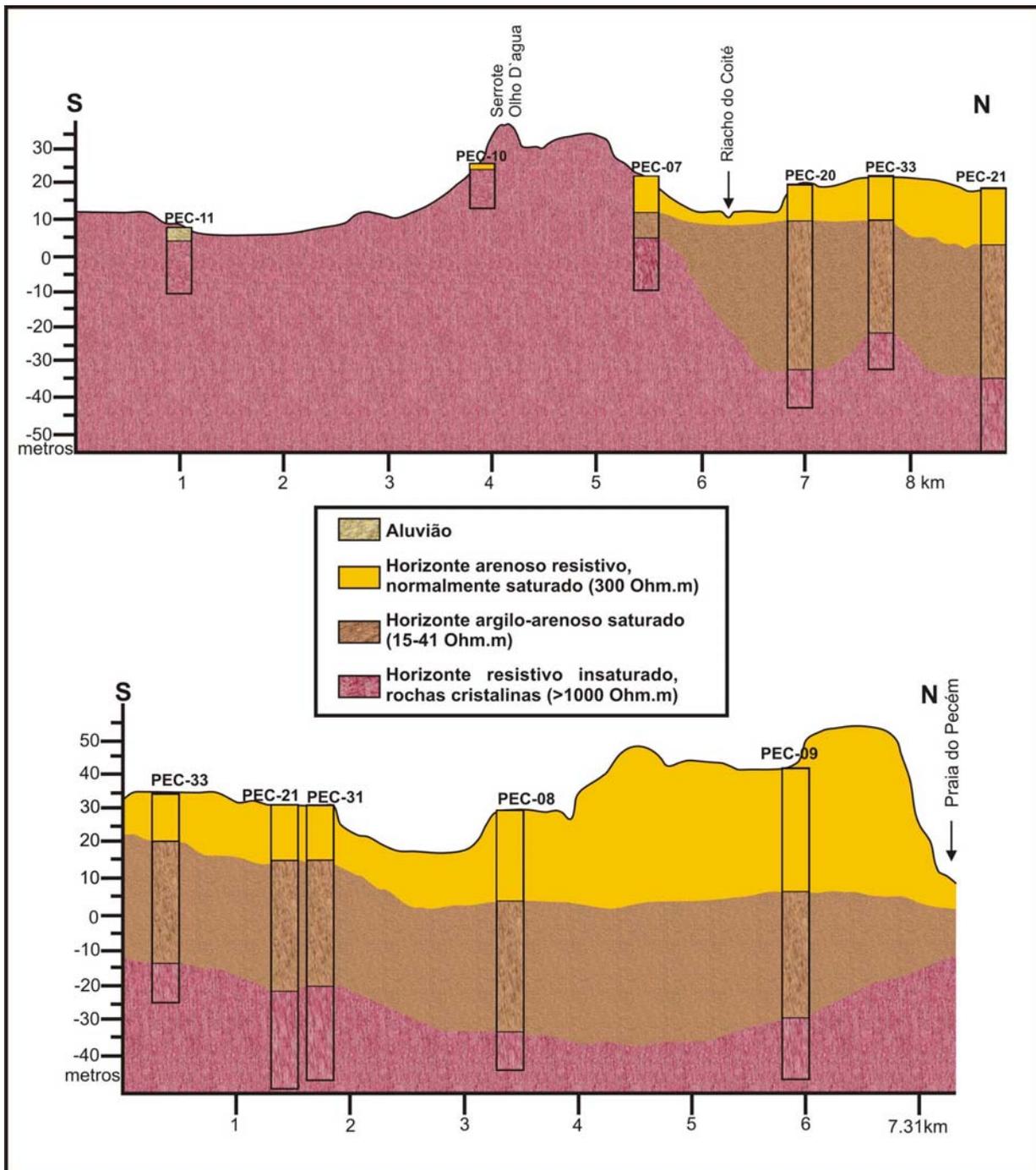


Figura 3.33 - Perfil geolétrico 01 obtido com o resultado das inversões das SEVs executadas na parte leste da área de pesquisa.

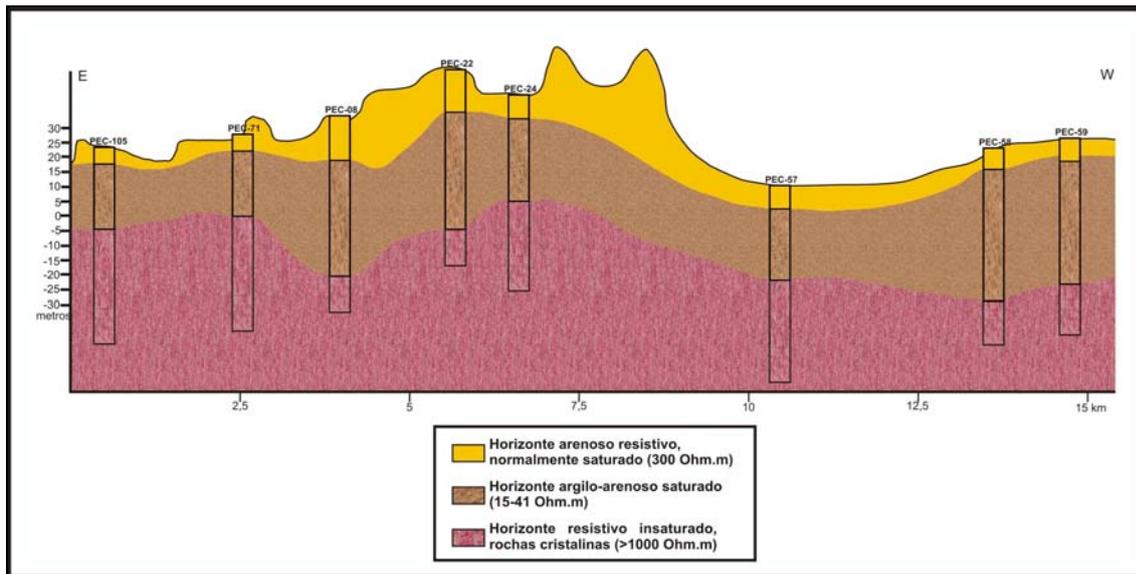


Figura 3.34 - Perfil geolétrico 02 orientado paralelo ao litoral e elaborado com o resultado das inversões das SEVs.

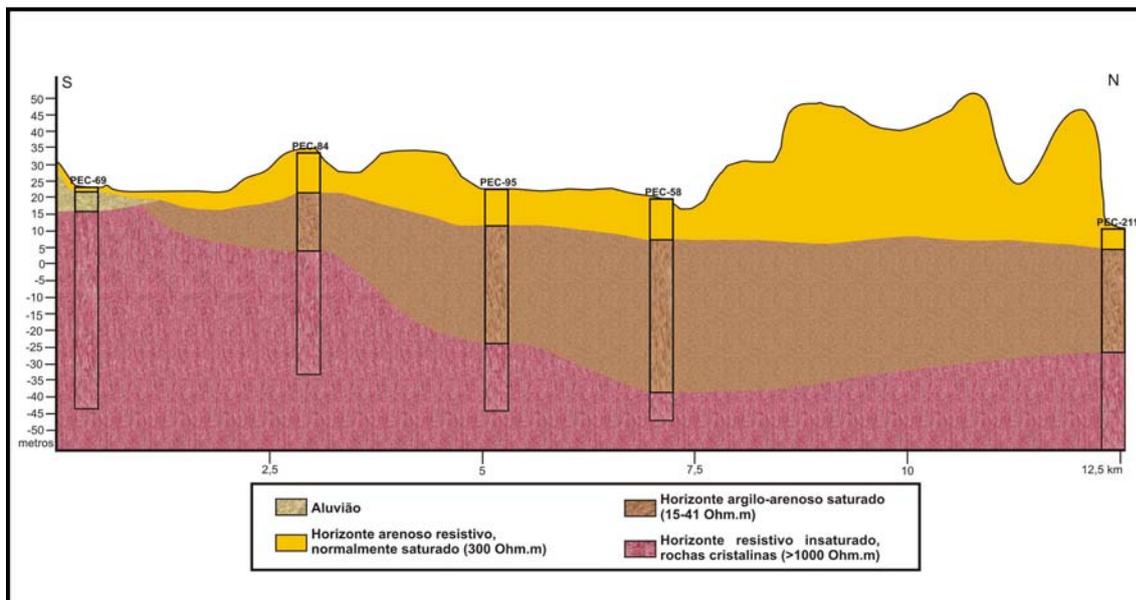


Figura 3.35 - Perfil geolétrico 03 elaborado com o resultado das inversões dos dados das SEVs executadas na parte oeste da área.

Cavalcante (2006) realizou uma caracterização do aquífero costeiro da Praia do Pecém, através da aplicação do método geofísico eletromagnético e do monitoramento de piezômetros. A finalidade foi determinar a extensão da cunha salina em direção ao continente e as áreas que sofrem maior influência da água do mar. Os estudos de campo foram realizados em duas etapas correspondentes aos períodos seco e chuvoso da região.

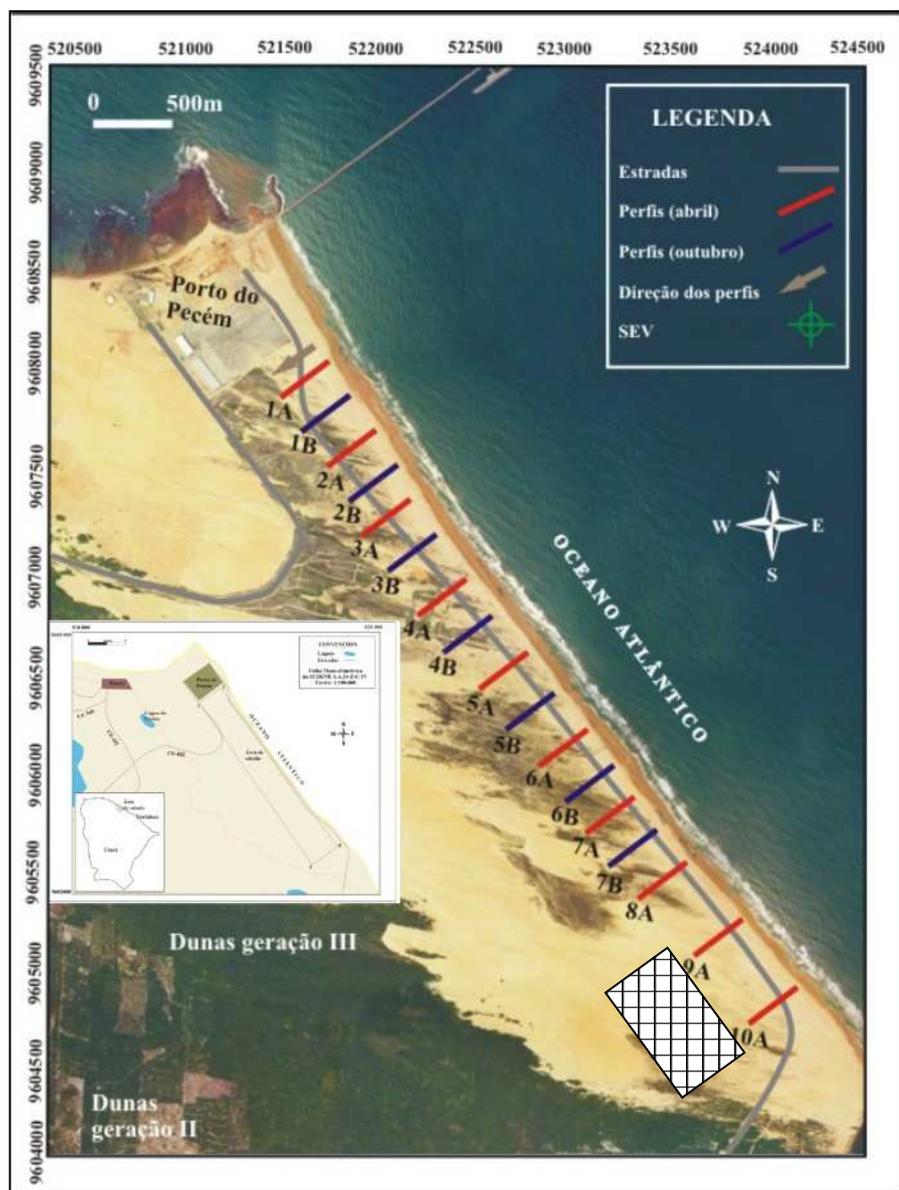


Figura 3.36 - Mapa de localização da área de pesquisa e perfis geofísicos de Cavalcante (2006). Obs.: A área de pesquisa de Mota (2006) aparece com padrão hachurado.

A caracterização da interface água doce/água salgado no aquífero costeiro foi baseada no princípio de indução eletromagnética no domínio frequência. Foram obtidos 17 perfis sendo 10 no período chuvoso (abril de 2005) e 7 no período seco (outubro de 2005), todos distanciados 500,0 m um do outro. O condutímetro eletromagnético utilizado foi o EM34-3XL fabricado pela *Geonics Limited*.

Os caminhamentos realizados na segunda fase do levantamento distribuíram-se intercalados aos anteriores de maneira a se obter uma maior cobertura dos dados de condutividade elétrica aparente na região. A finalidade desta etapa foi observar a variação sazonal da condutividade em subsuperfície para esta região. Todos os caminhamentos

iniciaram da linha de costa para o interior do continente. Os perfis têm uma direção preferencial de NE-SW e estão distribuídos paralelos entre si e perpendiculares à linha de costa. Cada perfil tem uma extensão de 300,0 m e o espaçamento de cada estação é de 20,0 m, totalizando 16 estações para cada caminhamento. O total das estações, nos dois períodos, foi de 272 estações (Figura 3.36).

Os resultados de abril/2005 obtidos na estação chuvosa de Cavalcante (2006), de uma forma geral, apresentam valores baixos de condutividade (entre 2,0 e 30,0 mS/m), à exceção de algumas regiões onde se verificou elevação destes valores (até 60,0 mS/m). Ocorre também uma diminuição da condutividade à medida que há um afastamento da linha de costa em direção ao continente (Figura 3.37). Somente os perfis 3A e 6A apresentaram uma zona condutiva bastante proeminente, estendendo mais marcadamente para o interior do continente. Nos demais perfis, essa região concentrou-se nas áreas mais próximas à linha de costa, não ultrapassando os primeiros 50 m. Considera-se que na região dessas zonas anômalas encontram-se zonas fraturadas no topo do embasamento, muito provavelmente quartzitos, que condicionam e armazenam um fluxo preferencial de água salgada quando ocorre a movimentação natural da interface água doce/água salgada.

Os resultados de outubro de 2005 obtidos por Cavalcante (2006) mostram-se semelhante ao levantamento realizado em abril no que diz respeito à diminuição dos valores de condutividade em direção ao continente. Outro aspecto que deve ser destacado é que a condutividade aparente registrada nesse período (outubro) foi superior a registrada nos perfis de abril, situando-se entre 15 e 80 mS/m (Figura 3.38).

Mota (2006) obteve resultados compatíveis com a mesma técnica em uma área próxima a foz do rio Cauípe e ao lado dos perfis 9A e 10A de Cavalcante (2006). Foram efetuadas 311 sondagens distribuídas em uma malha de 800 m x 600m com espaçamento de 40 metros entre os pontos de leituras.

Pseudo-seções e mapas de isovalores de condutividade elétrica para a estação chuvosa (abril/2005)

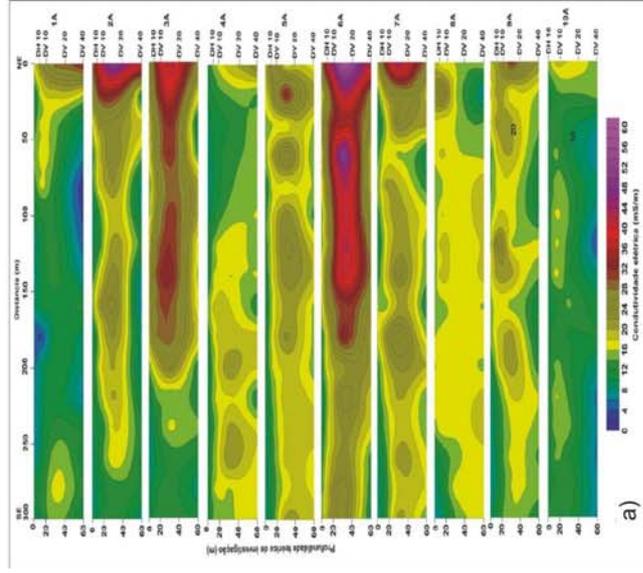
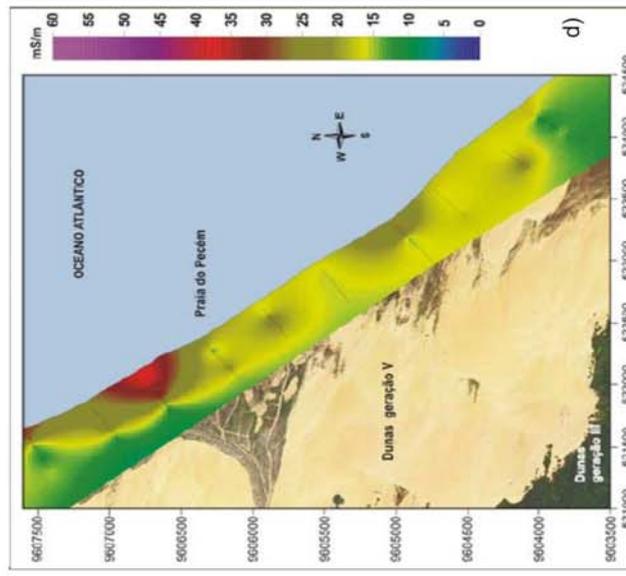
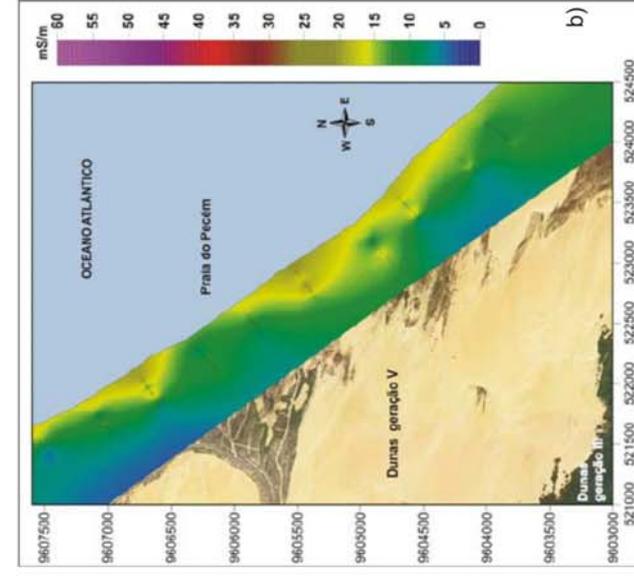
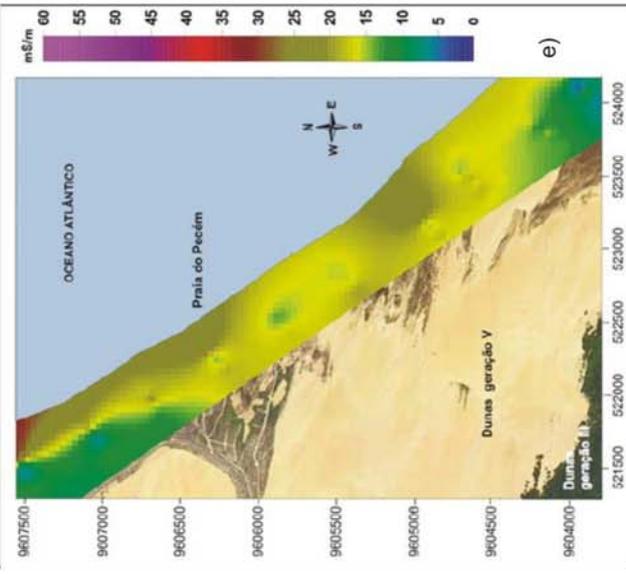
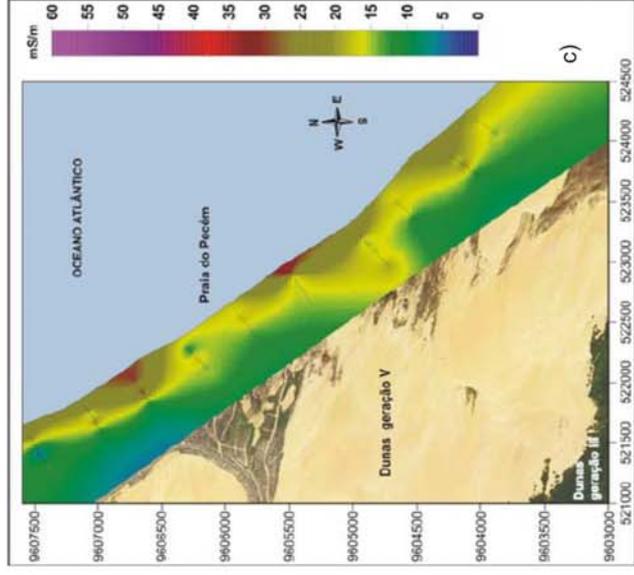


Figura 3.37

- a) Zonas anômalas condutivas nos perfis 3A e 6A.
- b) Profundidade Teórica Máxima de 7,5 m.
- c) Profundidade Teórica Máxima de 15,0 m.
- d) Profundidade Teórica Máxima de 30,0 m.
- e) Profundidade Teórica Máxima de 60,0 m.



Pseudo-seções e mapas de isovalores de condutividade elétrica para a estação seca (outubro 2005)

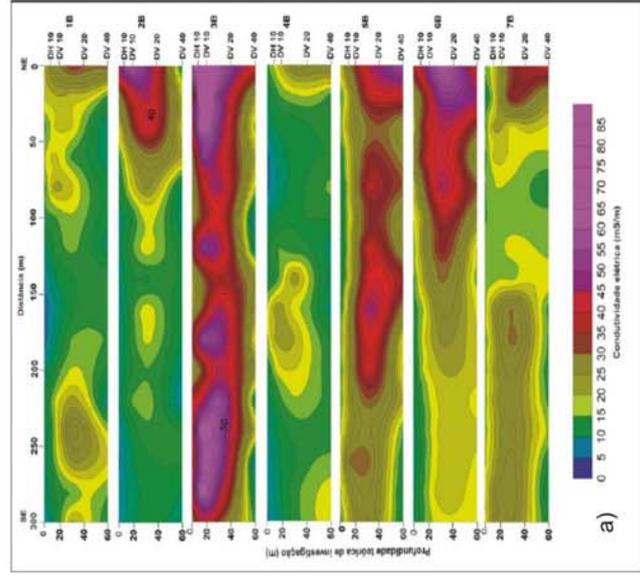
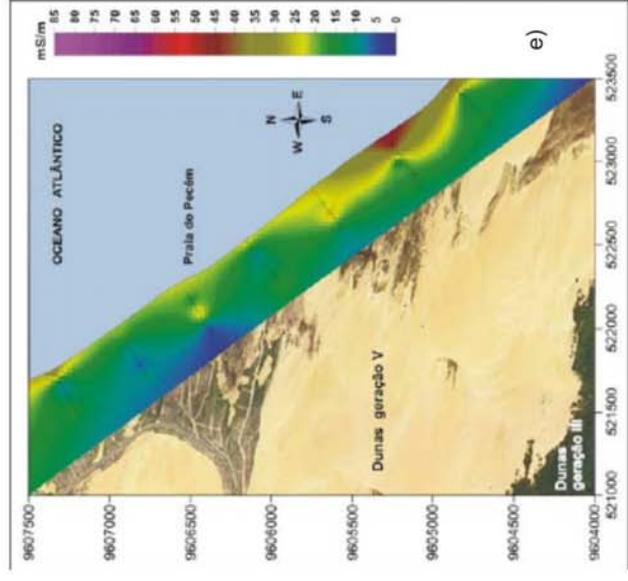
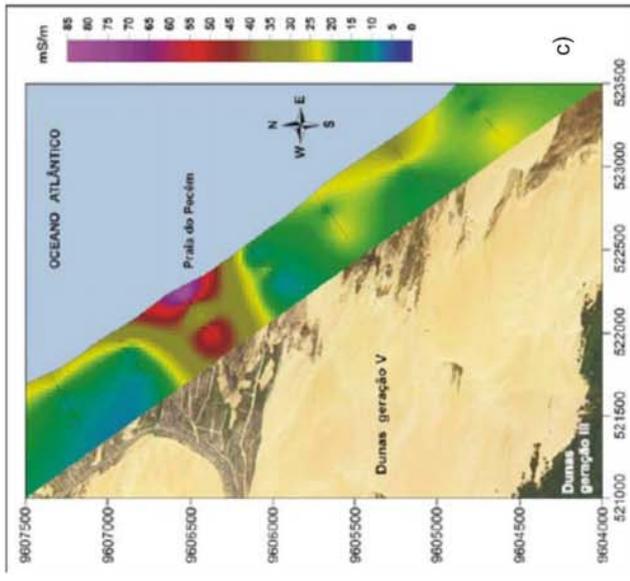
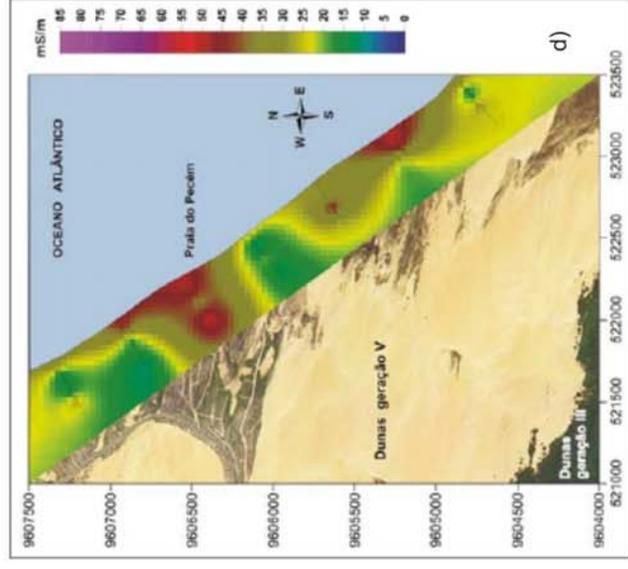
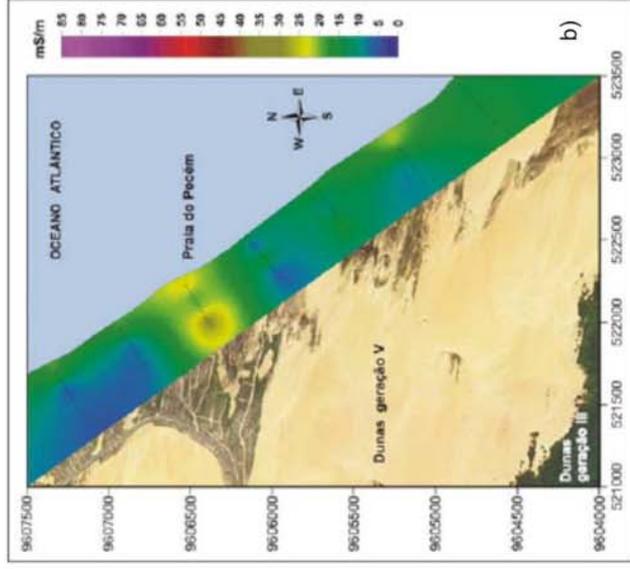


Figura 3.38

- a) Zonas anômalas condutivas nos perfis 3A, 5A e 6A.
- b) Profundidade Teórica Máxima de 7,5 m.
- c) Profundidade Teórica Máxima de 15,0 m.
- d) Profundidade Teórica Máxima de 30,0 m.
- e) Profundidade Teórica Máxima de 60,0 m.



A Figura 3.39 apresenta os resultados obtidos para esse levantamento em forma de mapas de isocondutividade para cada dipolo medido. Observa-se uma excelente correlação entre o comportamento geoeletrico com as unidades litoestratigráficas e a influência da interface água doce/água salina e uma insignificante diferença entre os dipolos vertical e horizontal indicando uma maior variação vertical do que lateral das propriedades dos materiais investigados.

Para os dipolos DH10 e DV10 as variações de condutividades obtidas são facilmente correlacionáveis aos sedimentos arenosos quaternários insaturados ($\approx 0-2$ mS/m) e saturados ($\approx 3-12$ mS/m) ocorrendo em toda a área com exceção de parte dos limites leste e oeste. No limite oeste os menores valores de condutividade marcam o limite norte de ocorrência não aflorante dos sedimentos areno-argilosos terciários do Grupo Barreiras ($\approx 15-40$ mS/m) na Praia do Pecém. Já os valores mais condutivos no limite leste podem ser associados a um avanço natural da interface água doce/água salina em direção ao continente, aumentando a quantidade de íons presente na água subterrânea. Essas observações são também válidas e até mais visíveis para os dipolos DH20 e DV20.

Já a baixa condutividade e pequena variação obtida para os dipolos DH40 e DV40, contrastando de forma acentuada com os dipolos mais rasos, deve-se exclusivamente a influência das rochas cristalinas do embasamento local onde se percebe a inexistência de zonas fraturadas e/ou falhadas de médio à grande porte.

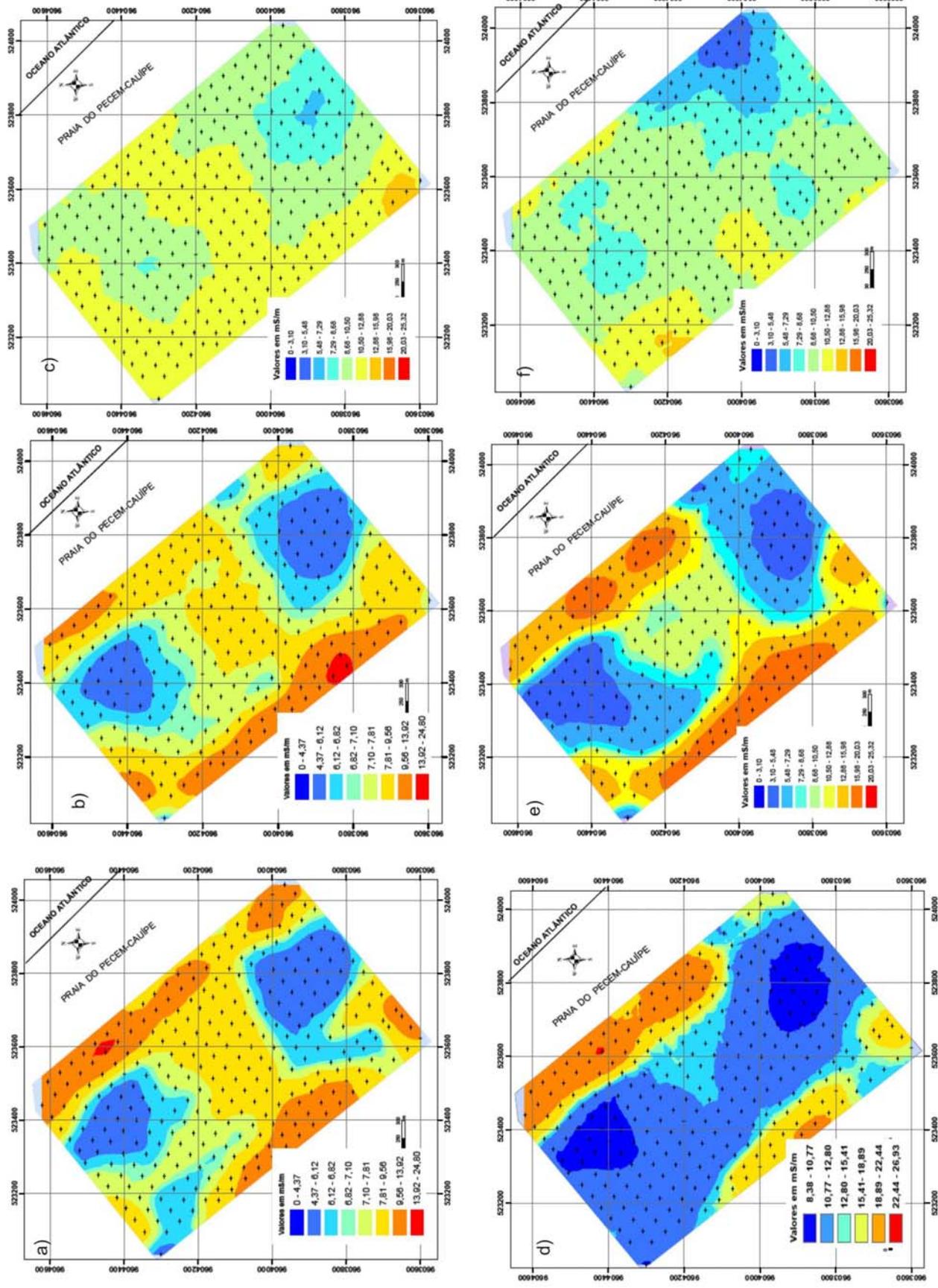


Figura 3.39 - Mapas de Isocondutividade. a) Dh10; b) Dh20; c) Dh40; d) Dv10; e) Dv20; f) DV40

3.9 - HIDROGEOLOGIA

O Aquífero Dunas e o Aquífero Barreiras são as principais unidades hidroestratigráficas da área de pesquisa, possuindo características hidrogeológicas muito diferenciadas entre si, mas com a existência peculiar de haver conexão hidráulica direta entre ambos. A ausência de um isolamento hidráulico entre unidades hidroestratigráficas, que se comportam como aquíferos encontra-se sem consenso conceitual entre pesquisadores atuantes entre a região litorânea sudeste, nordeste e norte do país, áreas de ocorrência dessas unidades.

Devido a alto grau de variação espacial do conteúdo de argila nos sedimentos terciários do Grupo Barreiras, um modelo conceitual em voga é caracterizar esses sedimentos como um aquífero (p.ex., Marinho *et al.*, 2003). A outra abordagem conceitual que será utilizada nessa pesquisa como ponto inicial para as discussões correntes considera ambas unidades como parte integrante de um sistema aquífero denominado dunas/barreiras que incorpora o modelo dos sedimentos terciários como aquífero mas, de forma localizada (p.ex., Melo, 1995).

Secundariamente ainda ocorre o Aquífero Fissural com baixa disponibilidade de recursos hídricos subterrâneos que se expõem na parte sudoeste e está sotoposto principalmente ao Aquífero Barreiras, no restante da área. As aluviões, às vezes, possuem quantidades de água explotáveis imprimindo-lhe uma importância local em termos de potencial hídrico (Figura 3.40).

Aquífero Fissural

Esse aquífero é considerado nessa pesquisa como unidade hidroestratigráfica formada pelos solos residuais, saprólito e rochas sãs fraturadas sotopostas. O potencial hídrico dessa unidade é reconhecidamente baixo pela baixa porosidade primária e porosidade secundária elevada, mas, concentrada somente ao longo das fraturas. A pequena espessura dos solos e regolitos e sua exposição irregular contribuem para o baixo potencial, mas, mesmo em tais condições a reduzida oferta hídrica concentrada entre o período de setembro a fevereiro é bem aproveitado pelas comunidades rurais.

A captação da água subterrânea é feita através de Cacimbas, poços construídos manualmente e de diâmetros em torno de 1,0 m, profundidade máxima de 3,0 m e nível estático variando entre 0,5 m a 2,0 m (Figuras 3.41 e 3.42). A captação de água subterrânea no regolito é feita por um conjunto de balde plástico ou alumínio e corda de sisal.

Nenhuma das premissas básicas de proteção sanitária recomendada pela ABAS é seguida, elevando exponencialmente o potencial de transmissão de doenças de vinculação hídrica.

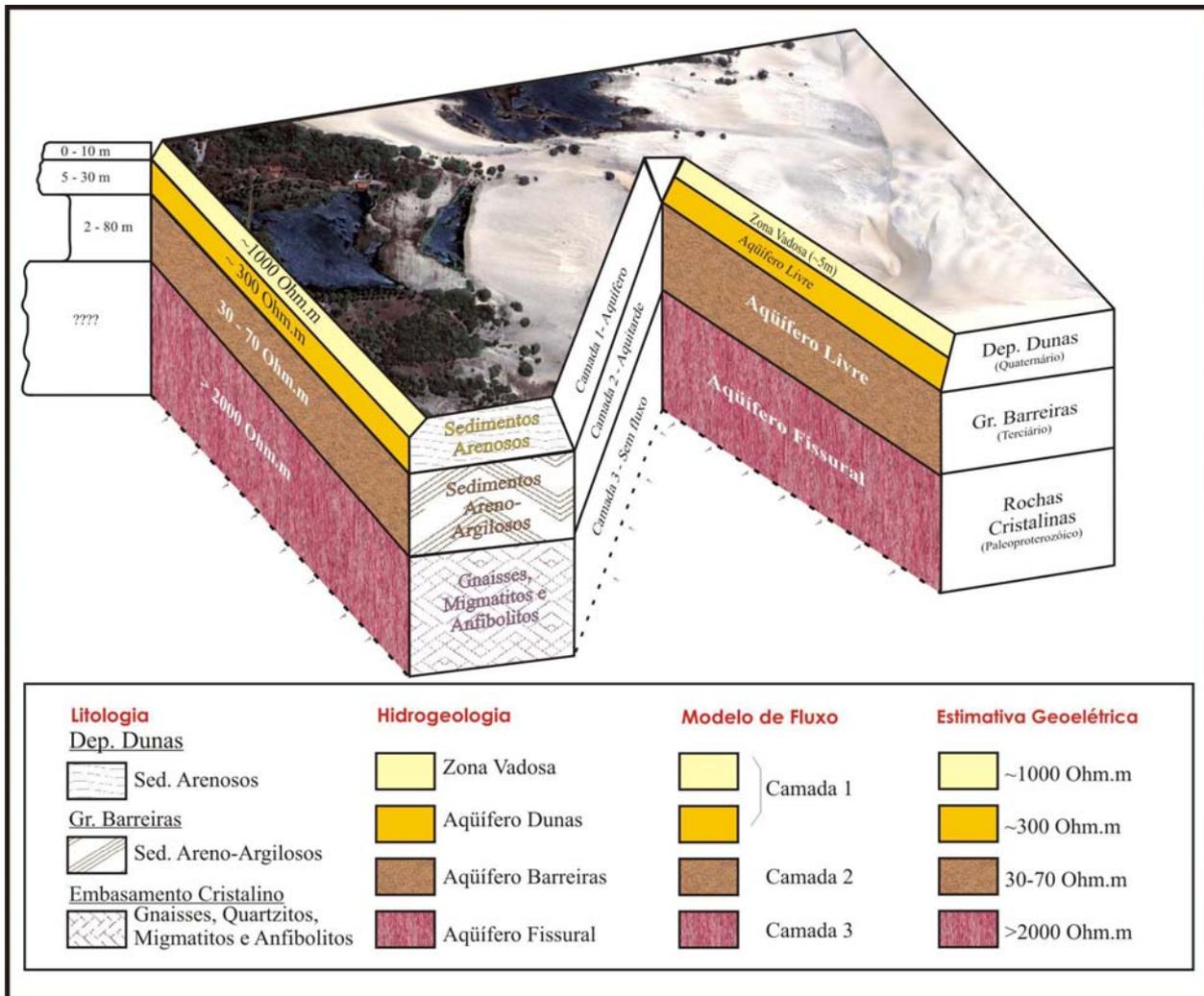


Figura 3.40 - Bloco diagrama ressaltando as relações conceituais interdisciplinares para as unidades encontradas na área de pesquisa.

Já a captação na parte fraturada ocorre através de poços tubulares com perfuração de 12" e revestimento com diâmetro de 8" até o fim do regolito, e 6" na rocha sã, sem revestimento. Esses poços raramente ultrapassam 60,0 m de profundidade devido há uma herança infeliz proporcionada pelas limitações de equipamentos incessantemente utilizados no passado. Tal limitação anterior acabou por provocar um sentimento de finitude de fluxo subterrâneo abaixo daquela profundidade.

As vazões médias de 1,5 m³/h dos poços na porção sul/sudoeste da área, normalmente, estão associadas à falta de estudos prévios de análise de lineamentos e levantamento geofísico que tendem a elevar a vazão em cerca de 30% a 40% (Empresas de perfuração por comunicação verbal). Não há estudos específicos a respeito de uma

capacidade produtiva maior ou menor dessa unidade na região em que está sobrepostas pelas unidades arenosas saturadas, região com uma recarga adicional para esse aquífero.

O comportamento dos parâmetros hidrodinâmicos desse aquífero é reconhecidamente muito irregular refletindo em padrões anisotrópicos e heterogêneos, principalmente, de condutividade e transmissividade hidráulica. Os valores laboratoriais de amostras de argilossolos indicam condutividade hidráulica média horizontal e vertical de $5,0 \times 10^{-5}$ cm/s (item 4.1).



Figura 3.41 - Cacimba escavada no embasamento cristalino para captação de água subterrânea próxima à BR-222. No canto superior esquerdo, detalhe da parede interna e do nível d'água.



Figura 3.42 - Saprólito típico no qual uma grande parte das cacimbas do aquífero fissural é escavada.

Aquífero Barreiras

Esta unidade hidroestratigráfica compreende as rochas sedimentares areno-argilosas do Grupo Barreiras. Em alguns trabalhos, por exemplo, Marinho *et al.* (2006), tal unidade é tratada e considerada como aquitarde devido ao alto conteúdo de argila em algumas porções de sua parte inferior.

Para efeito conceitual na pesquisa de que trata a tese em questão essa unidade será considerada como aquífero. Tal assertiva baseia-se na análise integrada de todas as características hidrogeológicas regionais e locais dessa unidade hidroestratigráfica e não apenas em análises específicas de um determinado parâmetro como sua resposta geométrica em determinados pontos ou valores pontuais de condutividade hidráulica.

A variabilidade lateral e vertical na espessura que atinge cerca de 80,0 m, no centro e norte da área, está principalmente associada à topografia irregular do embasamento cristalino. Na parte sul reduz-se à cerca de 2,0 m na região de contato com as rochas

cristalinas e próximo à praia do pecém também tem uma redução de espessura interrompendo sua presença por sobre o embasamento como constatado pelo levantamento geofísico. Regionalmente há descrições e constatações por empresas de construção de poços tubulares de confinamento hidráulico desse aquífero.

Sobrepõem-se ao embasamento cristalino, normalmente, através de uma camada de saprólito, descontínua e com espessura variável de poucos metros, e na maior parte da área está sob os sedimentos arenosos do Aquífero Dunas.

Com um nível estático próximo a 10,0-15,0 m a captação de água subterrânea na maioria das propriedades rurais ainda é feita através de cacimbas. Em escolas, postos de saúde, unidades administrativas e casas de prefeito já é captada por poços tubulares com perfuração de 12” e revestimento com diâmetro de 8”.

As vazões médias de 6,0 m³/h (CPRM, 1999) dos poços nesse aquífero considerando sua espessura média de zona filtrante de 20,0 m e condutividade hidráulica da ordem de $2,0 \times 10^{-5}$ cm/s (item 4.1) indicam transmissividades na ordem de $4,0 \times 10^{-4}$ cm/s. A avaliação dos demais parâmetros hidrodinâmicos é impossibilitada por ausência de ensaios de bombeamento para esse aquífero na região da área de pesquisa.

Aquífero Dunas

Com presença em cerca de 70% da área é composto por sedimentos arenosos de idade quaternária. Caracteriza-se por apresentar a espessura da zona vadosa muito maior do que sua espessura saturada nas regiões intradunas. Apesar de sua origem eólica apresenta uma variabilidade espacial que está refletida na heterogeneidade identificada na condutividade hidráulica desse material (item 4.1).

Está sobreposto ao Aquífero Barreiras por quase toda a sua extensão aflorante, excetuando-se a região ao longo da praia do pecém próxima ao promontório do pecém onde é visível sua permanência por sobre os gnaisses e quartzitos, ratificado também pelos resultados geofísicos.

No restante do litoral da área de pesquisa, os resultados da investigação geofísica indicam um contato basal com materiais terrígenos cujas características elétricas assemelham-se ao comportamento conhecido das rochas areno-argilosas do Grupo Barreiras.

Nas regiões interdunares após o início do quadriênio chuvoso a ascensão do nível estático forma lagoas de pequeno porte que persistem por cerca de dois a três meses após o período chuvoso. As lagoas de maior porte em anos com uma variação sazonal normal

persistem não mais pela ascensão do nível estático mas por serem pontos de descarga de água subterrânea dos campos de dunas (Figura 3.43).

A associação de material arenoso inconsolidado e nível estático à cerca de 2,0 m de profundidade está refletida na forma de captação de água subterrânea que é feita em sua maioria a partir de poços construídos manualmente com 4” de diâmetro e profundidade máxima de 6,0 m (Figura 3.44).



Figura 3.43 - Ponto de descarga de água subterrânea oriunda do campo de dunas formando lagoa interdunar no centro-sul da área.



Figura 3.44 - Técnica manual empregada na construção de poços para captação de água subterrânea no Aquífero Dunas.

3.9.1 - Modelo Hidrogeológico Conceitual

A relação hidráulica existente entre as unidades hidroestratigráficas pode ser visualizada de forma simplificada através do modelo hidrogeológico conceitual (Figura 3.45). Tal modelo foi desenvolvido com base nos dados e informações obtidas, além, das interpretações feitas com base nos dados geofísicos.

Desta forma, as seguintes premissas do modelo conceitual são definidas:

1 - Considera-se que o Embasamento Cristalino, o Grupo Barreiras, os Depósitos eólicos e de praia, e aluviões sejam as unidades litológicas no modelo conceitual;

2 - O sistema aquífero compreende: aluviões, aquífero dos depósitos eólicos e de praia, aquífero do Grupo Barreiras.

3 - O Embasamento Cristalino sotoposto pelo Grupo Barreiras e Depósitos eólicos e de praia serve de base impermeável para o sistema aquífero.

4 - Há uma conexão hidráulica entre o aquífero Dunas (depósitos eólicos e de praia) e o Aquífero Barreiras traduzida por uma drenança vertical descendente como função do gradiente hidráulico vertical entre esses aquíferos.

5 - As águas subterrâneas do aquífero Dunas deságuam nas sub-bacia do Guaribas e nas bacias do Cauipe e São Gonçalo através das drenagens perenes e intermitentes, e lagoas interdunares, além da descarga principal regional para o oceano.

6 - O Aquífero Barreiras deságua principalmente para norte em direção ao Oceano Atlântico, além de contribuir de maneira insignificante para a recarga do aquífero fissural.

7 - A recarga no sistema considerado ocorre por recarga superficial através da infiltração de águas pluviais nos Depósitos eólicos e Grupo Barreiras, e infiltração de águas dos rios nas aluviões.

8 - A evapotranspiração é intensa e eqüitativa em toda a área de pesquisa onde *a priori* nas áreas densamente vegetadas tenderia a ser maior, mas compensada nas áreas sem vegetação pela forte ação dos ventos.

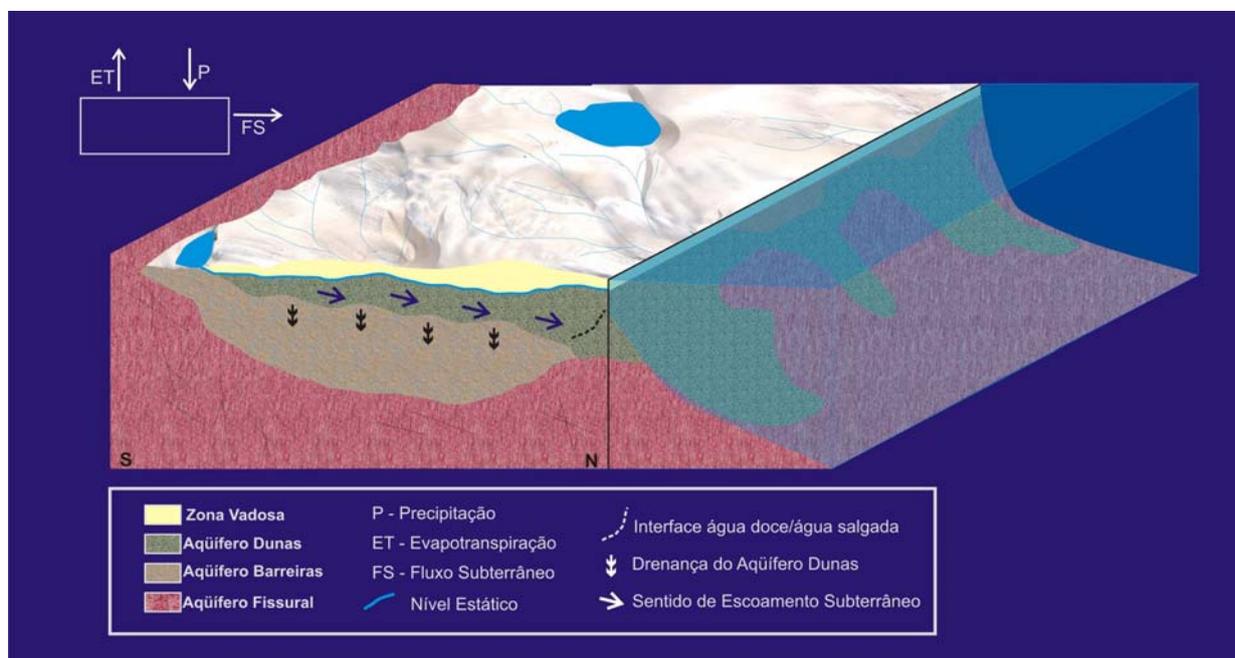


Figura 3.45 - Modelo hidrogeológico conceitual para a região da área de pesquisa.

CAPÍTULO IV

PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS

4.1 - CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Objetivando identificar de forma mais precisa a heterogeneidade e anisotropia hidráulicas na área de pesquisa, 60 amostras de solo indeformadas foram coletadas a profundidade de 1,0 m em 30 pontos e analisadas em laboratório utilizando-se o método de carga variável. Em cada ponto foram coletadas 02 amostras sendo uma na posição vertical e outra na horizontal. Detalhes das etapas laboratoriais do método utilizado encontram-se em anexo, item C1.1 (Anexos).

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam a distribuição dos resultados obtidos para a condutividade hidráulica vertical e horizontal onde se identifica três regiões homogêneas e isotrópicas compostas por valores com ordem de grandeza de 10^{-5} cm/s, 10^{-3} cm/s e 10^{-1} cm/s, respectivamente. As menores condutividades em ambas as posições concentram-se em duas unidades hidroestratigráficas onde, na parte centro-sul, estão expostos solos residuais do embasamento cristalino, parte integrante do Aquífero Fissural, e na parte oeste em que afloram os sedimentos areno-argilosos que compõem o Aquitarde Barreiras. As duas outras regiões homogêneas e isotrópicas, ao contrário da anterior formada por unidades diferentes, são formadas por sedimentos arenosos que compõem o Aquífero Dunas sendo na parte noroeste da área onde se localizam as condutividades com ordem de grandeza de 10^{-3} cm/s e na parte centro-leste as condutividades mais altas com ordem de grandeza de 10^{-1} cm/s.

Esses resultados são de grande importância para o modelo de fluxo, pois, evidenciam a existência de uma heterogeneidade entre materiais de mesma origem e idade como é o caso dos sedimentos eólicos e, uma homogeneidade entre os sedimentos areno-argilosos do Grupo Barreiras e dos solos residuais do embasamento.

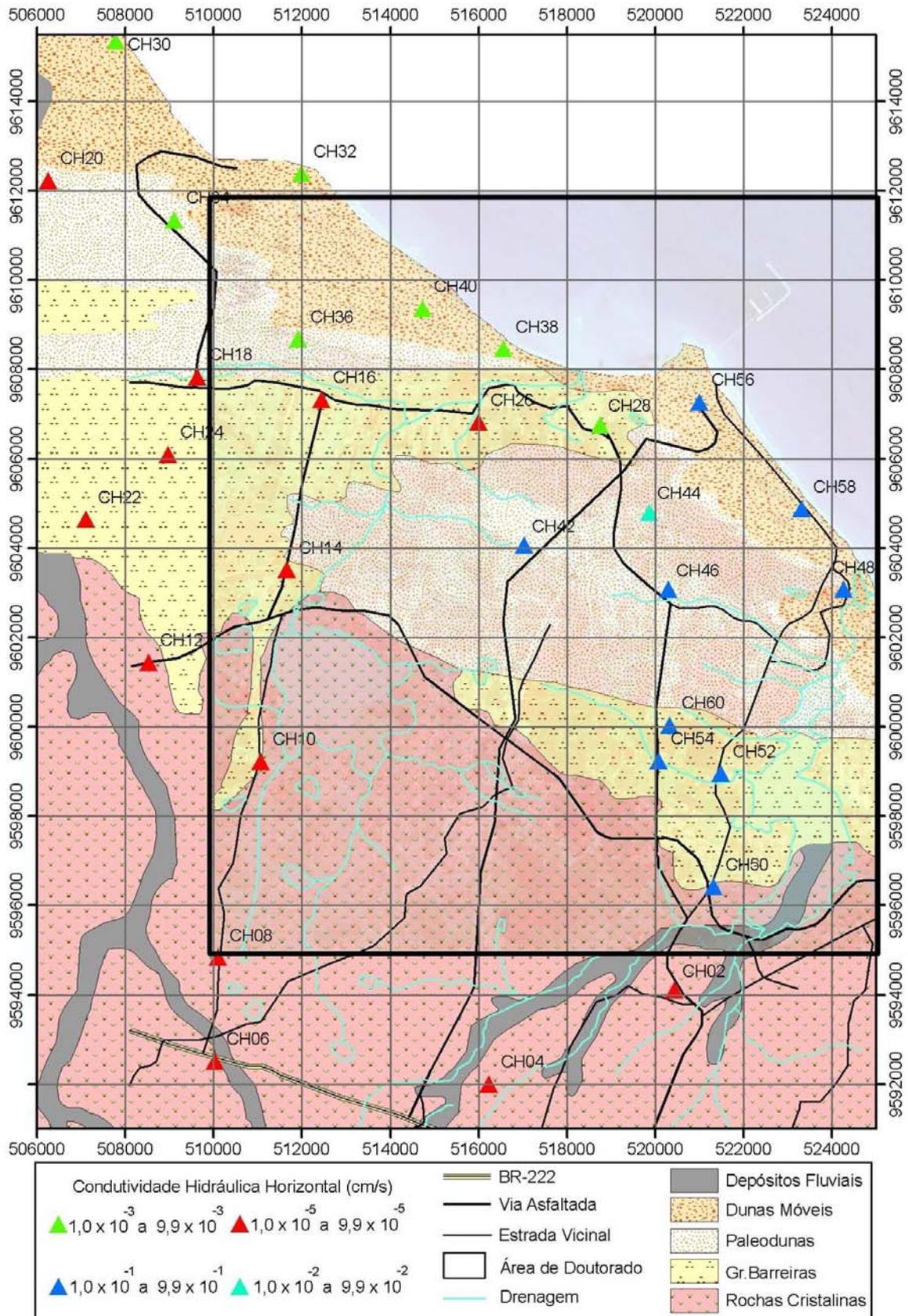


Figura 4.1 - Distribuição da condutividade hidráulica vertical por ordem de grandeza.

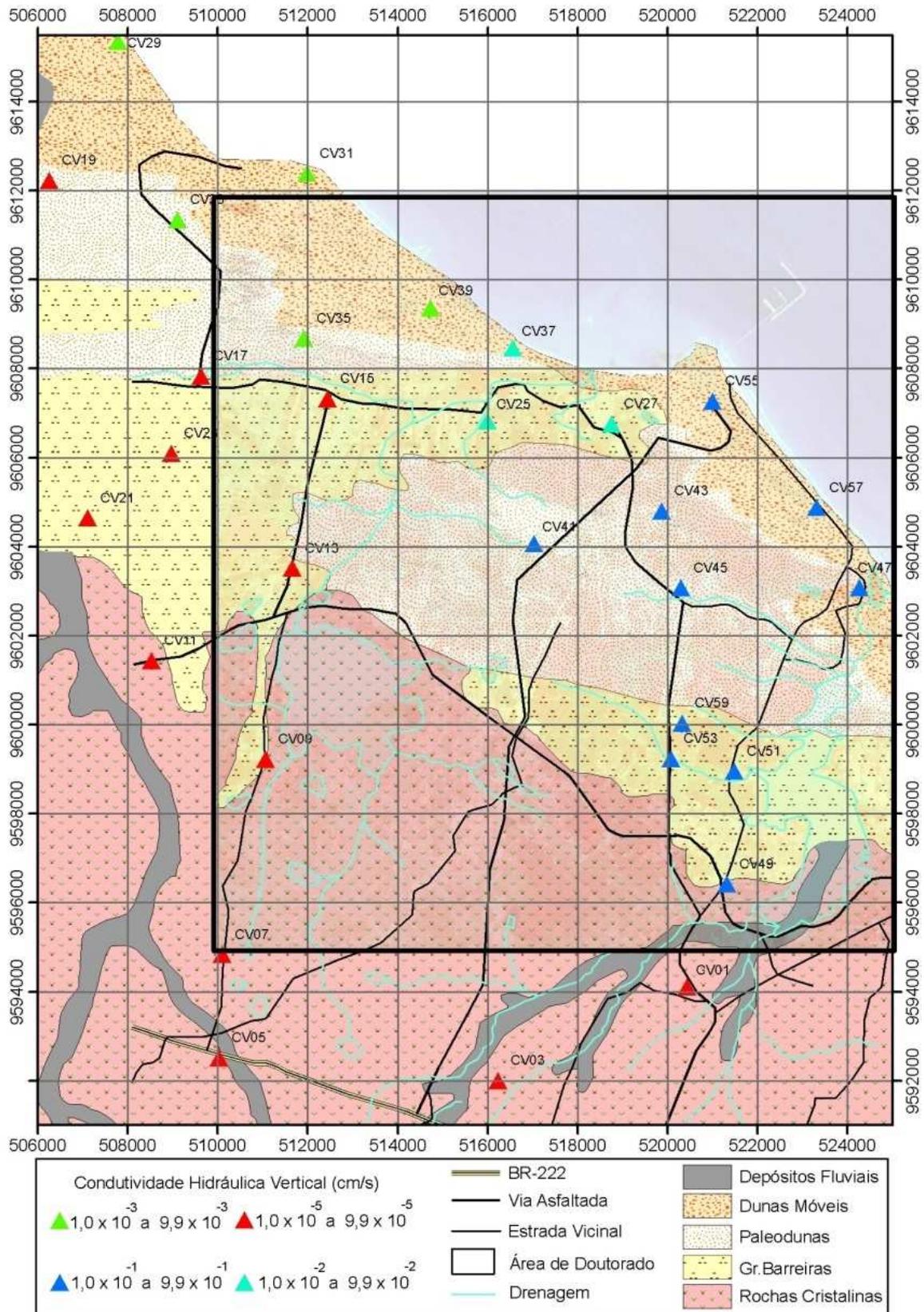


Figura 4.2 - Distribuição da condutividade hidráulica horizontal por ordem de grandeza.

4.2 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

De forma a identificar a distribuição granulométrica vertical, principalmente, dos sedimentos quaternários na área de pesquisa foram realizadas 83 análises granulométricas sendo 76 nos sedimentos quaternários oriundos da construção de 13 dos 14 poços de monitoramento (PM) e 07 de amostras superficiais de sedimentos terciários do Grupo Barreiras (Figura 4.3). As análises granulométricas que consistem de um processo mecânico que permite estabelecer uma expressão quantitativa da distribuição granulométrica de certos materiais foram realizadas no Laboratório de Oceanografia Abiótica do Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR/UFC). Detalhes das etapas laboratoriais envolvidas e de todos os parâmetros obtidos podem ser consultados no item C1.2 (Anexos).

A Tabela 4.1 apresenta a relação dos pontos e profundidades amostrados e, os resultados obtidos segundo a Classificação de Folk & Ward (1957) *in* Suguio & Bigarella (1979).

Outra forma utilizada na etapa de análise dos resultados é a visualização gráfica da distribuição granulométrica dos sedimentos através de curvas de frequência acumulada. Cada ponto desta curva corresponde a uma determinada granulometria sendo que o eixo das ordenadas representa os valores retidos e, ao longo do eixo das abscissas está representada a escala de frequência de 0 a 100%.

Nesta pesquisa, para efeito comparativo, uma curva-padrão que compreende um intervalo onde se enquadram todos os sedimentos provenientes de dunas foi incorporada como base para plotar os resultados obtidos (Figuras 4.4 a 4.10).

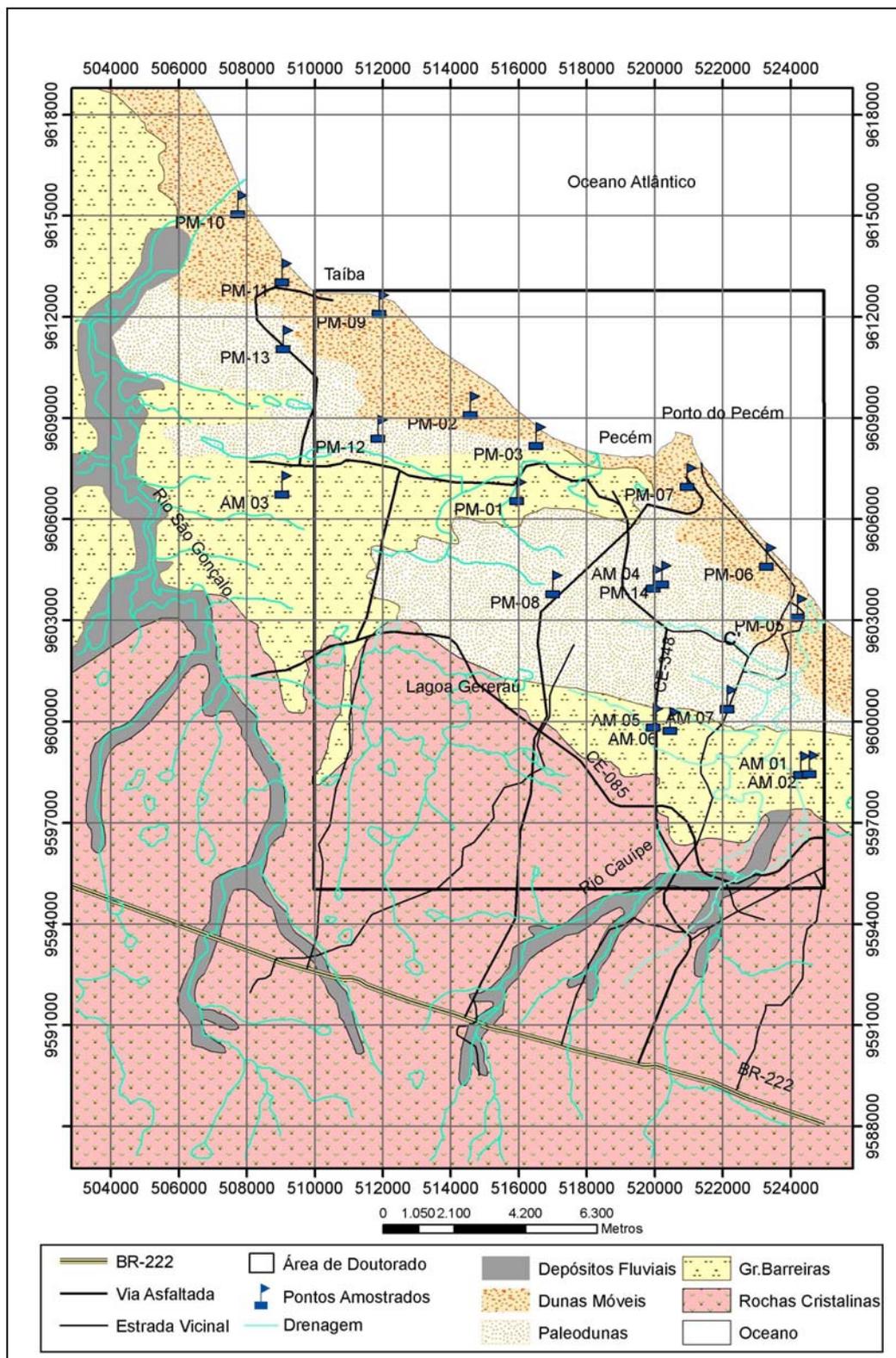


Figura 4.3 - Localização dos pontos amostrados para análise granulométrica.

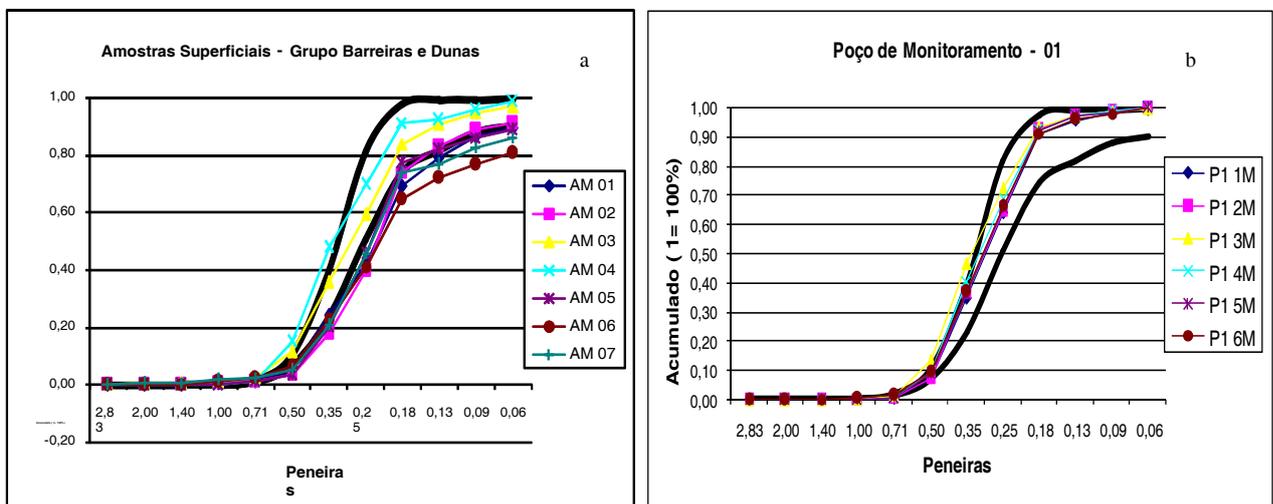
Tabela 4.1 - Apresenta os resultados obtidos para a Análise Granulométrica. Obs.: Silte (% Silte) não foi detectado em nenhuma amostra.

Amostra	UTM-N	UTM-E	Unidade	Casc. (%)	Areia (%)	Argila (%)	F&W-Média	F&W-Médiana	Amostra	UTM-N	UTM-E	Unidade	Casc. (%)	Areia (%)	Argila (%)	F&W-Média	F&W-Médiana
AM 01	524338	9598717	Gr. Barreiras	0	89,35	10,65	Areia Fina	Areia Fina	Pz8 1 m	517046	9604064	Dunas	0	99,84	0,16	Areia Grossa	Areia Grossa
AM 02	524596	9598751	Gr. Barreiras	0,0426	91,11	8,85	Areia Fina	Areia Fina	Pz8 2 m	-	-	Dunas	0	99,99	0,01	Areia Média	Areia Média
AM 03	509085	9607024	Dunas	0,5415	96,49	2,97	Areia Média	Areia Média	Pz8 3 m	-	-	Dunas	0	99,91	0,09	Areia Média	Areia Média
AM 04	520003	9604240	Dunas	0	98,67	1,33	Areia Média	Areia Média	Pz8 4 m	-	-	Dunas	0,6114	98,8	0,58	Areia Média	Areia Média
AM 05	520003	9600129	Gr. Barreiras	0	88,83	11,17	Areia Fina	Areia Fina	Pz8 5 m	-	-	Dunas	0	99,42	0,58	Areia Média	Areia Média
AM 06	520494	9600034	Gr. Barreiras	0	80,84	19,16	Areia Muito Fina	Areia Fina	Pz8 6 m	-	-	Dunas	0	99,22	0,78	Areia Média	Areia Média
AM 07	522177	9600664	Gr. Barreiras	0,4889	85,73	13,78	Areia Fina	Areia Fina	Pz9 1 m	511939	9612384	Dunas	0	98,55	1,45	Areia Média	Areia Média
Pz1 1 m	515992	9606828	Dunas	0	99,11	0,89	Areia Média	Areia Média	Pz9 2 m	-	-	Dunas	0,3778	80,9	18,72	Ar. M. Fina	Areia Fina
Pz1 2 m	-	-	Dunas	0	99,89	0,11	Areia Média	Areia Média	Pz9 3 m	-	-	Dunas	1,1219	85,58	13,29	Areia Fina	Areia Fina
Pz1 3 m	-	-	Dunas	0	99,62	0,38	Areia Média	Areia Média	Pz9 4 m	-	-	Dunas	1,0417	95,87	3,09	Areia Média	Areia Média
Pz1 4 m	-	-	Dunas	0	100	0	Areia Média	Areia Média	Pz10 1 m	507778	9615338	Dunas	0	99,56	0,44	Areia Fina	Areia Fina
Pz1 5 m	-	-	Dunas	0	99,8	0,2	Areia Média	Areia Média	Pz10 2 m	-	-	Dunas	0	99,93	0,07	Areia Média	Areia Grossa
Pz1 6 m	-	-	Dunas	0	100,04	0,04	Areia Média	Areia Média	Pz10 3 m	-	-	Dunas	0	100,03	-0,03	Areia Média	Areia Média
Pz2 1 m	514615	9609378	Dunas	0	99,41	0,59	Areia Média	Areia Média	Pz10 4 m	-	-	Dunas	0	99,89	0,11	Areia Grossa	Areia Grossa
Pz2 2 m	-	-	Dunas	0	99,83	0,17	Areia Média	Areia Média	Pz10 5 m	-	-	Dunas	0	100,74	-0,74	Areia Grossa	Areia Grossa
Pz2 3 m	-	-	Dunas	0	99,32	0,68	Areia Média	Areia Média	Pz10 6 m	-	-	Dunas	0,569	99,07	0,36	Areia Grossa	Areia Grossa
Pz2 4 m	-	-	Dunas	0	100,19	0,19	Areia Média	Areia Média	Pz10 7 m	-	-	Dunas	3,138	96,68	0,18	Areia Grossa	Areia Grossa
Pz2 5 m	-	-	Dunas	0	99,47	0,53	Areia Média	Areia Média	Pz10 9 m	-	-	Dunas	6,8369	93,34	-0,18	Areia Média	Areia Média
Pz2 6 m	-	-	Dunas	0	99,81	0,19	Areia Média	Areia Média	Pz10 10	-	-	Dunas	4,9661	95,05	-0,02	Areia Grossa	Areia Grossa
Pz3 1 m	516555	9608462	Dunas	0	99,94	0,06	Areia Fina	Areia Fina	Pz11 1 m	509087	9613316	Dunas	2,3006	98,1	-0,4	Areia Média	Areia Média

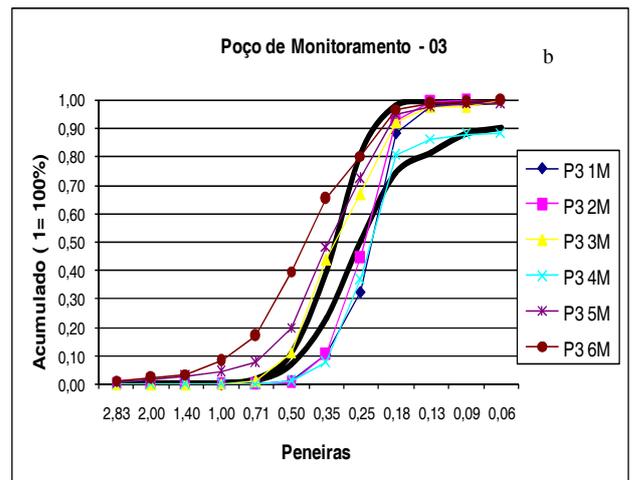
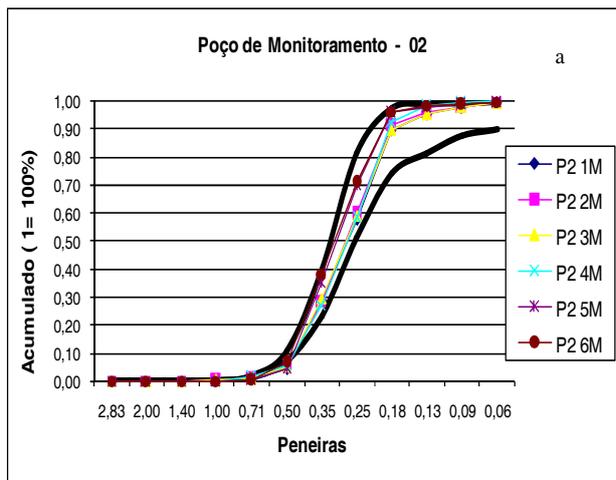
Pz3 2 m	-	-	Dunas	0	100,1	0,1	Areia Fina	Pz11 2 m	-	-	Dunas	0,4789	99,69	-0,17	Areia Média
Pz3 3 m	-	-	Dunas	0	100,02	0,02	Areia Média	Pz11 3 m	-	-	Dunas	0,4009	99,67	-0,07	Areia Média
Pz3 4 m	-	-	Dunas	0	88,41	11,59	Areia Fina	Pz11 4 m	-	-	Dunas	1,5101	98,88	-0,39	Areia Média
Pz3 5 m	-	-	Dunas	1,6763	97,27	1,05	Areia Média	Pz11 5 m	-	-	Dunas	0	100,78	-0,78	Areia Média
Pz3 6 m	-	-	Dunas	1,9078	97,71	0,38	Areia Média	Pz11 6 m	-	-	Dunas	1,9802	98,07	-0,05	Areia Média
Pz5 1 m	524243	9603374	Dunas	0	98,89	1,11	Areia Fina	Pz12 1 m	511908	9608678	Dunas	0	100,25	-0,25	Areia Média
Pz5 2 m	-	-	Dunas	0	100,03	0,03	Areia Média	Pz12 2 m	-	-	Dunas	0	100,45	-0,45	Areia Média
Pz5 3 m	-	-	Dunas	0,2762	91,86	7,87	Areia Média	Pz12 3 m	-	-	Dunas	0	99,94	0,06	Areia Média
Pz5 4 m	-	-	Dunas	0,1648	88,53	11,31	Areia Fina	Pz12 4 m	-	-	Dunas	0	56,06	43,94	Silte Grossa Fina
Pz5 5 m	-	-	Dunas	0	89,21	10,79	Areia Fina	Pz13 1 m	509112	9611338	Dunas	0	85,69	14,31	Areia Fina
Pz5 6 m	-	-	Dunas	0,2399	92,41	7,35	Areia Fina	Pz13 2 m	-	-	Dunas	0,1318	92,88	6,99	Areia Fina
Pz6 1 m	523332	9604890	Dunas	0	99,67	0,33	Areia Média	Pz13 3 m	-	-	Dunas	0	95,36	4,64	Areia Média
Pz6 2 m	-	-	Dunas	0	99,83	0,17	Areia Média	Pz13 4 m	-	-	Dunas	0,6774	91,2	8,12	Areia Média
Pz6 3 m	-	-	Dunas	0	100,19	0,19	Areia Média	Pz13 5 m	-	-	Dunas	0,7118	87,12	12,17	Areia Média
Pz6 4 m	-	-	Dunas	0	99,93	0,07	Areia Média	Pz13 6 m	-	-	Dunas	0,3908	90,82	8,79	Areia Média
Pz6 5 m	-	-	Dunas	7,2814	92,75	0,04	Areia Grossa	Pz14 1 m	520259	9604358	Dunas	0	99,38	0,62	Areia Média
Pz7 1 m	521001	9607258	Dunas	0	100,42	0,42	Areia Média	Pz14 2 m	-	-	Dunas	0	97,98	2,02	Areia Média
Pz7 2 m	-	-	Dunas	0	99,73	0,27	Areia Média	Pz14 3 m	-	-	Dunas	0	100,48	-0,48	Areia Média
Pz7 3 m	-	-	Dunas	2,0849	97,05	0,87	Areia Média	Pz14 4 m	-	-	Dunas	0	96,16	3,84	Areia Média
Pz7 4 m	-	-	Dunas	9,9641	89,95	0,08	Areia Grossa	Pz14 5 m	-	-	Dunas	0	97,73	2,27	Areia Média
Pz7 5 m	-	-	Dunas	7,3664	92,63	0	Areia Grossa	Pz14 6 m	-	-	Dunas	0	96,6	3,4	Areia Média
Pz7 6 m	-	-	Dunas	6,6422	93,27	0,09	Areia Média								

Com relação às amostras superficiais, coletadas entre 0 a 1 m de profundidade, os sedimentos oriundos do Grupo Barreiras classificam-se como areia fina a muito fina com o conteúdo de argila entre 9,0% a 20%. Para os sedimentos quaternários classificados como areia média e baixo conteúdo de argila (1,0% a 3,0%) observa-se uma boa correlação entre as amostras AM02 e AM03 e a curva-padrão.

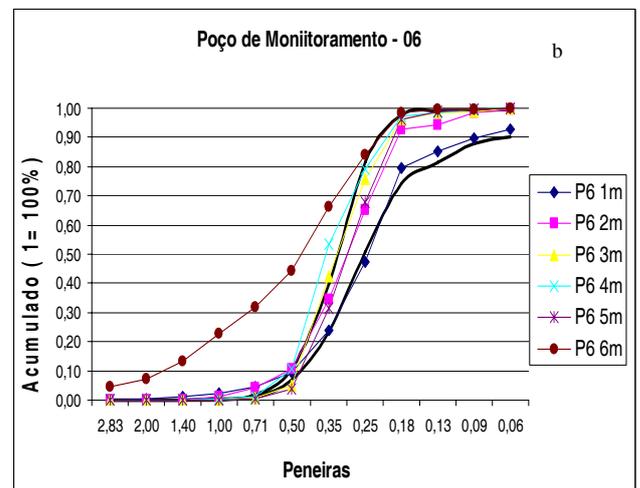
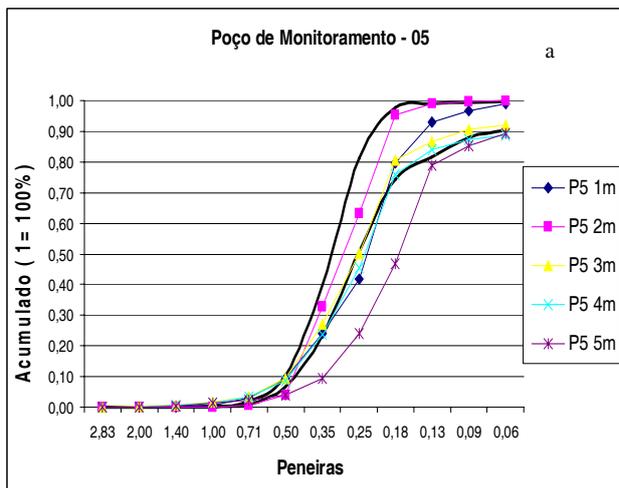
Tanto pela análise da Tabela 5.2 quanto pelas Curvas de Frequência Acumulada (Figuras 5.4 a 5.10) é possível identificar para os sedimentos provenientes dos poços de monitoramento que a distribuição granulométrica predominante horizontal ou verticalmente é de areia média com conteúdo de argila entre 4,0% a 9% e o teor de cascalho < 0,7% (PMs 01, 02, 03, 06, 08, 11, 12 e 14). Variações a essa distribuição granulométrica são as areias grossa, fina e muito fina que se encontram intercalados como níveis métricos (PMs 3, 9, 12 e 14) ou predominando o perfil construtivo (PMs 05, 07, 10 e 13). A presença dos níveis classificados como areias finas deve-se a alta percentagem de areia concentradas nas peneiras de diâmetro de 0,06 μ a 0,25 μ (p.ex. PM 03, Figura 5.5) ou teor argila > 7,0%. Os níveis de areia grossa presentes nos perfis dos poços 06, 07 e 11 podem ser associados à variação lateral granulométrica entre sedimentos arenosos médios e grossos devido a diferença de energia na deposição de material na faixa de praia, onde estes poços estão localizados. Já o alto conteúdo de cascalho no PM 10 também pode ser explicado por sua localização, próxima a foz do rio São Gonçalo.



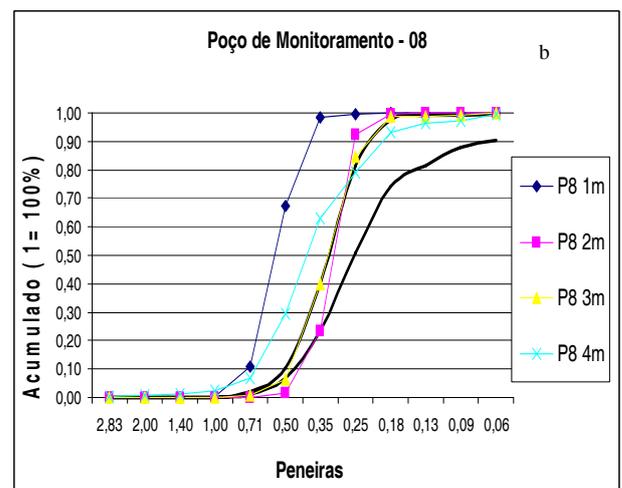
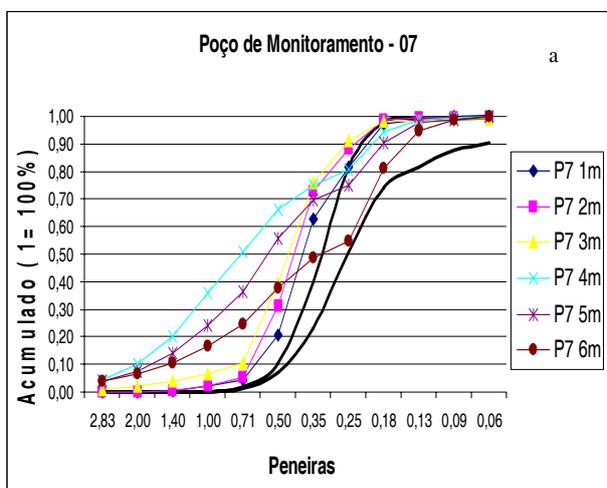
Figuras 4.4a e 4.4b - Distribuição Granulométrica para amostras coletadas entre 0 – 1m de profundidade e à direita, para o Poço 01. Obs.: A curva-padrão de sedimentos oriundos de Dunas está aparecendo na cor preta.



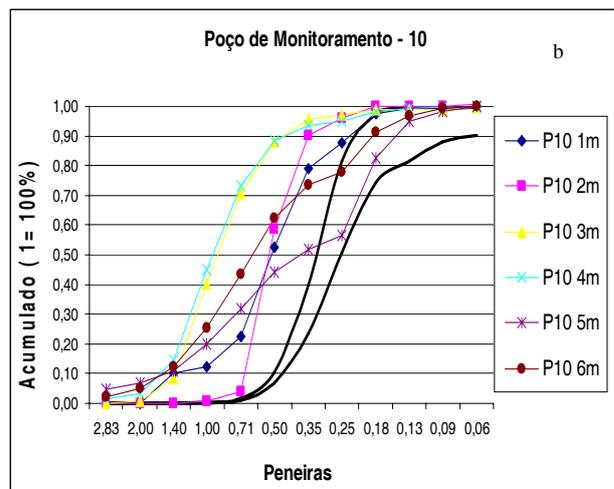
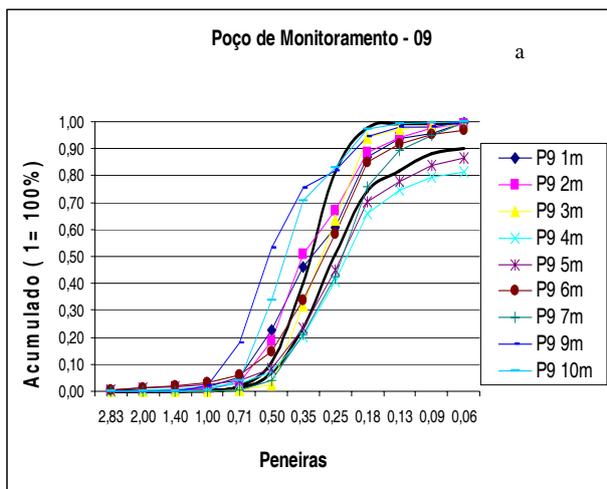
Figuras 4.5a e 4.5b - Distribuição Granulométrica para o Poço 02 e à direita, para o Poço 03.



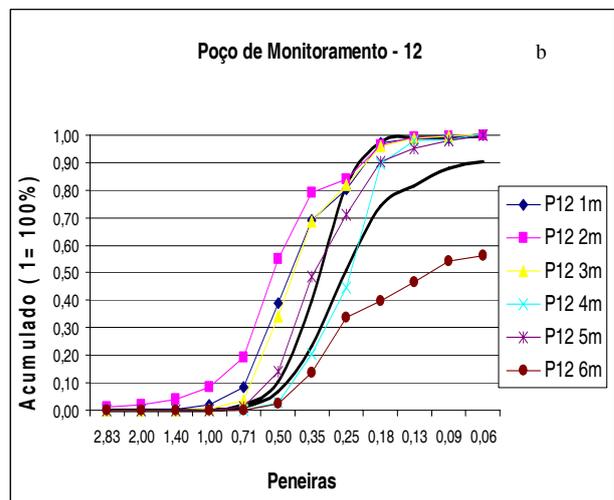
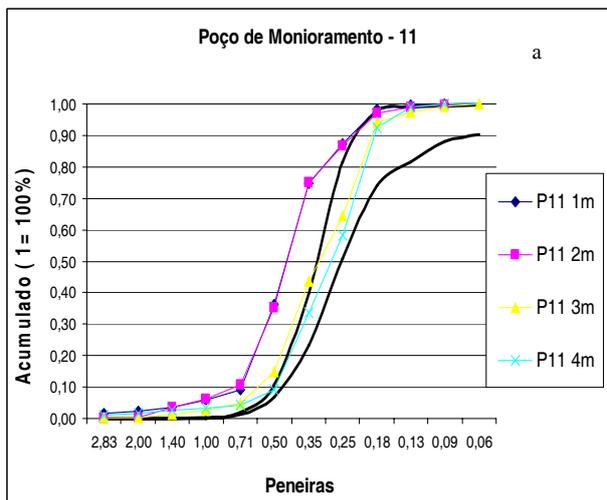
Figuras 4.6a e 5.6b - Distribuição Granulométrica para o Poço 05 e para o Poço 06.



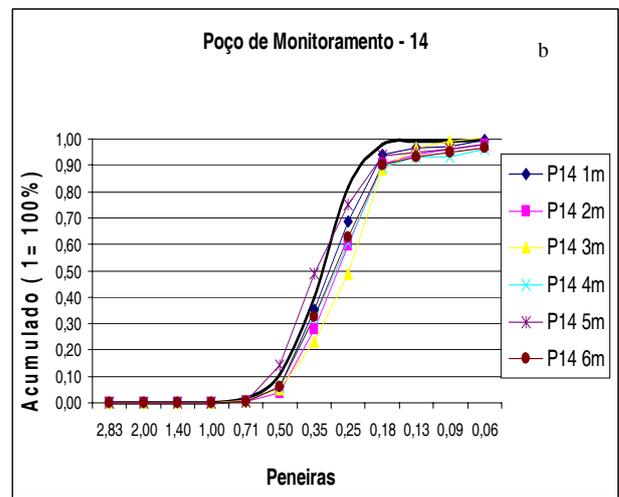
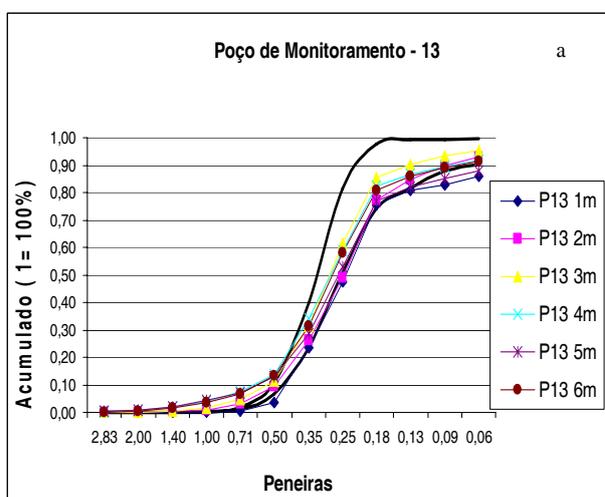
Figuras 4.7a e 4.7b - Distribuição Granulométrica para o Poço 07 e à direita, para o Poço 08.



Figuras 4.8a e 4.8b - Distribuição Granulométrica para o Poço 09 e à direita, para o Poço 10.



Figuras 4.9a e 4.9b - Distribuição Granulométrica para o Poço 11 e à direita, para o Poço 12.



Figuras 4.10a e 4.10b - Distribuição Granulométrica para o Poço 13 e à direita, para o Poço 14.

4.2.1 - Distribuição Granulométrica *versus* Condutividade Hidráulica

Uma vez que a condutividade hidráulica é dependente das propriedades do material (Fetter, 1994) objetivou-se identificar a existência de alguma relação direta entre as ordens de grandeza desse parâmetro e a distribuição granulométrica. Utilizaram-se somente os pontos amostrados para ambos os ensaios laboratoriais.

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam a distribuição granulométrica conforme a condutividade hidráulica para as amostras coletadas até 1,0 m de profundidade onde é possível observar que não há uma correlação direta entre esses parâmetros.

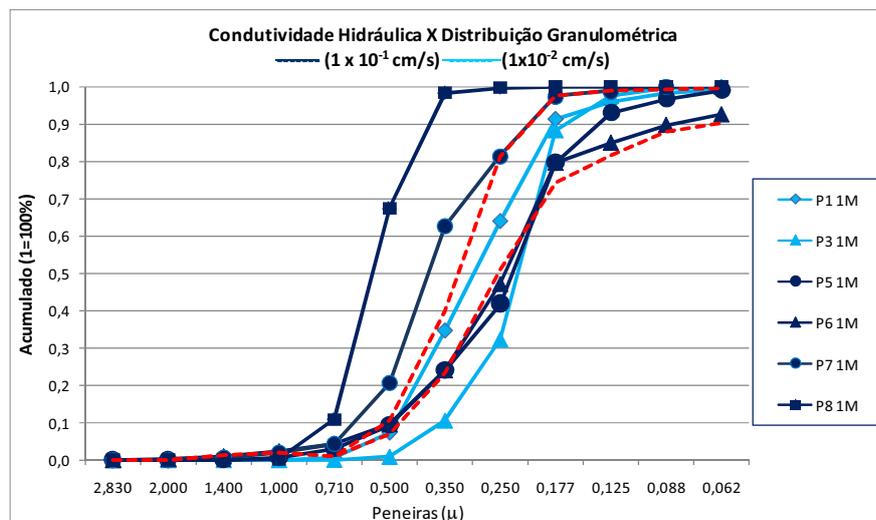


Figura 4.11 - Distribuição granulométrica em relação à condutividade hidráulica evidenciando uma ausência de correlação para as ordens de grandeza 10^{-1} cm/s e 10^{-2} cm/s.

Considera-se que essa é apenas uma análise preliminar de tais dados podendo ainda ser executado processamento estatístico como, por exemplo, modelamento estocástico.

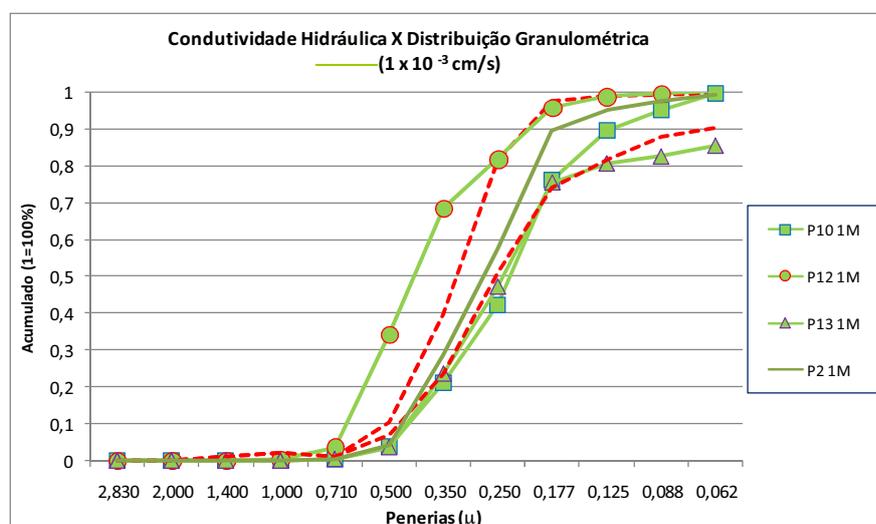


Figura 4.12 - Distribuição granulométrica em relação à condutividade hidráulica evidenciando uma ausência de correlação para as ordens de grandeza 10^{-3} cm/s.

Ainda com o intuito de avançar na identificação da possível relação existente entre essas propriedades, uma função de pedotransferência multiparamétrica para a condutividade hidráulica vertical foi obtida utilizando um processamento apoiado por programação.

A acurácia dessa função foi avaliada usando as medidas de condutividade hidráulica vertical saturada obtidas em laboratório pelo método de carga variável. Três funções são apresentadas que representam a relação empírica entre a variável dependente definida pela condutividade hidráulica e as variáveis independentes (Cunha, *et al.*, 2009). Como se trata de uma avaliação preliminar deve-se considerar a necessidade de se avaliar as equações obtidas com este processamento com reserva.

- Função de Transferência

A previsão matemática de propriedades físicas do solo como a condutividade hidráulica com o uso de funções de pedotransferência permite que informações básicas de solo disponíveis ou obtidas com maior facilidade e menor custo sejam equacionados em valores estimados de outros parâmetros cuja medição é mais onerosa e lenta. Assim, as funções de pedotransferência são funções de previsão/estimativa das propriedades do solo a partir de um ou mais parâmetro já determinado. As funções de transferência atendem às demandas por informações frequentemente requeridas a partir de elementos normalmente disponíveis em bases de dados.

O termo função de pedotransferência foi introduzido por Bouma (1989) e podem ser definidas como funções utilizadas para fazer estimativas de propriedades dos solos a partir de outras propriedades medidas rotineiramente com maior facilidade e baixo custo (McBratney *et al.*, 2002).

Segundo Silva *et al.* (2008) são diferentes abordagens que têm sido utilizadas para o desenvolvimento de funções de transferência. Na literatura predominam trabalhos que apresentam funções de transferência para a condutividade hidráulica saturada, para a curva de retenção de água no solo, especialmente em solos de regiões de clima temperado (Wösten *et al.*, 2001). No Brasil, para solos tropicais (Hodnett & Tomasella, 2002) desenvolveram funções de transferência para as curvas de retenção de água do solo. Arruda *et al.* (1987) fizeram a primeira tentativa do uso de equações de regressão para estimar a água disponível com base na textura do solo e Giarola *et al.* (2002) obtiveram regressões múltiplas para estimar os teores de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a água disponível em função dos teores de argila, silte e óxidos de ferro e de alumínio.

Até o momento, no Brasil, não há uma na literatura aplicada a funções de pedotransferência, desenvolvidas para condutividade hidráulica, utilizando dados multiparamétricos. O objetivo dessa análise foi desenvolver funções de pedotransferência para

estimar a condutividade hidráulica vertical saturada de água em Argilossolos e Neossolos Quartzarênicos com o suporte da programação genética.

- Programação Genética

A programação genética, apresentada por Koza (1992), é uma nova abordagem computacional que envolve a utilização de algoritmos evolutivos de diversas naturezas na busca de relações empíricas entre dados. Nessa técnica, a população de possíveis soluções evolui através de muitas gerações em direção a solução otimizada usando os conceitos de seleção natural e genética (Parasuraman *et al.*, 2007). A técnica de programação genética, também denominada de Regressão Genética Simbólica, objetiva determinar a expressão matemática na forma simbólica que fornece um ajuste otimizado entre uma amostra finita de valores da variável independente e seus valores associados da variável dependente (Koza, 1992). A regressão simbólica pode ser considerada como uma extensão dos problemas de regressão numérica. Na regressão numérica, a forma da função deve ser pré-definida (linear, quadrática ou polinomial) e objetiva encontrar um conjunto de coeficientes numéricos que melhor ajustam a estrutura de modelo escolhido. Já a regressão simbólica genética não requer que a forma da função seja pré-definida, mas sim, busca a expressão otimizada da relação entre as variáveis dependente preditiva e independente preditora (Parasuraman *et al.*, 2007).

Para um dado problema, a primeira etapa dessa abordagem é definir os conjuntos funcional e terminal, a função objeto e os operadores genéticos. O conjunto funcional compreende os operadores matemáticos básicos (+, -, x, /, sen, cos, exp) que podem ser usados para estruturar o modelo. A escolha desses operadores está diretamente relacionada ao grau de complexidade do problema a ser modelado. O conjunto terminal consiste das variáveis independentes e das constantes. Diferentes combinações desses conjuntos são usadas para construir a população do modelo matemático. Já a função objeto é utilizada para avaliar o ajuste de cada indivíduo à população enquanto seleção, cruzamento e mutação são os possíveis operadores genéticos (Koza, 1992). Normalmente, são os erros estatísticos quadráticos e suas variantes que são utilizadas para avaliar tais ajustes.

Uma vez que os conjuntos funcional e terminal estão definidos, a próxima etapa é gerar uma população inicial para um dado tamanho de uma população pré-definido. Os métodos inteiro, de crescimento e bipartido são comumente utilizados. O método inteiro gera novas árvores e ramificações até um nível (profundidade) pré-determinado,, iniciando por nós não-terminais (funcionais) enquanto o método de crescimento cada novo nó é aleatoriamente escolhido entre terminais e não-terminais até a profundidade máxima. Já o método bipartido é uma combinação dos anteriores onde em cada nível metade dos indivíduos são inicializados

usando o método inteiro e a outra metade usando o método de crescimento (Parasuraman *et al.*, 2007).

Após iniciado o processo, o ajuste de cada indivíduo (modelo matemático) na população é avaliado pela função objeto. Quanto maior o ajuste de um indivíduo, maior é a chance desse ser transferido para a próxima geração. Em cada geração, novos conjuntos de modelos são evoluídos pela aplicação dos operadores genéticos (Babovic and Keijzer, 2002; Parasuraman *et al.*, 2007). Esses novos modelos denominados de descendentes formam a base da próxima geração. A seguir é executada a seleção com o objetivo de criar uma população temporária que podem ser manipuladas pelo cruzamento e mutação. O processo de seleção garante que os modelos com maiores ajustes sejam transferidos para a próxima geração. O cruzamento é executado pela escolhendo dois modelos familiares na população temporária e determinando aleatoriamente diferentes ramificações desses descendentes com características diferentes para serem trocadas entre si. Já a mutação envolve alteração aleatória para uma ramificação ou nível nodal. Os operadores genéticos produzem, assim, novos descendentes (modelos) que são estruturalmente diferentes de seus antecessores familiares, garantindo que o processo direcione-se à obtenção do modelo final otimizado.

Todos esses processos, da população inicial, as ações dos operadores genéticos e indivíduos resultantes formando uma nova população é um processo iterativo sendo pré-determinado pelo número de iterações escolhidas ou até a obtenção do valor desejado da função objeto.

De forma a determinar as funções de pedotransferência para relacionar as variáveis dependentes e independentes foi utilizado o programa GPKERNEL (Babovic & Keijzer, 2002) baseado em programação genética.

- Resultados

O material utilizado para a análise foi escolhido com o objetivo de se retirar a influência da estruturação do material no comportamento da condutividade hidráulica. Assim, os restritos teores de argila presente nas amostras não forma qualquer tipo de estrutura (granular ou grumosa) e os componentes detríticos do material ocorrem como grãos simples.

Para aplicação da programação genética para solos como argissolos ou nitossolos, necessariamente a estrutura, incluindo tipo, percentual, tamanho e distribuição no perfil deverá ser considerada como variável dependente para a previsão da condutividade hidráulica.

Experiências de campo demonstram que a estruturação dos solos pode ampliar em até três ordens de grandeza a condutividade hidráulica vertical em solos de textura muito argilosa que desenvolvem estruturação granular média a grossa comum. Tais resultados foram obtidos a

partir de ensaios de infiltração *in situ* em diferentes profundidades para obtenção de condutividade hidráulica vertical em nitossolos vermelhos eutróficos (de textura muito argilosa) com amplo desenvolvimento de estruturação granular média.

Da mesma forma para solos com teores potencialmente elevados em silte como Neossolos Flúvicos e Cambissolos Háplicos o conteúdo desta fração deverá entrar na composição das equações, uma vez que a dimensão desta partícula deverá ter um comportamento do ponto de vista hídrico, mais próximo de argila do que de areia.

As Figuras 4.13a e 4.13b apresentam, respectivamente, a relação obtida entre os dados observados e simulados para a Equação I e o ajuste das três equações para cada ponto analisado. Para essa equação que traz uma relação multiparamétrica entre condutividade hidráulica e os parâmetros físicos do solo observa-se um bom ajuste obtido entre os dados observados e simulados.

Três principais funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica saturada foram determinadas para a área de pesquisa com o uso da soma, subtração e divisão como operadores matemáticos onde o ajuste das equações multiparamétricas foi avaliado pelo ajuste a cada nó e pelo RMS, como funções objeto (Tabela 4.2).

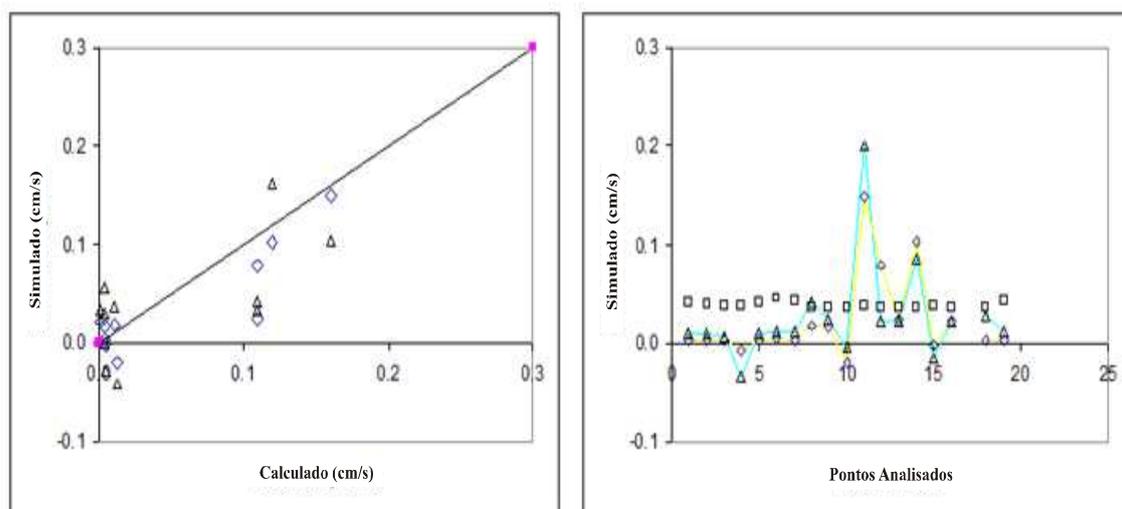


Figura 4.13 - Resultados obtidos para a Equação I: (a) Relação entre os dados observados e simulados. (b) Ajuste das três equações para cada ponto analisado.

As duas primeiras funções de pedotransferência é que melhor obtiveram o ajuste aos dados medidos com ajuste por nó de 0,173 e 0,229, respectivamente e RMS de 0,043 e 0,030, respectivamente. Apesar de a terceira equação ter apresentado um ajuste insatisfatório com ajuste por nó de 0,370 e RMS = 0,060, ela será considerada para efeito de comparação, por apontar a necessidade da retirada do parâmetro conteúdo de argila do equacionamento.

Tabela 4.2 - Funções de pedotransferência multiparamétrica para a condutividade hidráulica.

	Função de Pedotransferência	Variável Predita	Variável Preditora
I	$K_s = ((C - 1,9302735) / ((-1,15115619 + C) * (((-2,0733011 / C) + (C + C)) / C) + S)))$	Condutividade Hidráulica Saturada (Ks)	Teor de Areia (S) e Teor de Argila (C)
II	$K_s = (((C - (1,1214534 / ((\text{clay} + \text{clay}) - 0,285753548))) - (C / (C - 0,311025739))) / (1,19457698 + ((S + 0,285753548) / 0,315698773))) / (C - 1,12822092))$	Condutividade Hidráulica Saturada (Ks)	Teor de Areia (S) e Teor de Argila (C)
III	$K_s = (3,65705609 / \text{sand})$	Condutividade Hidráulica Saturada (Ks)	Teor de Areia (S)

Exceção a essa análise são as amostras com um alto teor de argila que implicaram em valores simulados negativos de condutividade hidráulica. Já a análise com os resultados simulados das três equações em conjunto (Figura 4.13b) comparando ponto a ponto com os dados medidos indica que o melhor modelo é o representado pela Equação I porque ao desconsiderar o teor de argila do equacionamento o ajuste da Equação III não será alcançado de forma satisfatória.

Três modelos foram obtidos (Equação I, II e III) com o uso de diferentes arranjos dos operadores matemáticos considerados. A Equação I foi considerada a que melhor otimizou os dados das variáveis independentes a variável dependente sendo exceção as amostras que apresentam um alto teor de argila. A tentativa de desconsiderar esse parâmetro em busca do aumento de um melhor equacionamento da função de pedotransferência não resultou na melhor escolha porque o ajuste da função objeto apresentou um resultado inadequado.

4.3 - CAPACIDADE ESPECÍFICA

Sendo referida como a propriedade de uma rocha ou solo que reflete o volume de água drenado por gravidade em relação ao seu volume total, após estar saturado (Meinzer, 1923 *in* Healey & Cook, 2002), a capacidade específica tem atuação importante na quantificação de recursos hídricos de aquíferos livres. A equação 4.3 é normalmente utilizada para representar o conceito deste parâmetro:

$$S_y = \theta - S_r \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Onde θ é a porosidade e S_r é a retenção específica (volume d'água retido por unidade de volume do material).

A capacidade específica é normalmente obtida através de medidas laboratoriais de porosidade e retenção específica com posterior aplicação da Equação 4.3, uma vez que a obtenção de valores de retenção é mais fácil do que de capacidade específica. Mesmo assim, a

influência do tempo dos ensaios tanto para medir a retenção ou principalmente a capacidade específica nos valores finais obtidos faz com outras formas de avaliação desse parâmetro sejam consideradas.

Alguns autores (Cassel & Nielsen, 1986; McWhorter & Garcia, 1990) propuseram novas técnicas de medir a capacidade de campo, um equivalente da retenção específica, mas com grande demanda de tempo e problemas de rotina nesses ensaios laboratoriais.

Outras tentativas buscam correlacionar a textura do solo à Sy usando análises estatísticas específicas como as funções de transferência (Johnson, 1967 In Healey & Cook, 2000; Nimmo, 1999).

A Tabela 4.3 apresenta a média, o coeficiente de variação (CV) e o intervalo para o Sy como função da textura. Como pode ser observado existe uma grande variação nos valores de capacidade específica entre os diversos materiais analisados. Tal variação é associada à heterogeneidade natural dos materiais terrígenos, aos métodos e em grande parte ao tempo de ensaio (Prill et al, 1965 in Healey & Cook, 2002).

Comparando-se os dados de distribuição granulométrica apresentados no item 4.2 com os valores da Tabela 4.3 observa-se que para a área de pesquisa a capacidade específica pode ser considerada com valores médios de 0,20 para a grande maioria dos pontos analisados sendo classificados como areias médias. Opta-se por utilizar o valor médio de 0,20 ao invés da média apontada na Tabela 4.3 de 0,26 para tentar inserir a presença constatada de níveis de areia fina a muito fina que naturalmente reduz a capacidade de drenagem dos materiais terrígenos.

Tabela 4.3 – Valores de Capacidade Específica (Sy) em função da distribuição granulométrica (Johnson, 1967 In Healey & Cook, 2002).

Textura	Cap. Específica	Coeficiente de Variação (%)	Cap. Específica (Mínimo)	Cap. Específica (Máximo)	Número de Ensaio
Argila	0,02	59	0,0	0,05	15
Silte	0,08	60	0,03	0,19	16
Areia argilosa	0,07	44	0,03	0,12	12
Areia Fina	0,21	32	0,1	0,28	17
Areia Média	0,26	18	0,15	0,32	17
Areia Grossa	0,27	18	0,2	0,35	17
Areia com cascalho	0,25	21	0,2	0,35	15
Cascalho fino	0,25	18	0,21	0,35	17
Cascalho Médio	0,23	14	0,13	0,26	14
Cascalho	0,22	20	0,12	0,26	13

4.4 - NÍVEL ESTÁTICO

O monitoramento mensal (março/2005 a julho/2006) do nível estático (NE) foi realizado com o objetivo de obter dados tanto para calibração do modelo quantitativo de fluxo subterrâneo como para estimar a recarga natural do aquífero. Trinta e cinco (35) pontos foram selecionados para medir o NE em que 12 pontos situam-se em áreas de exposição do Aquífero Barreiras, 15 pontos no Aquífero Dunas e 06 no Aquífero Misto (Figura 4.13). Muitas foram as dificuldades encontradas para a realização de tal monitoramento sendo a principal delas a impossibilidade financeira/logística de medir os parâmetros monitorados todos os meses no intervalo de março de 2005 a julho de 2006. Os meses de junho, outubro e novembro de 2005 e janeiro, fevereiro, abril, maio e junho de 2006 não foram monitorados reduzindo a acurácia do cálculo de recarga, mas, sem comprometer sua precisão como é possível observar pela análise dos dados de nível estático (Figuras 4.15 a 4.18). Com essa análise, constata-se que o monitoramento atingiu seu objetivo principal que era determinar o ponto máximo de ascensão e descendência do nível estático para o período estipulado iniciando-se entre janeiro a março de 2005 e finalizando em julho, dois meses após a estação chuvosa de 2006. A Tabela 4.4 apresenta os dados de monitoramento do nível estático na área de pesquisa.

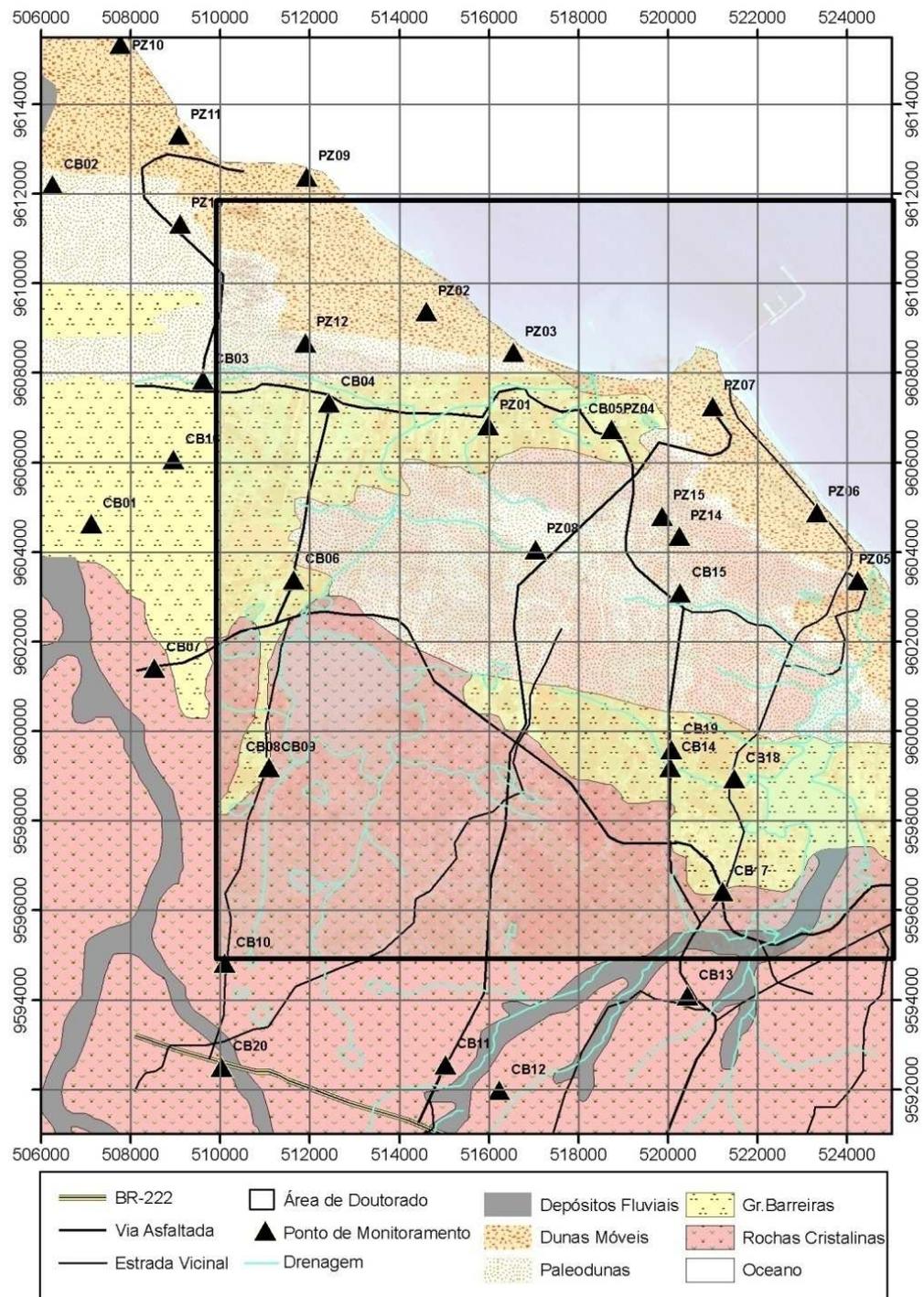


Figura 4.14 - Localização dos pontos de monitoramento do NE dentro da área de pesquisa quanto em sua adjacência.

O nível estático no Aquífero Dunas teve uma variação de 0,5 m a 2,0 m onde os menores valores estão situados próximos à interface com o Oceano Atlântico que dificulta a descarga subterrânea, por exemplo, com a ação das marés (Figuras 4.15 a 4.18).

No Aquífero Barreiras a variação foi cerca de 2,0 m em quase toda a área monitorada sendo que dois pontos (CB06 e CB07) excederam esse valor mas, por razões de extração de água por bombeamento durante certo período.

A maior variação encontrada no monitoramento ocorreu nas cacimbas situadas no Aquífero Fissural próximo à interface com o Aquífero Barreiras. Nos pontos mais a sul onde as espessuras do regolitos diminuem a variação teve média de 1,5 m.

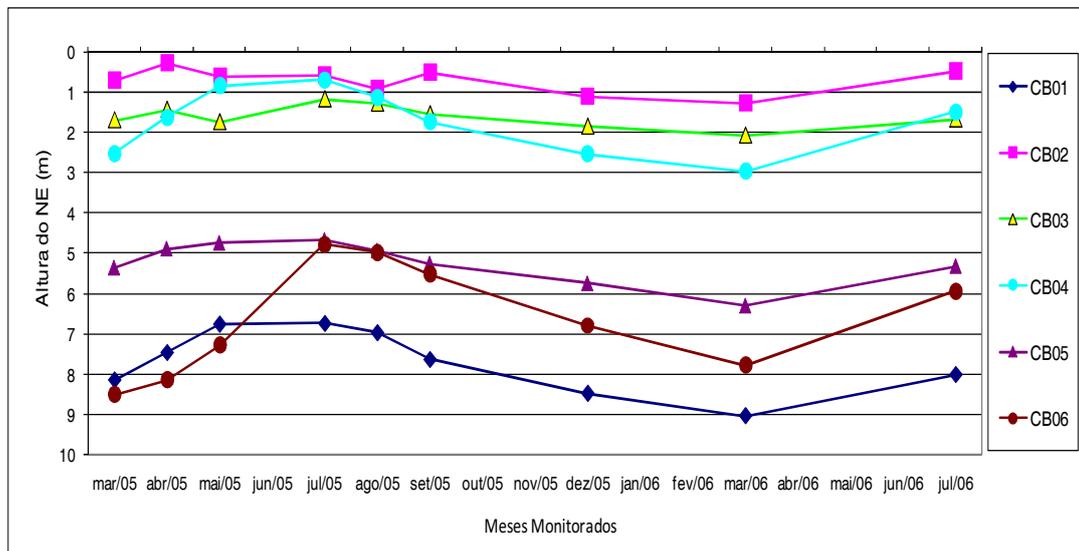


Figura 4.15 - Variação do nível estático monitorado no Aquífero Barreiras.

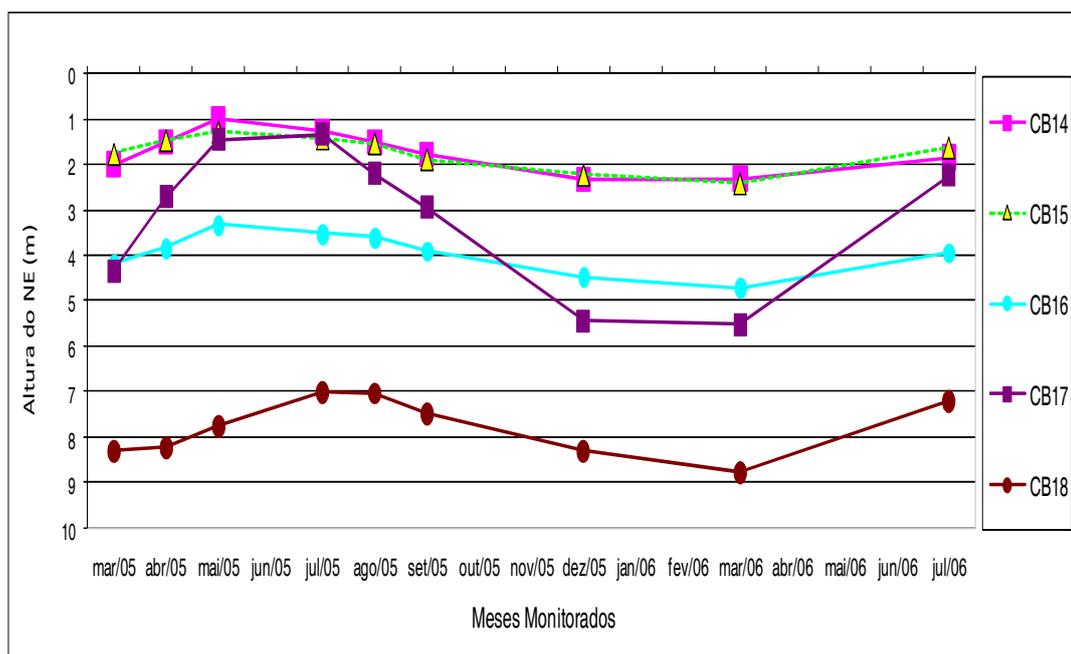


Figura 4.16 - Variação do nível estático monitorado no Aquífero Barreiras.

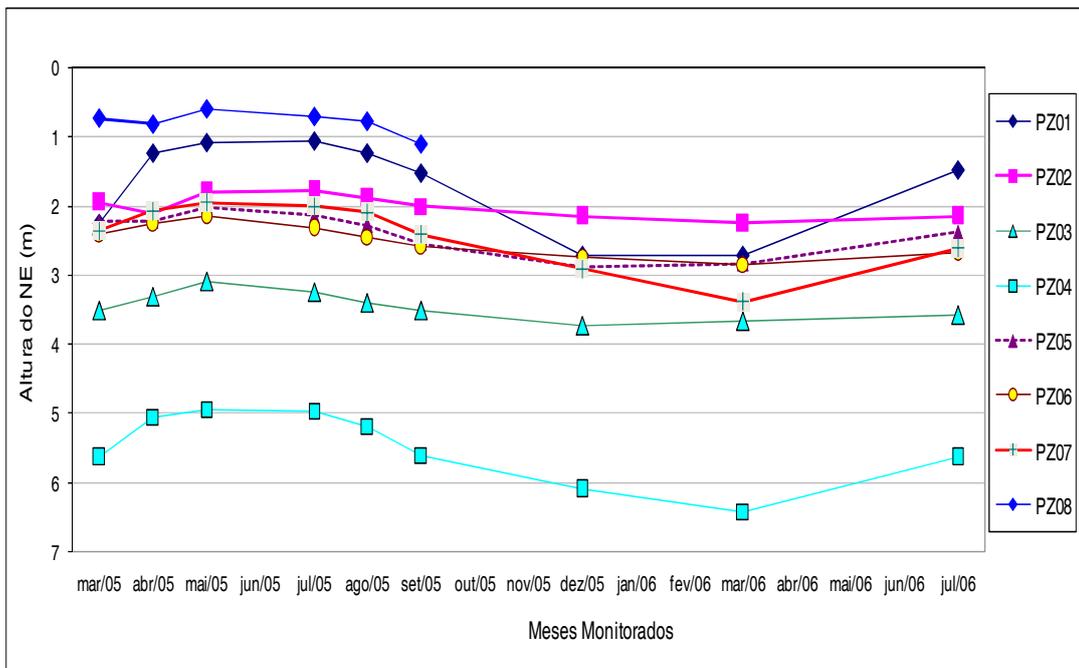


Figura 4.17 - Variação do nível estático monitorado Aquífero Dunas.

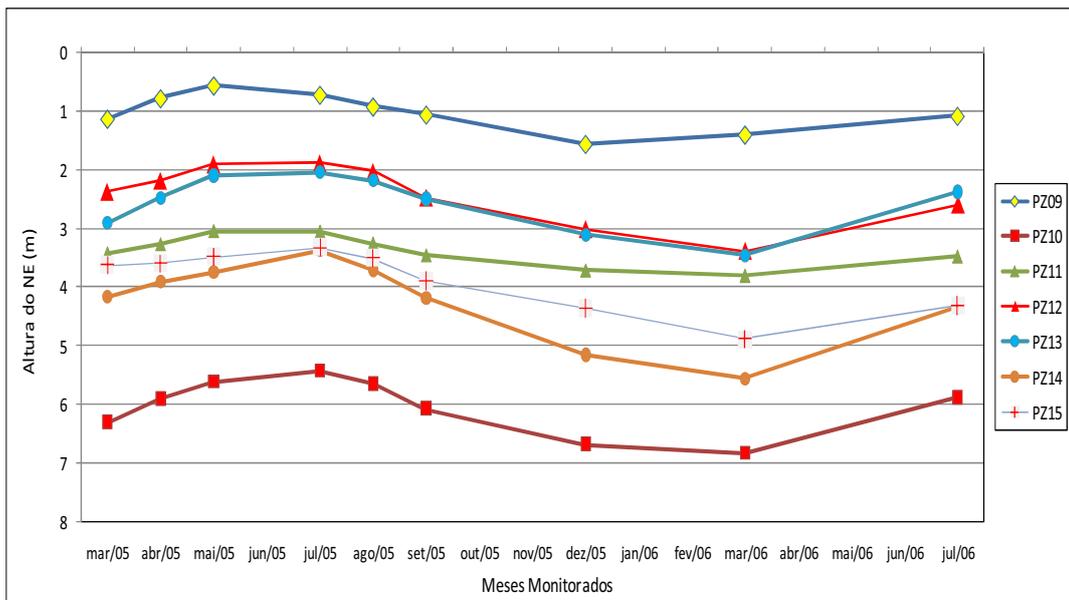


Figura 4.18 - Variação do nível estático em parte do Aquífero Dunas.

Tabela 4.4 - Dados de do nível estático monitorados entre março de 2005 a julho de 2006.

Obs.: a) Dados em negrito foram excluídos da análise direta por terem ausência de medida (NM) em algum mês de monitoramento. b) CS = Cacimbas no aquífero misto que secaram. c) X= Poço de Monitoramento depredado.

Pontos	UTM-N	UTM-E	Aquífero	mar/05	abr/05	mai/05	jul/05	ago/05	set/05	dez/05	mar/06	jul/06
				NE (m)								
CB01	507130	9604638	Barreiras	8,15	7,47	6,76	6,74	6,97	7,64	8,49	9,05	8,02
CB02	506262	9612202	Dunas	0,71	0,27	0,61	0,56	0,9	0,5	1,11	1,26	0,46
CB03	509620	9607850	Barreiras	1,68	1,42	1,73	1,16	1,27	1,53	1,84	2,06	1,66
CB04	512436	9607342	Barreiras	2,51	1,62	0,84	0,69	1,12	1,73	2,52	2,96	1,49
CB05	518750	9606740	Dunas	5,35	4,88	4,74	4,66	4,93	5,25	5,74	6,29	5,31
CB06	511649	9603390	Barreiras	8,52	8,16	7,3	4,78	4,98	5,53	6,8	7,79	5,95
CB07	508539	9601420	Barreiras	3,37	1,06	1,62	0,64	1,4	2,09	0,75	NM	NM
CB08	511076	9599194	Misto	2,81	NM	0,98	0,86	1,15	CS	CS	CS	1,11
CB09	511100	9599190	Misto	NM	6,97	2,92	1,26	2,15	5,03	7,11	5,83	2,6
CB10	510101	9594824	Misto	11,65	11,53	8,89	11,28	11,34	11,76	12,84	13,56	12,1
CB11	515041	9592556	Misto	0,79	0,5	0,2	0,19	0,86	1,37	CS	0,68	0,15
CB12	516239	9591990	Misto	5,99	4,93	0,3	0,47	1,74	4,94	CS	5,53	0,2
CB13	520439	9594094	Misto	5,55	5,01	1,6	0,84	2,37	3,38	6,68	6,06	2,19
CB14	520053	9599192	Barreiras	1,99	1,51	1	1,28	1,51	1,79	2,32	2,31	1,84
CB15	520280	9603090	Barreiras	1,76	1,46	1,27	1,42	1,53	1,88	2,22	2,41	1,62
CB16	508968	9606068	Barreiras	4,18	3,83	3,31	3,51	3,59	3,9	4,47	4,72	3,94
CB17	521226	9596422	Barreiras	4,32	2,7	1,45	1,32	2,18	2,92	5,41	5,5	2,21
CB18	521487	9598942	Barreiras	8,27	8,19	7,75	6,99	7,01	7,46	8,28	8,76	7,18
CB19	520083	9599590	Barreiras	NM	NM	3,48	3,33	3,67	4,55	NM	NM	4,58
CB20	510034	9592500	Misto	NM	NM	5,33	4,64	4,63	5,12	6,37	6,72	3,18
PZ01	515992	9606828	Dunas	2,25	1,24	1,08	1,06	1,24	1,53	2,729	2,73	1,48
PZ02	514615	9609378	Dunas	1,955	2,125	1,8	1,78	1,89	2,01	2,16	2,26	2,15
PZ03	516555	9608462	Dunas	3,515	3,31	3,1	3,26	3,4	3,53	3,73	3,67	3,59
PZ04	518750	9606740	Dunas	5,64	5,06	4,95	4,97	5,19	5,61	6,11	6,43	5,64
PZ05	524243	9603374	Dunas	2,23	2,22	2,02	2,14	2,29	2,55	2,89	2,84	2,39
PZ06	523332	9604890	Dunas	2,41	2,27	2,14	2,33	2,45	2,59	2,74	2,85	2,68
PZ07	521001	9607258	Dunas	2,36	2,08	1,96	2,01	2,1	2,42	2,92	3,39	2,62
PZ08	517046	9604064	Dunas	0,74	0,82	0,61	0,71	0,79	1,12	X	X	X
PZ09	511939	9612384	Dunas	1,13	0,78	0,56	0,72	0,92	1,06	1,56	1,4	1,08
PZ10	507778	9615338	Dunas	6,3	5,9	5,61	5,43	5,65	6,07	6,67	6,82	5,88
PZ11	509087	9613316	Dunas	3,42	3,26	3,04	3,05	3,25	3,45	3,71	3,8	3,47
PZ12	511908	9608678	Dunas	2,37	2,18	1,9	1,88	2,03	2,47	3,01	3,38	2,59
PZ13	509112	9611338	Dunas	2,905	2,48	2,1	2,05	2,18	2,5	3,11	3,45	2,38
PZ14	520259	9604358	Dunas	4,17	3,91	3,75	3,38	3,71	4,18	5,15	5,55	4,34
PZ15	519872	9604804	Dunas	3,62	3,59	3,48	3,32	3,5	3,89	4,36	4,88	4,31

4.5 - RECARGA

Além de ser considerado o parâmetro mais importante e mais complexo de quantificar, a recarga proporciona também grandes divergências quanto ao seu conceito fundamental. Nesta pesquisa será considerada a definição mais utilizada onde é expressa como a quantidade de água que se acrescenta à zona saturada de água subterrânea. A recarga pode ocorrer por infiltração da água da chuva, por infiltração a partir de cursos de água e de outros corpos hídricos superficiais, por escoamento subterrâneo e/ou por ação humana (recarga artificial) (Figura 4.19).

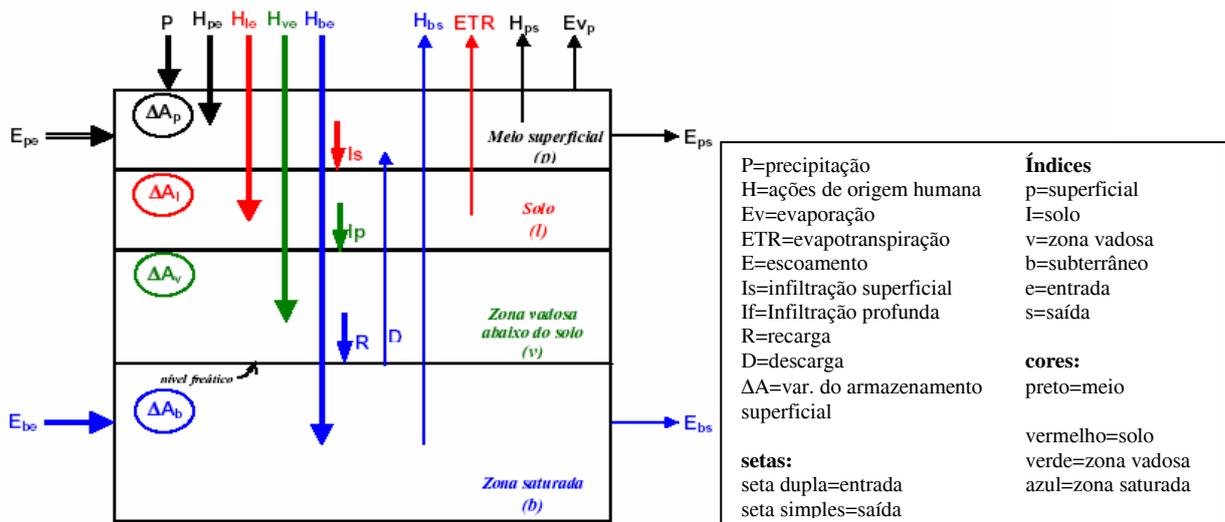


Figura 4.19 – Componentes ativos de um balanço hídrico onde a recarga representa a quantidade de água efetiva que alcança a zona saturada (Oliveira, 2000).

Atualmente, o termo *recarga líquida* começa a ser muito empregado na literatura para diferenciar a recarga subtraída do escoamento subterrâneo. A recarga é um processo que ocorre internamente ao perfil de solo de forma difusa e pode ser estimado direta ou indiretamente.

As principais técnicas para estimar/quantificar a recarga são apresentadas na Tabela 4.5 e estão divididas em dados de corpos de águas, zona insaturada e zona saturada (Scalon et. al., 2002). Dentro de cada divisão é possível subclassificá-las em técnicas físicas, traçadores e modelamentos numéricos.

Uma ausência facilmente perceptível na Tabela 4.5 é o balanço hídrico (equação de conservação de massa). Devido ao fato de que a maioria das técnicas de estimativa de recarga é baseada na equação de balanço hídrico, esse tópico será detalhado.

Tabela 4.5 - Classificação das metodologias de quantificação de recarga (Scalon, *et al.*, 2002).

Divisão/Subdivisão	Físicas	Traçadores	Modelo Numérico
Corpos de água superficiais	- Balanço de água em drenagens	- Traçador de Calor	- Modelos Diretos - Modelos Inversos
Zona Insaturada	- Lísímetros	-Traçadores Aplicados -Traçadores Históricos -Traçadores Ambientais	- Modelos Diretos
Zona Saturada	-Flutuação do Nível Estático	-Datação de Água Subt. -Traçadores Ambientais	- Modelos Diretos - Modelos Inversos

Balanço Hídrico

O balanço hídrico em uma bacia hidrográfica pode ser estabelecido como:

$$P + Q_{IN} = ET + Q_{OUT} + \Delta S \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde P é a precipitação; Q_{IN} e Q_{OUT} são fluxo de água entrando e saindo da bacia, respectivamente; ET é a evapotranspiração e ΔS é a variação no armazenamento de água. Todos os componentes são dados em taxas (p.ex. m/s ou m^3/h). Cada uma dessas variáveis pode ser dividida em subcomponentes. O fluxo de água entrando e saindo pode ser escrito como a soma do fluxo superficial, do interfluxo e fluxo subterrâneo. ET pode ser distinguida com base na fonte da água evaporada (superficial, zona insaturada e zona saturada). Água armazenada pode ser localizada em reservatórios superficiais, zona insaturada e zona saturada. Reescrevendo a equação de balanço hídrico (Scalon, 2002):

$$P + Q_{IN}^{SW} + Q_{IN}^{GW} = ET^{SW} + ET^{UZ} + ET^{GW} + R_o + Q_{OUT}^{GW} + Q_{BF} + \Delta S^{SW} + \Delta S^{UZ} + \Delta S^{GW} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

onde sw=superficial; in=entrada; out=sáida; uz=zona insaturada; gw= subterrâneo; bf=fluxo de base (descarga de água subterrânea para drenagens e fontes; R_o = escoamento superficial.

A recarga, R, inclui qualquer infiltração de água que alcança o nível estático e pode ser escrita como (Walton, 1989):

$$R = Q_{OUT}^{GW} - Q_{IN}^{GW} + Q_{BF} + ET^{GW} + \Delta S^{GW} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Esta equação simples estabelece que toda água que alcança o nível estático flui para fora da bacia hidrográfica como fluxo subterrâneo, ou descarga para a superfície, ou evapotranspirada ou retida (armazenada) em aquíferos e/ou aquícludes.

Substituindo a equação de recarga na segunda equação apresentada nesse tópico, obtém-se a seguinte equação de balanço hídrico:

$$R = P + Q_{IN}^{SW} - R_o - ET^{SW} - ET^{UZ} - \Delta S^{SW} - \Delta S^{UZ} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

A explanação acima evidencia de forma clara que a dificuldade de quantificar todos os componentes envolvidos é uma das principais causas da complexidade apontada na quantificação da recarga.

A escolha da técnica a ser utilizada no cálculo da recarga é baseada no equacionamento dos objetivos da pesquisa com os dados disponíveis ou que serão obtidos para tal, sempre que possível utilizando mais uma técnica para efeito comparativo (p. ex., Scalon et al., 2002; Healey & Cook, 2002).

Considerando tais preceitos esta pesquisa optou por utilizar dois métodos associados à zona saturada sendo o primeiro método da variação do nível estático e outro através de aplicação de métodos numéricos.

Seguindo a estrutura orgazicional proposta inicialmente, a seguir será aplicada a técnica física da variação do nível estático e, posteriormente, em tópico específico sobre modelamento de fluxo, o cálculo por método numérico.

4.5.1 – Método da Variação do Nível Estático

O princípio teórico desse método baseia-se em equacionamento do balanço hídrico onde se considera que mudanças no armazenamento de água pode ser atribuído à recarga e ao fluxo subterrâneo na bacia hidrográfica retirados o fluxo base (descarga para drenagens e fontes naturais), evapotranspiração a partir de água subterrânea e por fluxo subterrâneo para o exterior da bacia (Schict and Walton, 1961 *in* Healey & Cook, 2002; Fetter, 1994). O balanço hídrico pode ser escrito como:

$$R = \Delta S^{gw} + Q^{bf} + ET^{gw} + Q_{off}^{gw} - Q_{on}^{gw} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

onde R é a recarga, ΔS^{gw} é a variação no armazenamento subterrâneo, Q^{bf} é o fluxo de base, ET^{gw} é a evapotranspiração a partir da água subterrânea e, $Q_{off}^{gw} - Q_{on}^{gw}$ é o fluxo subterrâneo disponível ou líquido, já considerando extrações por bombeamento. Todos esses parâmetros são expressos como taxas (p.ex., mm/ano).

A premissa inerente ao método é que a ascensão do nível d'água no aquífero livre é devido à recarga que alcança o nível estático. A recarga é calculada como:

$$R = S_y dh / dt = S_y \Delta h / \Delta t \quad (\text{Eq.4.9})$$

onde S_y é a capacidade específica, h= altura do nível estático e t é o tempo.

Uma derivação comum da Equação 4.9 assume que a água que alcança o nível estático vai direto para o armazenamento e que todos os outros componentes da equação 4.8 tenham valor zero (0) durante o período da recarga (Healey & Cook, 2002). Mas, um retardo de tempo ocorre entre o evento de recarga e a redistribuição da água para os demais componentes envolvidos da equação 4.8. Logo, o intervalo de tempo é crítico para o correto uso desse método sendo que para intervalos curtos (horas ou poucos dias) ele é mais apropriado para o cálculo da recarga total. Para intervalos mais longos (anuais ou sazonais) também pode ser usado fornecendo uma estimativa da variação de armazenamento de água subterrânea também conhecida como recarga líquida (Healey & Cook, 2002). Outra condição inerente a esse método é que o fluxo base ou o fluxo de água que deixa o nível estático em direção aos pontos de descarga tenha velocidade reduzida quando comparada à recarga que alcança o nível estático.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados dos cálculos para a recarga líquida utilizando a Equação 4.9. Considerando toda a complexidade na quantificação deste parâmetro hidrogeológico e as diversas premissas a serem incorporadas no uso da Equação 4.9 optou-se por critérios conservadores utilizar os valores mínimos de capacidade específica apontados na Tabela 4.4 para os materiais terrígenos relacionados à Areia contendo argila (0,03), Areia Fina (0,10) e Areia Média (0,20). Acredita-se, assim, que tais valores traduzam as características, anteriormente descritas, dos materiais do Aquífero Misto, Aquífero Barreiras e Aquífero Dunas, respectivamente.

Para o Aquífero Dunas a taxa de recarga líquida média para os pontos mais próximos ao litoral foi de 140,0 mm/ano enquanto para os pontos neste aquífero mais recuados apresentam uma média de 300,0 mm/ano. Ao se comparar essas taxas com o total precipitado monitorado em alguns locais para o período de julho/2005 a julho/2006 observa-se que a recarga líquida representou entre 9,0% a 13,0% da precipitação pluviométrica.

A taxa média de recarga líquida para o Aquífero Barreiras foi de 200,0 mm/ano representando entre 18,0% a 25,0% do total precipitado para o período de julho/2005 a julho/2006 sendo exceção o ponto CB15 que aponta apenas 7,0% da precipitação pluviométrica.

Apesar da maioria dos pontos monitorados no Aquífero Misto terem ausência de leituras é possível avaliar de maneira semi-quantitativa que a recarga líquida média foi de 150,0 mm/ano representando entre 16,0% a 23,0%.

Tabela 4.6 - Valores de Recarga Líquida obtidos com a utilização da Equação 4.9.

Pontos	Aquíf.	Máx. NE (m)	Mín. NE (m)	Varição do NE (m)	Capac. Espec.	Rec. Líqu. (mm/ano)	Prec. 2005/06	Relação Rec./Precip. (%)	Pluviôm.
CB01	Barreiras	9,05	6,74	2,31	0,10	231	902,5	25,6	PV09
CB02	Dunas	1,26	0,27	0,99	0,20	198	-	-	-
CB03	Barreiras	2,06	1,16	0,9	0,10	90	-	-	-
CB04	Barreiras	2,96	0,69	2,27	0,10	227	1264	18,0	PV01
CB05	Dunas	6,29	4,66	1,63	0,20	326	-	-	-
CB06	Barreiras	8,52	4,78	3,74	0,10	374	-	-	-
CB07	Barreiras	3,37	0,64	2,73	0,10	273	1234	22,1	PV04
CB08	Misto	2,81	0,86	1,95	0,03	58,5	-	-	-
CB09	Misto	7,11	1,26	5,85	0,03	175,5	-	-	-
CB10	Misto	13,56	8,89	4,67	0,03	140,1	860,5	16,3	PV03
CB11	Misto	1,37	0,15	1,22	0,03	36,6	-	-	-
CB12	Misto	5,99	0,2	5,79	0,03	173,7	-	-	-
CB13	Misto	6,68	0,84	5,84	0,03	175,2	755	23,2	PV02
CB14	Barreiras	2,32	1	1,32	0,10	132	-	-	-
CB15	Barreiras	2,41	1,27	1,14	0,10	114	1595,5	7,1	PV06
CB16	Barreiras	4,72	3,31	1,41	0,10	141	-	-	-
CB17	Barreiras	5,5	1,32	4,18	0,10	418	-	-	-
CB18	Barreiras	8,76	6,99	1,77	0,10	177	-	-	-
CB19	Barreiras	4,58	3,33	1,25	0,10	125	-	-	-
CB20	Misto	6,72	3,18	3,54	0,03	106,2	-	-	-
PZ01	Dunas	2,73	1,06	1,67	0,20	334	-	-	-
PZ02	Dunas	2,26	1,78	0,48	0,20	96	-	-	-
PZ03	Dunas	3,73	3,1	0,63	0,20	126	1305,5	9,7	PV07
PZ04	Dunas	6,43	4,95	1,48	0,20	296	-	-	-
PZ05	Dunas	2,89	2,02	0,87	0,20	174	1885	9,2	PV05
PZ06	Dunas	2,85	2,14	0,71	0,20	142	-	-	-
PZ07	Dunas	3,39	1,96	1,43	0,20	286	-	-	-
PZ08	Dunas	1,12	0,61	0,51	0,20	102	-	-	-
PZ09	Dunas	1,56	0,56	1	0,20	200	1478,8	13,5	PV08
PZ10	Dunas	6,82	5,43	1,39	0,20	278	-	-	-
PZ11	Dunas	3,8	3,04	0,76	0,20	152	-	-	-
PZ12	Dunas	3,38	1,88	1,5	0,20	300	-	-	-
PZ13	Dunas	3,45	2,05	1,4	0,20	280	-	-	-
PZ14	Dunas	5,55	3,38	2,17	0,20	434	-	-	-
PZ15	Dunas	4,88	3,32	1,56	0,20	312	-	-	-

4.6 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Evapotranspiração é a perda de água subterrânea para a atmosfera ocasionada pela evaporação de água contida no solo somada à transpiração da vegetação. Distingue-se em dois tipos (Fetter, 1994):

Evapotranspiração potencial (ETP): quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água.

Evapotranspiração real (ETR): quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial ($ETR \leq ETP$).

Devido à complexidade e custos envolvidos existem poucos dados disponíveis sobre evapotranspiração real. Já a evapotranspiração potencial, pode ser obtida a partir de modelos baseados em leis físicas e relações empíricas de forma rápida e suficientemente precisas. As diferenças entre a evapotranspiração real e potencial diminuem sempre que os intervalos de tempo utilizados para o cálculo da segunda são ampliados (meses). As técnicas normalmente utilizadas baseiam-se em medidas diretas (lisímetros), em temperatura, na radiação incidente e balanço hídrico (Fetter, 1994).

O alto custo na instalação e monitoramento das medidas diretas dá espaço à utilização de métodos indiretos baseados em temperatura (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite & Mather, 1955 in Camargo & Camargo, 2000; Thornthwaite modificado por Camargo et al. 1999; Hargreaves & Samani, 1985; Medeiros, 2002) e que envolvem balanço de energia nas plantas (Monteith, 1965 in Camargo & Camargo, 2000; Medeiros, 2002).

Método de Thornthwaite

Correlaciona dados de evapotranspiração potencial medida em evapotranspirômetros e em bacias hidrográficas, com dados de temperatura média mensal e comprimento do dia.

Thornthwaite (1948) estabelece a seguinte equação para um mês de 30 dias:

$$E = \left(\frac{t}{I}\right)^a \quad (\text{Eq. 4.10})$$

onde: E é a evapotranspiração potencial não ajustada (cm); t a temperatura média mensal (°C); I um índice de calor, correspondente à soma de 12 índices mensais.

$$I = \sum_1^{12} t \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Onde:

$$t = \left(\frac{t}{E}\right)^{1.514} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

a = equação cúbica da forma:

$$a = 0,675 \cdot 10^{-6} I^3 - 0,771 \cdot 10^{-4} I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} I + 0,49$$

A equação de Thornthwaite é bastante complexa para uso prático, mas pode ser facilmente aplicada com o auxílio de um nomograma específico. Como a temperatura do ar é um

elemento geralmente medido em postos meteorológicos com bastante precisão, substituiu-se o índice de calor pela temperatura média anual, construindo um nomograma com: temperatura média anual (°C) e temperatura média mensal (°C). Com esse nomograma, calcula-se diretamente a evapotranspiração mensal.

Método de Penman-Monteith

Segundo Medeiros (2002) esse método considera que os fatores de transferência turbulenta de calor latente e sensível são os mesmos implicando que a evapotranspiração potencial equacionada por Penman-Monteith (1965) será:

$$ETP_{pm} = \frac{\Delta(R_n G) + \frac{\rho C_p (\epsilon_s - \epsilon_a) M}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

, onde $(\epsilon_s - \epsilon_a)$ é o déficit de pressão do ar para altura de referência medida (kPa); ρ é a densidade do ar (kg.m^{-3}); C_p é o calor específico do ar para pressão constante ($\text{MJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor contra temperatura (kPa.°C^{-1}); γ é a constante psicométrica (kPa.°C^{-1}); r_c e r_a são as resistências total da cobertura e aerodinâmica (sm^{-1}); M é o valor que depende da escala de tempo usada; R_n é o saldo de radiação ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) e G é a densidade de fluxo de calor do solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$).

Após diversas simplificações e equacionamentos específicos resulta-se nos seguintes parâmetros de entrada desse método (Medeiros, 2002):

- Temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$, °C);
- Temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$, °C);
- Radiação solar global (R_s , $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$);
- Velocidade média do vento (U_2 , m.s^{-1});
- Umidade relativa máxima do ar ($UR_{\text{máx}}$, %);
- Umidade relativa mínima do ar ($UR_{\text{mín}}$, %);
- Altitude, latitude, dia Juliano e pressão atmosférica.

4.6.1 – Evapotranspiração na área de influência do CIPP

Em uma detalhada pesquisa sobre evapotranspiração em uma área litorânea distante cerca de 50 km do CIPP, Medeiros (2002) comparou os resultados obtidos com o método de Penman-Monteith, considerado um padrão, com métodos direto como o Tanque de Evaporação Classe A (p.ex., Alen et al. 1998) e indiretos como o Thornthwaite (1948), Thornthwaite modificado por Camargo (1999); Hargreaves & Samani (1985). Utilizando como base os anos hidrológicos de 1997 e 1998, Medeiros (2002) obteve um valor médio anual de 1606,0mm com o método Penman-Monteith e valor médio 5% maior com o método Thornthwaite.

Aguiar (2003) utilizando dados da série histórica de 1975-2002 de dados climatológicos para mesma região pesquisada por Medeiros (2002) obteve um valor médio anual de 1707,0mm para a evapotranspiração potencial aplicando o método de Thornthwaite.

Especificamente para área do CIPP a evapotranspiração potencial e o balanço hídrico segundo o método proposto por Thornthwaite (1948); Thornthwaite & Mather (1955) utilizando os dados climatológicos para os anos de 2004 a 2006 fornecidos pela FUNCEME.

A Tabela 4.7 apresenta os valores dos parâmetros iniciais utilizados, a Tabela 4.7 os resultados obtidos para a evapotranspiração potencial e as Tabelas 4.9 a 4.11, os valores calculados para as variáveis do balanço hídrico.

O valor de 100,0mm, estimativa da Capacidade de Armazenamento de Água no solo (CAD), foi baseado em resultados obtidos por Medeiros (2002); Aguiar (2003); Andrade et al. (2007) que indicam valores de 75,0mm a 125,0mm.

Tabela 4.7 – Valores de Temperatura média e Precipitação pluviométrica para o período 2004 a 2006.

Mês	Temp. Média (°C) 2004	Temp. Média (°C) 2005	Temp. Média (°C) 2006	Prec. Média 2004 (mm)	Prec. Média 2005 (mm)	Prec. Média 2006 (mm)
Janeiro	26,90	28,29	28,52	306,6	25	0
Fevereiro	26,26	28,45	27,47	267,4	45	158,4
Março	26,81	27,81	26,58	199,2	87,6	260,2
Abril	26,95	27,36	25,82	86	133,4	282
Mai	27,07	26,73	26,22	14,4	243,6	188,8
Junho	25,73	26,09	25,77	127	132	133,9
Julho	25,90	26,58	26,06	67	8	15
Agosto	26,84	27,26	27,03	0	0	0
Setembro	27,61	27,46	27,67	0	0	10
Outubro	27,78	27,82	27,96	0	0	0
Novembro	27,95	28,30	28,03	0	0	0
Dezembro	28,04	28,45	28,09	0	0	10

Tabela 4.8 - Resultados obtidos para a Evapotranspiração potencial para os anos entre 2004 a 2006.

Mês	Evapotrans. potencial (mm) 2004	Evapotrans. potencial (mm) 2005	Evapotrans. potencial (mm) 2006
Janeiro	148,16	179,96	186,75
Fevereiro	120,91	165,06	144,38
Março	143,48	164,60	138,82
Abril	140,78	148,03	119,06
Maiο	146,10	137,23	129,03
Junho	116,39	120,60	116,98
Julho	123,03	134,10	125,95
Agosto	142,72	150,20	146,89
Setembro	154,68	150,26	156,38
Outubro	166,34	166,43	171,09
Novembro	167,09	175,12	169,49
Dezembro	174,12	184,17	175,90
Total	1743,8	1875,76	1780,72

Tabela 4.9 - Balanço Hídrico para o ano de 2004 considerando uma CAD de 100,0 mm.

Mês	P(mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	NAC (mm)	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Jan.	306,6	148,0	158,44	0,00	100,00	99,00	148,16	0,00	59,44
Fev.	267,4	120,91	146,49	0,00	100,00	0,00	120,91	0,00	146,49
Mar.	199,2	143,48	55,72	0,00	100,00	0,00	143,48	0,00	55,72
Abr.	86,0	140,78	-54,78	-54,00	58,00	-42,00	128,00	-12,78	0,00
Maiο	14,4	146,10	-131,70	-185,00	15,00	-43,00	57,40	-88,7	0,00
Jun.	127,0	116,39	10,61	0,00	100,00	85,00	116,39	0,00	-74,39
Jul.	67,0	123,03	-56,03	-56,00	57,00	-43,00	110,00	-13,03	0,00
Ago.	0,00	142,72	-142,72	-198,00	13,00	-44,00	44,00	-98,72	0,00
Set.	0,00	154,68	-154,68	-352,00	2,00	-11,00	11,00	-143,68	0,00
Out.	0,00	166,34	-166,34	-518,00	0,00	-2,00	2,00	-164,34	0,00
Nov.	0,00	167,09	-167,09	-685,00	0,00	0,00	0,00	-167,09	0,00
Dez.	0,00	174,12	-174,12	-859,00	1,00	1,00	1,00	-173,12	0,00
TOTAL	1067,6	1743,80	-676,20	-----	-----	0,00	882,34	-858,00	187,26
P (mm) - Precipitação média mensal ETP (mm) - Evapotranspiração Potencial NAc (mm) - Negativo Acumulado ----- ARM (mm) - Armazenamento de Água no Solo ALT (mm) - Alteração do Armazenamento ETR (mm) - Evapotranspiração Real ----- DEF (mm) - Déficit Hídrico EXC (mm) - Excedente Hídrico									

Tabela 4.10 - Balanço Hídrico para o ano de 2005 considerando uma CAD de 100,0 mm.

Mês	P(mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	NAc (mm)	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Jan.	25,00	179,96	-154,96	-1105,00	1,00	-6,00	31,00	-148,96	0,00
Fev.	45,00	165,06	-120,06	-1225,00	4,00	3,00	48,00	-117,06	0,00
Mar.	87,60	164,60	-77,00	-1302,00	2,00	-2,00	89,60	-75,00	0,00
Abr.	133,40	148,03	-14,63	0,00	1,00	-1,00	134,40	-13,63	0,00
Maió	243,60	137,23	-131,70	0,00	100,00	99,00	137,23	0,00	7,37
Jun.	132,00	120,60	106,37	-126,00	100,00	0,00	120,60	0,00	11,40
Jul.	8,00	134,10	11,40	-276,00	28,00	-72,00	80,00	-54,1	0,00
Ago.	0,00	150,20	-126,10	-426,00	61,00	-22,00	22,00	-128,20	0,00
Set.	0,00	150,26	-150,20	-592,00	1,00	-5,00	5,00	-145,26	0,00
Out.	0,00	166,43	-166,34	-767,00	0,00	-1,00	1,00	-165,43	0,00
Nov.	0,00	175,12	-175,12	-685,00	7,00	4,00	4,00	-171,12	0,00
Dez.	0,00	184,17	-184,17	-951,00	7,00	3,00	3,00	-181,17	0,00
TOTAL	674,60	1875,76	-1201,16	-----	-----	0,00	675,83	- 1197,00	18,77

P (mm) - Precipitação média mensal ETP (mm) - Evapotranspiração Potencial NAc (mm) - Negativo Acumulado

ARM (mm) - Armazenamento de Água no Solo ALT (mm) - Alteração do Armazenamento ETR (mm) - Evapotranspiração Real

DEF (mm) - Déficit Hídrico EXC (mm) – Excedente Hídrico

Tabela 4.11 - Balanço Hídrico para o ano de 2006 considerando uma CAD de 100,0 mm.

Mês	P(mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	NAc (mm)	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Jan.	0,00	186,75	-186,75	-1093,00	1,00	0,00	0,00	-186,75	0,00
Fev.	158,40	144,38	14,02	-189,00	15,00	14,00	144,38	0,00	0,00
Mar.	260,20	138,82	121,38	0,00	100,00	85,00	138,82	0,00	36,38
Abr.	282,00	119,06	162,94	0,00	100,00	0,00	119,06	0,00	162,94
Maió	188,80	129,03	59,77	0,00	100,00	0,00	129,03	0,00	59,77
Jun.	133,90	116,98	16,92	0,00	100,00	0,00	116,98	0,00	16,92
Jul.	15,00	125,95	-110,95	-110,00	33,00	-67,00	82,00	-43,95	0,00
Ago.	0,00	146,89	-146,89	-256,00	7,00	-26,00	26,00	-120,89	0,00
Set.	10,00	156,38	-146,38	-402,00	1,00	-6,00	16,00	-140,38	0,00
Out.	0,00	171,09	-171,09	-573,00	0,00	-1,00	1,00	-170,09	0,00
Nov.	0,00	169,49	-169,49	-742,00	5,00	5,00	5,00	-164,49	0,00
Dez.	10,00	175,90	-165,90	-907,00	1,00	-4,00	14,00	-161,90	0,00
TOTAL	1058,30	1780,72	-722,42	-----	-----	0,00	792,27	-984,00	276,01

P (mm) - Precipitação média mensal ETP (mm) - Evapotranspiração Potencial NAc (mm) - Negativo Acumulado

ARM (mm) - Armazenamento de Água no Solo ALT (mm) - Alteração do Armazenamento ETR (mm) - Evapotranspiração Real

DEF (mm) - Déficit Hídrico EXC (mm) – Excedente Hídrico

CAPÍTULO V

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS: UMA ANÁLISE CRÍTICA

5.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Durante as duas últimas décadas que se seguiram desde a publicação de Aller *et al.*, (1987) que apresenta o método DRASTIC para avaliação qualitativa da vulnerabilidade de aquíferos, diversos outros métodos do tipo paramétrico-indexadores ou paramétricos foram desenvolvidos para avaliar a vulnerabilidade intrínseca e específica de aquíferos. Devido a sua aparente fácil aplicação e utilização os métodos indexadores deixam margem ao uso indiscriminado e baseado em dados insuficientes e inconsistentes.

É possível agrupar esses novos métodos em quatro grupos tomando por base os parâmetros utilizados no método DRASTIC. O Grupo 1 é constituído por aqueles métodos que reduziram os parâmetros hidrogeológicos utilizados no DRASTIC como, por exemplo, o GOD (Foster & Hirata, 1988), o AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1993) e o DAT (Ross *et al.*, 2004). O método SINTACS (Civita 1997, Civita & De Maio, 2004) pode ser incluso nesse grupo por apenas modificar a forma de quantificar a recarga.

O Grupo 2 é constituído pelos métodos que acrescentaram algum parâmetro ao DRASTIC para ir ao encontro ao conceito de vulnerabilidade específica ou risco potencial, por exemplo, com a inclusão do mapa de uso (Secunda *et al.*, 1998; Fritch *et al.*, 2000; Panagopoulos *et al.*, 2006; Gomezdelcampo & Dickerson, 2007), características estruturais (Rodríguez, 2004; Denny *et al.*, 2007), propriedades dos contaminantes (Wang *et al.*, 2007), ou o coeficiente de adsorção e conteúdo de argila (Guo *et al.*, 2007).

O Grupo 3 apresenta-se como o mais recente e independente, pois, busca avaliar a vulnerabilidade intrínseca através de outros parâmetros como a capacidade de troca catiônica, conteúdo de carbono orgânico, pH e conteúdo de argila. O SAI (Heredia & Cirelli, 2007) ou outras técnicas estatísticas (Gemitzi *et al.*, 2005; Twarakavi & Kaluarachchi, 2005) para a determinação dos pesos e índices do potencial poluidor utilizados no cálculo do índice de vulnerabilidade.

O Grupo 4 contempla os métodos baseados em parâmetros diferentes do DRASTIC, mas desenvolvidos especificamente para aquíferos do tipo cárstico: EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1997), PI (Goldscheider *et al.*, 2000) e COP (Vías *et al.*, 2006) onde parâmetros como desenvolvimento de rede de fluxo cárstico, efetividade da cobertura (solo + vegetação),

condições de infiltração e existência/grau de carstificação são associados a parâmetros utilizados por outros métodos como solo, conteúdo de argila, recarga, confinamento, etc.

A quantidade total dos diferentes parâmetros utilizados pelos métodos abordados pode ultrapassar a trinta, caso sejam considerados os parâmetros descritos no quarto grupo. Essa quantidade exorbitante de parâmetros aponta para um dos objetivos desse trabalho que é a análise conceitual dos 14 principais parâmetros utilizados para definir integralmente a vulnerabilidade à poluição de uma região considerando os métodos dos grupos 1, 2 e 3.

Ao longo da análise individual de cada parâmetro é traçado outro objetivo desse texto que trata dos métodos e fontes de obtenção de dados específicos a respeito de determinado parâmetro hidrogeológico, e equívocos algumas vezes observados.

Para uma análise mais detalhada da aplicação destes métodos o objetivo final é alcançado com a aplicação de quatro dos seis métodos abordados conceitualmente em uma área costeira no nordeste brasileiro sob influência de um complexo industrial e portuário. A aplicação não tem a intenção de comparar tais métodos por se considerar inapropriada essa abordagem uma vez que os diferentes métodos, apesar de terem conceitos muito próximos para a determinação da vulnerabilidade, apontam diferentes graus de importância (peso) para um mesmo parâmetro. Outro impedimento de uma comparação direta é a resolução diferenciada de cada método, imposta pelo número e equacionamento dos parâmetros utilizados, ou seja, um método que se baseie em dois ou três parâmetros e estrutura sua conceituação na resistência vertical não pode ser comparado direta e objetivamente com outros métodos que não consideram tais características.

A primeira dificuldade de atingir todos os objetivos reside na existência de vários conceitos de vulnerabilidade:

- a vulnerabilidade é a sensibilidade da qualidade da água subterrânea a uma carga contaminante imposta (Van Duijvenbooden & Van Waegeningh, 1987; Ferreira, 2004);
- a sensibilidade do aquífero a ser adversamente afetado por uma carga contaminante imposta (Foster & Hirata, 1991);
- é a facilidade com que um contaminante introduzido na superfície atinge e difunde-se na água subterrânea (Vrba & Zaporozec, 1994);
- uma propriedade intrínseca do sistema de água subterrânea (Civita, 1997).

Outros conceitos correlatos definem vulnerabilidade intrínseca como a vulnerabilidade da água subterrânea a contaminantes gerados por ações humanas e considera as características geológicas, hidrogeológicas, mas independe da natureza do contaminante. Já vulnerabilidade específica define a vulnerabilidade a um contaminante em particular ou a um grupo (Vrba &

Zaporozec, 1994; Gogu & Dassargues, 2000; Antonakos & Lambrakis, 2006; Lamelas *et al.*, 2007).

Apesar de não apresentar conceito formal sobre a matéria, Aller *et al.*, (1987) traça uma analogia do potencial poluidor com a vulnerabilidade relativa de uma área. Referem-se a risco quando tratam de susceptibilidade natural de um local submetido a uma carga poluente determinada, ou seja, vulnerabilidade específica.

O conceito mais utilizado é a propriedade intrínseca do sistema de água subterrânea que depende da sensibilidade aos impactos humanos e/ou naturais podendo ser intrínseca ou específica. O primeiro tipo, natural/intrínseca, é definido somente em função dos fatores hidrogeológicos enquanto o segundo tipo é função dos impactos potenciais de uso da terra e contaminantes (Stigter *et al.*, 2006).

Qualquer que seja o conceito utilizado, a vulnerabilidade é apresentada através de mapas temáticos úteis, principalmente, a técnicos e gestores de órgãos ambientais das diferentes esferas públicas em questões a respeito do potencial poluidor de determinado lugar. Esses mapas podem ser utilizados como ferramenta preliminar para planejamento governamental (Aller *et al.* 1987) identificando áreas potencialmente mais sensíveis, em programas de monitoramento ambiental, etc. O mapeamento da vulnerabilidade não deve substituir investigações *in situ* e não é indicador definitivo para avaliação da sensibilidade em implantação de indústrias e aterros sanitários.

Os métodos indexadores em sua concepção objetivam incorporar a distribuição espacial dos parâmetros hidrogeológicos que tendem a qualificar e/ou quantificar a vulnerabilidade. De forma geral, primeiramente, tais métodos qualificam individualmente cada parâmetro atribuindo-lhe um índice entre um intervalo arbitrário em que os valores menores indicam baixa vulnerabilidade e os maiores valores indicam alta vulnerabilidade daquele parâmetro. Após essa etapa um peso com valor constante é aplicado a cada parâmetro reclassificado na primeira etapa do processamento sendo que ao final, seguido o somatório dos produtos individuais obtidos, tem-se um mapa temático relativo à vulnerabilidade do aquífero à poluição.

5.2 - MÉTODOS PARAMÉTRICOS OU INDEXADORES

Nos métodos indexadores cada parâmetro tem um intervalo relativo à sua propriedade subdividido em intervalos discretos e hierarquizados com valores específicos que refletem o seu grau de sensibilidade à poluição (Gogu & Dassargues, 2000). A quantidade de parâmetros hidrogeológicos utilizados e a determinação do grau de sensibilidade de cada um é uma escolha subjetiva, mas influenciada pelo conceito de vulnerabilidade adotado (Figura 5.1 e Tabela 5.1).

Método DRASTIC

Como um método de avaliação do potencial poluidor natural/intrínseco da água subterrânea de um local (Aller *et al.*, 1987), esse método considera os seguintes parâmetros: profundidade do nível estático, recarga líquida, tipo de aquífero, tipo de solo, declividade, zona vadosa e condutividade hidráulica. Parâmetros quantitativos como condutividade e nível estático são classificados em intervalos contínuos e parâmetros qualitativos como aquífero e solo em intervalos relacionados aos seus subtipos. Considerando o potencial impacto à poluição da água subterrânea, índices (R) de 1 a 10 são atribuídos aos intervalos ou subtipos de cada parâmetro, e para realçar ou equilibrar a importância de determinado parâmetro hidrogeológico é aplicado um peso (W) entre 1 a 5 onde os menores valores associam-se a parâmetros de menor importância para a avaliação da vulnerabilidade.

A análise e interpretação do Índice DRASTIC (I_D) tem que ser relativa e estar baseada na subjetividade imposta na escolha dos índices que podem ser alterados pelo usuário e dos pesos que são fixos na etapa anterior de processamento, pois para nenhuma questão haverá resposta absoluta, ou seja, os valores obtidos para uma área somente tem algum significado naquele local. Normalmente, tais valores são divididos em 3 a 5 intervalos de vulnerabilidade onde relacionados aos valores mínimos encontram-se os locais pertencentes àquela região que possuem uma maior proteção à contaminação das águas subterrâneas.

Método SINTACS

Este método pode ser considerado até um desmembramento do DRASTIC por apenas substituir o parâmetro recarga líquida por infiltração efetiva (Civita, 1994; Civita & De Maio, 2004). Apresenta diferenças estruturais que disponibilizam ao usuário maior flexibilidade na escolha de índices (P) e pesos (W). O produto final aponta os resultados em 6 classes de vulnerabilidade.

Método GOD

Tal método (Foster, 1987; Foster & Hirata, 1988) tem uma estrutura simples e pragmática cujo sistema empírico é indicado para uma rápida avaliação da vulnerabilidade de um aquífero à poluição. Os parâmetros utilizados são: existência de confinamento (G), material da zona vadosa (O) e profundidade do nível estático (D). Apesar de não imputar pesos diretos aos fatores que conceitua a vulnerabilidade utiliza a atribuição de índices entre 0 e 1 para classificar os três parâmetros considerados seguindo a ordem de $G - O - D$. O índice GOD é determinado com a multiplicação entre os índices obtidos anteriormente podendo ser relacionado a 5 classes de vulnerabilidade (negligenciável, baixo, moderado, alto, extrema).

Método AVI

Tal método avalia a vulnerabilidade intrínseca utilizando apenas a condutividade hidráulica e a espessura de cada camada acima do aquífero, ou seja, fundamenta-se na avaliação da resistência vertical que o meio impõe ao fluxo de um agente contaminante. O procedimento padrão é a determinação inicial do índice AVI para cada poço tubular e posterior geração de um mapa final de isovalores de vulnerabilidade por métodos de interpolação delimitando as zonas AVI (Gogu & Dassargues, 2000).

Método DAT

Este método (Ross *et al.*, 2004) baseia-se no conceito relativo de Tempo de Advecção Descendente (DAT, em inglês), oriundo da Lei de Darcy, obtido com os parâmetros: conteúdo volumétrico ou porosidade, espessura das camadas acima do aquífero e a recarga. Originalmente desenvolvido para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos regionais sotopostos a camadas descontínuas e/ou inconsolidadas. Quando se considera saturada a seção entre a superfície do terreno e o topo do aquífero o parâmetro conteúdo volumétrico pode ser substituído pela porosidade, implicando na existência de uma camada saturada de baixa permeabilidade.

Pelos fundamentos do método não necessita classificar e ressaltar a importância dos parâmetros com índices e pesos tendo uma aplicação mais direta e com os resultados apresentados em 6 classes de vulnerabilidade cujos extremos são muito baixo e muito alto o potencial poluidor.

Método SAI

Incorporando conceitos e parâmetros que tendem a ressaltar os processos físico-químicos que ocorrem no solo ao receber uma carga poluente o Índice de Atenuação do Solo (Heredia & Cirelli, 2007) utiliza os parâmetros: profundidade do nível estático, espessura da zona vadosa, conteúdo de carbono orgânico, capacidade de troca catiônica, potencial hidrogeniônico e conteúdo de argila. Ao invés de utilizar índices, usa fatores de normalização (C) em uma escala de 0-100% que classificam os parâmetros em termos do conceito de vulnerabilidade intrínseca que posteriormente tem pesos (P) atribuídos vinculados a sua importância no processo de atenuação de contaminantes no solo.

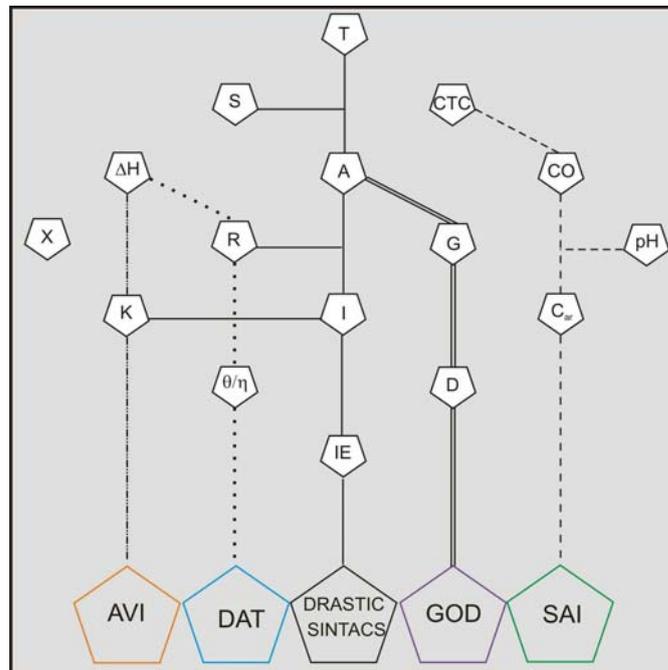


Figura 5.1 - Relação dos parâmetros utilizados pelos métodos de avaliação de vulnerabilidade intrínseca. Os diversos parâmetros específicos estão representados por “X”.

Tabela 5.1 - Resumo dos Fundamentos e Equações de alguns métodos paramétricos.

Método	Princípio/Fundamento	Equações
DRASTIC (Aller et al.1987)	Potencial poluidor dependente do solo e da zona vadosa. Desenvolvido objetivamente para aquíferos livres.	$I_D = \sum_{j=1}^7 W_j \times R_j$
SINTACS (Civita, 1994)	Potencial poluidor dependente do solo e da zona vadosa. Desenvolvido para os sistemas hidrogeológicos da Itália.	$I_S = \sum P_{(1,7)} \times W_{(1,n)}$
GOD (Foster & Hirata, 1988)	Potencial poluidor dependente do solo e da zona vadosa.	$I_{GOD} = I_C \times I_O \times I_D$
AVI (Gogu & Dassargues, 2000)	Fundamentado no conceito de resistência vertical.	$AVI = \sum d/k$
DAT (Ross et al., 2004)	Baseado no conceito de tempo relativo de advecção descende.	$DAT = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^n m_i \theta_i$
SAI (Heredia & Cirelli, 2007)	Incorpora os processos físico-químicos que ocorrem no solo.	$SAI = \frac{\sum C_i \times P_i}{\sum P_i}$

5.3 - PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS

São 14 parâmetros hidrogeológicos utilizados para definir a vulnerabilidade intrínseca pelos métodos DRASTIC, GOD, AVI, DAT, SAI e SINTACS (Tabela 5.2):

Tabela 5.2 - Relação dos parâmetros utilizados na avaliação da vulnerabilidade.

Parâmetros Intrínsecos da Vulnerabilidade	
Aquífero (A)	Nível Estático (D)
Recarga (R)	Carbono orgânico (CO)
Declividade (T)	Confinamento (G)
Solo (S)	Troca catiônica (CTC)
Infiltração (IE)	Conteúdo volumétrico (Θ)
Condutividade (K)	pH
Zona vadosa (O)	Conteúdo de argila (C_{ar})

Apesar do presente trabalho se tratar especialmente dos parâmetros hidrogeológicos que definem a vulnerabilidade intrínseca, os mais utilizados na avaliação da vulnerabilidade específica são: uso e ocupação do solo (Secunda *et al.*, 1998; Delcampo & Dickerson, 2007), características estruturais (Denny *et al.*, 2007), propriedades dos contaminantes orgânicos (Wang *et al.*, 2007), metais (Guo *et al.*, 2007), nitrato (Rupert, 2001; Panagopoulos *et al.*, 2006; Alamasri, 2007), intrusão salina e da zona costeira (Edet, 2004; Herlinger Jr & Viero, 2007; Draui, 2007).

Aquífero (A)

O método DRASTIC refere-se a esse parâmetro como o material consolidado ou inconsolidado que produz quantidades significativas de água subterrânea. O sistema de fluxo dentro do aquífero é afetado por sua estrutura. Os caminhos preferenciais e as extensões que um contaminante tem que seguir é governado pelo sistema de fluxo dentro do aquífero (Aller *et al.* 1987). Essa extensão é um importante agente controlador na determinação do tempo disponível para a influência de processos naturais como a sorção, reatividade e dispersão.

A relação entre contaminante e o tipo de aquífero também é influenciada pelo tamanho da área superficial de material em contato com o agente poluidor. O caminho a ser percorrido por esse contaminante pode ser fortemente influenciado por fraturamentos e/ou sistemas interconectados de aberturas de origem cársticas que implicarão em um fluxo mais fácil e rápido (Aller, 1987). Tal método estabelece um intervalo com 10 litotipos que representariam os principais tipos de aquíferos com seus intrínsecos potenciais poluidores (Tabela 5.3).

Assim, um tipo de aquífero representado por um argilito não fraturado teria uma vulnerabilidade a contaminação muito baixo sendo-lhe atribuído o índice 1 enquanto um calcáreo com estruturas cársticas teria o índice 10 representando o mais alto potencial poluidor. Para litotipos com porosidade primária baixa ou inexistente o potencial poluidor será dependente do grau de fraturamento. Uma vez que o conhecimento específico a respeito de uma área é

hierarquicamente superior ao estabelecido na Tabela 1 essa etapa do processamento é o momento ideal e decisivo para que o usuário manipule, adeque e redistribua os índices pré-estabelecidos da melhor forma a realmente incorporar a distribuição espacial desse parâmetro ao mapa temático.

Tabela 5.3 - Índices e Peso DRASTIC para o tipo de aquífero.

Aquífero		
Subtipos	Índices	Índice
Argilito	1-3	2
Rochas ígneas/metamórficas	2-5	3
Saprolito	3-5	4
Tilito/diamictitos	4-6	5
Arenito, calcáreo e ritmito	5-9	6
Arenito maciço	4-9	6
Calcáreo maciço	4-9	6
Areia e cascalho	4-9	8
Rochas vulcânicas	2-10	9
Calcáreo c/ estruturas cársticas	9-10	10
Peso do Parâmetro: 3		

Pelo método SINTACS esse parâmetro incorpora as características do aquífero considerando os processos físico-químicos (moleculares, dispersão cinemática, diluição, sorção e reações químicas) que ocorre abaixo do nível estático quando o agente poluidor/contaminante mistura-se a água subterrânea. Da mesma forma esse método estabelece uma avaliação relativa do potencial que varia entre 1 a 10 onde os menores valores representam baixo potencial e vice-versa (Tabela 5.4).

As informações disponíveis sobre tal parâmetro na maioria das vezes são inexistentes, sendo os mapas geológicos associados a pesquisas de campo, a principal forma de se obter um mapa temático sobre os tipos de aquíferos presentes em uma região específica. Normalmente, as escalas regionais e semi-regionais de 1:100.000 e 1:50.000 dos mapas geológicos são compatíveis com a escala adequada de elaboração dos índices de vulnerabilidade.

O método GOD utiliza esse parâmetro considerando-o como o tipo predominante do material terrígeno constituinte do aquífero. O índice utilizado para traduzir a vulnerabilidade do parâmetro varia entre 0 e 1 sendo os menores associados ao baixo potencial poluidor (Tabela 5.5).

Tabela 5.4 - Índices e Peso SINTACS para o tipo de aquífero.

Aquífero	
Subtipos	Índice
Aluvião com cascalho	8-9
Calcáreo c/ estruturas cársticas	9-10
Calcáreo fraturado	6-9
Dolomito fraturado	4-7
Aluvião com finos	6-8
Areia	7-9
Arenito, Conglomerado	4-9
Rochas plutônicas fraturadas	2-4
Turbiditos	5-8
Rochas vulcânicas fraturadas	8-10
Marga, argilitos	1-3
Tilitos grossos	6-8
Tilitos finos	4-6
Argila, silte	1-3
Rochas Metamórficas	2-5
Peso do Parâmetro: 3 (regiões naturais); 3 (diversas fontes de contaminação); 5 (alta densidade de drenagens); 5 (estruturas cársticas); 4 (fissural)	

Tabela 5.5 - Índices GOD para o tipo de material predominante do aquífero.

Aquífero	
Material	Índice
Cascalho/Seixos	0,8
Areia	0,7
Areno-argiloso	0,6
Marga com finos	0,5
Argila	0,4

Recarga (R) e Infiltração Efetiva (IE)

A recarga é o parâmetro hidrogeológico que representa no método DRASTIC a quantidade de água que penetra a subsuperfície e alcança o nível estático. Essa recarga contribui de forma acentuada ao transporte vertical de contaminantes e ao controle da quantidade de água disponível para processos como a diluição e a dispersão. *A priori* quanto maior a recarga maior o potencial poluidor, pois, um aumento acentuado da recarga irá proporcionar aumento da distribuição do contaminante (Aller *et al.* 1987).

No método SINTACS o parâmetro recarga é substituído pela infiltração efetiva que é relacionada à água subterrânea que alcança o nível estático oriunda somente da precipitação efetivamente infiltrada, desconsiderando-se as águas provenientes de corpos superficiais, por recarga artificial como irrigação e interfluxo subsuperficial (Draoui *et al.*, 2007).

A Tabela 5.6 apresenta os valores de recarga DRASTIC e de infiltração efetiva SINTACS.

Tabela 5.6 - Índices e Peso DRASTIC para a recarga e para a infiltração do método SINTACS.

Recarga		Infiltração	
mm/ano	Índice	mm/ano	Índice
0-50	1	0-30	1
50-100	3	51-80	3
100-180	6	81-100 (>476)	4
180-250	8	101-120 (416-475)	5
> 250	9	121-150 (381-415)	6
-	-	181-210 (341-360)	8
-	-	211-250 (301-340)	9
-	-	251-300	10
Peso 4		-	

Os valores de recarga intencionalmente possuem amplos intervalos para incorporar a dificuldade na obtenção de dados disponíveis sobre esse parâmetro, permitindo também uma manipulação mais flexível por um usuário mais experiente. Já a infiltração efetiva é relacionada com seus índices por uma distribuição aproximadamente normal impactando o intervalo entre 250-300 mm/ano como tendo o maior potencial poluidor. Considera-se que infiltrações efetivas acima desse intervalo passam a ter uma importância além da injeção de água subterrânea no sistema que é a diluição de um potencial agente contaminante.

Para o método DAT (Ross *et al.*, 2004) a recarga é conceituada de maneira intermediária quando comparada com os métodos DRASTIC e SINTACS onde se parte da premissa/simplificação que somente um fluxo vertical descendente ocorre desde a superfície até o topo do aquífero.

Apesar de ter um elevado grau de importância na gestão de recursos hídricos a obtenção de dados de recarga hidráulica apresenta grande dificuldade. As principais técnicas, além do balanço hídrico, para estimar/quantificar a recarga são apresentadas na Tabela 5 (Scalon *et al.*, 2002), sendo divididas em corpos de águas superficiais, zona insaturada e zona saturada na qual cada divisão é subclassificada em técnicas físicas, traçadores e modelamentos numéricos.

A escolha da técnica a ser utilizada na quantificação da recarga normalmente é influenciada pela disponibilidade de dados de algumas das variáveis envolvidas no processo. Tal

situação pode acarretar em excessos ou subestimativas quando desconsiderados outros fatores no processo de recarga como a cobertura vegetal, declividade e permeabilidade do terreno.

Tabela 5.7 - Técnicas de quantificação da recarga (Scalon *et al.*, 2002).

Técnicas	Físicas	Traçadores	Modelo Numérico
Corpos de água superficiais	Balço de hídrico em drenagens	de Calor	Diretos Inversos
Zona Insaturada	Lísímetros	históricos ambientais	Diretos
Zona Saturada	Flutuação do Nível Estático	ambientais	Diretos Inversos

Declividade (T)

Apesar de ter forte influência na determinação de áreas favoráveis ao escoamento ou infiltração e ter influência no desenvolvimento dos perfis de solos que podem interferir na atenuação de contaminantes, somente o método DRASTIC e o seu desmembramento, o método SINTACS, incorporam esse parâmetro. Áreas com baixa declividade podem refletir um alto potencial poluidor devido à facilidade de um contaminante presente se infiltrar (Aller *et al.* 1987).

Tanto o método DRASTIC quanto o SINTACS além de considerarem o exposto anteriormente justificam a importância do uso desse parâmetro pela informação do gradiente topográfico e direção de fluxo subsuperficial que ele pode fornecer.

A Tabela 5.8 fornece os índices e o peso ponderado considerando 05 (cinco) intervalos percentuais de declividade que seriam significativamente relevantes na caracterização do potencial poluidor (Aller *et al.* 1987). Os menores valores de declividade denotam os maiores potenciais poluidores devido à facilidade do agente contaminante percolar verticalmente em direção ao nível estático.

Tabela 5.8 - Índices e Peso DRASTIC para a declividade.

Declividade	
%	Índice
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
> 18	1
Peso: 1	

Com o advento da integração e do processamento de dados georeferenciados em ambientes digitais a obtenção de mapas temáticos de declividade se transformou em rotina. Anteriormente, este tipo de mapa era obtido através de uma seqüência morosa de meses de processamento quase inteiramente manual formada por: escolha da base topográfica, medição planimétrica entre as curvas de níveis, cálculo da razão entre distância vertical sobre os valores medidos, plotagem manual das declividades calculadas em base georeferenciada, delimitação das curvas extrapoladas e elaboração do mapa final de declividade. A precisão e consistência do produto final eram influenciadas por: instrumentos de medidas (régua), número de técnicos na aquisição dos dados analógicos, número de decimais nos cálculos efetuados, resolução e preservação da base analógica topográfica.

Uma vez que nos principais pacotes computacionais disponíveis não se calcula especificamente a declividade e, sim, a taxa de variação máxima de uma variável qualquer, diversas etapas não estão preparadas para tal processamento, ocasionando a real necessidade do operador interferir na escolha dos parâmetros ao longo do processamento. Essa participação ativa do usuário não é normalmente levada em consideração devido, tanto a “urgência” de obtenção de um produto final visualmente “adequado”, quanto, ao excesso de confiança depositada nesse tipo de processamento digital.

Hoje, os condicionantes da qualidade de um mapa de declividade estão vinculados, principalmente, na acurácia e consistência da base plani-altimétrica digital, e na limitação e influência da utilização dos modelos TIN (*Triangulated Irregular Network*). A oferta recente e instantânea de bases topográficas digitais não foi acompanhada por uma avaliação crítica da qualidade/acurácia desses dados que em sua maioria têm problemas de consistência ocasionando a obrigatoriedade da inclusão de uma etapa inicial de redigitalização e correções topológicas, etc.. A incorporação da técnica de representação de superfícies a partir de pontos espaçados irregularmente e feições não-uniformes denominada de TIN otimizou de forma acentuada o processamento de imagens *raster* tridimensionais, mas, com eventuais limitações não consideradas ao longo do processo. Apesar de muito utilizado para tal, um modelo TIN pode ser menos sensível para certas espécies de aplicações SIG como análises de superfície através da declividade e aspecto do que outros modelos como o DEM (*Digital Elevation Model*), mas, possui uma real habilidade na representação tridimensional de um terreno (Thurtson, 2003). O modelo TIN será fortemente limitado pelos dados de entrada criando a necessidade de seleção de pontos que capturem as mudanças significativas da superfície (Thurtson, 2003). Ou seja, a forma totalmente automática de elaboração digital de um mapa temático de declividade tende a embutir

erros sistemáticos e de processamentos até pouco perceptíveis, mas que obrigatoriamente terão uma influência no resultado final do produto que utiliza tal parâmetro como dado inicial.

Solo (S)

Refere-se à porção superior da zona vadosa caracterizado por significativa atividade biológica (Aller *et al.*, 1987). Solo tem um impacto direto na recarga por controlar a quantidade de água infiltrada verticalmente, o que também acontece com os potenciais contaminantes. A presença de materiais com texturas finas tal como silte e argila podem reduzir a permeabilidade do solo e restringir a migração do contaminante. Além disso, onde o perfil de solo é espesso, a atenuação por processo de filtração, biodegradação, sorção e volatilização podem ser bastante significantes (Civita & De Maio, 2004).

Em geral, para certas práticas superficiais de uso do solo, tal como aplicações de pesticidas em atividade agrícolas podem ter uma influência primária no potencial poluidor. Em geral, esse potencial poluidor é afetado pelo tipo de argila presente, o potencial expansão/contração da argila e a distribuição granulométrica do perfil de solo (Aller *et al.*, 1987).

A quantidade de matéria orgânica presente no solo também pode ser um importante fator de atenuação de contaminantes e/ou poluentes como os pesticidas. Normalmente, o maior conteúdo de matéria orgânica concentra-se na parte superior do perfil de solo diminuindo em quantidade em profundidade com exceção dos solos classificados como gleissolos e organossolos cuja própria origem é vinculada a condições propícias a acumulação e preservação de matéria orgânica.

Segundo Aller *et al.* (1987), os principais tipos de solo com seus respectivos potenciais poluidores podem ser sintetizados da seguinte forma:

- a) Solo com argila não expansiva - nestes casos os argilominerais, quando presentes são de estrutura 1:1 com predominância de caolinita que não se expande e contrae quando adicionada água e, assim, não apresenta permeabilidade secundária vertical que poderia aumentar o potencial poluidor.
- b) Solo com textura franco-argilosa - é uma classificação textural caracterizada quando a fração silte varia entre 15-55%, a argila varia entre 25-40% e a areia entre 20-45%. Devido ao alto conteúdo de argila restringe naturalmente sua permeabilidade, resultando em baixo potencial poluidor.
- c) Solo chernozêmico - rico em matéria orgânica decomposta, em geral de coloração escura, com alto teor de fração inorgânica e em geral com textura argilosa.

- d) Solo com textura franco-siltosa - classificação textural em que o silte ocorre em concentração entre 50 e 85%, a argila entre 15 e 25% e a areia contribui com 0 a 50%.
- e) Solo com textura franca - caso em que a argila contribui com até 20% e as frações areia e silte com 40% cada.
- f) Solo com textura franco-arenosa - classificação em que a areia contribui com 15 a 50%, o silte com 0 a 50% e a argila com 15 a 50%.
- g) Solo com argila expansiva - situação em que dominam argilominerais de estrutura 2:1. Argissolos e nitossolos podem ser considerados excelentes exemplos deste tipo de regolito.
- h) Solo rico em matéria orgânica - casos em que a concentração total de matéria orgânica não decomposta é elevada, onde ainda se podem encontrar restos não decompostos de folhas, raízes e matéria lenhosa (sinônimo de serapilheira).
- i) Solo Arenoso - a fração areia em grãos individuais representa mais de 85% da porção inorgânica e a concentração de matéria orgânica é muito reduzida.
- j) Solo com pedregosidade - coberturas em que a fase cascalhenta domina ou a fração grossa (> 2 mm) representa mais de 70% do material.
- k) Solo delgado ou Ausente - quando ausente ou muito delgado o potencial poluidor deve ser considerado muito alto.

Os métodos DRASTIC e SINTACS relacionam subjetivamente esses potenciais poluidores à distribuição linear granulométrica dos materiais terrígenos de forma a determinar os índices do parâmetro tipo de solo na avaliação da vulnerabilidade à poluição do aquífero (Tabela 5.9).

Tabela 5.9 - Índices e Peso DRASTIC e SINTACS para o solo.

Solo		
Subtipos	Índice DRASTIC	Índice SINTACS
Solo delgado ou ausente	10	-
Solo pedregoso ou cascalhento	10	-
Solo arenoso	9	9
Rico em matéria orgânica não decomposta	8	-
Solo argiloso com argilominerais 2:1	7	-
Solo com textura franco-arenosa	6	6
Solo com textura franca	7	5
Solo com textura franco-siltosa	5	4
Solo com textura franco-argilosa	4	3
Solo com caráter chernozêmico	3	1
Solo argiloso com argilominerais 1:1	2	
Peso 2		-

Já para a avaliação da vulnerabilidade específica de aquíferos à poluição de nitrato a utilização do parâmetro tipo de solo nos métodos indexadores tem encontrado críticos que baseados em análises estáticas apontam que esse parâmetro não influencia a concentração de nitrato no solo (McLay *et al.* 2001; Lambrakis *et al.* 2004; Panagopoulos *et al.*, 2006) devido à ausência de reações de redução no solo por excesso de oxigênio.

As informações necessárias a respeito desse parâmetro normalmente estão disponíveis em escalas muito pequenas para os objetivos de avaliação da vulnerabilidade. No Brasil, as melhores referências são os mapas de solos disponibilizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Condutividade Hidráulica (K)

Esse parâmetro hidrogeológico é utilizado na avaliação da vulnerabilidade nos métodos SINTACS, AVI e DRASTIC sendo considerado por esses dois últimos como a habilidade do aquífero em controlar a taxa em que a água subterrânea flui sob um determinado gradiente hidráulico. Para o método SINTACS a condutividade hidráulica representa a capacidade da água subterrânea mover-se em um meio saturado, ou seja, a velocidade do fluxo. Ou ainda, sendo também considerada como o potencial de mobilidade de um contaminante que tenha quase a mesma densidade e viscosidade da água subterrânea.

Apesar de a condutividade hidráulica ser aplicada com conceituação diferente para os métodos que o utilizam, a idéia de ter representado na avaliação da vulnerabilidade intrínseca de um aquífero a importância da velocidade em que a água subterrânea movimentada-se está presente. Tal fato tem sido questionado quando o conceito passa a ser vulnerabilidade específica em que os agentes contaminante são formados por compostos nitrogenados (Rupert, 2001; Panagopoulos *et al.*, 2006), soluções salinas (Stigter *et al.*, 2005), ou contaminantes orgânicos (Wang *et al.*, 2007). Os argumentos utilizados são baseados em análises estáticas que apontaram falta de correlação entre a condutividade hidráulica e concentração de nitrato e cloretos no solo justificando que pode estar havendo subestimação da capacidade de diluição e superestimação do potencial de atenuação da zona vadosa e do aquífero perante a estabilidade dos contaminantes e porque a condutividade não é diretamente relacionada aos processos de alteração das substâncias dissolvidas na água subterrânea como adsorção, troca catiônica e reações redox (Rupert, 2001; Panagopoulos *et al.*, 2006).

Outros argumentos afirmam que os tipos de contaminantes orgânicos e suas propriedades físico-químicas que determinam sua estabilidade ou reatividade no subsolo não estão incorporados à conceituação de vulnerabilidade fazendo com que a condutividade hidráulica

passa a ser substituída por um parâmetro que considere a estabilidade do contaminante e sua facilidade de infiltração (Wang *et al.*, 2007).

A Tabela 5.10 apresenta uma comparação entre os índices utilizados pelos métodos DRASTIC e SINTACS em relação aos intervalos e as principais ordens de grandeza do parâmetro condutividade hidráulica. A Tabela 5.11 traz para os valores de condutividade hidráulica utilizados no cálculo do índice AVI para os principais materiais terrígenos.

Tabela 5.10 - Índices DRASTIC e SINTACS para o parâmetro condutividade hidráulica.

DRASTIC		SINTACS	
m/s	Índice	m/s	Índice
$5,00 \times 10^{-7}$ a $5,0 \times 10^{-5}$	1	$< 10^{-8}$	1
$5,0 \times 10^{-5}$ a $2,0 \times 10^{-4}$	2	10^{-7}	2
$2,0 \times 10^{-4}$ a $3,5 \times 10^{-4}$	4	10^{-6}	3
$3,5 \times 10^{-4}$ a $5,0 \times 10^{-4}$	6	10^{-5}	5
$5,0 \times 10^{-4}$ a $1,0 \times 10^{-3}$	8	10^{-4}	7
$> 1,0 \times 10^{-3}$	10	10^{-3}	9
-	-	$> 10^{-2}$	10
Peso 3		-	

Tabela 5.11 - Valores de condutividade hidráulica utilizados pelo método AVI para os principais materiais terrígenos.

AVI	
Materiais	K (m/s)
Cascalho	$1,0 \times 10^{-2}$
Areia	$1,0 \times 10^{-3}$ a $1,0 \times 10^{-7}$
Siltoso	$1,0 \times 10^{-8}$ a $1,0 \times 10^{-7}$
Textura franca	$1,0 \times 10^{-9}$ a $1,0 \times 10^{-7}$
Argila	$1,0 \times 10^{-10}$ a

A disponibilização de um banco de dados com valores confiáveis de condutividade hidráulica não é fato incomum onde normalmente a solução passa pelo cadastro de pontos d'água em companhias de construção de poços tubulares privadas e públicas em busca de dados de ensaios de bombeamento de longa duração com acompanhamento concomitante em poços de monitoramento. Os dados consistentes de condutividade hidráulica são reduzidos devido à falta de obrigatoriedade desses ensaios pelos órgãos públicos associada aos custos elevados ocasionados pelas exigências técnicas intrínsecas necessárias na condução de tais ensaios. Normalmente, o que tem sido exigido como condicionante em relatórios finais de pesquisa por órgãos públicos federais e pedidos de outorga por órgãos estaduais são ensaios de produção do

tipo escalonado ou sucessivo. Estes ensaios apesar de seguir várias premissas técnicas como a realização de pré-teste, dimensionamento de bomba submersa, vazão constante e pelo menos uma etapa de longa duração não necessita de acompanhamento de um poço de monitoramento. Impede-se, assim, o acompanhamento da evolução do nível dinâmico em ponto no aquífero sem ter a influência da perda de carga hidráulica adicional ocasionada pela presença da bomba submersa.

Alternativamente, a realização de ensaios *in situ* do tipo Slug, Slug invertido, “Open End Hole” e ensaios laboratoriais do tipo carga constante e carga variável têm sido utilizados na obtenção de dados de condutividade hidráulica. Quer seja *in situ* ou em laboratório esses ensaios são mais adequados quando o aquífero é livre e raso porque o volume de material afetado durante os ensaios é pequeno quando comparado com os ensaios em poços profundos. A vantagem desses ensaios é a possibilidade da realização em número muito maior em menos tempo e com menor custo quando comparado aos ensaios de bombeamento de longa duração fazendo com que estatisticamente haja representatividade das medidas realizadas na área de pesquisa.

Zona Vadosa (O)

Segundo Aller *et al.*, (1987) a zona vadosa é definida como a zona acima do nível estático que é insaturado ou descontinuamente saturado e abaixo do perfil de solo sendo o tipo de material determinante das suas características atenuadoras. Processos como a biodegração, neutralização, reações químicas, volatilização e dispersão ocorrem na zona vadosa com diminuição de intensidade com o aumento da profundidade. O método GOD utiliza conceito similar reforçando a idéia da característica litológica e grau de consolidação da zona vadosa (Forster *et al.*, 2002). O método SINTACS conceitua esse parâmetro por sua capacidade de atenuação avaliando-a a partir das principais feições hidro-litológicas como textura, composição mineralógica, distribuição granulométrica e fraturamento (Civita & De Maio, 2004). O método DRASTIC ao contrário do SINTACS considera um amplo espectro de materiais em relação à caracterização do potencial poluidor da zona vadosa incluindo, como segue, a possível existência de confinamento:

- a) Camada Confinante: esse tipo deve ser escolhido quando um aquífero confinado for avaliado onde a camada confinante representa um meio impermeável que restringe o movimento de água e contaminante no aquífero indicando um reduzido potencial poluidor.
- b) Silte/Argila: um depósito de silte e/ou partículas do tamanho de argila serve como barreira, retardando o movimento de fluidos. O alto conteúdo imprime um baixo potencial poluidor.

- c) Rochas Ígneas/Metamórficas: são rochas consolidadas sem porosidade primária e que só permitem fluxo através de fraturas. O potencial poluidor é função da intensidade do fraturamento.
- d) Argilito e calcáreo: dependente do grau de consolidação, espessura e intensidade de fraturamento. O potencial poluidor é diretamente relacionado à combinação desses fatores.
- e) Arenito: relacionado a rochas consolidadas contendo porosidade primária e secundária tendo grande espessura. O potencial poluidor também será controlado pela associação das porosidades.
- f) Areia e cascalho: mistura de areia e cascalho terá a variação na distribuição granulométrica e o conteúdo de material fino (argila e silte) os principais fatores para determinação do potencial poluidor. Materiais mal selecionados e com pequena dimensão tem baixo potencial poluidor e depósitos bem selecionados de grãos maiores tem alto potencial poluidor.

A Tabela 5.12 apresenta a comparação dos índices DRASTIC e SINTACS em relação aos materiais constituintes da zona vadosa.

Tabela 5.12 - Índices DRASTIC e SINTACS para o impacto da zona vadosa na avaliação de vulnerabilidade.

DRASTIC		SINTACS	
Subtipo	Índice	Subtipo	Índice
Camada confinante	1	Argila	1
Silte/Argila	2-6	Textura Franca	2
Argilito	2-5	Siltoso	3
Calcáreo	2-7	Areias	5
Arenito	4-8	Cascalho	7
Areia e Cascalho com alto conteúdo de argila	4-8	Aluvião pedregoso	9
Ígneas/Metamórficas	2-8	-	-
Areia e Cascalho	6-9	-	-
Vulcânicas	2-10	-	-
Calcáreo cárstico	8-10	-	-
Peso 5		-	

Por sua vez o método GOD separa a existência de confinamento do tipo de material da zona vadosa em parâmetros diferentes. A Tabela 5.13 traz os índices utilizados na caracterização da zona vadosa em relação dos materiais constituintes e sua capacidade de atenuação.

Nível Estático (D)

Uma vez que determina a extensão de material que o contaminante terá que atravessar antes de alcançar o aquífero esse é o parâmetro hidrogeológico mais presente nos diversos métodos utilizados para a avaliação da vulnerabilidade.

Tabela 5.13 - Índice GOD para a zona vadosa considerando a consolidação e tipo predominante do material.

GOD			
Não Consolidado (sedimentos)	Consolidado (rochas porosas)	Consolidado (rochas duras)	Índice
		Calcrete + calcáreo cárstico	1,0
	Calcáreo, calcarenito		0,9
Cascalho de Leques Aluviais	Arenito	Lava vulcânica recente	0,8
Areia aluvial e flúvioglacial		Ígneas/Metam.	0,7
Areia eólica	Siltito		0,6
Silte e till glacial	Lamito e xisto		0,5
Solos residuais			0,4

A profundidade do nível estático é também importante porque fornece a máxima oportunidade de oxidação por oxigênio atmosférico (Aller et al., 1987). Em geral, existe grande chance de a atenuação ocorrer com o aumento da profundidade do nível d'água porque águas mais profundas implicam em demasiado tempo de trânsito. A presença de camadas confinantes aumentará também o tempo de trânsito dos contaminantes em direção ao aquífero (Forster et al., 2002; Civita & De Maio, 2004; Heretia & Cirelli, 2007).

A Tabela 5.14 apresenta a comparação dos índices DRASTIC e SINTACS em relação à profundidade do nível d'água e a Tabela 5.15 apresenta o índice GOD para o mesmo parâmetro. Já a Tabela 5.16 traz os fatores de normalização utilizada no método SAI onde considera menor do que 2,0 m de profundidade a vulnerabilidade é máxima para esse parâmetro e que o nível estático maior do que 20,0 m a vulnerabilidade é mínima.

Confinamento (G)

Somente o método GOD utiliza explicitamente a existência ou não de camada confinante e o seu grau de confinamento como atributo específico no conceito de vulnerabilidade. Os outros métodos incorporam tal parâmetro de forma implícita dentro de parâmetro específico que é a zona vadosa (DRASTIC e SINTACS) ou através de alguns de seus atributos como a condutividade hidráulica, a espessura ou conteúdo de argila das camadas subjacentes ao aquífero ou nível estático (AVI, DAT e SAI).

No método GOD o potencial poluidor aumenta com a inexistência de camada confinante com um grau de 40% menos vulnerável ou com menor potencial poluidor para uma situação com a existência de camada confinante.

Tabela 5.14 - Índices DRASTIC e SINTACS para a profundidade do nível estático/potenciométrico.

DRASTIC		SINTACS	
(m)	Índice	(m)	Índice
<1,5	10	<1,8	10
1,5 – 5,0	9	1,8 – 3,0	9
5,0 – 9,0	7	3,0 – 4,1	8
9,0 – 15,0	5	4,1 – 6,5	7
15,0 – 25,0	3	6,5 – 8,9	6
25,0 – 30,0	2	8,9 – 13,1	5
>30,0	1	13,1 – 19,9	3-4
-	-	20,0 – 50,0	2-3
		50,0 – 90,0	1-2
Peso 5		-	

Tabela 5.15 - Índice GOD para a profundidade do nível d'água.

GOD	
(m)	Índice
0-2,0	1
2,0– 5,0	0,9
5,0 –	0,8
10,0 –	0,7

Tabela 5.16 - Fatores de normalização para o nível estático/potenciométrico do Índice de Atenuação do Solo (SAI).

SAI	
(m)	Fator
<2,0	10
2,0– 5,0	25
5,0 –	50
10,0 –	75
>20,0	100
Peso 4	

Conteúdo de Argila (C_{ar}) e Carbono Orgânico (CO)

Considerados na conceituação de vulnerabilidade do método SAI o conteúdo de argila e de carbono orgânico visam incorporar a avaliação da capacidade de complexidade do solo pela incidência na estabilidade de agregação e dos poros afetados em sistemas edáficos (CO) e pela avaliação da capacidade de retenção de poluentes (C_{ar}) (Heretia & Cirelli, 2007). A Tabela 5.17

apresenta os fatores de normalização e pesos desses parâmetros que tem por base para o carbono orgânico um menor potencial poluidor para conteúdos menores do que $7,4 \text{ g.kg}^{-1}$ e maiores potenciais acima ou igual a 30 g.kg^{-1} . Já os maiores potenciais poluidores em relação ao conteúdo de argila estão associados a porcentagem mínima de estabilização e formação dos agregados. Valores entre 15% e 50% de argila associam-se aos menores potenciais.

Tabela 5.17 - Fatores de normalização para o conteúdo de argila e de carbono orgânico do Índice de Atenuação do Solo (SAI).

SAI			
Conteúdo de Argila (%)	Fator	Conteúdo de Carbono (g.kg^{-1})	Fator
<15	10	<7,5	10
15 – 20,0	25	7,5 – 15,0	25
20,0 – 30,0	50	15,0 – 20,0	50
30,0 – 50,0	75	20,0 – 30,0	75
>50,0	100	>30,0	100
Peso 3		Peso 3	

Troca Catiônica (CTC) e pH

Também considerados na conceituação de vulnerabilidade do método SAI esses parâmetros foram incorporados para representarem a capacidade do solo em reter íons (CTC) e a estabilidade de colóides e mobilidade de elementos traços (pH). Esses dois parâmetros juntos avaliam a saturação de complexos coloidais e mobilidade de elementos tóxicos no solo (Heretia & Cirelli, 2007). A Tabela 5.18 traz os fatores de normalização e pesos desses parâmetros que relacionam a um alto potencial poluidor em relação a CTC para solos com menos do que $5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e baixo potencial para valores acima de $25 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Já o baixo potencial poluidor relacionado ao pH está associado aos valores entre 6,6 a 7,5 associados a solos levemente a moderadamente ácidos enquanto os valores extremos de acidez e alcalinidade que levam a instabilidade coloidal relacionam-se ao alto potencial poluidor.

Tabela 5.18 - Fatores de normalização para a capacidade de troca catiônica e pH do Índice de Atenuação do Solo (SAI).

SAI			
CTC ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	Fator	pH	Fator
0 - 5	10	<8,5/<5,0	10
5 – 10,0	25	-	25
10,0 – 17,0	50	-	50
17,0 – 25,0	75	5-6,5/7,5-8,5	75
>25,0	100	6,6 – 7,5	100
Peso 3		Peso 2	

5.4 - PROPOSIÇÃO DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO

A partir da análise conceitual percebe-se que todos os parâmetros hidrogeológicos têm grande importância para a definição adequada da vulnerabilidade intrínseca. Outro aspecto identificado são os diferentes fundamentos ou princípios utilizados por cada método objetivando caracterizar ou equacionar a interface entre a superfície do terreno e o nível estático e a sua relação com um potencial agente contaminante. Princípios como resistência vertical, advecção, potencial poluidor e capacidade de atenuação estão explícita e/ou implicitamente presentes naqueles métodos, refletidos pelos parâmetros hidrogeológicos utilizados. O grau de importância de cada um dos parâmetros no conceito de vulnerabilidade está indicado não só pela sua presença no equacionamento, mas, também pelos índices e pesos à eles atribuídos. Tais coeficientes são tratados como os determinantes para ordenar o grau de importância não somente dos parâmetros, mas dos três principais condicionantes que estruturam os conceitos de vulnerabilidade que são a capacidade de atenuação do solo, a resistência vertical ao fluxo, e o transporte de contaminantes (Figura 5.2). A atuação conjunta desses condicionantes em todo o processo ocasiona uma sobreposição dos limites de cada um, evidenciando a influência de um mesmo parâmetro hidrogeológico em mais de um condicionante.

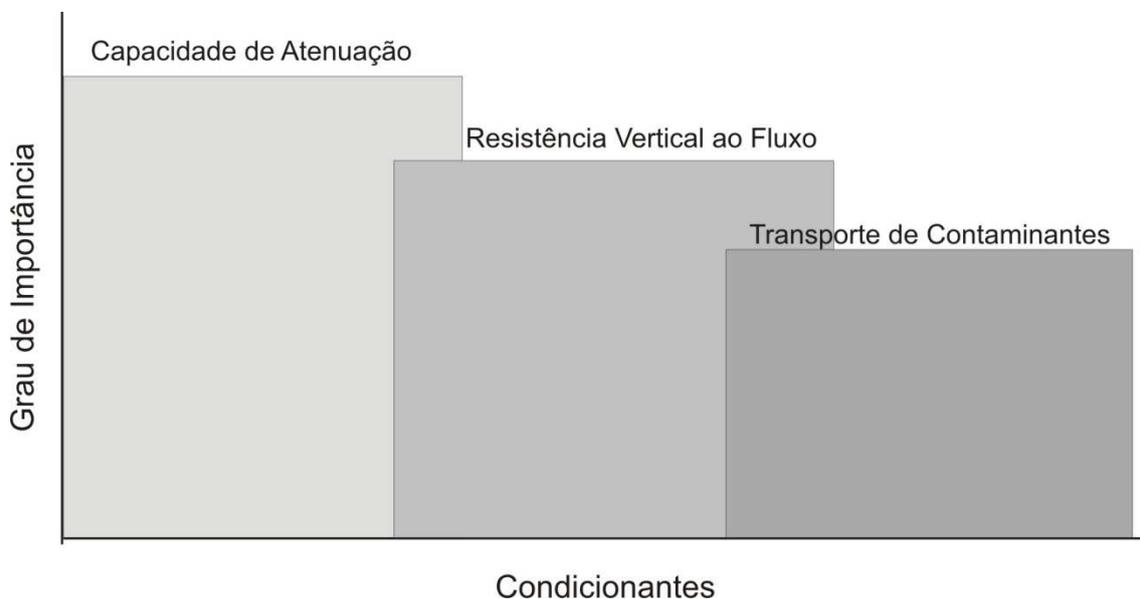


Figura 5.2 – Grau de importância relativa dos condicionantes: atenuação, resistência vertical e transporte de contaminantes na conceitualização da vulnerabilidade intrínseca.

- possibilita atribuir um grau de importância excepcionalmente elevado ao condicionante resistência vertical caso a presença de solo seja insignificante ou desprezível. Nesse caso haverá uma associação dos parâmetros restantes (recarga e declividade) com os parâmetros zona vadosa e profundidade do nível estático para complementar o conceito de resistência vertical de fluxo;

- incorpora resultados de outros métodos quantificadores da resistência vertical, por exemplo, AVI e DAT, no cálculo do índice de vulnerabilidade. Tais resultados deverão apenas ser reclassificados considerando a variação linear do índice entre 0 a 10. Essa operação permite substituir os parâmetros zona vadosa (I) e profundidade do nível estático sem comprometer o conceito do condicionante em questão.

5.4.1 - CONDICIONANTES

Capacidade de Atenuação do Solo

A capacidade de atenuação do solo qualifica o que ao mesmo tempo configura-se como a primeira e última fronteira de defesa natural que o meio tem em impedir de forma eficaz a entrada ou o avanço de um agente contaminante. É caracterizada principalmente pela interação existente entre os parâmetros solos, recarga e declividade (Tabela 5.19).

- Solo (S)

Se os processos atenuantes têm grande responsabilidade na avaliação da vulnerabilidade, o solo atua de forma ímpar nesse processo. São os tipos de solos que determinam e controlam os processos iniciais de infiltração induzidos por suas características composicionais, texturais, matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, conteúdo e composição de argila, e atividade biológica.

- Recarga (R)

Sendo o principal veículo introdutor de um potencial agente contaminante, a recarga tem influência decisiva na qualificação da avaliação da vulnerabilidade, apesar de ser o único parâmetro não inerente ao meio. Áreas com as mesmas características físicas podem ser eleitas com graus de vulnerabilidade devida somente a presença ou não da recarga ocasionada pela distribuição espacial e temporal irregular da precipitação;

- Declividade (T)

Complementa os fatores preponderantes da capacidade de atenuação por determinar o padrão de modificação do tipo de fluxo superficial em laminar (difuso) ou linear (concentrado). Áreas com baixa declividade são mais susceptíveis tanto a favorecer a infiltração de agentes contaminantes quanto a recebê-los de áreas mais altas.

Tabela 5.19 - Tabela de índices de potencial poluidor dos parâmetros do método SORETO.

Solo	Índice	Recarga (mm/ano)	Índice	Declividade (%)	Índice	Vadosa					
							Índice			Índice	
Latossolo; Espodossolo.	3	0-50	1	0-8	10	CTC	< 5,0 cmol _c kg ⁻¹	-2	Confina-mento	Sim	-2
Neossolo.	10	50-150	3	8-30	5		5,0-25,0 cmol _c kg ⁻¹	-1		Não	0
Cambissolo.	8	150-300	5	> 30	1		> 25,0 cmol _c kg ⁻¹	0			
Argissolo; Nitossolo; Planossolo	2	> 300	10			MO	< 7,4 g.kg ⁻¹	-2	Condutividade Hidráulica	< 10 ⁻⁵ cm/s	-2
Plintossolo;	3-5						7,4-30,0 g.kg ⁻¹	-1		10 ⁻⁵ -10 ⁻³ cm/s	-1
Organossolo; Gleissolo.	1						> 30,0 g.kg ⁻¹	0		> 10 ⁻³ cm/s	0
Luvissolo; Vertissolo.	4										

Profundidade do NE (m)	Índice	Zona Saturada					
			Índice			Índice	
0-1,5	10	Litotipo	Sedimentar Arenoso	0	Condutividade Hidráulica	< 10 ⁻⁵ cm/s	-2
1,5-3,0	7		Sedimentar Argiloso	4		10 ⁻⁵ - 10 ⁻³ cm/s	-1
3,0-5,0	5		Ígneo/Metamórfico	5		> 10 ⁻³ cm/s	0
> 5,0	2						

- Resistência Vertical ao Fluxo

Após a entrada do contaminante no meio as forças matriciais e gravitacionais passam a controlar os processos de infiltração e consequentemente o tempo de trânsito do agente contaminante até atingir o nível estático. Ambas as forças também refletem a interação de parâmetros que caracterizam a zona vadosa.

- Zona Vadosa (I)

São as características dessa zona que integradas determinam o potencial de resistência a um fluxo vertical de um agente contaminante. Os principais fatores determinantes são o conteúdo de argila, a capacidade de troca catiônica, a espessura e condutividade hidráulica da(s) camada(s).

- Profundidade do Nível Estático (D)

Esse parâmetro determina indiretamente o tempo de trânsito de um potencial agente contaminante em alcançar a água subterrânea. Locais com níveis mais profundos contribuem com a eliminação de certos agentes patogênicos devido ao um maior tempo de permanência na zona vadosa.

- Transporte de Contaminantes

Considera-se que a advecção como o principal fator controlador do transporte de contaminante em comparação com a dispersão e as reações químicas. Sendo assim, tal condicionante retrata as características da zona saturada que atuam sobre o comportamento do agente contaminante. Considera-se que nessa zona os litotipos e a condutividade hidráulica terão papel condicionante no transporte de contaminantes comparado com outros fatores como as características específicas do agente poluidor. Essa premissa visa realçar uma avaliação qualitativa da migração pela advecção tornando a análise mais simples enquanto uma análise mais complexa deverá considerar outros processos físicos como a sorção, dispersão e reatividade.

5.4.2 - Índices

O equacionamento proposto para o método SORETO inclui adaptações de alguns parâmetros às condições ambientais tropicais, além de modificações em intervalos de índices adotados pelos métodos tradicionais. As principais adaptações ocorreram nos tipos de solo que são enumerados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006) e zona vadosa que passa a ter considerado a presença de matéria orgânica e capacidade de troca catiônica. Já as modificações concentram-se nos parâmetros recarga, declividade, profundidade do nível estático e condutividade hidráulica. Esse último parâmetro passou a ser analisado tanto na zona vadosa do ponto de vista de resistência vertical quanto na migração na zona saturada.

5.4.3 - Pesos

Com o intuito de realçar ou equilibrar a importância de determinado parâmetro hidrogeológico, normalmente, os métodos tradicionais aplicam um valor constante (peso). Os menores valores associam-se a parâmetros tidos como de menor importância para a avaliação da vulnerabilidade e os maiores valores realçam os parâmetros mais importantes.

Inicialmente, o método SORETO partindo dessa premissa também considerou que existe uma hierarquia entre os parâmetros que definem a vulnerabilidade e associa pesos maiores aos de maior importância e vice-versa. Além disso, nesse momento inicial de elaboração do método, observou-se a necessidade de também associar pesos adicionais e diferenciados aos condicionantes da atenuação, da resistência hidráulica e transporte de contaminantes. Sendo assim, o 1º conjunto de pesos diferenciados avaliados para o método SORETO implicava no seguinte equacionamento:

$$\{(So \times 6 + Re \times 3 + To \times 1) \times 6 + (I \times 3 + D \times 1,5) \times 3 + (A \times 2 + C \times 1) \times 2\} \quad \text{Eq.5.1}$$

Atenuação

Res. Vert.

Transporte

Tal equacionamento e outras variações testadas levaram a resultados (item 5.5) muito semelhantes aos obtidos com aplicação dos métodos DRASTIC, SINTACS e GOD, apesar desses métodos executarem uma ponderação e/ou uma hierarquização diferenciada do método SORETO. Na tentativa de se obter uma explicação razoável para tal questão foi testado um equacionamento sem considerar a possibilidade da existência de uma hierarquia de importância dos parâmetros da vulnerabilidade, ou seja, foram retirados todos os pesos até então utilizados para que somente a propriedade da adição tivesse efeito sobre a operação.

O resultado dessa adição mais uma vez se aproximou de todos aqueles produtos já obtidos, induzindo a conclusão de que os pesos aplicados aos respectivos parâmetros com o intuito de realçar ou equilibrar a importância de determinado parâmetro não tem o efeito desejado como estão equacionados.

Partindo dessa nova premissa e após várias possibilidades testadas e, comparadas com o conhecimento do comportamento dos diversos parâmetros na área de pesquisa, obtiveram-se resultados bastante satisfatórios quando somente foram aplicados pesos aos parâmetros com maiores resoluções de amostragem. Logo, o intuito dessa vez foi o de objetivamente realçar qualquer parâmetro que em sua informação inicial já trazia uma maior resolução espacial.

Sendo assim, para a área de pesquisa o 2º conjunto de pesos diferenciados avaliados para o método SORETO implicou no seguinte equacionamento:

$$\{So + Re \times 3 + To \times 3 + I \times 3 + D \times 3 + A + C\} \quad \text{Eq.5.2}$$

5.5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 5.4 a 5.7 apresentam os mapas temáticos de vulnerabilidade intrínseca à poluição obtidos com a utilização dos métodos DRASTIC, SINTACS, GOD e SORETO, respectivamente.

- Método DRASTIC

Para o processamento com o método DRASTIC foram necessárias duas modificações nos parâmetros profundidade do nível estático e tipo de solo devido a características específicas da área.

Nesses condicionantes estão estruturados todos os parâmetros hidrogeológicos que caracterizam a vulnerabilidade intrínseca indicando naturalmente o grau de importância de cada um no processo de avaliação do comportamento do meio à presença de um potencial agente contaminante (Figura 5.3).

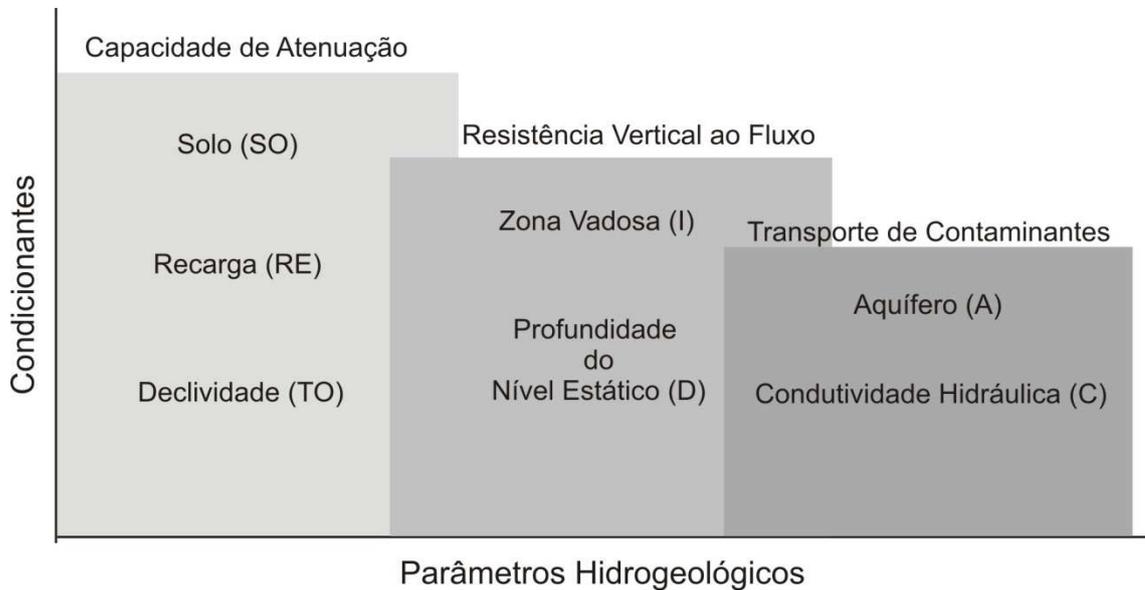


Figura 5.3 - Parâmetros hidrogeológicos considerados para cada condicionante.

Talvez na tentativa de diminuir e otimizar os parâmetros normalmente utilizados nos métodos paramétricos esses condicionantes ainda não foram hierarquicamente estruturados de forma harmônica na avaliação da vulnerabilidade intrínseca. Os principais métodos de avaliação, normalmente, baseiam-se em somente um condicionante ou em uma associação desarmônica desses, ou seja, utilizam poucos parâmetros ou atribuem pesos excessivos ou inferiores a parâmetros que naturalmente não atuam daquela forma no processo geral.

Logo, propõe-se uma reorganização dos parâmetros hidrogeológicos que influem objetivamente na conceituação/avaliação da vulnerabilidade através de seus condicionantes.

O método aqui proposto de avaliação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero à poluição, denominado **SORETO**, traz as seguintes características:

- uma grande flexibilidade no quesito quantidade de parâmetros necessários, pois responde a um intervalo de 4 até 13 parâmetros;
- considera de forma integrada os condicionantes: capacidade de atenuação do solo, resistência vertical ao fluxo e transporte de contaminantes;
- atribui um peso específico para realçar ou não o grau de sensibilidade de um parâmetro e computa um fator adicional a cada um dos condicionantes para reforçar a importância de cada um desses no processo geral;

Como a variação entre o nível estático máximo e mínimo na área de pesquisa está abaixo do intervalo mínimo indicado pelo método foi necessário subdividi-los em 50% de tal forma a aumentar a amplitude do espectro identificado até o limite de 4,5m, com exceção do primeiro intervalo. Sendo assim, o primeiro intervalo indicado pelo método como <1,5m foi mantido como tal, mas os demais ficaram em 1,5m a 3,0m; 3,0 a 4,5m; > 4,5m. Já para a adaptação da classificação do tipo solo usado pelo método para as condições tropicais foi utilizada a proposta apresentada pelo método SORETO, mas utilizando por comparação os índices apresentados pelo método DRASTIC com o intuito de implementar o mínimo de interferência na proposta original do método.

De forma a seguir a orientação do método e, também, convencionar para efeito de comparação entre os diversos produtos, os resultados foram agrupados em 05 (cinco) classes de vulnerabilidade com intervalos constantes. Tais classes cobrem o intervalo de vulnerabilidade muito baixa até muito alta. Para a área de pesquisa fica evidente que os parâmetros aquífero e zona vadosa têm uma grande influência no produto final DRASTIC mais do que os demais parâmetros onde a classe de baixa vulnerabilidade segue o traçado dos litotipos argilo-arenosos do Grupo Barreiras e do litotipos do embasamento cristalino e as classes alta e muito alta concentram-se nos litotipos arenosos quaternários.

Essa influência depõe contra o produto final, pois transparece um desequilíbrio no equacionamento (índice e pesos) de todos os parâmetros envolvidos uma vez que somente com um parâmetro, para tais condições ambientais, seria possível obter produto semelhante.

- Método SINTACS

As semelhanças com o método DRASTIC em termos de parâmetros, índices e pesos refletem-se no produto final SINTACS onde a classe média de vulnerabilidade passa a dominar a área que afloram as rochas argilo-arenosas do Grupo Barreiras, circunvizinha ao riacho Guaribas. O padrão das demais classes repete-se com diferenças insignificantes.

Tais resultados reforçam a idéia de que uma pequena mudança nos pesos utilizados no método SINTACS quando comparada ao método DRASTIC, nessas condições ambientais, não é suficiente para alterar o produto final obtido.

- Método GOD

Comparativamente, esse método apresenta um resultado satisfatório quando comparados com os outros métodos, pois, apresenta um produto semelhante, utilizando uma menor quantidade de parâmetros e ausência de pesos. Essa semelhança conduz a identificação da influência mais acentuada do parâmetro que representa a zona vadosa no resultado. Tal

influência associada à baixa quantidade de parâmetros ocasionou a superestimação de áreas com vulnerabilidades baixas a muito baixas onde não seria possível, como se observa próximo ao distrito de Pecém e ao norte da Lagoa do Gereraú. Ou seja, com esse método obteve-se uma redução das áreas com classes altas e muito altas sobre as rochas quaternárias e, conseqüente aumento da classe média de vulnerabilidade, provavelmente, devido à ausência do parâmetro da condutividade hidráulica da zona saturada.

- Método SORETO

Os resultados finais obtidos com esse método apontaram maior coerência com o conceito de vulnerabilidade associado ao conhecimento prévio do comportamento dos materiais terrígenos da área de pesquisa.

As classes de menor vulnerabilidade estão associadas aos litotipos do embasamento cristalino. Exceção é a região sul do Lagamar do Cauípe que provavelmente está ressaltada pela existência de um número maior de dados de nível estático naquele local.

Já as classes com maior vulnerabilidade não estão concentradas somente onde afloram os litotipos arenosos quaternários. Isso transmite uma maior certeza de que todos os parâmetros utilizados para conceituar a vulnerabilidade estão computados sem a influência exarcebada de um ou outro parâmetro.

O intervalo entre esses conjuntos de classes está vinculado a regiões com grau intermediário de vulnerabilidade, mas que também não estão associadas a um determinado parâmetro. Tal fato pode ser observado pela região onde se localiza o distrito de Pecém que se inclui como intermediária pela influência das condutividades hidráulicas diferenciadas nesse local quando comparadas com suas regiões circunvizinhas. Já a região de classe intermediária que aparece mais a noroeste da área tem maior influência dos litotipos presentes.

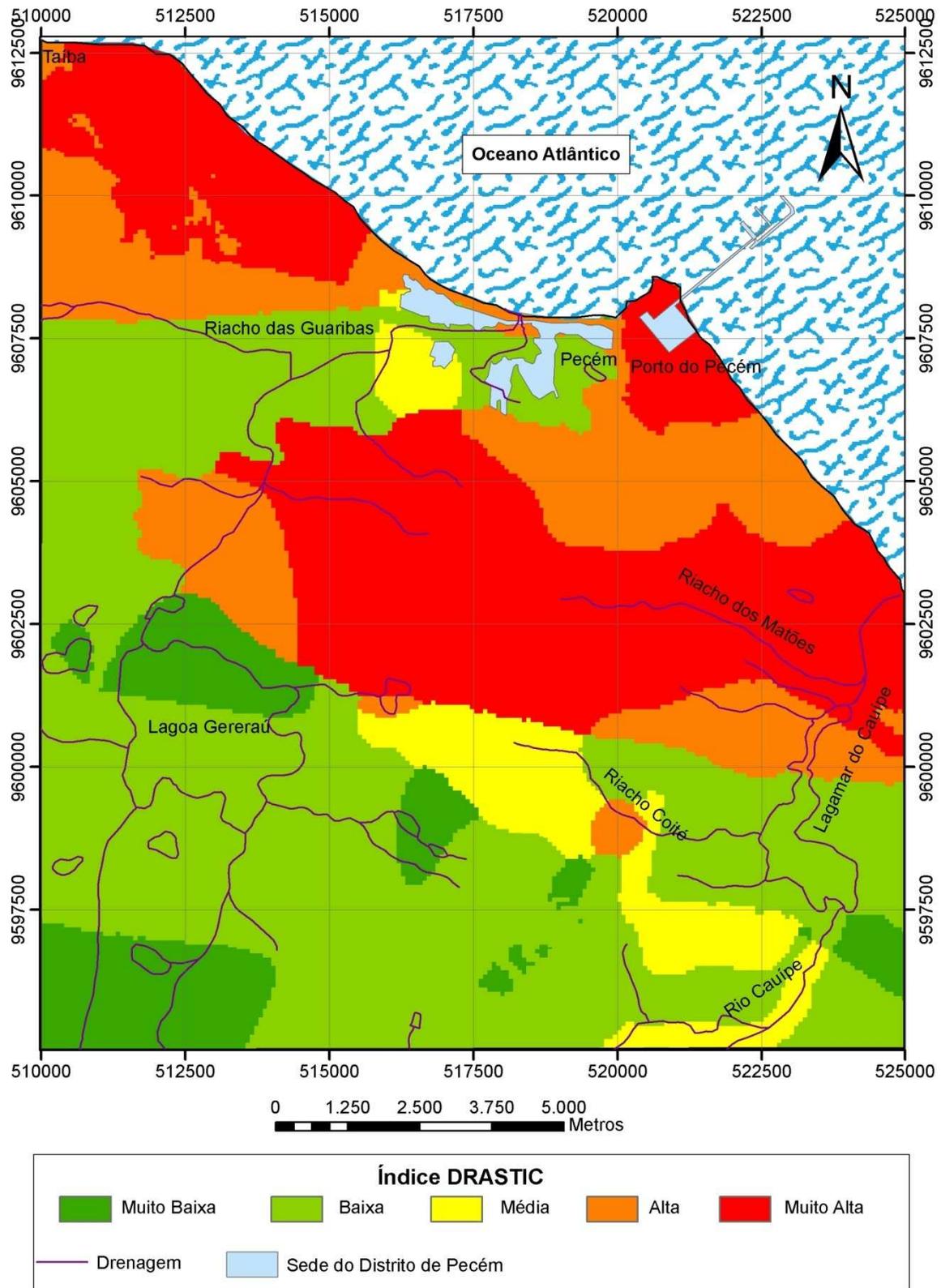


Figura 5.4 - Mapa de Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero obtido com o método DRASTIC.

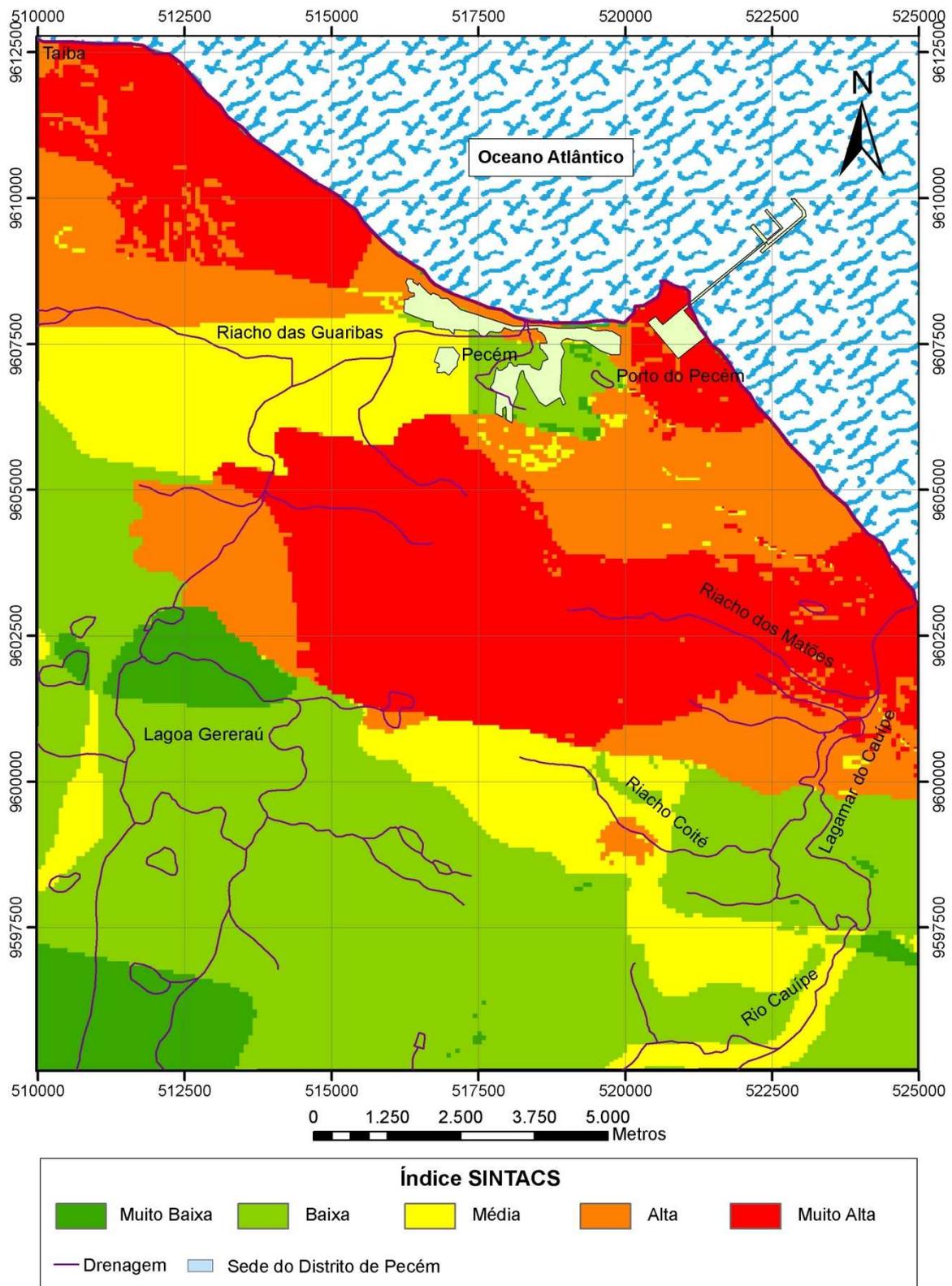


Figura 5.5 - Mapa de Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero obtido com o método SINTACS.

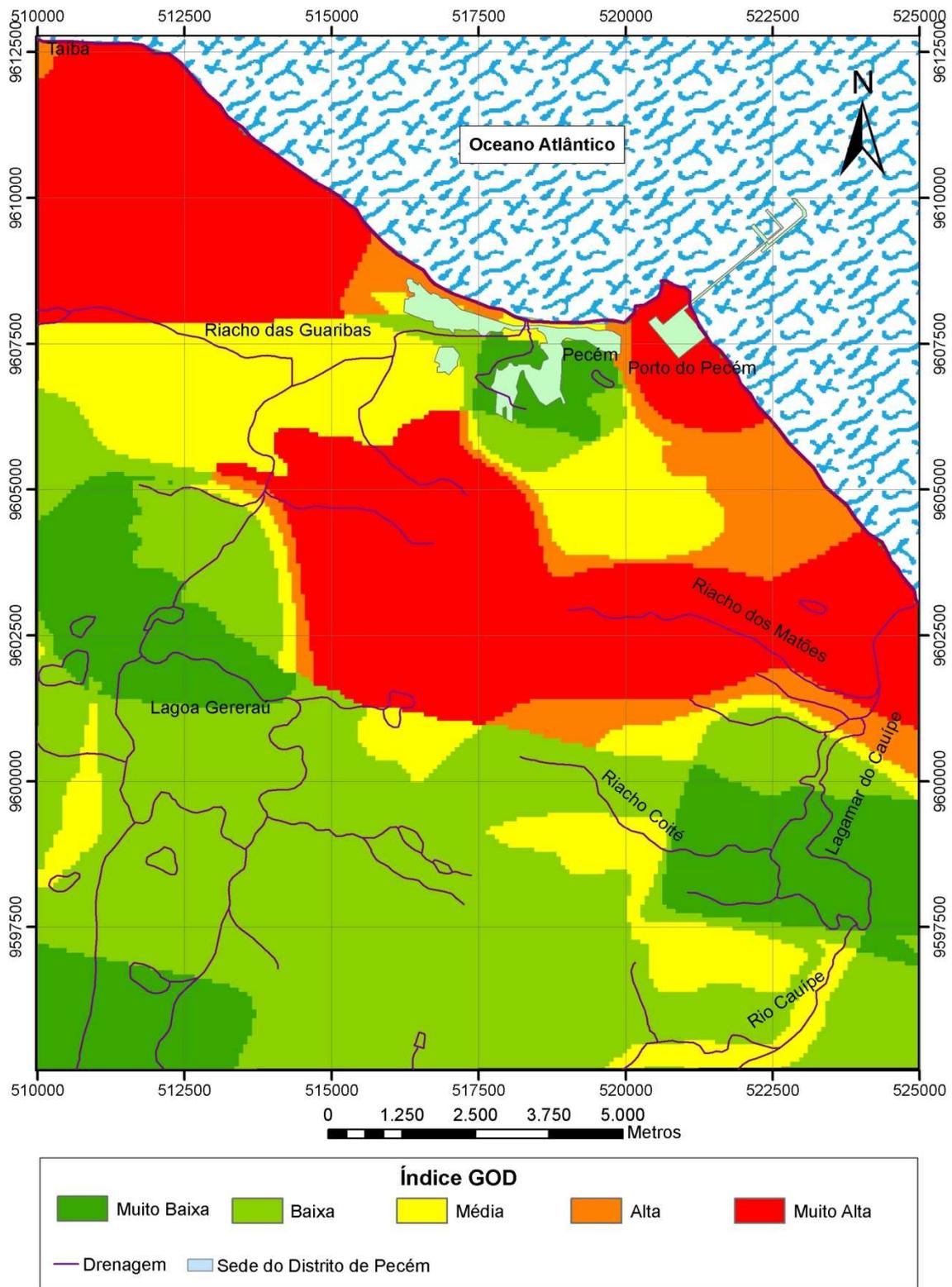


Figura 5.6 - Mapa de Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero obtido com o método GOD.

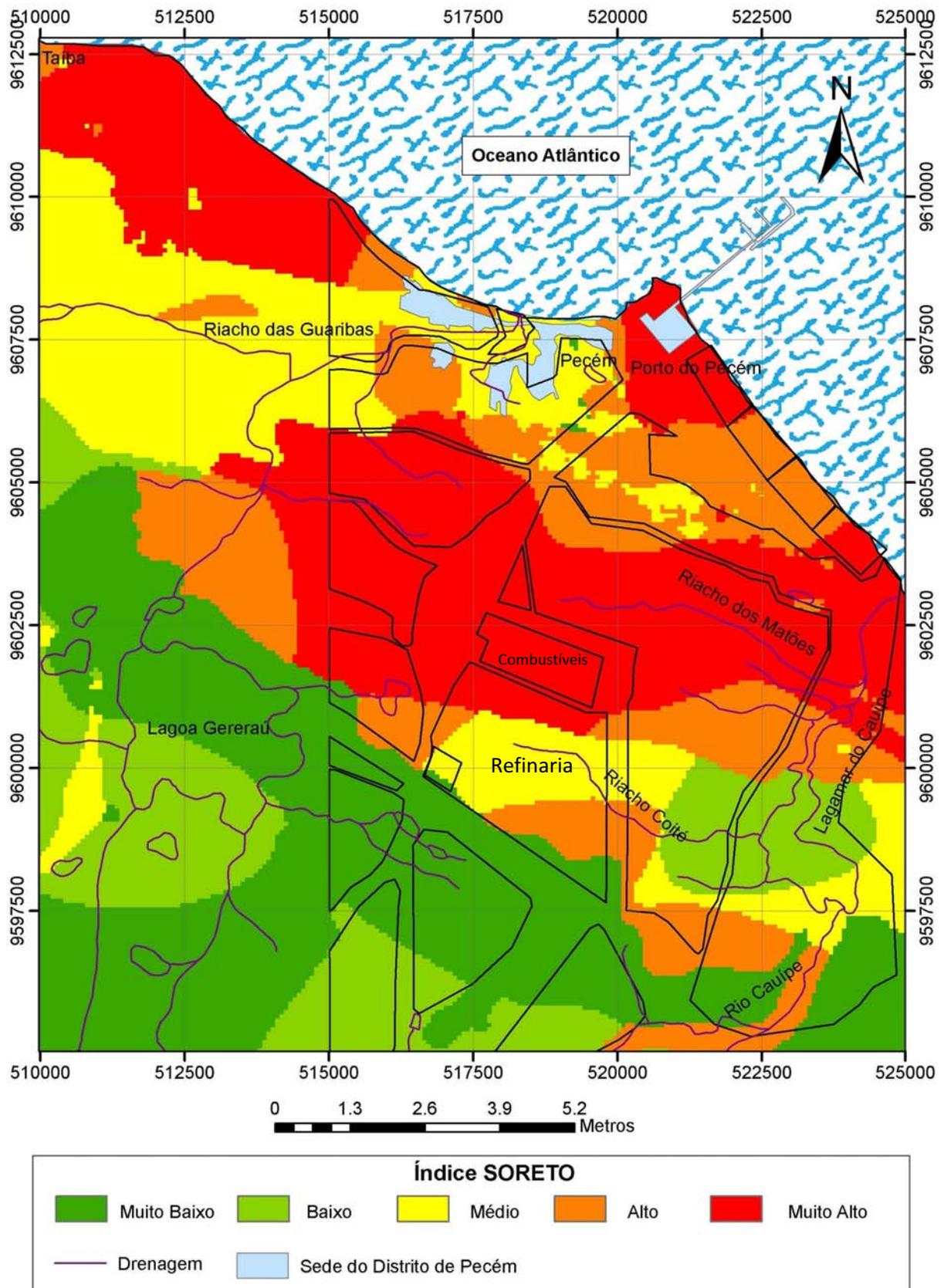


Figura 5.7 – Mapa de Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero obtido com o método SORETO, aplicando peso aos parâmetros com maior resolução de informação.

5.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos pode-se afirmar que:

- A reorganização e a incorporação de novos parâmetros tendem a realçar da melhor forma possível o conceito mais aceito de vulnerabilidade;
- Os pesos utilizados pelos métodos DRASTIC e SINTACS não são eficazes de delimitar áreas com diferentes graus de vulnerabilidade sem sofrer influências excessivas de algum parâmetro hidrogeológico;
- O método GOD tende a superestimar em classes de alta e muita vulnerabilidade, áreas sem essas características devido à ausência de outros parâmetros para completar o conceito mais adequado de vulnerabilidade;
- O método SORETO, assim como os métodos DRASTIC e SINTACS, apresentou resultados semelhantes entre os equacionamentos com e sem pesos quando todos os parâmetros foram hierarquizados;
- O método GOD indica baixa vulnerabilidade para área destinada à construção de uma refinaria enquanto os outros métodos utilizados apontam uma vulnerabilidade média. Para a área destinada a atividades de armazenamento de derivados de petróleo todos os métodos indicam uma vulnerabilidade muito alta.
- A melhor resposta com o método SORETO para o mapa de vulnerabilidade à poluição do aquífero da área de influência do CIPP foi obtida quando somente aos parâmetros com alta resolução espacial foram ponderados.

Assim, pode-se afirmar que a melhor resposta para a caracterização da vulnerabilidade a contaminação deverá ser alcançada a partir da ponderação dos parâmetros obtidos com maior acurácia, maior densidade de pontos amostrais ou maior escala do mapa temático.

CAPÍTULO VI

MODELO QUANTITATIVO DE FLUXO SUBTERRÂNEO

6.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

“Que mudanças podem ser esperadas no nível estático na área de recarga do Aquífero Dunas-Barreiras no ano de 2016?”

“Como se comportará o nível estático nas proximidades do rio São Gonçalo com a exploração de água subterrânea para irrigação?”

“Qual é a zona de captura da bateria de poços tubulares que abastece a cidade da Taíba-CE?”

“Qual seria o trajeto mais provável de uma pluma de contaminação a partir de um possível vazamento na área dos reservatórios de hidrocarbonetos da Petrobrás no Porto do Pecém-CE?”

Atualmente, tanto a sociedade quanto entidades públicas e privadas começam a fazer tais questionamentos e uma grande parte dessas respostas cabe aos geocientistas. Para fornecer tais respostas é necessário formular um correto modelo conceitual, determinar os valores dos parâmetros que descrevem a variabilidade espacial dentro do sistema de fluxo subterrâneo, os períodos de *stress* hídrico e o comportamento atual e futuro do nível estático (Walton, 1989). O melhor instrumento disponível para auxiliar os profissionais da área a lidar com o desafio da previsão é um modelo de fluxo subterrâneo (Anderson, 1992).

Um modelo é qualquer sistema que representa com acurácia uma situação natural (Walton, 1989). Modelos físicos são aqueles que simulam o fluxo diretamente, tal como um tanque de areia em um laboratório. Um modelo matemático simula o fluxo subterrâneo indiretamente através de equações (governantes e específicas) que representam os processos físicos reais que ocorrem na natureza (Anderson, 1992). Modelos quantitativos (matemáticos) podem ser resolvidos tanto analiticamente, quanto numericamente. Quanto menos simplistas forem as suposições usadas para formular um modelo conceitual, mais complexo é o modelo e mais difícil será sua resolução por métodos analíticos (Anderson, 1992).

6.2 - EQUAÇÕES GOVERNANTES DO FLUXO

Antes da derivação das equações governantes de fluxo faz-se necessário caracterizar os dois modelos conceituais de sistemas de água subterrânea (Anderson 1992): aquífero e sistema de fluxo (Figura 6.1).

Quando conceituado como um aquífero o sistema está baseado no conceito de aquíferos livres e confinados. Um aquífero é uma unidade de material poroso capaz de armazenar e transmitir quantidades significativas de água para pontos de descargas naturais (fontes) e artificiais (poços tubulares). Um aquífero confinado está sob uma camada confinante, uma camada de material poroso que retarda o movimento da água. Já um aquífero livre tem o nível estático como o seu limite superior.

O sistema com esse conceito assume que o fluxo de água subterrânea é totalmente horizontal através do aquífero e totalmente vertical através da camada confinante. O potencial do aquífero em transmitir água é descrita como condutividade hidráulica. Nesse ponto de vista a condutividade hidráulica é integrada na vertical gerando uma transmissão média de água conhecida como transmissividade ou condutividade hidráulica multiplicada pela espessura saturada do aquífero. A transmissividade do aquífero é constante se o aquífero é homogêneo e de espessura uniforme. A transmissividade de um aquífero livre sempre varia espacialmente devido à alteração na espessura saturada.

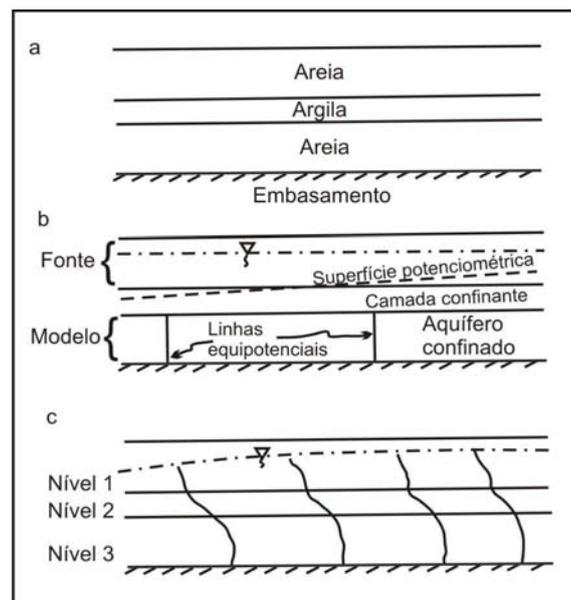


Figura 6.1 - Ponto de vista conceitual: a) unidades geológicas; b) abordagem de aquífero (a distribuição da carga é calculada apenas para o aquífero confinado); c) visto como um sistema de fluxo (as propriedades hidráulicas são determinadas para todas as camadas e a carga calculada nas três camadas) (adaptado de McDonald & Harbaugh, 1988).

Esse conceito é utilizado para simular fluxo horizontal bi-dimensional (2D) em aquíferos livres e confinados. Aquíferos confinados drenantes podem ser simulados usando uma aproximação *quasi* 3D em que o fluxo vertical através da camada confinante é representada por um termo de drenança que adiciona ou retira água a partir do aquífero posicionado sobre ou sob a camada confinante drenante (drenança ascendente ou descendente). Assim, camadas

confinantes não são exatamente modeladas e as cargas hidráulicas na camada confinante não são calculadas.

A Figura 6.1b apresenta um modelo numérico do sistema da Figura 6.1a, baseado na visão de aquífero, tendo apenas duas camadas, uma para cada aquífero. Uma camada pode ser usada para representar o aquífero livre onde a carga hidráulica encontra-se em equilíbrio (estado permanente) e não influenciada por variações de carga hidráulica no aquífero confinado. Com essas suposições a atenção passa a ser o aquífero confinado onde as cargas hidráulicas não são calculadas, mas utilizadas para determinar o gradiente hidráulico através da camada confinante.

Para um modelo numérico conceituado como um sistema de fluxo (Figura 6.1c) haveria três camadas, e as cargas seriam calculadas em todas as unidades geológicas, tanto nos aquíferos quanto na camada confinante.

A forma geral da equação governante para o sistema do ponto de vista de aquífero é:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (\text{eq. 6.1})$$

Os termos do lado esquerdo da equação (1) representam o fluxo horizontal através do aquífero onde h é a carga e T_x e T_y são os componentes da transmissividade. A posição de T_x e T_y dentro da derivada parcial representa a possibilidade de haver variação espacial desses parâmetros (heterogeneidade). O x e y subscritos em T indicam que a transmissividade em cada uma destas direções pode ser diferente, ou seja, o aquífero pode ser anisotrópico; S é o coeficiente de armazenamento; R é um ponto de descarga (poço) ou um ponto de injeção (recarga) que, por convenção, é positivo quando representa a recarga. Caso ocorra o rebaixamento do nível estático, então $R = -W$ onde W é a taxa de rebaixamento. O termo L representa a drenagem através da camada confinante onde K'_z é a condutividade hidráulica vertical e b' é a espessura da camada confinante; h_f é a carga do fornecedor de água do outro lado da camada confinante (sobre ou sob).

Quando a equação 6.1 é aplicada a um aquífero livre, as suposições de Dupuit são usadas: (1) as linhas de fluxo são horizontais e as linhas equipotenciais são verticais e (2) o gradiente hidráulico é igual a inclinação da superfície d'água e invariável com a profundidade. Considera-se que $T_x = K_x h$ e $T_y = K_y h$ onde h é a cota do nível d'água acima da base do aquífero, ou seja, a espessura saturada; h pode variar no tempo e no espaço. S considera-se como produção específica. Devido a uma conceituação em termos de área (2D) a transmissividade na direção z não é definida, ao contrário da condutividade hidráulica (K) que descreve a transmissão em um ponto do aquífero e, assim, possui componentes em todas as três direções.

No ponto de vista do sistema de fluxo o objetivo não é identificar o que é aquífero e camada confinante por si só, mas caracterizar uma distribuição tri-dimensional das cargas hidráulicas, condutividades e armazenamento em todo o sistema. Isso é obtido pela consideração dos componentes de fluxo tanto horizontal quanto vertical. A forma geral da equação governante é:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (\text{eq. 6.2})$$

onde K_x , K_y e K_z são componentes do tensor de condutividade hidráulica. S_s é o armazenamento específico; R^* é o termo geral para é um ponto de descarga (poço) ou um ponto de injeção (recarga) que, por convenção, é positivo e define a entrada d'água (influxo) no sistema por unidade de volume de aquífero por unidade de tempo. Para simular o fluxo de saída $R^* = -W$.

6.2.1 - Derivação das Equações Governantes

A equação 6.2 é derivada da combinação da equação de balanço de água com a Lei de Darcy. Essa derivação é tradicionalmente realizada com referência a um cubo de material poroso que é grande o bastante para representar as propriedades do meio poroso e, ao mesmo tempo, pequeno o suficiente de forma que a variação da carga hidráulica dentro do volume seja relativamente pequena. Esse cubo de material poroso é conhecido como volume elementar representativo (REV). Seu volume é igual a $\Delta x \Delta y \Delta z$ (Figura 6.2). O fluxo de água através do REV é expresso em termos de taxa de descarga onde \mathbf{q} é o vetor cuja magnitude pode ser expressa em termos dos três componentes: q_x , q_y e q_z . Formalmente:

$$\mathbf{q} = q_x \mathbf{i}_x + q_y \mathbf{i}_y + q_z \mathbf{i}_z \quad (\text{eq. 6.3})$$

onde \mathbf{i}_x , \mathbf{i}_y , \mathbf{i}_z são vetores unitários ao longo dos eixos x , y e z .

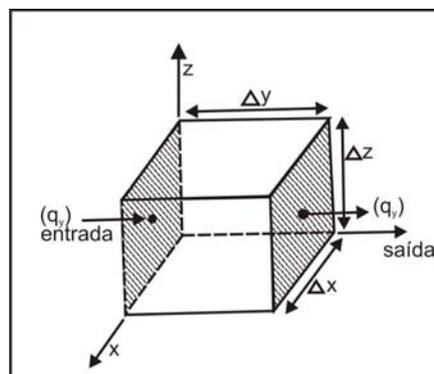


Figura 6.2 - Volume Elementar Representativo (REV) utilizado na derivação da equação governante. O componente do fluxo (q_y) ao longo do eixo y está em evidência (adaptado de McDonald & Harbaugh, 1988).

A equação de balanço de água (conservação de massa) estabelece que:

$$\text{fluxo de saída} - \text{influxo} = \text{variação no armazenamento} \quad (\text{eq. 6.4})$$

Considerando o fluxo ao longo do eixo y do REV o influxo ocorre através da face $\Delta x \Delta z$ sendo igual a $(q_y)_{in}$ (Figura 6.2) e o fluxo de saída igual a $(q_y)_{out}$. A taxa volumétrica de saída menos a taxa volumétrica de entrada ao longo do eixo y é:

$$[(q_y)_{out} - (q_y)_{in}] \Delta x \Delta z \quad (\text{eq. 6.5})$$

Isto pode reescrito como:

$$\frac{(q_y)_{out} - (q_y)_{in}}{\Delta y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (\text{eq. 6.6}) \quad \text{ou} \quad \frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (\text{eq. 6.7})$$

Expressões similares podem ser escritas para a variação da taxa de fluxo ao longo dos eixos x e z. A variação total na taxa de fluxo é igual à variação no armazenamento e é expresso como:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{variação no armazenamento} \quad (\text{eq. 6.8})$$

Deve ser considerada a possibilidade de descarga (ex. poço tubular) e de recarga (p.e. poço de injeção) dentro do REV. Essa taxa volumétrica de influxo seria representada por R^* ($\Delta x \Delta z \Delta y$). Por convenção, R^* será positivo quando for uma fonte de recarga; assim, será subtraído do lado esquerdo da equação 6.8. O que resulta em:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{variação no armazenamento} \quad (\text{eq. 6.9})$$

Agora, considerando o lado direito da equação 6.9 a variação no armazenamento é representada pelo *armazenamento específico* S_s , que é definido como sendo o volume de água liberado por variação unitária de carga hidráulica por volume unitário de aquífero:

$$S_y = \frac{w_y}{V_t} \quad S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (\text{eq. 6.10})$$

A convenção usada na equação 6.11 é ΔV é positivo quando Δh for negativo, ou seja, a água é liberada quando a carga hidráulica decresce. A taxa de variação no armazenamento no REV é

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{eq. 6.11})$$

Combinando as equações 6.9 e 6.11 e, dividindo por $\Delta x \Delta z \Delta y$ tem-se a forma final da equação de balanço de água:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (\text{eq. 6.12})$$

Esta equação é de pouco uso, pois não se pode medir \mathbf{q} diretamente. A Lei de Darcy é utilizada para definir a relação entre q e h ; a carga hidráulica é uma variável que pode ser medido diretamente. Pela Lei de Darcy em três dimensões (3D) tem-se:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{eq. 6.13})$$

$$q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Quando as equações 6.13 são substituídas na equação 6.12, o resultado é a equação 6.2. A equação 6.1 é derivada da equação 6.2 fazendo $\partial h / \partial z = 0$, multiplicando todos os termos por b (espessura), adicionando o termo de drenança e , considerando $bS_s = S$ e $bR^* = R$.

6.3 - MÉTODOS NUMÉRICOS

Quando simplificadas, as equações 6.1 e 6.2 podem ser resolvidas analiticamente. As simplificações normalmente envolvem suposições de homogeneidade e fluxo 1D ou 2D. Soluções numéricas são mais versáteis e com os atuais avanços de processamentos computacionais tornaram-se menos exaustivos do que as soluções analíticas (Anderson, 1992).

Os métodos numéricos mais utilizados em modelamento de água subterrânea são: diferenças finitas, elementos finitos, diferenças finitas integradas, método da equação integral de contorno e elementos analíticos (Anderson, 1992). Os dois primeiros são os mais difundidos e utilizados em diversas áreas das ciências. O código do *software* MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988), o mais utilizado para modelamento de fluxo subterrâneo em sistemas intergranulares é estruturado com o método de diferenças finitas.

Um programa de computador (código fonte) resolve um conjunto de equações geradas aproximando-se as equações derivadas parciais (equações governantes, condições de contorno e condições iniciais) que formam o modelo matemático. Técnicas de aproximação como os métodos de diferenças finitas e elementos finitos operam sobre o modelo matemático e modificam-no de forma que possa ser resolvido rapidamente por um computador. O conjunto de equações algébricas produzidas nesta maneira pode ser expressa como uma equação matriz. Métodos numéricos são utilizados para resolver essa equação matriz. Assim, a solução do processo tem duas etapas: (1) aplicação das diferenças finitas ou elementos finitos para gerar o modelo matemático e (2) resolver a equação matriz.

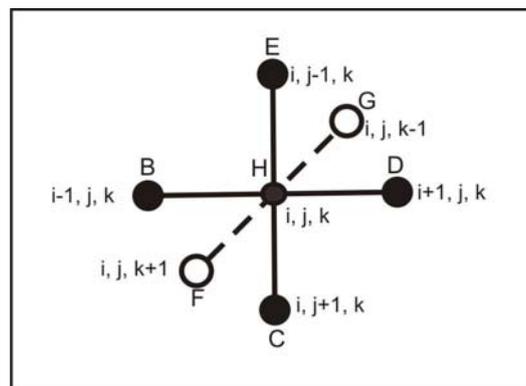


Figura 6.3 - Molécula computacional de diferença finita tri-dimensional (Adaptado de Anderson, 1992).

A forma geral da expressão de diferenças finitas para uma molécula computacional da Figura 6.3 é:

$$Bh_{i-1,j,k} + Ch_{i,j+1,k} + Dh_{i+1,j,k} + Eh_{i,j-1,k} + Fh_{i,j,k+1} + Gh_{i,j,k-1} + Hh_{i,j,k} = RHS_{i,j,k} \quad (\text{eq. 6.14})$$

A equação para a carga no nó i, j, k ($h_{i, j, k}$) envolve a carga no próprio nó tal como as cargas nos seis nós vizinhos. Cada carga é multiplicada por um coeficiente (B, C, D, E, F, G ou H) que é a função da condutividade hidráulica entre os nós. O coeficiente H é também uma função do termo de armazenamento. O termo $RHS_{i,j,k}$ inclui os termos de armazenamento e recarga no lado direito da equação.

Para problemas em que a distribuição nodal é regularmente espaçada, as equações algébricas resultantes são as mesmas tanto para o método de diferenças finitas quanto para elementos finitos. A diferença principal reside no fato de que o método de diferenças finitas computa o valor da carga hidráulica no nó e utiliza esse valor para a célula na vizinhança, ou seja, nenhuma consideração é feita de como ocorre a variação da carga entre os nós. No método de elementos finitos funções de interpolação são utilizadas para definir essa variação.

6.3.1 - Tipos de Modelos

Existem várias maneiras de classificar os modelos de fluxo subterrâneo. Modelos podem ser tanto transientes (variação com o tempo), permanentes (em equilíbrio), confinado ou livre quanto àqueles baseados em sua dimensão espacial (Walton, 1989). Uma das características mais importantes na resolução de um modelo é a sua distribuição espacial dos nós (*grid*) e com relação a isso os modelos podem ser classificados em:

- Modelo Bidimensional (2D)

Três tipos de aquíferos podem ser simulados com modelos bidimensionais: confinados, confinados drenantes e livres.

Para **aquíferos confinados** o coeficiente de armazenamento e transmissividade são especificados para cada nó, célula ou elemento. Variações na transmissividade podem ser representadas por variações tanto na condutividade hidráulica quanto na espessura do aquífero (heterogeneidade). Anisotropia pode ser representada por diferenças em T_x e T_y .

No sistema **confinado drenante** a camada confinante e o aquífero adjacente que supre a drenagem para o aquífero confinado não são explicitamente representados no modelo, mas simulados por meio do termo de drenagem (equação 1).

Em um modelo de um **aquífero livre** as condições de Dupuit são sempre utilizadas, pois, considerando-se o fluxo horizontal a carga hidráulica não varia com a profundidade. Assim, um problema tridimensional pode ser resolvido de forma bidimensional, por exemplo. Simulações envolvendo aquíferos livres necessitam da distribuição de condutividade hidráulica (K), produção específica (S_y) e cota do *datum* (Figura 6.4).

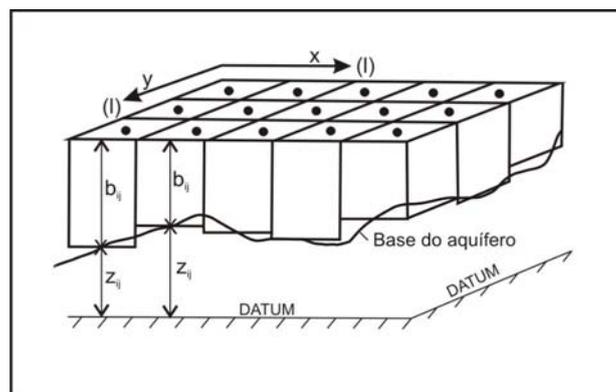


Figura 6.4 - *Grid* do tipo bloco-centrado para um modelo bi-dimensional de um aquífero livre (Adaptado de Anderson, 1992).

- Modelo *Quasi*-tridimensional

Um modelo quasi tridimensional simula uma seqüência de aquíferos com camadas confinantes separando-os. Utiliza as mesmas considerações de um modelo bidimensional do tipo confinado drenante onde as camadas confinantes não são explicitamente representadas.

- Modelo Tridimensional (3D)

Modelos tridimensionais tratam o sistema a ser modelado do ponto de vista de sistema de fluxo. Esses modelos necessitam dos mesmos parâmetros de um modelo 2D exceto que os parâmetros são especificados para cada camada do modelo (Figura 6.5).

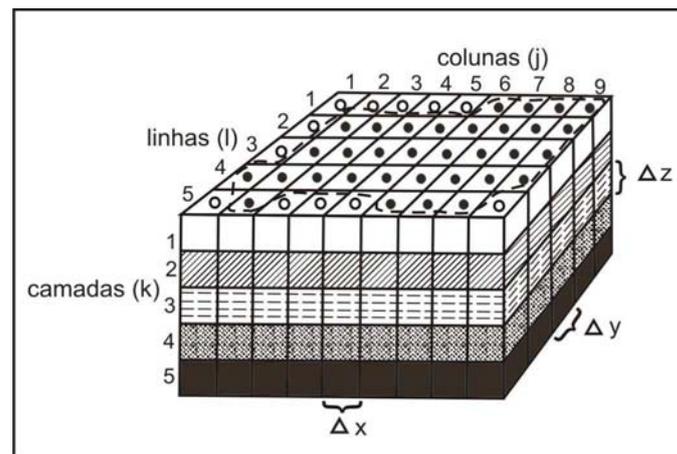


Figura 6.5 - Diagrama esquemático de um modelo tri-dimensional. Todas as unidades estratigráficas estão representadas por uma ou mais camadas (Adaptado de Anderson, 1992).

6.3.2 - Tipos de *Grid* (Discretização espacial)

Em modelos numéricos, o domínio contínuo do problema é substituído por um domínio discretizado que consiste de arranjo de nós associados a blocos (células) de diferenças finitas (Walton 1989).

Existem dois tipos de *grids* de diferenças finitas: bloco-centrado e rede-centrada. A diferença entre eles está principalmente na maneira em que o fluxo nos contornos (limites) é manipulado (Figura 6.6). No *grid* de bloco centrado supõe-se que o fluxo em um contorno sempre ocorre na borda do bloco. Já no *grid* de rede centrada o contorno coincide com o nó (Figura 6.6).

A seleção do tamanho do espaço entre os nós é um das etapas críticas da discretização. O espaço entre os nós na horizontal é função da inclinação esperada da superfície freática ou potenciométrica e da variabilidade das propriedades do aquífero. Por exemplo, para regiões com alto gradiente horizontal um espaçamento menor entre os nós será necessário. Similarmente ocorrerá o mesmo para a direção vertical.

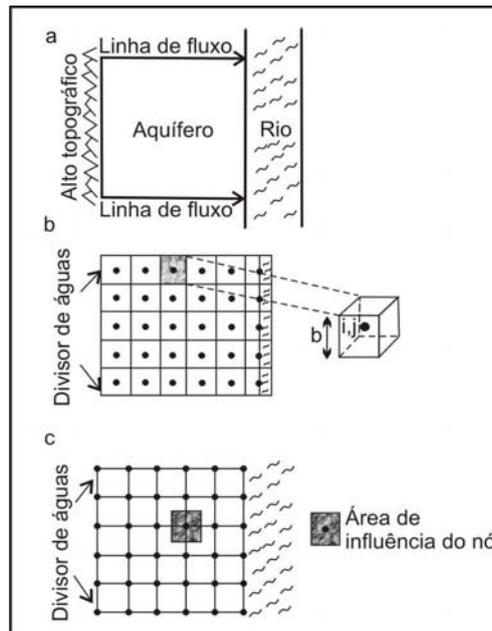


Figura 6.6 - *Grids* bi-dimensionais de diferenças finitas: a) domínio do problema; b) *grid* de diferença finita do tipo bloco-centrado onde o contorno do tipo fluxo-nulo é localizado na borda do bloco (célula) e o contorno do tipo rio é localizado sobre os nós; c) *grid* de diferença finita do tipo rede-centrada onde os contornos localizam-se sobre os nós (Adaptado de Anderson, 1992).

6.3.3 - Condições de Contorno

Uma condição de contorno é um ajuste matemático que especifica a variável dependente (carga) ou a derivada dessa variável (fluxo) em um limite (contorno) do domínio do problema (Anderson, 1992). Algumas condições de contorno típicas para domínios bi e tri-dimensionais são apresentadas na Figura 6.7.

Contornos físicos de sistemas de fluxos de água subterrânea são formados pela presença física de algum corpo impermeável de rocha ou uma grande massa de água superficial. Outros contornos são formados pelas condições hidrológicas (contornos hidráulicos) que incluem os divisores de água subterrânea e as linhas de fluxo. Na Figura 6.7 dois sistemas regionais de fluxo possuem contornos físicos: rocha impermeável na base, nível estático no topo e um rio em cada extremidade. Divisores de água subterrânea formam os contornos hidráulicos cuja localização é influenciada pela presença das feições físicas locais.

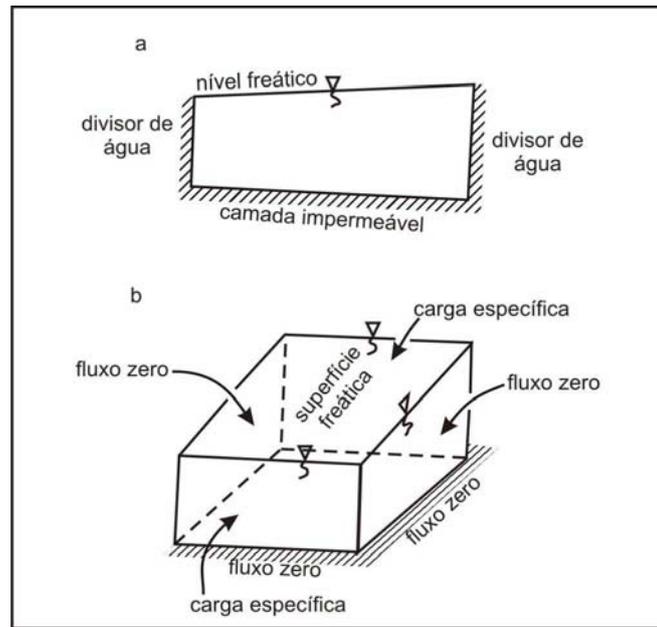


Figura 6.7 - Principais condições de contorno encontradas no modelo de fluxo subterrâneo (Anderson, 1992).

Contornos hidrogeológicos são representados por três tipos de condições matemáticas (Anderson 1992):

- **Tipo 1.** Contorno de carga específica (condição de Dirichlet): o valor da carga hidráulica é indicado. Reservatórios superficiais como lagos, barragens e rios são exemplos desse tipo de contorno;

- **Tipo 2.** Contorno de fluxo específico (condição de Neumann): a derivada da carga hidráulica através do contorno é calculada. A condição de fluxo-nulo é um caso especial de fluxo específico. Poços de injeção e extração de água são representantes de fluxo específico. Lagos e rios também podem ser caracterizados pelo Tipo 2, desde que conhecida a taxa de fluxo;

- **Tipo 3.** Contorno de fluxo dependente da carga (condição mista ou de Cauchy): em que o fluxo através do contorno é calculado, fornecido o valor da carga. Bastante utilizado para simular fluxo para drenos e drenagem para um rio ou de um rio (drenança descendente ou ascendente).

6.4 – MODELO QUANTITATIVO DE FLUXO SUBTERRÂNEO

De forma a ampliar a compreensão dos mecanismos do fluxo hídrico subterrâneo no aquífero e suas interrelações com os corpos de água superficiais e transportes de possíveis contaminantes foi elaborado um modelo para servir de subsídio no gerenciamento dos recursos hídricos costeiros na região em estudo.

6.4.1 - Modelo Hidrogeológico Conceitual

Com base nas informações geológicas, geofísicas e hidrogeológicas adquiridas e disponíveis, um modelo conceitual hidrogeológico foi estabelecido. As premissas envolvidas nesse modelo são:

- Embasamento Cristalino, Grupo Barreiras e Sedimentos Quaternários Eólicos e Fluviais (Aluviões) como as unidades litológicas principais. O aquífero livre do Grupo Barreiras e os Sedimentos Quaternários Eólicos são os correspondentes sistemas aquíferos (Figura 3.3).
- As rochas que compõem o Embasamento Cristalino servem de base impermeável para os aquíferos em questão (Figura 3.3).
- Existe uma relação hidráulica entre os aquíferos Dunas e Barreiras, na área em os sedimentos eólicos sobrepõem-se as rochas sedimentares terciárias, servindo-lhes de fonte de recarga.
- As águas subterrâneas do Aquífero Barreiras deságuam principalmente na Bacia do Rio Cauípe e em menor quantidade na micro bacia do Riacho Guaíbas. Já no Aquífero Dunas a descarga principal ocorre na interface água doce/água salgada nos limites com o Oceano Atlântico (Figura 3.4).
- A recarga acontece superficialmente, em todos os sistemas aquíferos, através de infiltração de águas pluviais nas áreas de exposição das litologias em questão e por infiltração de águas dos rios nos aluviões.
- A evapotranspiração real é importante nesse modelo devido aos seus altos valores proporcionando uma redução significativa nas águas infiltradas.

6.4.2. Domínio e Discretização

Domínio

Para evitar efeitos indesejados devidos à proximidade com as condições de contorno, os limites do modelo devem ser selecionados, quando possível, com grande distância da área de interesse (McDonald 1984). Para o limite oeste não foi possível adotar um limite hidrológico natural, no caso divisor d'água. O limite leste é formado pelo Lagamar do Cauípe enquanto para o limite sul foi considerado o afloramento do embasamento cristalino, que forma também a base do modelo numérico. O limite norte é formado pelo Oceano Atlântico.

Discretização

Em termos de distribuição horizontal, a discretização do domínio foi feita em malha quadrática do tipo bloco centrado, sendo o espaçamento diminuído de 100 x 100 m nas bordas para 50 x 50 m na área de interesse de transporte de contaminantes (área reservada para refinaria). Em profundidade, o modelo foi dividido em 3 camadas sendo uma para o aquífero dunas, uma para o aquífero barreiras e uma para o embasamento cristalino (Figura 6.8).

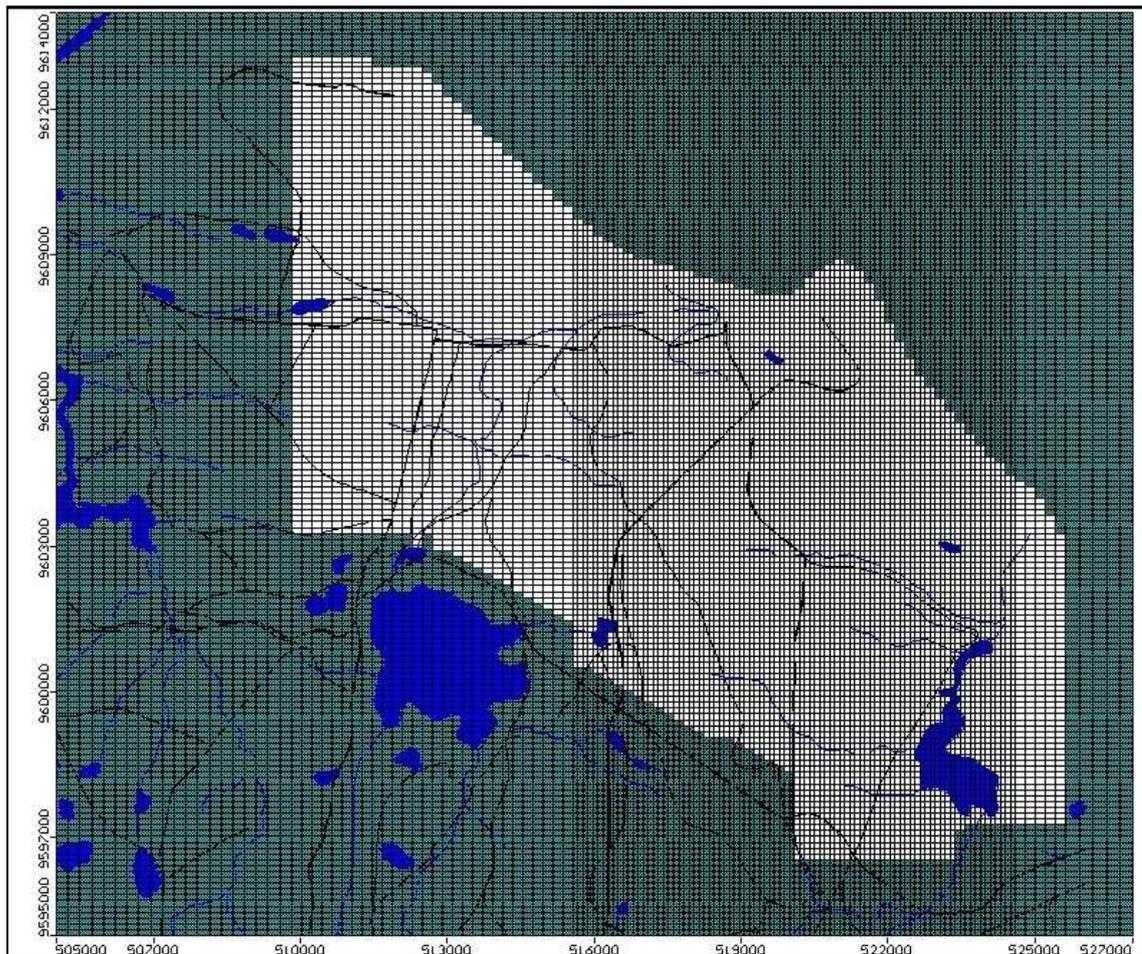


Figura 6.8 - Domínio e discretização considerados para o modelo de fluxo hídrico subterrâneo da área de influência do Porto do Pecém.

6.4.3 - Propriedades e Condições de Contorno

Para cada camada modelada, foram adotados valores de condutividade hidráulica obtidos pelas medidas laboratoriais descritas no item 5.1. e corroborados por escassos dados disponíveis na literatura sendo as distribuições das condutividades hidráulicas das camadas agrupadas em 5 zonas heterogêneas e isotrópicas e 1 heterogênea e anisotrópica (Figura 6.9).

Com base nas premissas adotadas para o modelo hidrogeológico conceitual foram definidas as seguintes condições de contorno para o modelo matemático de fluxo da região.

Limites Laterais - foi adotada uma linha de fluxo como limite oeste sendo desconsiderada a parte da drenagem que ocorre fora da área ativa do modelo, presente na metade desse limite.

Para a parte norte adotou-se uma carga constante, representando o comportamento do Oceano Atlântico. No limite leste, para não coincidir o limite ativo do modelo exatamente com o Lagamar do Cauípe, optou-se por considerar uma linha de fluxo a 1 km de distância para leste. Uma condição de contorno de fluxo zero foi imposta na parte sul, contato dos sedimentos terciários e quaternários com as rochas do embasamento cristalino, significando que não existem águas entrando ou saindo lateralmente do modelo.

Condutividade Hidráulica – a partir dos resultados dos ensaios de carga variável foram delimitadas zonas de mesma ordem de grandeza (Figura 6.9). Com exceção da zona III que apresenta uma condutividade hidráulica vertical diferente em termos de ordem de grandeza com relação a condutividade horizontal as demais zonas tiveram os mesmos valores (Tabela 6.1).

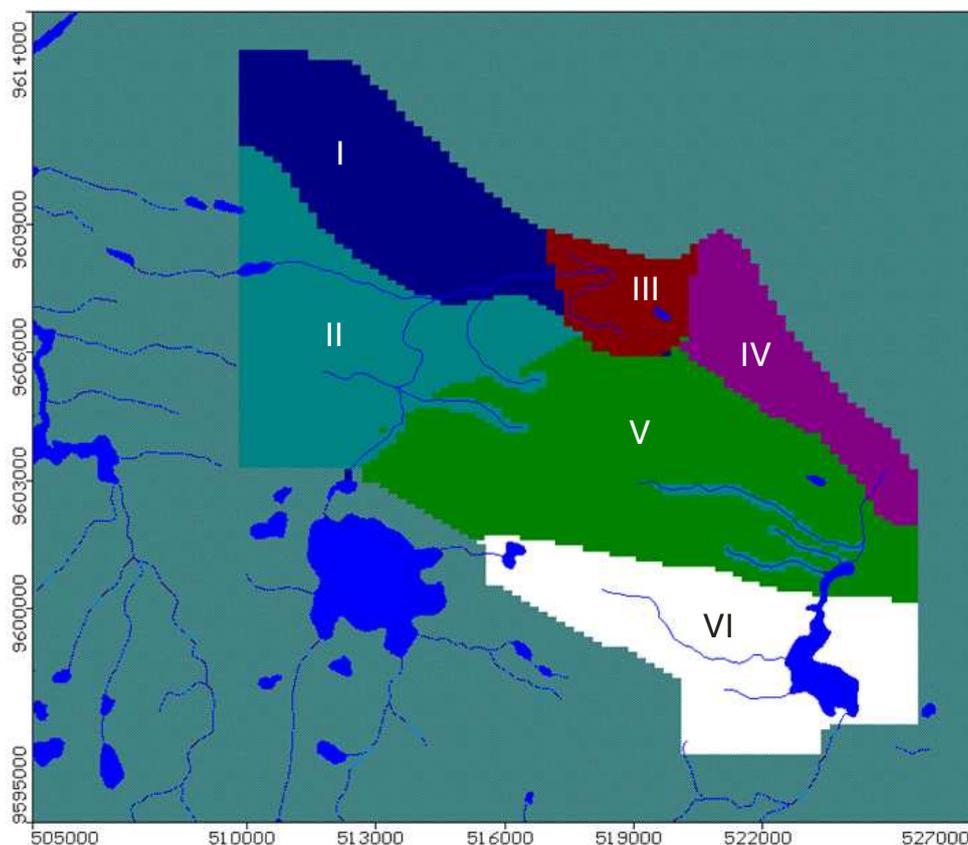


Figura 6.9 – Zonas de condutividade hidráulica delimitadas com base nos dados pontuais de carga variável.

Tabela 6.1 – Valores de condutividade hidráulica utilizados no modelo de fluxo.

Cond. Horizontal (cm/s)	Zona I e IV	Zona II e VI	Zona III	Zona V
	5E-3	5E-7	5E-3	5E-3
Cond. Vertical (cm/s)	Zona I e IV	Zona II e VI	Zona III	Zona V
	5E-3	5E-7	5E-2	5E-3

Rios - foram adotadas condições de contorno tipo rio para o lagamar do Cauípe e para o riacho Guaribas. Somente estes dois corpos de água superficial foram considerados perenes (Figura 6.10).

Drenos - para todos os corpos de água superficiais que permanecem secos a maior parte do ano foi adotada condições de contorno tipo dreno. A vantagem desse tipo de condição de contorno é que ela permite apenas a retirada de água do sistema, não como no caso da condição de contorno do tipo “rio”, que serve de fonte de água ao sistema, quando o nível do lençol freático encontra-se abaixo da base do rio. Quando o nível d’água rebaixa até a base do dreno o aquífero pára de retirar água do sistema (McDonald, 1984).

Recarga - foram adotados os valores de 140 mm/ano para a região litorânea, de 200 mm/ano para a região de afloramento do Grupo Barreiras e 300 mm/ano para a área de exposição das dunas de 1ª e 2ª gerações. Esses valores correspondem aos determinados pelo método de flutuação do nível estático (item 5.5).

Poços - foram considerados no modelo todos os 40 poços que se encontravam no banco de dados de 2005, obtido junto ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM). O volume total bombeado para este período é de aproximadamente 1.500 m³/dia. Esse valor foi obtido com a vazão média de 1.5 m³/h para cada poço que consta no banco de dados citado.

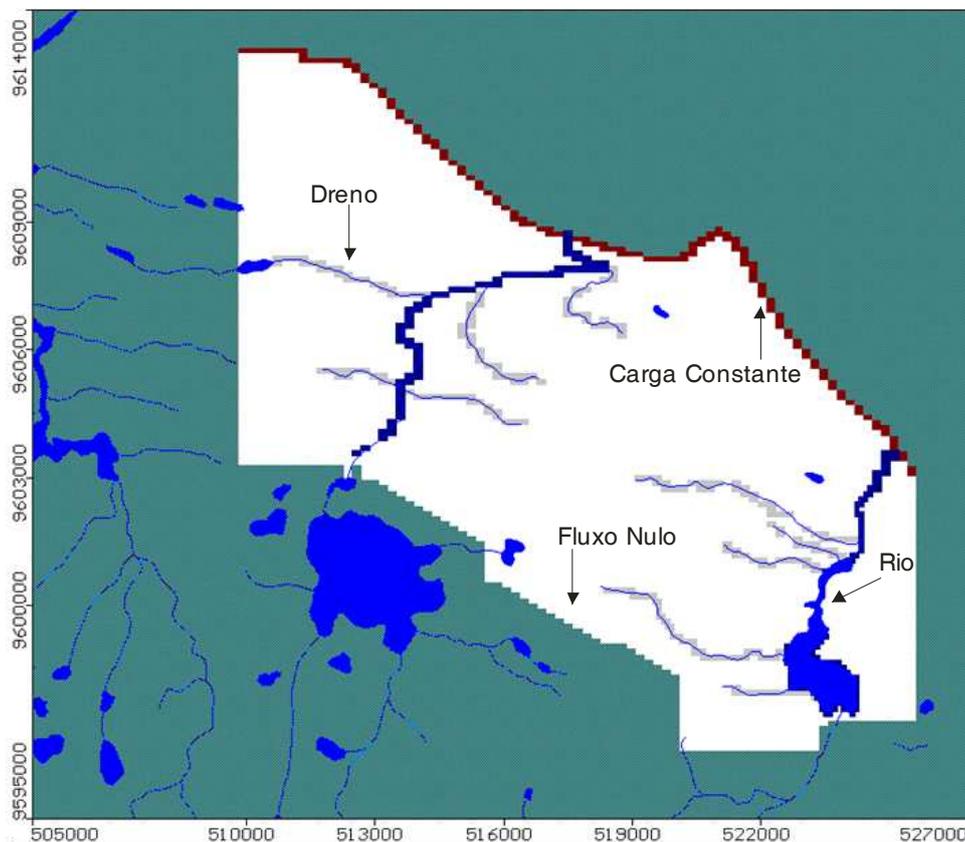


Figura 6.10 – Principais tipos de condições de contorno utilizados no modelo de fluxo.

6.4.4 - Calibração do Modelo de Fluxo

A calibração é uma medida do quanto representativo um modelo é em relação à situação medida em campo (Guiger, 2000). Essa pode ser avaliada em termos qualitativos pela comparação entre as equipotenciais medidas e as calculadas pelo modelo ou graficamente também quantitativamente pela relação entre o valor calculado *versus* valor observado. A Figura 6.11 mostra a localização dos pontos de observação, cujos valores de nível d'água foram medidos entre março de 2005 e julho de 2006, utilizados na calibração do modelo no estado estacionário. A Figura 6.12 mostra o gráfico comparativo entre os valores de nível d'água medidos e calculados pelo modelo numérico, bem como um histograma de distribuição dos resíduos. Observa-se uma boa concordância entre os valores medidos e os calculados pelo modelo, sendo o erro normalizado de 4,08 % (RMS) e um coeficiente de correlação de 0,991. O histograma dos resíduos mostra uma distribuição próxima à curva gaussiana indicando que a distribuição entre os resíduos positivos e negativos se dá de uma forma homogênea. Para o modelo em estado transitório foram considerados 04 períodos de tempo quadrimestrais, condizentes com 01 (um) de excesso hídrico (março a junho) e 03 de escassez.

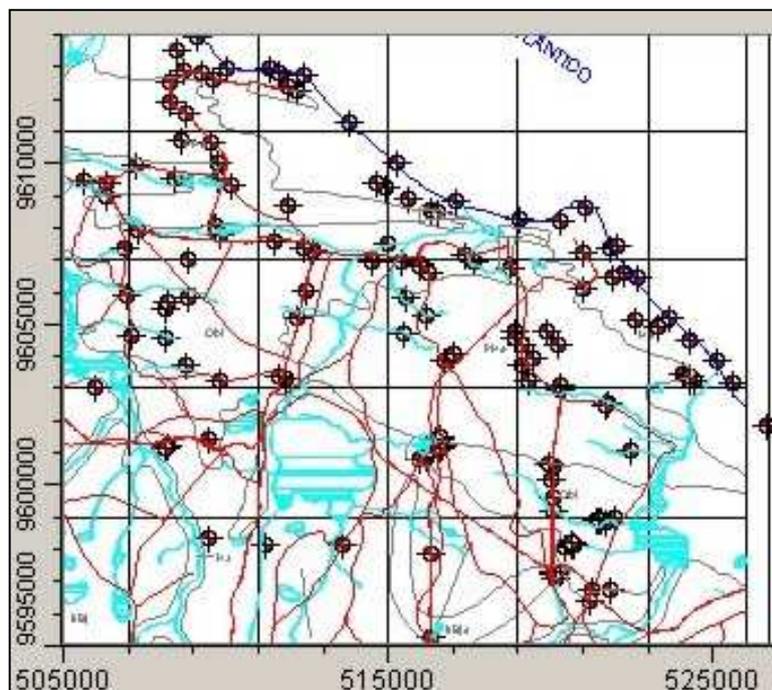


Figura 6.11 - Distribuição dos pontos de observação cujos valores de nível d'água foram medidos entre março de 2005 e julho de 2006, utilizados na calibração do modelo no estado estacionário.

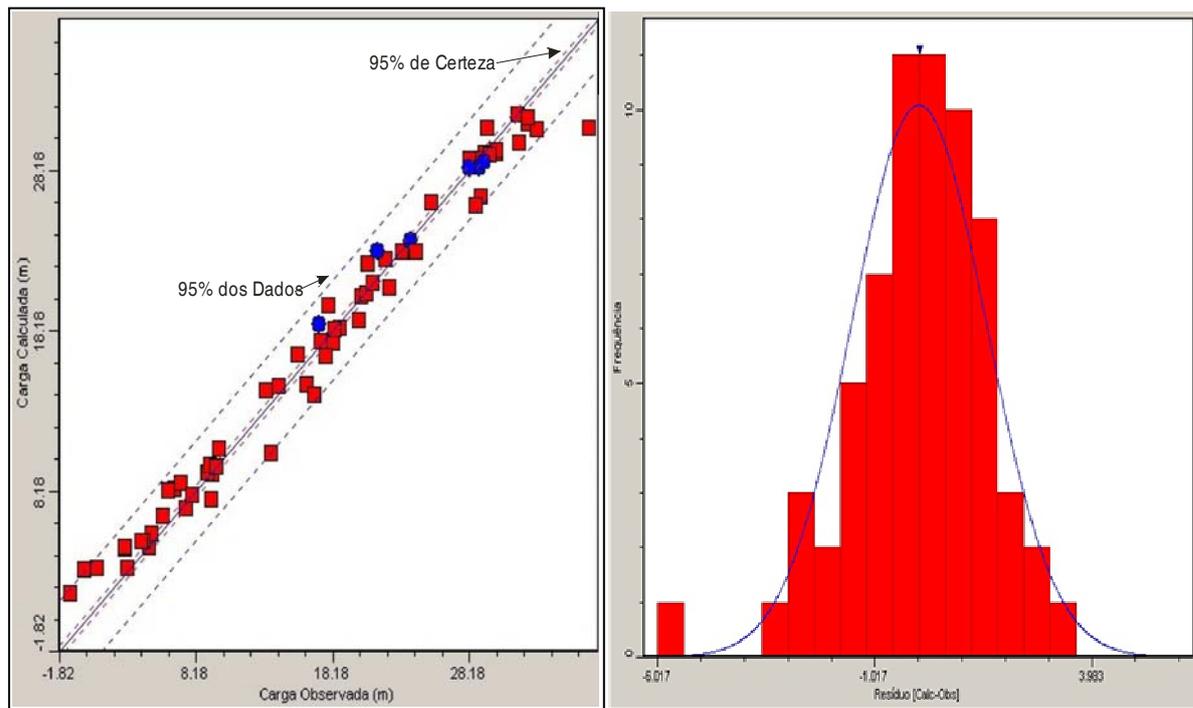


Figura 6.12 - a) Relação gráfica entre os valores calculados e observados para o nível d'água para o modelo de fluxo com um RMS de 4,08% e um coeficiente de correlação de 0,991. b) Histogramas de resíduos com comportamento bem ajustado ao padrão gaussiano.

O mapa potenciométrico calculado pelo modelo para o sistema aquífero considerado mostra que ocorre um direcionamento preferencial das linhas de fluxo para o norte da área de pesquisa (Figura 6.13). Nota-se, no entanto, localmente a influência dos rios e das drenagens.

Os resultados do balanço hídrico calculados pelo modelo matemático encontram-se na Tabela 6.2. Com relação à recarga ($119.240 \text{ m}^3/\text{dia}$) há uma diferença de cerca de 20% a mais ($95.8900 \text{ m}^3/\text{dia}$) se for considerado os valores obtidos pelo método da variação do nível estático (item 4.5.1). Tal diferença provavelmente está associada a imprecisões do método do nível estático devido aos parâmetros granulométricos considerados e quanto as incertezas de um modelo matemático. Os demais parâmetros como a descarga para o Oceano Atlântico e a drenança ascendente têm ordem de grandeza de $15.000 \text{ m}^3/\text{dia}$, os rios contribuem um pouco para recarga com cerca de $1.000 \text{ m}^3/\text{dia}$ mas, domina sua drenança com cerca de $7.400 \text{ m}^3/\text{dia}$ e a evapotranspiração com $83.000 \text{ m}^3/\text{dia}$. Quando comparado com os valores de evapotranspiração potencial obtidos com o método de Thornthwaite (≈ 300.000) confronta-se uma grande diferença, que pela calibração adequada do modelo matemático, aponta em uma superestimação do método utilizado.

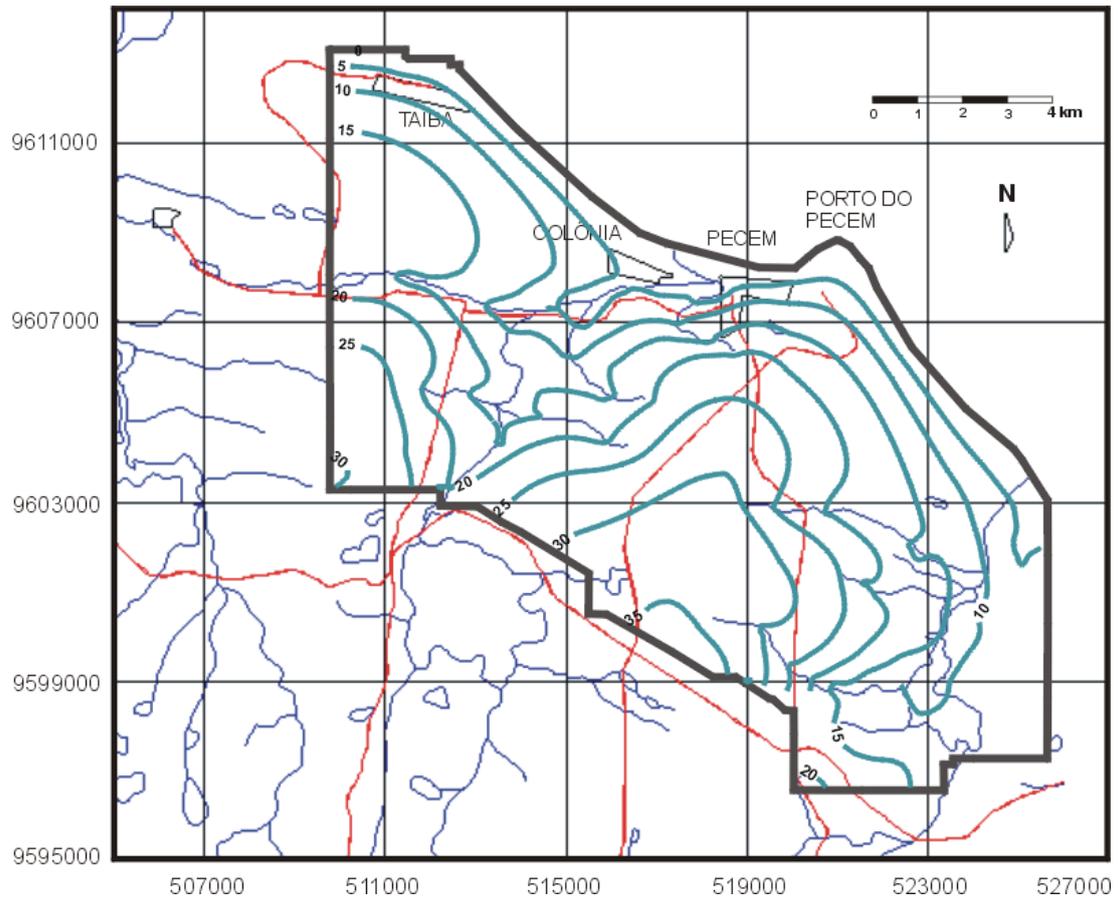


Figura 6.13 - Mapa potenciométrico para a área modelada ressaltando o fluxo principal em direção ao oceano e, localmente, as principais drenagens.

Tabela 6.2 - Balanço Hídrico para o modelo calibrado para a área de pesquisa.

PARÂMETROS	ENTRADA (m ³ /dia)	SAÍDA (m ³ /dia)
Armazenamento	0	0
Carga Constante	0	15.318
Dreno	0	15.012
Rio	1.274	7.443
Evapotranspiração	0	83.052
Recarga	119.240	0
TOTAL	120.510	120.830

6.4.5 - Cenários Avaliados

Após a calibração do modelo matemático de fluxo foi possível utilizá-lo como instrumento para avaliar cenários previsionais.

Entre os cenários simulados foram considerados pertinentes, um cenário do cálculo da zona de captura da situação de bombeamento atual (cenário atual) e um cenário com os poços instalados explorando com o dobro da vazão, com o intuito de duplicar o regime de exploração atual (cenário previsional).

6.4.6 - Exploração Atual do Sistema Dunas/Barreiras – Cenário Atual

Em tal cenário foram considerados todos os poços que se encontram no banco de dados de 2005 obtidos junto ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM). O volume total explorado pelos poços de bombeamento é de aproximadamente 1.500 m³/dia (Figura 6.13).

A Figura 6.14 mostra o mapa potenciométrico para a situação atual com os poços em operação em estado estacionário. Em termos gerais pode-se afirmar que na situação atual o aquífero apresenta-se pouco explorado. O fluxo das águas subterrâneas do sistema aquífero se direciona principalmente em direção ao norte, ocorrendo desvios para poços, drenagens e rios. Próximo ao afloramento do embasamento cristalino nota-se que os gradientes são maiores.

O modelo também foi usado para definir de onde vem a água bombeada ou ‘capturada’ pelos poços. É importante saber a origem da água, pois se esta zona é afetada por contaminantes, cedo ou tarde o poço poderia ser também contaminado, com prejuízos sociais e financeiros potencialmente grandes. A zona de captura de um poço é definida como a área de contribuição de água a um poço (na realidade um volume tridimensional). A forma e extensão da zona de captura dependem do tempo de trânsito da água nos poros do aquífero e normalmente usam-se perímetros de proteção de poços diferenciados de acordo com o tempo de trânsito (chamados PPPs). Para diferentes tempos, são então estabelecidas regras de uso e ocupação do solo, que podem ser menos ou mais restritivas. Quanto menor o tempo de trânsito da zona de captura, mais restritivo será o PPP, pois é demandado menos tempo para que o contaminante alcance o poço.

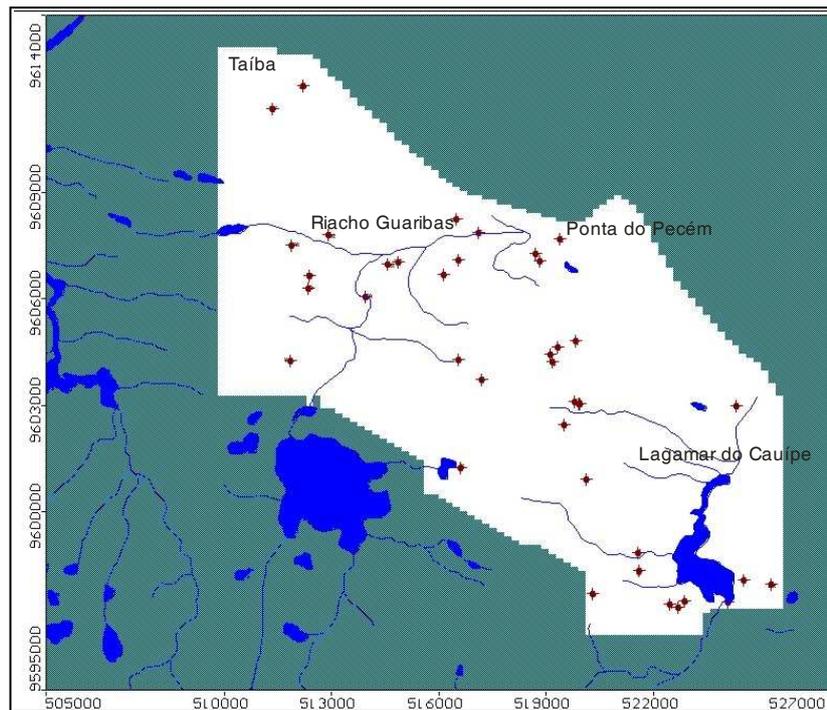


Figura 6.14 - Distribuição dos poços tubulares utilizados nos cenários atual e previsional.

Por exemplo, em vários países, consideram-se perímetros de proteção de 50 ou 100 dias como forma de proteção do poço contra agentes patogênicos (vírus/bactérias/parasitas). Isto porque mais de 95% destes organismos são filtrados e/ou eliminados por mecanismos de auto-depuração no aquífero e por causa da temperatura da água subterrânea, entre 10 a 30°C, o que cria um ambiente inóspito para esses organismos. Dentro destes PPPs, não se permite o ingresso de animais, instalação de fossas sépticas ou outras fontes potenciais de contaminação microbiológica. Zonas de proteção de tempo muito longo ou a zona de captura estacionária (ou máxima) do poço são também de grande utilidade para se avaliar a origem das águas.

A Figura 6.15 exhibe as zonas de captura que se formam após a simulação com o modelo calibrado no cenário atual para o estado transiente para 1.760 dias (3 anos) de alguns poços considerados estratégicos por fatores como proximidade a drenagens, áreas industriais, ao litoral e a rios/lagamar. Dois conjuntos de partículas também foram adicionados na área destinada a uma refinaria de petróleo. Observa-se que as zonas de captura não se estendem para áreas maiores, indicando que os gradientes d'água subterrânea no sistema aquífero são muito baixos como pode ser identificado pelo espaçamento entre as equipotenciais nesse local. Deve-se ainda considerar que o modelo foi concebido para uma escala regional, portanto, para uma análise mais detalhada outra resolução espacial da distribuição dos parâmetros deverá ser obtida. A Tabela 6.3 apresenta o balanço hídrico para o cenário atual. Os valores são muito similares aos do modelo calibrado, variando apenas o volume explotado de águas subterrâneas pelos poços tubulares.

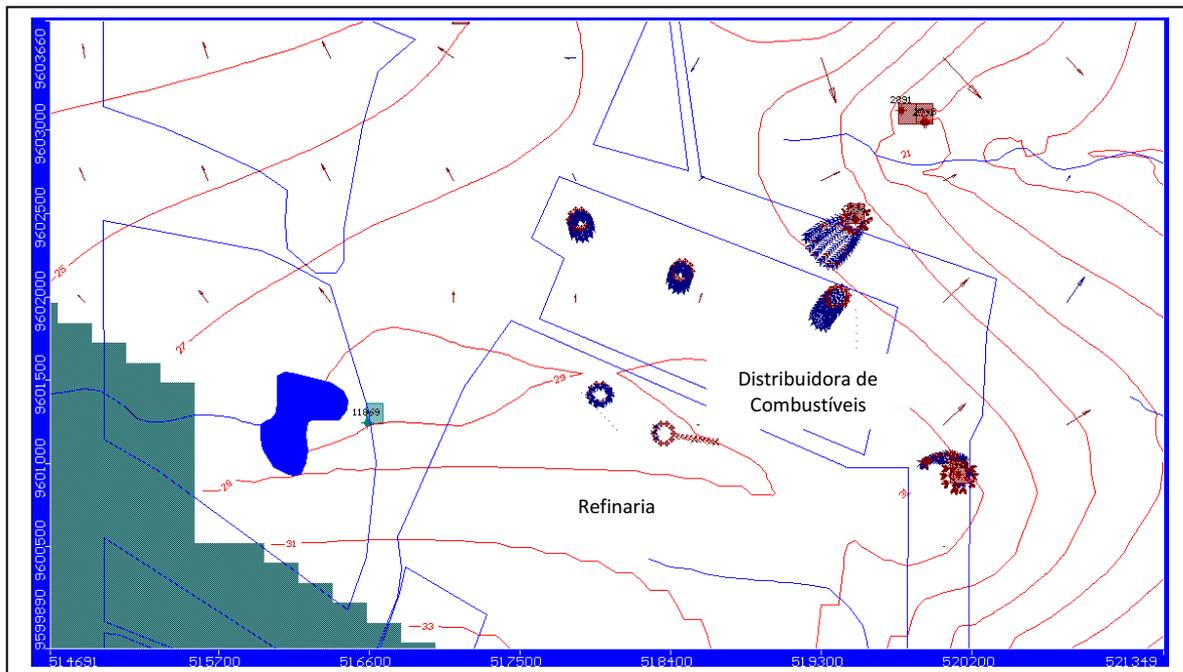


Figura 6.15 - Zonas de captura produzidas após 1760 dias evidenciadas pela utilização de partículas envolta de alguns poços tubulares e nas áreas que terão atividades potencialmente poluidoras no CIPP.

Tabela 6.3 - Balanço Hídrico para o cenário atual de exploração dos recursos hídricos subterrâneos pelos poços para o estado transiente.

PARÂMETROS	ENTRADA (m ³ /dia)	SAÍDA (m ³ /dia)
Armazenamento	0	0
Carga Constante	0	15.210
Poços	0	1.404
Dreno	0	14.702
Rio	1.312	7.242
Evapotranspiração	0	89.090
Recarga	119.240	0
TOTAL	120.550	120.650

6.4.7 - Ampliação da Vazão dos Poços de Bombeamento - Cenário Previsional

O objetivo deste cenário foi o de avaliar o potencial do aumento da exploração dos poços do sistema dunas/barreiras. Para tanto, as vazões dos poços atualmente em exploração foram acrescidas em 50% e 100%.

A Figura 6.16 exibe o mapa potenciométrico do sistema aquífero para o primeiro cenário. Nota-se nessa figura que os efeitos do bombeamento não são tão pronunciados, se comparados com o cenário atual. Exceção ocorre com os poços localizados muito próximos ao contato com embasamento cristalino na porção sudeste do modelo ativo. Tais poços tiveram que ser desativados porque o aumento de vazão nessa região não permitiu uma convergência matemática do modelo indicando indiretamente uma superexploração de água subterrânea para os parâmetros modelados.

A Figura 6.17 exibe o mapa potenciométrico do sistema aquífero para o segundo cenário. Nota-se nessa figura que os efeitos do bombeamento também não são tão pronunciados, se comparados com os demais cenários, indicando que ainda há uma grande disponibilidade hídrica na área de interesse.

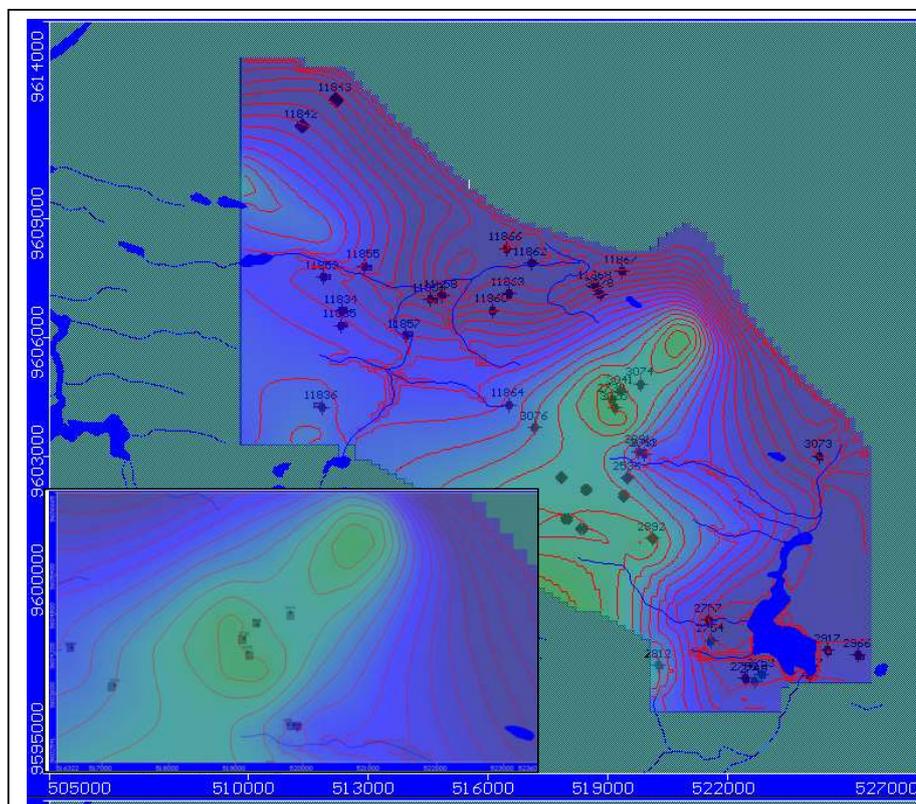


Figura 6.16 - Mapa potenciométrico para o cenário do aumento de 50% na vazão de exploração dos poços tubulares. Obs.: No canto esquerdo inferior, detalhe do reduzido rebaixamento próximo a um conjunto de poços.

Tabela 6.4 - Balanço Hídrico para o cenário com exploração dos recursos hídricos subterrâneos pelos poços tubulares.

PARÂMETROS	ENTRADA (m³/dia)	SAÍDA (m³/dia)
Armazenamento	0	0
Carga Constante	0	15.121
Poços	0	2.298
Dreno	0	16.604
Rio	1.366	8.944
Evapotranspiração	0	81.395
Recarga	118.990	0
TOTAL	120.360	124.360

Para se avaliar a sensibilidade do modelo quanto às variações dos parâmetros de entrada foram modificados os valores das condições de contorno e os das propriedades hidrogeológicas. Especificamente foram variados os valores da profundidade do topo do embasamento cristalino, da recarga regional e valores de condutividade hidráulica.

A profundidade do topo do embasamento cristalino foi alterada em 30 metros, ou seja, foi simulada uma situação em que a cota do topo teve um acréscimo de 30 metros e uma situação de diminuição em 30 metros. Os efeitos destas variações foram avaliados primeiramente nos resultados de calibração. Foram avaliadas as mudanças que ocorreram nos valores da média dos resíduos de calibração (cargas calculadas menos observadas), da média absoluta dos resíduos e da raiz quadrada normalizada da média dos resíduos (erro RMS normalizado).

Variou-se a recarga regional em 50% para mais e para menos, em relação ao modelo calibrado, obtendo-se o RMS normalizado de 10,82% para a recarga maior e 8,68% para a menor. Para a condutividade hidráulica os parâmetros de entrada foram de meia ordem de grandeza para cima e para baixo, resultando num RMS normalizado de 31,0% relativo à condutividade maior e 8,28% com relação à menor. A cota do topo do embasamento cristalino foi alterada em 30 metros para maior profundidade e 15 metros para a menor, obtendo-se o RMS normalizado de 7,7% e 9,34% respectivamente.

6.5 - MODELO PREVISIONAL DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

Contaminantes são transportados em água subterrânea por advecção, isto é, o soluto movimenta-se com a velocidade linear média da água subterrânea (v) (Anderson, 1992):

$$v = - K / n_e (\text{grad } h) \quad (\text{eq. 6.15})$$

onde, v é um vetor; K é o tensor de condutividade hidráulica; n_e é a porosidade efetiva; $\text{grad } h$ é o gradiente hidráulico.

Existem, entretanto, dois outros processos que afetam o movimento de contaminantes, denominados dispersão e reações químicas. Dispersão refere-se ao espalhamento do contaminante ocasionado pelo movimento de parte do soluto com velocidade diferente da velocidade linear média. O movimento de um contaminante é fortemente influenciado pelas heterogeneidades que influenciam na velocidade linear média. Essas influências (desvios) estão representadas na Lei de Fick (lei de difusão):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (\text{eq. 6.16})$$

onde D_{ij} é o coeficiente de dispersão e c é a concentração.

As reações químicas tipicamente consideradas nos modelos de transporte são a adsorção, descrita pelo fator de retardo (R_d) e, hidrólise e decaimento, descritos pela taxa constante de primeira-ordem (λ). Estes termos são assim definidos:

$$R_d = \frac{v}{v_c} = 1 + K_d \left(\frac{\rho_b}{n} \right) \quad (\text{eq. 6.17})$$

$$\frac{dc}{dt} = \lambda c \quad (\text{eq. 6.18})$$

onde v é a velocidade linear média da água subterrânea (equação 6.15); v_c é a velocidade do contaminante; K_d é o coeficiente de dispersão; ρ_b é a densidade total do material poroso e, n é a

porosidade. Na equação 6.3, $\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{t_{1/2}}$, onde $t_{1/2}$ é a meia-vida.

A equação para transporte de soluto, conhecida como equação de dispersão-advecção, pode ser derivada da equação de balanço de massa usando a equação 6.16 para representar o fluxo dispersivo e as equações 6.17 e 6.18 para representar as reações químicas.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (c v_i) = R_d \frac{\partial c}{\partial t} + \lambda c R_d - \frac{C' W^*}{n_e} \quad (\text{eq. 6.19})$$

onde c é a concentração e C' é a concentração na fonte; v_i representam os componentes do vetor velocidade; W^* é o termo que descreve um ponto de recarga ou descarga e, n_e é porosidade efetiva.

O código para um modelo de transporte consiste basicamente de dois submodelos: um modelo resolve a equação de fluxo e o outro resolve a equação de dispersão-advecção. A solução da equação de fluxo produz a distribuição de carga, a partir da qual o campo de velocidade é calculado. Velocidades são os dados de entrada do submodelo de transporte, que estima a distribuição da concentração no tempo e no espaço.

6.5.1 - Fontes potenciais de poluição

A possibilidade de contaminação da água subterrânea é dependente da existência de uma fonte fornecedora de um contaminante qualquer (tipo de contaminante, quantidade, tempo de exposição, etc.) e das propriedades de um sistema (porosidade, permeabilidade, componentes biológica e quimicamente ativos) constituído pelas zonas saturada e não saturada do subsolo. Essa relação definirá o grau de vulnerabilidade do aquífero ao potencial do poluente.

O sistema aquífero local possui uma zona vadosa relativamente espessa e com teor médio a alto de argila na porção centro-sul da área, o que lhe confere uma ação razoavelmente eficaz na proteção da zona saturada subjacente. Já na porção centro-norte onde afloram os sedimentos arenosos quaternários a zona vadosa é pouco espessa, conferindo baixa proteção a zona saturada.

As fontes atuais e potenciais de poluição identificados na região em questão são:

- Fossas negras e efluentes de fossas sépticas instaladas em residências associadas a pequenas propriedades rurais nas áreas adjacentes e localidades urbanas;
- Estradas vicinais não-pavimentadas que atravessam a área de pesquisa;
- Captações de água para atividades agropecuárias em propriedades de pequeno porte;
- Eventual modificação no padrão de ocupação da região identificada como zona de recarga.

- Efluentes de fossas sépticas

A falta de infra-estrutura parcial nas áreas urbanas caracteriza-se pela existência de fossas sépticas e estradas não-pavimentadas.

Com uma população estimada em 10.000 habitantes e considerando a quantidade de residências (tanto na área urbana da Taíba, quanto nas áreas rurais), os efluentes de fossas sépticas caracterizam uma fonte atual de poluição. Tal fonte é constituída por pontos de poluição que efetiva e permanentemente poderiam contribuir para uma eventual degradação do aquífero. Essas cargas poluentes são do tipo pontual e de baixo poder migratório. São constituídas por microorganismos patogênicos e por substâncias químicas derivadas da decomposição de compostos nitrogenados (fezes e urina).

A distância recomendável que deve separar o ponto de descarga de efluentes de uma fossa séptica, de uma captação de água subterrânea, para eliminar o perigo de contaminação do aquífero explotado, não pode ser fixada indiscriminadamente. O arraste de bactéria e de substâncias químicas pelas águas subterrâneas é ditado por muitos fatores, entre os quais a declividade do terreno, a atitude das camadas de rocha que constituem o aquífero, o nível estático, a persistência das substâncias e a condutividade hidráulica do solo têm grande influência (Foster et al. 1991).

No caso em discussão, as fossas identificadas existentes nas propriedades situam-se a na zona vadosa que representa a primeira e mais importante defesa natural contra a poluição de aquíferos. Isso é devido não somente à sua posição estratégica, entre a superfície do terreno e a zona saturada, mas ainda por seu peculiar ambiente físico-químico que, geralmente, age no sentido de atenuar ou, mesmo, eliminar os poluentes que nela ingressam. É bem conhecido o fenômeno de impermeabilização que normalmente afeta o anel circular que envolve as paredes de uma fossa negra. Suas dimensões são variáveis, conforme a composição do solo, mas seu efeito é sempre marcado pelo impedimento total ou parcial de percolação do efluente líquido contido no interior da fossa.

Logo, para efeito de análise de impacto ambiental, mesmo com uma grande presença de residências ao norte da região estudada, e todas elas servidas por fossas negras, pode ser traduzida como fonte de poluição pontual. O percentual relativamente alto de argila que caracteriza o solo da região resulta em baixa condutividade hidráulica, dado que constitui um fator de efetiva atenuação aos eventuais efeitos desse tipo de poluição. Uma vez que não há histórico de contaminação da água subterrânea na área de interesse pode-se afirmar que estatisticamente a probabilidade de contaminação do aquífero pesquisado por fonte poluente do tipo em questão é baixa. Contudo, dada a persistência deste tipo de efluente, o risco efetivo de que a contaminação ocorra no futuro deve ser considerada.

- Estradas vicinais não-pavimentadas

Outra eventual fonte de poluição são as estradas vicinais não-pavimentadas que recortam a área em estudo e as regiões circunvizinhas. Normalmente, as regiões de domínio das estradas vicinais, por não possuírem cobertura impermeabilizante, representam uma exposição do solo a todo tipo de poluente que, porventura, seja descartado às suas margens ou em seus leitos e que para eles possa ser carregado pelas enxurradas formadas por ocasião das chuvas. Essa fonte poluente é do tipo linear, mas sua ação é eventual. Nessas estradas, nunca existiu nenhum tipo de fonte de contaminação de grande porte (ex. depósito de lixo), como pode ser observado durante

os trabalhos de campo. Caso essas condições sejam mantidas ao longo do tempo a possibilidade de poluição por aquele tipo de fonte se torna remota.

Para o caso das rodovias estaduais que transectam a área a possibilidade de poluição associada a essa fonte não deve ser considerada remota, mas dependente de eventual acidente envolvendo o derrame de cargas poluentes.

- Captações de água e uso para atividades agropecuárias

As cisternas e poços tubulares utilizadas para as atividades agropecuárias em propriedades de pequeno porte constituem elementos que podem favorecer a poluição do aquífero pelo simples fato de expô-lo, sobretudo se aqueles não forem utilizados e protegidos devidamente. Entretanto, a pequena quantidade dessas fontes de captação de água subterrânea em relação ao tamanho da área contribui para tornar pouco provável a ocorrência de poluição significativa, originada nesses locais.

As atividades agropecuárias propriamente ditas naquelas propriedades de pequeno porte, situadas a montante dos pontos de captação também apresentam baixo potencial de poluição a integridade do aquífero. Por se situarem em posições relativamente afastadas e por não envolverem produtos potencialmente poluentes, a probabilidade de provocarem algum problema à porção explorada do aquífero é remota. Cabe ainda considerar que o tipo de poluição que podem teoricamente causar é de natureza difusa e baixa intensidade. Não foram observadas aplicações de produtos potencialmente poluentes nessas propriedades que, pelo visto, não praticam atividades com uso intensivo de fertilizantes ou de defensivos agrícolas, pois executam plantios de subsistências.

- Eventual modificação no padrão de ocupação

Se houver uma modificação do sistema de ocupação da região do tipo residencial para industrial, o aquífero explorado atualmente poderá sofrer alteração da proteção que dispõe, caso essas novas atividades industriais envolvam matérias químicas potencialmente poluidoras. Essa fonte poluente, futura atividades industriais químicas, pode ser classificada como fonte potencial, por sua possibilidade de ocorrência no futuro, mas com o seu grau de intensidade dependente do local da fonte poluidora.

Uma vez que o projeto que implementa o Porto do Pecém prevê diversos tipos de atividades industriais (refinaria, estocagem de derivados de petróleo e gás natural, siderúrgica, pólo metal-mecânico, etc.), na área de influência do porto acredita-se que alguma dessas fontes deixem de ser potenciais para se comportar como fontes reais de poluição.

Considerando todas as informações divulgadas nos meios de comunicação, as atividades vinculadas aos derivados de hidrocarbonetos constituem a maior potencialidade em contaminar os solos e as águas subterrâneas na área de pesquisa. Sendo assim, optou-se por elaborar um modelo previsional de transporte de contaminantes para as áreas destinadas a tais atividades com o intuito de avaliar a utilização de modelos matemáticos em contrapartida e/ou em complementação aos métodos indexadores de determinação da vulnerabilidade.

6.5.2 - Cenário de Transporte Avaliado

A simulação pressupõe um cenário com uma área de 0,1 km² contaminada com benzeno, localizada numa área definida pelo Plano Diretor, para implantação de uma refinaria. Foi considerado que o contaminante possui uma concentração máxima de 2 mg/l e atinge o nível freático e foi utilizado o modelo de fluxo obtido que apresentou o erro RMS de 4,08 (Figura 6.15) como a distribuição de cargas para a área.

A simulação do cenário é conservadora, considera-se apenas o fenômeno da adsorção, e definem os impactos a receptores à jusante, sem os efeitos biológicos de atenuação natural e sem extração por bombeamento do contaminante. Foi simulado por um período de 50 anos.

No cenário com contaminante a pluma gerada se dispersa com eixo principal na direção NE a partir do ponto do possível vazamento. Após um período estimado de 25 anos a concentração do contaminante ainda encontra-se em 0,005 mg/l. Essa concentração de benzeno estaria no limite do Valor Máximo Permissível pela Resolução 274 da ANVISA (Figura 6.18).

Como já havia sido identificada pelo comportamento das partículas utilizadas na avaliação das zonas de captura a região pré-determinada no plano diretor do Porto do Pecém caracteriza-se como adequada para atividades potencialmente poluidoras.

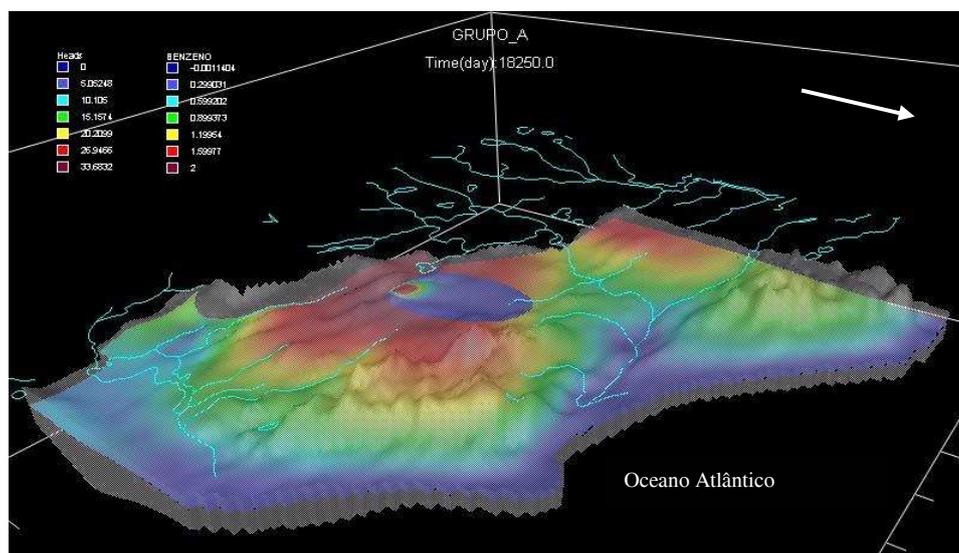


Figura 6.18 – Comportamento advectivo de uma hipotética pluma contaminante de Benzeno na região prevista para a instalação de uma refinaria de hidrocarbonetos.

6.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos pode-se afirmar que:

- O fluxo subterrâneo principal ocorre em direção ao oceano com fluxos secundários em direção as drenagens;
- Os valores de recarga mais adequados para a calibração do modelo diferem em cerca de 20% dos obtidos pelo método de variação do nível;
- O balanço hídrico obtido com o modelo matemático indica uma evapotranspiração muito inferior a obtida pelo método thornthwaite, mas provavelmente mais adequada quando considerada a calibração do modelo. Muito provavelmente os valores obtidos representam a evapotranspiração real para a região;
- Há uma grande disponibilidade hídrica subterrânea ainda a ser explorada por poços tubulares na área de pesquisa. Um aumento de 50% e 100% nas vazões de exploração não afetaria significativamente os rebaixamentos de poços tubulares em operação na região estuda, com exceção da parte sul, na faixa de contato entre os sedimentos terciário-quadernários com o embasamento cristalino;
- Em uma variação da recarga regional em 50% para maior e menor, em relação ao modelo calibrado, obteve-se um RMS normalizado de 10,82% para recarga maior e 8,68% para menor indicando uma resposta adequada do modelo quanto a sensibilidade a tal parâmetro;
- Para a condutividade hidráulica os parâmetros de entrada foram de meia ordem de grandeza para cima e para baixo, resultando num RMS normalizado de 31,0% relativo à condutividade maior e de 8,28% relativo à menor;
- A cota do topo do embasamento cristalino foi alterada em 30 metros para maior profundidade e 15 metros para menor, obtendo-se o RMS normalizado de 7,70% e 9,34% respectivamente;
- No cenário de transporte de benzeno, a pluma apresentou pequena migração com dispersão principal com na direção NE, a partir do ponto do possível vazamento. Após um período estimado de 50 anos a concentração do contaminante ainda encontra-se em 0,005 mg/l. Essa concentração de benzeno estaria no limite do Valor Máximo Permissível pela Resolução 274 da ANVISA;
- Tanto o modelo de fluxo com a utilização das partículas quanto o modelo de transporte de contaminantes apontam as áreas pré-determinadas para a instalação de uma refinaria e demais atividades afins como adequadas com relação às considerações e premissas advectivas adotadas nos modelos.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se afirmar que o Modelo Hidrogeológico Local:

- Considera que o Embasamento Cristalino, o Grupo Barreiras, os Depósitos eólicos e de praia, e aluviões sejam as unidades litológicas no modelo conceitual;
- O sistema aquífero compreende: aluviões, aquífero livre dos depósitos eólicos e de praia, aquífero livre do Grupo Barreiras;
- O Embasamento Cristalino sotoposto pelo Grupo Barreiras e Depósitos eólicos e de praia serve de base impermeável para o sistema aquífero;
- Há uma conexão hidráulica entre o Aquífero Dunas (depósitos eólicos e de praia) e o Aquífero Barreiras traduzida por uma drenança vertical descendente como função do gradiente hidráulico vertical entre esses aquíferos;
- As águas subterrâneas do aquífero Dunas deságuam nas sub-bacia do Guaribas e nas bacias do Cauipe e São Gonçalo através das drenagens perenes e intermitentes, e lagoas interdunares, além da descarga principal regional para o oceano;

Com relação aos Parâmetros Hidrogeológicos pode-se afirmar que:

- O Aquífero Barreiras deságua principalmente para norte em direção ao Oceano Atlântico, além de contribuir de maneira insignificante para a recarga do aquífero fissural;
- A recarga no sistema considerado ocorre por recarga superficial através da infiltração de águas pluviais nos Depósitos eólicos e Grupo Barreiras, e infiltração de águas dos rios nas aluviões;
- A evapotranspiração é intensa equitativamente em toda a área de pesquisa onde a priori nas áreas densamente vegetadas tenderia a ser maior, mas compensada nas áreas sem vegetação pela forte ação dos ventos;
- A distribuição dos resultados obtidos para a condutividade hidráulica vertical e horizontal onde se identifica três regiões homogêneas e isotrópicas compostas por valores com ordem de grandeza de 10^{-5} cm/s, 10^{-3} cm/s e 10^{-1} cm/s, respectivamente. As menores condutividades em ambas as posições concentram-se em duas unidades hidroestratigráficas onde na parte centro-sul estão expostos solos residuais do embasamento cristalino, parte integrante do Aquífero Fissural e, na parte oeste em que afloram os sedimentos areno-argilosos que compõem

o Aquífero de Barreiras. As duas outras regiões homogêneas e isotrópicas, ao contrário da anterior formada por unidades diferentes, são formadas por sedimentos arenosos que compõem o Aquífero Dunas sendo na parte noroeste da área onde se localizam as condutividades com ordem de grandeza de 10^{-3} cm/s e na parte centro-leste as condutividades mais altas com ordem de grandeza de 10^{-1} cm/s;

- Com relação às amostras superficiais, coletadas entre 0 a 1 m de profundidade, os sedimentos oriundos do Grupo Barreiras classificam-se como areia fina a muito fina com o conteúdo de argila entre 9,0% a 20%. Para os sedimentos quaternários classificados como areia média e baixo conteúdo de argila (1,0% a 3,0%);

- Três principais funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica saturada foram determinadas para a área de pesquisa com o uso da soma, subtração e divisão como operadores matemáticos onde o ajuste das equações multiparamétricas foi avaliado pelo ajuste a cada nó e pelo RMS, como funções objeto;

- O nível estático no Aquífero Dunas teve uma variação de 0,5 m a 2,0 m onde os menores valores estão situados próximos à interface com o Oceano Atlântico que dificulta a descarga subterrânea, por exemplo, com a ação das marés;

- No Aquífero Barreiras a variação foi cerca de 2,0 m em quase toda a área monitorada sendo que dois pontos (CB06 e CB07) excederam esse valor mas, por razões de extração de água por bombeamento durante certo período;

- A maior variação encontrada no monitoramento ocorreu nas cacimbas situadas no Aquífero Fissural próximo à interface com o Aquífero Barreiras. Nos pontos mais a sul onde as espessuras do regolitos diminuem a variação teve média de 1,5 m;

- Para o Aquífero Dunas a taxa de recarga líquida média para os pontos mais próximos ao litoral foi de 140,0 mm/ano enquanto para os pontos neste aquífero mais recuados apresentam uma média de 300,0 mm/ano. Ao se comparar essas taxas com o total precipitado monitorado em alguns locais para o período de julho/2005 a julho/2006 observa-se que a recarga líquida representou entre 9,0% a 13,0% da precipitação pluviométrica.

A taxa média de recarga líquida para o Aquífero Barreiras foi de 200,0 mm/ano representando entre 18,0% a 25,0% do total precipitado para o período de julho/2005 a julho/2006 sendo exceção o ponto CB15 que aponta apenas 7,0% da precipitação pluviométrica;

- Apesar da maioria dos pontos monitorados no Aquífero Misto terem ausência de leituras é possível avaliar de maneira semi-quantitativa que a recarga líquida média foi de 150,0 mm/ano representando entre 16,0% a 23,0%;

- Utilizando o método de Thorntwaite a evapotranspiração potencia obtiveram-se valores médios de 1700 mm/ano enquanto para a evapotranspiração real a média alcança 750 mm/ano;

A partir dos resultados obtidos pode-se afirmar que os Métodos Paramétricos de Determinação de Vulnerabilidade de Aquíferos à Poluição:

- A reorganização e a incorporação de novos parâmetros tendem a realçar da melhor forma possível o conceito mais aceito de vulnerabilidade;

- Os pesos utilizados pelos métodos DRASTIC e SINTACS não são eficazes de delimitar áreas com diferentes graus de vulnerabilidade sem sofrer influências excessivas de algum parâmetro hidrogeológico;

- O método GOD tende a superestimar em classes de alta e muita vulnerabilidade, áreas sem essas características devido a ausência de outros parâmetros para completar o conceito mais adequado de vulnerabilidade;

- O método SORETO, assim como os métodos DRASTIC e SINTACS, apresentou resultados semelhantes entre os equacionamentos com e sem pesos quando todos os parâmetros foram hierarquizados;

- O método GOD indica baixa vulnerabilidade para área destinada à construção de uma refinaria enquanto os outros métodos utilizados apontam uma vulnerabilidade média. Para a área destinada a atividades de armazenamento de derivados de petróleo todos os métodos indicam uma vulnerabilidade muito alta.

- A melhor resposta com o método SORETO para o mapa de vulnerabilidade à poluição do aquífero da área de influência do CIPP foi obtida quando somente aos parâmetros com alta resolução espacial foram ponderados.

A partir dos resultados obtidos pode-se afirmar que o Modelo de Fluxo Hídrico Subterrâneo:

- O estudo realizado permitiu executar o levantamento de diversos dados hidrogeológicos e a elaboração de um modelo matemático preliminar de fluxo regional e de transporte de contaminante para a área de influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém-CE.

- Obteve-se um resultado na calibração estacionária do modelo matemático (RMS=4,08%) que se enquadra dentro dos padrões internacional de aceitabilidade. Através desse modelo é possível compreender melhor os comportamentos de fluxos localizados e regionais;
- A configuração das linhas equipotenciais calculadas pelo modelo, nessa avaliação preliminar, permite observar que o sistema aquífero, na área de estudo, encontra-se em equilíbrio sem indícios de rebaixamento próximos das áreas onde há concentração de poços;
- A análise de sensibilidade mostrou que a condutividade hidráulica é o parâmetro mais sensível a mudanças e que os valores utilizados no modelo estão próximos do real;
- Foram simulados dois cenários distintos: cenário atual e o cenário com ocorrência virtual de contaminante. No cenário atual observa-se de maneira geral o fluxo no sentido norte em direção ao oceano, e em direção aos canais de drenagem existentes na área. No cenário com contaminante a pluma atinge o primeiro canal de drenagem após um período de 25 anos, com uma concentração de 0,005 mg/l;

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar M.J.N., Lima J.B., Júnior J.H.C.B., Badu F.O. 2003. Documentos 73 -Dados climatológicos: Estação de Paraipaba. EMBRAPA, p. 16.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. 1998. Crop evapotranspiration. *FAO Irrigation and Drainage Paper*. Rome, p. 56 - 297.
- Aller L.T., Bennett J.H., Lehr R.J., Petty and Hackett G. 1987. DRASTIC - A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings, U.S. *Environmental Protection Agency/600/2-87/035*, Washington, DC. pp. 455.
- Almasri N.M. 2007. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *Journal of Environmental Management*. doi:10.1016/j.jenvman.01.022
- Anderson M.P. & Woessner W.W. 1992. Applied Groundwater Modeling. *Academic Press*. San Diego, p. 381.
- Andrade F.C.M., Goudinho A.N., Silva R.M., Lima Y.C.P. 2007. Estudo Comparativo entre os Manejos de Irrigação por Reposição da Evapotranspiração e por Balanço Hídrico no Solo. *Anais do XXXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - Bonito - MS*.
- Antonakos A.K., Lambrakis N.J. 2006. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. *J. Hydrol.* p. 56 - 297.
- Arruda F.B., Zullo Jr., J. & De Oliveira, J.B. 1987. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. *Revista Brasileira Ci. Solo.* (11): p.11-15.
- Babovic V. & Keijzer M. 2000. Genetic programming as model induction engine. *J. Hydroinform.* (2): p. 35-60.
- Babovic V., Keijzer M., Aguilera D.R., Harrington J. 2002. An evolutionary approach to knowledge induction: Genetic programming in hydraulic engineering. In: *ASCE conference proceedings*.
- Bezerra L.J.C. 2006. Caracterização Sedimentológica dos Tabuleiros Pré-Litorâneos do Estado do Ceará. *LABOMAR/UFC*: p. 103.

- Bouma J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: Stewart B.A. Ed. *Advances in soil science*. New York, Springer Verlag. (9): p.177-213.
- Brandão R.L. 1995. Sistema de Informações para Gestão e Administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza - Projeto SINFOR: Diagnóstico Geoambiental e os Principais Problemas de Ocupação do Meio Físico da Região Metropolitana de Fortaleza. *Serviço Geológico do Brasil (CPRM)*: p. 73.
- Brasil. Lei n. 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://www.cnrh-srh.gov.br/>>. Acesso: 14 de abril de 2006.
- Calheiros A.J.P., Molion L.C.B., Vaz J.C., Mancini T.R.S. 2006. Um Evento de Precipitação Extrema sobre a Costa Leste do Nordeste do Brasil. *Annais, XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia - (CBMET)*, Florianópolis - SC.
- Câmara G. & Monteiro A.M.V. 2004. Conceitos Básicos em Ciência da Geoinformação. In: Câmara G., Davis C., Monteiro A.M.V. Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE. p. 3 1-3.12.
- Câmara G. & Queiroz G.R. 2004. Arquitetura de Sistemas de Informação. In: Câmara G., Davis C., Monteiro A.M.V., (Eds.) Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE, pp.: 3.1-3.12.
- Câmara G., Barbosa C., Cordeiro J.P., Lopes E., Freitas U.M., Lucena I. 2004. Álgebra de Mapas. In: Câmara G., Davis C., Monteiro A.M.V., (Eds.) Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE, p.: 8.1-8.30.
- Camargo A.P., Marin F.R., Sentelhas P.C. 1999. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 7(2): p.251-257.
- Camargo Â.P. & Camargo M.B.P. 2000. Uma Revisão Analítica da Evapotranspiração Potencial. *Bragantia*, Campinas, 59(2): p.125-137.
- Campos S., Júnior A.A.A., Barros Z.X., Cardoso L.G., Piroli E.L. 2004. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao uso da terra em microbacias hidrográficas, Botucatu – SP, Eng. Agrícola. (24): p.431-435.
- Carvalho A.M. 2003. *Dinâmica Costeira entre Cumbuco e Matões – Costa NW do Estado do Ceará. Ênfase nos Processos Eólicos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Instituto de Geociências.
- Cassel D.K., Nielsen D.R. 1986. Field capacity and available water capacity. In: Klute A (ed) *Methods of soil analyses*, 2nd edn. American Society of Agronomy, Madison, WI: p. 901–926.

- Castelo Branco R.M.G. 2000. Notas de Aula da Disciplina de Geofísica Aplicada a Hidrogeologia e ao Meio Ambiente. Curso de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza, Ceará.
- Cavalcante J.C., Ferreira C.A., Armesto R.C.G., Medeiros M.F., Ramalho R., Braun O.P.G., Baptista M.B., Cunha H.C.S. 2003. Mapa Geológico do Estado do Ceará, Escala 1:500.000. MME-CPRM/REFOR.
- Cavalcante M.V.Á. 2006 - *Caracterização do Aquífero Costeiro do Pecém-CE com Base em Dados Geofísicos (Fem) e Hidrogeológicos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, UFC. 75p.
- Civita M. 1994. Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Teoria and practica (Aquifer vulnerability maps to pollution) Pitagora, Bologna.
- Civita M. & De Maio M. 2004. Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "combined" approach. *Geofísica Internacional*. **43(4)** p. 513-532.
- Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM) & Grupo de Integração do Gerenciamento Costeiro (GI-GERCO). 2005. Plano de Ação Federal da Zona Costeira do Brasil. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/pafzc_out2005.pdf>. Acesso em: 10 de agosto de 2006.
- Costa A.F.U. & Ferlin C.A. 1992. Mapeamento geofísico da contaminação da água subterrânea utilizando o método geofísico EM34-3. *XXXVII Congresso Brasileiro de Geologia - SBG/SP*. São Paulo, SP. Bol. Res. Exp: p. 393-395.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil & Secretaria de Recursos Hídricos. 1999. Atlas Digital de Geologia e Recursos Mierais do Ceará, mapas na escala 1:500.000. CD-ROM, Residência de Fortaleza - RFO.
- Cunha L.S., Friedel M.J., Campos J.E.G., Castelo Branco R.M.G. 2009. (inédito). Função de Pedotransferência Multiparamétrica da Condutividade Hidráulica usando Programação Genética para a Área de Influência do Porto do Pecém, Ceará. *Rev. Geociências*.
- Denny S. C., Allen D.M., Journeay J.M. 2007. DRASTIC-Fm: a modified vulnerability mapping method for structurally controlled aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal*. (15): p.483-493.
- Doerfliger N., Zwahlen F. 1997. EPIK: a new method for outling of protection areas in karstic environment. In: Gunay G, Jonshon AI (eds) *Int Symp. On Karst Water and Enviromental Impacts*, Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, p. 117-223.
- Draoui M., Vias J., Andreo B., Targuisti K., Stitou J., Messari S. 2007. A comparative study of four vulnerability mapping methods in a detritic aquifer under

- mediterranean climatic conditions. *Environmental Geology* DOI 10.1007/s00254-007-0850-3.
- Edet A.E. 2004. Vulnerability evaluation of a coastal plain sand aquifer with a case example from Calabar, southeastern Nigeria. *Environmental Geology* (45): p.1062–1070.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2001. Establishing a Groundwater Management Zone. Disponível em: <<http://www.epa.state.il.us/>>. Acesso em: 21 de maio de 2006.
- Epiphanyo J.C.N., Satélites de Sensoriamento Remoto (Capítulo 2), Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/>>. Acesso em 15 de maio 2006.
- Ferreira N.S. 1996. Zona de Convergência Intertropical. Climanálise Especial. Edição Comemorativa de 10 anos. FUNCEME: p.136 – 139.
- Fetter C.W. 1994. Applied Hydrogeology, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 3rd ed., p. 691.
- Foster S. & Hirata R. 1991. Groundwater pollution risk assessment. A methodology using available data. WHO-PAHO-CEPIS Technical report, Lima-Peru, 2nd edn, p.73.
- Fritch T.G., McKnight C.L., Yelderman Jr, Dworkin S.I., Arnold J.G. 2000. A predictive modeling approach to assessing the groundwater pollution susceptibility of the Paluxy Aquifer, Central Texas, using a Geographic Information System. *Environmental Geology*. **39 (9)**: p.1063-1069.
- Gemitzi A., Tsihrintzis V.A., Pisinaras V. 2005. Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques. *Environ Geol* (49): p.653–673.
- Giarola N.F.B., Silva A.P. & Imhoff S. 2002. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região Sul do Brasil. *Revista Brasileira. Ci. Solo.* (26): p.885-893.
- Gogu R.C. & Dassargues A. 2000. Current and future trends in groundwater vulnerability assessment. *Environ Geol.* **39(6)**: p.549–559.
- Goldscheider N., Klute M., Sturm S., Hořt H. 2000. The PI method—a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration on karst aquifers. *Z Angew Geol.* **46(3)**: p.157–166.
- Goldstein N.E., Benson S.M., Alumbaugh D. 1990. Saline groundwater plume mapping with electromagnetics. In: *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. II: Environ. and Groundwater*, S. H. Ward (Ed.): p.16-25.

- Gomezdelcampo E., Dickerson R. 2007. A modified DRASTIC model for Siting Confined Animal Feeding Operations in Williams County, Ohio, USA. *Environ Geol.* **46(5)**: p.149–159.
- Guo Q., Yanxin Wang Y., Gao X., Ma T. 2007. A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination at basin scale: a case study in Taiyuan basin, northern China. *Environ Geol.* **(52)**: p.923–932.
- Hargreaves G.H. & Samani Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering Agriculture.* **1(2)**: p.96-99.
- Healy R.W. & Peter G. C. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal* **(10)**: p.91–109.
- Herlinger Jr. R., Viero A.P. 2007. Groundwater vulnerability assessment in coastal plain of Rio Grande do Sul State, Brazil, using drastic and adsorption capacity of soils. *Environ Geol* **(52)**: p.819–829
- Heredia O.S., Cirelli A.F. 2007. Groundwater chemical pollution risk: assessment through a soil attenuation index. *Environ Geol* **(53)**: p.249–255.
- Hodnett M.G. & Tomasella J. 2002. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. *Geoderma*, **(108)**: p.155-180.
- Instituto de Planejamento do Estado do Ceará. IPLANCE. 2007. Informações Básicas dos Municípios do Estado do Ceará. p.221.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2002. Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas – SPRING 3.6 – Tutoriais. São José dos Campos. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring>>. Acesso em: 23 de março de 2006.
- Kato M., Maruyama Y., Tsukada M. 2000. An introduction of ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) for the Earth Observation. Disponível em: <<http://www.gisdevelopment.net/>>. Acesso em: 11 de novembro de 2005.
- Koza J.R. 1992. Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection. The MIT Press, Cambridge, MA.
- Lamelas M.T., Marinoni O.H., A. Riva, J. de la. 2007. Groundwater vulnerability map for the Ebro alluvial aquifer between Jalo'n and Ginel tributaries (Spain). *Enviromental Geology.* **53(9)**: p.861–878
- Lerner D.N., Issar A.S., Simmers I. 1990. Groundwater recharge. Int. Assoc. Hydrogeologists, p.345.

- Liggett J., Allen D., Journeay M., Denny S., Talwar S., Ivey Lex. 2006. Intrinsic aquifer vulnerability maps in support of sustainable community planning, Okanagan Valley, BC. Sea to Sky Geotechnique, Annais. p.1329–1336.
- Lobo-Ferreira J.P., Oliveira M.M. 2004. Groundwater vulnerability assessment in Portugal. *Geofísica Internacional*. **43(4)**: p.591-602.
- 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. Tese de Doutorado. Barcelona. p.269.
- Marinho J.M.L. & Vasconcelos S.M.S. 2003. Bacia Costeira do Rio Cauípe, Caucaia, Ceará: Levantamentos Geométrico e Hidrogeológicos. *Revista de Geologia - UFC, Fortaleza-Ceará*. (17): p.22-37.
- Mcbratney A.B., Minasny B., Cattle S.R., Vervoort R.W. 2002. From pedotranfer functions to soil inference systems. *Geoderma*. (109): p.41-73.
- Mather P.M. 2004. *Computed Processing Remotely-Sensed Images*. Jonh Wiley & Sons, West Sussex. p.324.
- Mcneill J.D. 1980b. Interpretation procedures for the EM-34. TN-8, Geonics Inc., Mississauga, Ontario. p.10.
- Mcneill J.D. 1990. Use of eletromagnetic methods for groundwater studies. *In: Ward S.H. Geotechnical and enviromental geophysics*. Vol. I, SEG special publication.
- McDonald M.G. & Harbaugh A.W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, *Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1*, USGS, p.576.
- McWhorter D.B., Garcia A.J. 1990. The concept of specific yield and its evaluation by laboratory measurements. *Groundwater Engineering and Management Conference Proceedings*, p.235–246.
- Medeiros A.T. 2000. *Estimativa de evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Moteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas em Paraipaba, CE*. Dissertação de Mestrado – Piracicaba, Unesp. p.103.
- Melo J.G. 1995. *Impactos do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal, RN* - Tese de Doutorado. – USP 132p.
- Mendes J.M.B. 1987. *Técnicas geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição de águas subterrâneas*. Tese de Doutorado. IG-USP.
- Meneses P.R. 2005. *Fundamentos de Sensoriamento Remoto (Texto Universitário)*, Universidade de Brasília, 138p.

- Miranda C., Massa J.L., Marques C.C.A. 1996. Análise da ocorrência de leishmaniose tegumentar americana através de imagem obtida por sensoriamento remoto orbital em localidade urbana da região Sudeste do Brasil. *Rev. Saúde Pública.* (30): p.433-437.
- Mota R.F. 2005. Estudos Geológicos-Geofísicos da Interface Água Doce/Água Salgada em Aquíferos da Formação Barreiras no Litoral da Região de Caucaia e Pecém – R.M.F./CE.
- Muñoz H.R. 2000. Interfaces da Gestão de Recursos Hídricos. Desafios da lei de águas. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 21 de setembro de 2005.
- Nogueira M.L.S & Augusto V.A. 2004. Reconhecimento de Áreas mais Susceptíveis à Contaminação por Hidrocarbonetos através da Caracterização Geológica e Hidrogeológica na Zona Portuária do Pecém – CE. Relatório de Trabalho Final de Graduação. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, 91p.
- Novo E.M.L. de M. (Ed.) 1992. Sensoriamento Remoto. Edgard Blücher, São Paulo, 308 pp.
- Oliveira M.M. 2000. A estimativa da recarga das águas subterrâneas a partir da decomposição de hidrogramas de escoamento superficial. Disponível em: <<http://www.dha.lnec.pt/nas>>. Acesso: 06 de agosto de 2005.
- Panagopoulos G.P., Antonakos A.K., Lambrakis N.J. 2006. Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeol. J.* (14): p.894–911.
- Parasuraman K., Elshorbagy A.S.B.C. 2007 Estimating Saturated Hydraulic Conductivity Using Genetic Programming. *SSSAJ.* 71(6): p.1676-1684.
- Rodríguez R. C. 2004. The role of urban areas in aquifer vulnerability assessments: The Salamanca Mexico case. *Geofísica Internacional.* 43(4): p.583-589.
- Ross M., Martell R., Lefebvre R., Parent M., Savard M.M. 2004. Assessing rock aquifer vulnerability using downward advective times from a 3D model of surficial geology: A case study from the St. Lawrence Lowlands, Canada. *Geofísica Internacional.* 43(4): p.591-602.
- Rupert MG. 2001. Calibration of the DRASTIC ground water vulnerability mapping method. *Ground Water* 39(4): p.625–630.
- Scanlon B.R., Healy R.W., Cook P.G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal.* (10): p.18–39.
- Scanlon B.R. 2002. Groundwater Recharge in Texas. *Water Resour. Res.* (36): p.395-409.

- Secunda S., Collin M.L., Melloul A.J. 1998. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management*. **(54)**: p.39–57.
- SEMACE/LABOMAR. 2005. Mapeamento das Unidades Geoambientais da Zona Costeira do Estado do Ceará. (Zoneamento Ecológico-Econômico do Litoral e Ecossistemas Associados). Coordenador Prof. Dr. Luís Parente Maia. p.147.
- Silva A.P., Tormena A.C., Fidalski J., Silvia I. 2008. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. *Revista Brasileira Ciênc. Solo*. **32(1)**.
- Sophocleous M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*. **(10)**: p.52–67.
- Souza Filho C.R., Crósta A. P. 2003. Geotecnologias aplicadas à Geologia. *Revista Brasileira de Geociências*. **33(2-Suplemento)**: p.1-4.
- Steward M. 1990. Rapid reconnaissance mapping of fresh-water lenses on small oceanic islands. In Ward, S. H. Ed., *Geotechnical and Environmental Geophysics, SEG*. **(2)**: p.57-66.
- Stewart M. & Bretnall R.E. 1986. Interpretation of VLF resistivity data for ground water contamination studies. *Ground Water Monitoring Review*. **6(1)**: p.71-75.
- Stigter T.Y., Vieira J., Nunes L.M. 2006. Avaliação da susceptibilidade da contaminação das águas subterrâneas no apoio a tomada de decisão. Caso de estudo: implantação de campos de golfe no concelho de Albufeira (Algarve). In: Proc 6º Congresso da Água, APRH, Porto (CD-ROM).
- Suguo K. & Bigarella. 1979. *Ambientes Fluviais*, Editoras UFSC e UFPR, 2a edição, 183p.
- Star J. & Estes J. 1990. *Geographic Information Systems*. Prentice Hall, New Jersey, 303p.
- Thornthwaite C.W. 1948. Approach an toward classification of climate. *Geography Review*, New Jersey. **(38)**: p.55-94.
- Thornthwaite C.W. & Mather J.R. 1955. Instructions and tables for computing potencial evapotranspirations and the water balance. *Publications in Climatology*, Centerton. **10(3)**: p.185-311.
- Thurtson J. 2003. Looking Back and Ahead: The Triangulated Irregular Network (TIN) - GEOinformatics. **(6)**: p.13.

- Todd D.K. & Mays L.W. 2005. Groundwater Hydrology. Jonh Wiley & Sons, New Jersey. p.636.
- Twarakavi N.K.C. & Kaluarachchi J.J. 2005. Aquifer Vulnerability Assessment to Heavy Metals Using Ordinal Logistic Regression. *Ground Water*. **43(2)**: p.200-214.
- Uvo C.B., Nobre C.A. 1989a. A zona de convergência intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do nordeste do Brasil. Parte I: a posição da ZCIT no Atlântico Equatorial. *Climanálise*. **4(7)**: p.39-40.
- Uvo C.B., Nobre C.A. 1989b. A zona de convergência intertropical (ZCIT) e sua relação com precipitação da região norte e nordeste do Brasil. Parte II: a influência dos ventos CTSM no Atlântico Tropical. *Climanálise (São José dos Campos)*. **4(10)**: p.39-49.
- Van Duijvenbooden W. & Van Waegeningh H.G. 1987. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in The Netherlands. TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands.
- Van Stempoot D., Ewert L., Wassenaar L. 1993. Aquifer Vulnerability Index (AVI): a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Can Water Res J*. **(18)**: p.25–37.
- Velpen V. 1988. RESIST: Program for the interpretation of Schlumberger, Wenner and Dipolo-dipolo sounding curves, ITC - Msc. Research Project, The Netherlands.
- Vías J.M., Andreo B., Perles M.J., Carrasco F., Vadillo I., Jime´nez P. 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeol J*. **(33)**: p.23-33.
- Vrba J., Zaporozec A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists (International Contributions to Hydrogeology 16). Verlag Heinz Heise, Hannover.
- Walton W.C. 1989. Numerical Groundwater Modelling: Flow and Contaminant Migration. Lewis Publishers Inc., Michigan. p.357.
- Wang Y., Merkel B.J., Li Y., Hui Y., Fu S., Ihm D. 2007. Vulnerability of groundwater in Quaternary aquifers to organic contaminants: a case study in Wuhan City, China. *Environ Geol*. **(53)**: p.479–484.
- Ward S.H. 1990. Resistivity and induced polarization methods. In, Ward, S. H. Ed., Geotechnical and environmental geophysics, Vol. I, SEG Special Publication.

Wösten J.H.M., Pachepsky Y.A., Rawls W.J. 2001. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hidrol.* (251): p.123-150.

Zohdy A.A.R., Bisdorf R.J. 1989. ATO: Programs for the automatic processing and interpretation of Schlumberger sounding curves in QuickBasic 4.0, USGS, Open-File Report. p.89-137.

A1 - MÉTODOS ESPECÍFICOS (CAPÍTULO I)

A1.1 – SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

O termo *Sistemas de Informação Geográfica* (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e processam informações não apenas com base em suas características alfanuméricas, mas também a partir de sua localização espacial (Câmara & Monteiro, 2004). Star & Estes (1990) define SIG como um sistema com suporte de um banco de dados com capacidades específicas (operações) para trabalhar com dados georeferenciados. Atualmente, os *softwares* utilizados já armazenam e operam informações não-georeferenciados.

Integra numa única base de dados e informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados de censo, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno (Câmara & Queiroz, 2004). Além disso, oferece mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, para consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados e gerar mapas temáticos (INPE, 2002).

Como suas principais aplicações estão a elaboração de mapas, de banco de dados geográficos com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial e, de suporte para análise espacial de fenômenos (Star & Estes, 1990).

Tipos de Dados

Com relação aos tipos de dados utilizados em um Sistema de Informação Geográfica, tem-se (Câmara & Monteiro, 2004):

- **dados temáticos:** descrevem a distribuição espacial de uma grandeza geográfica expressa de forma qualitativa (p.e. vegetação, declividade e teor mineral).

- **dados cadastrais:** distingue-se de um temático, pois cada um de seus elementos é um *objeto geográfico* que possui atributos e pode estar associado a várias representações gráficas (p.e. vegetação (altura, espessura do tronco, etc.) e geologia (litotipos, idade, teor).

- **redes:** cada objeto geográfico (p.e. cabo telefônico, transformador de rede elétrica, cano de água) possui uma *localização geográfica exata* e está sempre associado a atributos descritivos presentes no banco de dados.

- **modelos numéricos de terreno (MNT):** utilizado para denotar a representação quantitativa de uma grandeza que varia continuamente no espaço. Pode ser definido como um modelo matemático que reproduz uma superfície real a partir de algoritmos e de um conjunto de pontos (x, y) , em um referencial qualquer, com atributos denotados de z , que descrevem a variação contínua da superfície.

- **imagens:** representam formas de captura indireta de informação espacial obtidas por satélites, fotografias aéreas ou "scanners" aerotransportados. Armazenadas como matrizes, cada elemento de imagem ("pixel") tem um valor proporcional à energia eletromagnética refletida ou emitida pela área da superfície terrestre correspondente.

Representação Geométrica

A esses tipos de dados estão associados às representações geométricas: vetorial e matricial ou raster (Câmara & Queiroz, 2004) (Figura 2.4.1).

Na vetorial, a representação de um elemento ou objeto é uma tentativa de reproduzi-lo o mais exato possível. Qualquer entidade ou elemento gráfico de um mapa é reduzido a três formas básicas: pontos, linhas, áreas ou polígonos. Um *ponto* é um par ordenado (x, y) de coordenadas espaciais. As *linhas poligonais*, arcos, ou elementos lineares são um conjunto de pontos conectados. Um *polígono* é a região do plano limitada por uma ou mais linhas poligonais conectadas de tal forma que o último ponto de uma linha seja idêntico ao primeiro da próxima.

A representação matricial consiste no uso de uma malha quadriculada regular sobre a qual se constrói, célula a célula, o elemento que está sendo representado. A cada célula, atribui-se um código referente ao atributo estudado de tal forma que o computador identifique a que elemento ou objeto pertence a determinada célula.

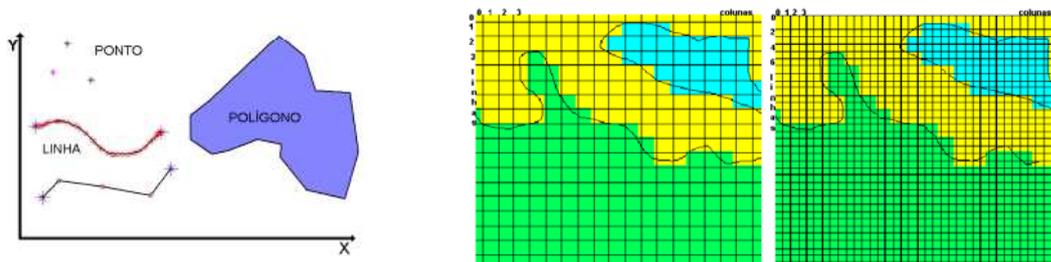


Figura A1 – Elementos de representação vetorial (lado esquerdo). Diferentes representações matriciais para um mapa (lado direito). (Fonte: Câmara & Monteiro, 2004).

Espaço Geográfico

O espaço geográfico é modelado segundo duas visões complementares: os modelos de *campos* e *objetos* (Câmara & Queiroz, 2004). O modelo de campos enxerga o espaço geográfico como uma superfície contínua, sobre a qual variam os fenômenos a serem observados segundo diferentes distribuições. Por exemplo, um mapa de vegetação descreve uma distribuição que associa a cada ponto do mapa um tipo específico de cobertura vegetal.

O modelo de objetos representa o espaço geográfico como uma coleção de entidades distintas e identificáveis. Por exemplo, os rios de uma bacia hidrográfica ou os aeroportos de um estado poderiam ser geo-objetos.

Organização do Ambiente de Trabalho

Quanto à organização do ambiente de trabalho em um SIG existem duas grandes formas de organização (Câmara & Monteiro, 2004):

- **baseada num banco de dados geográficos:** o usuário define inicialmente o esquema conceitual associado às entidades do banco de dados geográficos, indicando para cada tipo de dados seus atributos não-espaciais e as representações geométricas associadas. Proceda-se da mesma forma que num banco de

dados tradicional (dBASE e ACCESS), onde a definição da estrutura do banco precede a entrada dos dados. O SPRING é um exemplo de sistema organizado como banco de dados geográficos.

- **baseada em projetos:** o usuário define inicialmente um referencial geográfico (que delimita uma região de trabalho) e a seguir, define as entidades geográficas que compõem o projeto. O ARC/INFO, SGI e IDRISI são exemplos desta classe de sistemas. Um projeto é usualmente composto por um conjunto de *níveis, camadas ou planos de informação (PIs)*, que variam em número, tipos de formatos e de temas, conforme as necessidades de cada tarefa ou estudo.

Operações de Análise Geográfica

O que distingue um SIG de outros tipos de sistemas de informação são as funções que realizam análises espaciais. Tais funções utilizam os atributos espaciais e não-espaciais das entidades gráficas armazenadas na base de dados e buscam fazer simulações (modelos) sobre os fenômenos do mundo real, seus aspectos ou parâmetros (Câmara & Barbosa, 2004).

Uma das formas de caracterização dessas operações é pelo espaço geográfico (geo-campos e geo-objetos) que está sendo analisado, logo tem-se (Câmara *et al.* 2004):

- Operações sobre geo-campos:

- **Pontuais:** geo-campo de saída é função dos valores de entrada em cada localização correspondente. Suas principais classes de operações são as operações de transformação (Ponderação, Reclassificação, Fatiamento e Fatiamento de classes), as operações booleanas e as operações matemáticas.

- **Vizinhança:** geo-campo de saída está baseado na dimensão e forma de uma vizinhança em torno do geo-campo de entrada. Exemplos incluem *filtros* para processamento de *Dad_Sensor_Rem*, métodos de *interpolação* espacial para MNT e mapas de *declividade* para MNT;

- Operações sobre geo-objetos:

Podem-se definir as seguintes operações sobre geo-objetos:

• *restrições sobre atributos:* computados em função dos atributos de entidades espaciais (p.ex. “selecione todas as cidades de Alagoas com mortalidade infantil maior que 10%”);

• *restrições espaciais:* derivados a partir dos relacionamentos topológicos das entidades geográficas (p.ex. “dê-me todas as escolas municipais do bairro Jardim Satélite”).

- Operações entre geo-campos e geo-objetos:

▪ *Mapas de distâncias (“Buffer”):* Um mapa de distâncias é um mapa de geo-campos contendo as distâncias de cada ponto do mapa a um geo-objeto de referência (representado por um ponto, linha ou região). Trata-se de operação puramente geométrica (espacial) (Figura 2.4.2).

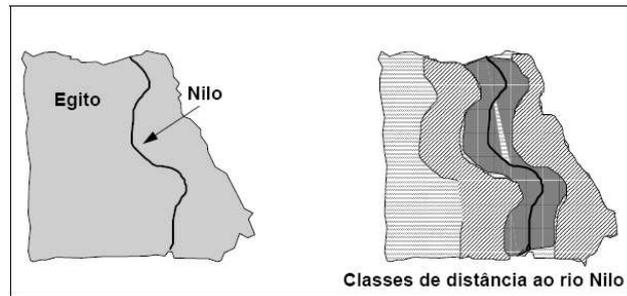


Figura A2 – Exemplo de mapa de distância (Segundo Câmara *et al.* 2004).

A1.2 – SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento Remoto é a utilização conjunta de modernos sensores com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes da Terra em suas mais diversas manifestações (Novo, 1992). Tais sensores podem ser divididos em duas grandes classes: fotográficos e imageadores (multiespectrais e termais) (Meneses, 2005).

Atualmente, o uso dos produtos de sensores remotos orbitais (imageadores) tem sido indispensável e com aplicação vasta em vários campos das ciências como geologia (Souza Filho & Crosta, 2003), agronomia (Campos *et al.* 2004) e saúde (Miranda *et al.* 1996).

Dentre as principais características dos sensores multiespectrais (sistema de imageamento, resolução e tipos de detetores) (Meneses, 2005) a resolução é o atributo que o usuário de imagens de sensores remotos orbitais tem maior interesse. Resolução refere-se à capacidade que um sensor tem para identificar o menor objeto possível (**resolução espacial**); à capacidade que um sensor tem em imagear um número maior de bandas em diferentes regiões espectrais (**resolução espectral**); à capacidade que um sensor (**detetores**) tem em medir com precisão um maior número de diferentes níveis de radiância (**resolução radiométrica**); à capacidade que um sensor remoto tem em obter uma nova imagem da mesma área no menor espaço de tempo (**resolução temporal**).

Embora outros sistemas façam parte do sensoriamento remoto, como os radiômetros de campo e de laboratório, e os sensores fotográficos e outros sistemas que operam em aeronaves, são os satélites que, a cada dia, mais e mais se tornam os instrumentos quotidianos dos profissionais de sensoriamento remoto (Epiphanyo, 2006). Os principais satélites em operação e mais utilizados no Brasil são os sistemas: Landsat, SPOT, NOAA, Terra (EOS), Radarsat, CBERS e o SSR/MECB (Brasil) (Epiphanyo, 2006). Devido ao escopo deste plano de tese seguirá somente uma breve descrição do satélite Terra.

O satélite Terra (EOS/AM-1) faz parte do programa EOS (Sistema de Observação da Terra) e foi lançado em 18/12/1999, estando em uma órbita circular a 705 km de altitude, quase polar, heliossíncrona,

cruzando o equador às 10:30h da manhã na órbita descendente, e à 1:30h no sentido ascendente (Epiphany 2006). Esse satélite possui cinco sensores: MODIS (Espectrorradiômetro de Imageamento de Moderada Resolução), ASTER (Radiômetro Espacial Avançado de Emissão Termal e Reflexão), MISR (Espectrorradiômetro Imageador em Múltiplos Ângulos), CERES (Sistema de Medição de Energia Radiante da Terra e Nuvens) e MOPITT (Medição da Poluição na Troposfera) (Kato, 2000).

O sensor ASTER possui três subsistemas, um para cada região espectral (Figura 2.5.1), com alta resolução espacial. Na região do visível/ infravermelho próximo tem três bandas com 15m de resolução espacial, sua faixa de imageamento é de 60km, e pode fazer visadas laterais de $\pm 24^\circ$, pode cobrir até 318km fora do nadir. Esse subsistema é composto de dois telescópios, sendo que um deles pode apontar para trás na mesma direção da órbita, permitindo que se obtenha imagens estéreo. O subsistema responsável pela região do infravermelho médio mede a radiação em seis bandas entre 1,60 μm e 2,46 μm , com 30m de resolução espacial, e uma faixa de imageamento de 60km. O terceiro subsistema do sensor ASTER é responsável pela medição da radiação em cinco bandas espectrais no infravermelho termal, entre 8,12 μm e 11,65 μm , com resolução espacial de 90m e faixa de imageamento de 60,0km. Esses dois últimos subsistemas possuem capacidade de apontamento de $\pm 8,54^\circ$ lateralmente, o que permite que qualquer ponto na superfície possa ser imageado pelo menos a cada 16 dias (Kato *et al.* 2000).

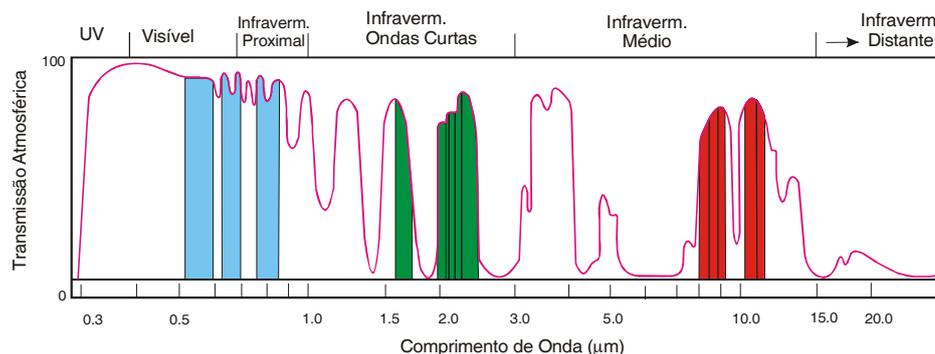


Figura A3 - A disposição espectral de comprimento de onda por transmissão atmosférica das 15 bandas do sensor ASTER onde estão agrupadas segundo suas respectivas resoluções espaciais (15m na região do visível, 30m no infravermelho médio e 90m no infravermelho termal).

A1.2.1 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Em sua forma original, como transmitida dos satélites, as imagens orbitais geralmente contêm falhas ou deficiências (Meneses, 2005). O Processamento Digital de Imagens visa corrigir essas deficiências antes da utilização para fins específicos (etapa de pré-processamento), intensificar as diferenças entre os alvos (etapas de realce e transformação) e a extração de informações (classificação) (Mather 2004). A realização dessas fases de processamento digital é dependente dos objetivos traçados e não necessariamente ocorrem por completo.

A fase de pré-processamento caracteriza a correção de distorções:

- **radiométricas:** ocasionadas, principalmente, por variações atmosféricas e imprecisões eletrônicas elevando o nível de ruído (valores incorretos de radiância) na imagem (Mather 2004);

- **geométricas:** geradas por deformações devido à forma e ao movimento de rotação da Terra, altura do Sol, posição do satélite em relação ao Sol, além de imprecisões eletrônicas. Nessa etapa os *pixels* da imagem são reamostrados em relação a um determinado sistema de projeção cartográfica (Novo 1992);

A fase de processamento digital propriamente dita contempla as seguintes etapas (Mather 2004):

- **realce:** aumenta a distinção visual entre as feições da imagem, elevando o contraste entre os alvos. As principais técnicas compreendem a ampliação de contrastes, composições coloridas e filtragens espaciais (passa-alta e passa-baixa).

- **transformações:** técnicas utilizadas para otimizar a extração de informações sem adicionar uma nova informação à imagem, mas apenas redistribuí-la. Operações aritméticas (adição, subtração e razão) entre bandas espectrais e principais componentes (diminuição da redundância de informação) estão entre as técnicas mais utilizadas.

O exemplo de uma operação aritmética entre imagens orbitais é o Índice de Vegetação. Está baseado na interação da radiação eletromagnética com a vegetação em que na região espectral denominada de Red (vermelho, $\equiv 0,6610 \mu\text{m}$) ocorre uma forte absorção pelos pigmentos das folhas e no Near InfraRed (infravermelho próximo, $\equiv 0,8070 \mu\text{m}$) ocorre uma alta reflectância por parte da estrutura das folhas (INPE, 2002). Através da divisão entre essas bandas um índice de vegetação simples pode ser obtido onde áreas de vegetação terão altos valores. Um dos índices de vegetação mais aplicados é o **NDVI** (índice normalizado da diferença da vegetação) cujo algoritmo padrão é: $\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$. Os resultados válidos situam-se entre -1 e +1 (Mather, 2004).

- **classificação:** a partir de um processo de decisão, um conjunto particular de elementos da imagem (*pixels*) é agrupado em uma classe (Novo 1992). Os algoritmos classificadores podem ser divididos em: *pixel a pixel* e por regiões (INPE, 2002). Os classificadores *pixel a pixel* agrupam regiões homogêneas a partir dos registros espectrais de cada *pixel*. Já os classificadores por regiões, além dos registros espectrais, utilizam as informações espaciais que envolvem as relações com *pixels* vizinhos. Dependendo do nível de conhecimento do usuário a respeito das características das possíveis classes existentes na área de interesse a forma de classificação pode ser supervisionada (fornece informações adicionais) ou não-supervisionada (só estima o número de classes).

B1 - MÉTODOS ESPECÍFICOS (CAPÍTULO IV)

B1.1 – ELETRORRESTIVIDADE

O método de eletrorresistividade consiste de medidas de impedância, com subsequente interpretação em termos de propriedade elétrica da estruturação geológica em subsuperfície, baseado na resposta de cada material ao fluxo de uma corrente elétrica (Ward, 1990). Quando uma corrente é introduzida no solo através de dois eletrodos, esta produz uma diferença de potencial que é medida por um segundo par de eletrodos. O valor medido desta diferença de potencial e da corrente associada é função da resistividade aparente do solo e do arranjo geométrico dos eletrodos sendo, a profundidade alcançada diretamente proporcional ao espaçamento entre os eletrodos (Orellana, 1972).

Existem basicamente dois tipos principais de modos de operação para qualquer método de resistividade; (1) sondagem e (2) caminhamento ou perfilagem.

(1) Na sondagem conhecida como SEV (Sondagem Elétrica Vertical), a separação dos eletrodos de transmissão de corrente elétrica é variada e os resultados são interpretados em termos das camadas geoeletricas. É usada para camadas horizontalizadas, quando existe a necessidade de se conhecer a variação vertical de resistividade e, assim, inferir a profundidade (espessura) e resistividade das camadas presentes. O procedimento é baseado no fato de que a corrente penetrará continuamente em profundidade à medida que aumenta o espaçamento entre os eletrodos;

(2) No caminhamento, transmissores e receptores são movidos, com separação constante, ao longo da superfície para detectar variações laterais de resistividade;

- Equações Básicas

Analisando o caso para um terreno homogêneo de resistividade ρ [ohm.m], se introduzirmos através de um eletrodo pontual **A**, uma corrente contínua de intensidade **i** [mA], esta fluirá radialmente, sendo as superfícies equipotenciais seriam semi-esferas concêntricas de raio **r** (Figura B.1).

Aplicando a lei de Ohm no espaço compreendido entre duas equipotenciais, teremos uma diferença de potencial, δV , dada por:

$$-\delta V = \rho \delta r i / 2\pi r^2 \quad \text{EQ-B.1}$$

integrando-se:

$$V = \rho i / 2\pi r \quad \text{EQ-B.2}$$

Na prática, a diferença de potencial é medida através de um arranjo de 4 eletrodos, sendo dois de corrente nos extremos (**A** e **B**) e dois de potencial no centro do arranjo (**M** e **N**) (Figura B.2).

Nos eletrodos externos **A** e **B** introduz-se corrente e nos internos, **M** e **N**, é medido a diferença de potencial. Aplicando a fórmula de ΔV para um terreno homogêneo e isotrópico tem-se:

$$\Delta V = (1/2\pi) (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN) \rho \quad \text{EQ-B.3}$$

fazendo

$$K = 2\pi / (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN) \quad \text{ou} \quad K = \{((AM \times AN)/MN) \times \pi\} \quad \text{EQ-B.4}$$

, resulta

$$\rho = K \Delta V / I \quad \text{EQ-B.5}$$

, onde **K** é uma constante que depende do arranjo geométrico dos eletrodos.

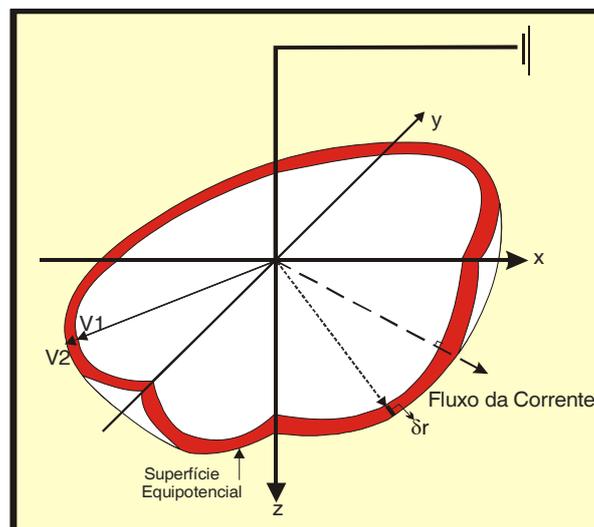


Figura B.1- Relação entre o fluxo de corrente elétrica e superfícies equipotenciais a partir de uma fonte pontual (Reinolds, 1997).

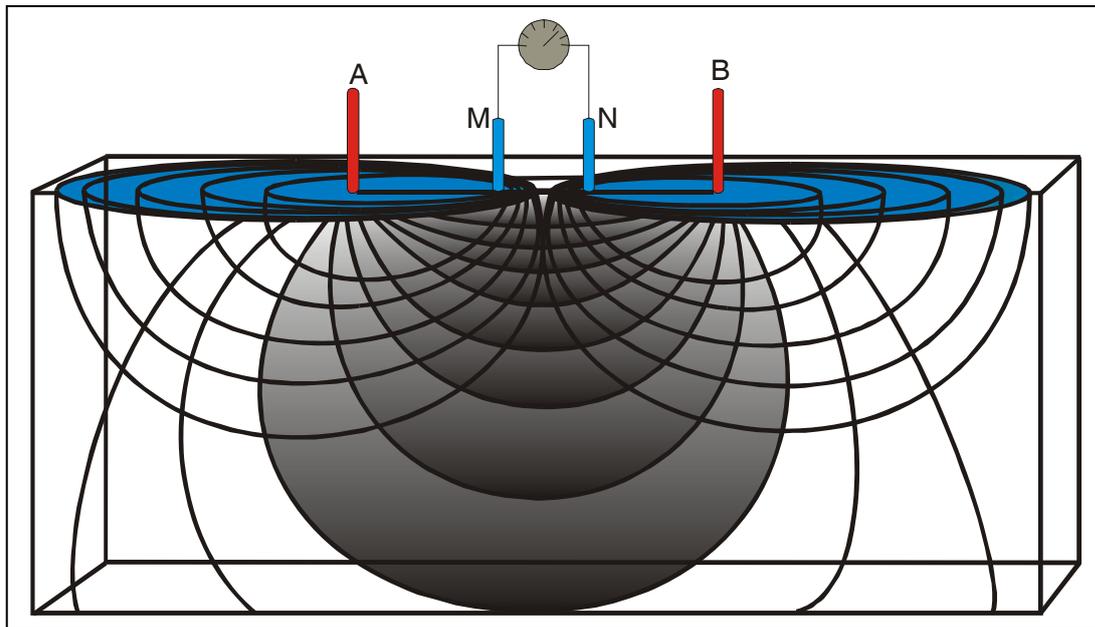


Figura B.2- Arranjo *Schlumberger* e a relação entre as linhas de corrente e as superfícies equipotenciais. A e B representam os eletrodos de injeção de corrente elétrica; M e N representam os eletrodos de medida do potencial (Modificado de Reynolds, 1997).

Para um terreno não-homogêneo e não-isotrópico, o valor calculado através da fórmula acima é chamado de resistividade aparente cuja unidade de medida é dada em Ohm.m.. Assim,

$$\rho_a = K \Delta V / I \quad \text{EQ-B.6}$$

– Aquisição dos Dados

O arranjo de eletrodos utilizado nas Sondagens Elétricas Verticais (SEV's) foi aquele proposto por Schlumberger e para o Caminhamento Elétrico (CE) foi aquele proposto por Wenner (Orellana, 1972). No caso das SEV's, o espaçamento dos eletrodos externos (A e B) é aumentado progressivamente, obtendo-se medidas cada vez mais profundas, num único ponto em profundidade.

O espaçamento dos eletrodos internos (M,N) é aumentado a cada vez que esta distância for 5 vezes menor do que a separação dos primeiros ($MN \leq AB/5$). Deste modo, é possível medir as variações de resistividade com o aumento da profundidade de investigação.

Utilizando AB máximo de 400m foram executadas 50 SEV's na área de estudo. Cada sondagem consistiu de 22 leituras com o equipamento PER-80 (DPM-Engenharia) de fabricação nacional.

– Interpretação dos Dados

Uma vez que a resistividade aparente medida em campo não é uma propriedade física da subsuperfície, é necessário utilizar técnicas de interpretação que transforme os valores obtidos pelas sondagens verticais em resistividade “real”. As curvas de campo das SEV's foram interpretadas através da seguinte metodologia:

1. Inicialmente os dados de campo foram processados através do *software* ATO versão 1.82 (Zohdy & Bisdorf, 1989) onde, basicamente, cada ponto de medida é considerado como uma camada geométrica distinta com dois parâmetros associados, resistividade e espessura;
2. A segunda etapa consiste em agrupar camadas que possuem comportamento geométrico semelhantes, utilizando as informações geológicas locais disponíveis;
3. Após as etapas 1 e 2, os dados são novamente processados (invertidos) no *software* RESIST versão 1.0 (Vander Velpen, 1988), com a introdução de um modelo inicial de n-camadas com suas respectivas, resistividades e espessuras, obtido da primeira etapa de interpretação.

O método de inversão, segundo Ward (1990), consiste em calcular uma curva teórica e compará-la com a curva de campo. A comparação é feita, utilizando a técnica de mínimos-quadrados, entre os valores observados de ρ_a versus $AB/2$ (curva de campo) e os valores calculados de ρ_a devido a um arranjo geométrico determinado de 4 eletrodos sobre n-camadas (curva teórica). Este método possibilita que a cada tentativa de comparação, o erro convirja para valores menores até um limite aceitável, geralmente menor que 5%.

A Tabela B.1 apresenta os dados de resistividade elétrica aparente (R), a espessura (Camada), e a profundidade da base de cada camada geométrica (base), resultante do processamento executado com os dados de campo.

SEV	UTM-E	UTM-N	camada1 (m)	camada2 (m)	camada3 (m)	base1 (m)	base2 (m)	base3 (m)	R1 (ohm.m)	R2 (ohm.m)	R3 (ohm.m)	R4 (ohm.m)
NORD_01	539335	9588420	1.5	5	15	1.5	6.5	21.5	600	80	170	15
NORD_02	535557	9589855	1	6	30	1	7	37	100	430	10	200
NORD_03	532576	9591295	1.6	5.2	25	1.6	6.8	31.8	1400	140	11	160
NORD_04	529972	9593987	3.1	15	0	3.1	18.1	18.1	200	14	120	0
NORD_05	527313	9596485	3.2	7.1	22	3.2	10.3	32.3	700	120	11	110
NORD_06	521177	9595988	1.4	4	0	1.4	5.4	5.4	800	20	650	0
NORD_07	515765	9600307	1.5	3.2	10.5	1.5	4.7	15.2	4000	380	700	70
NORD_08	513541	9602563	2	10	42	2	12	54	1000	1600	30	200
NORD_09	508530	9601429	1.3	18	0	1.3	19.3	19.3	120	7	200	0
NORD_10	504953	9601668	1.3	13	0	1.3	14.3	14.3	52	3	44	0
NORD_11	501156	9602983	2	9	0	2	11	11	340	7.5	260	0
NORD_12	495796	9606019	1.9	12	0	1.9	13.9	13.9	18	50	520	0
NORD_13	492191	9609763	7	100	0	7	107	107	3000	30	90	0
NORD_14	520177	9597497	1	16	45	1	17	62	1700	1000	100	700
NORD_15	522977	9595531	4.5	8	0	4.5	12.5	12.5	110	45	200	0
NORD_16	524773	9596485	3.3	12	0	3.3	15.3	15.3	300	10	300	0
NORD_17	521601	9597703	1.6	7	0	1.6	8.6	8.6	400	7	200	0
NORD_18	522185	9599556	11	0	32	11	43	43	3200	60	640	0
NORD_19	523772	9604434	1.3	11	25	1.3	12.3	37.3	190	700	58	90
NORD_20n	519969	9599932	10	0	40	10	10	50	900	28	350	0
NORD_21n	520257	9601837	2.8	7	38	2.8	9.8	47.8	3500	1800	65	300
NORD_22	519164	9604534	2.5	13	38	2.5	15.5	53.5	380	1500	140	570
NORD_23	526058	9599235	2	13	60	2	15	75	500	1800	70	460
NORD_24	518325	9604805	1	7	32	1	8	40	610	1200	50	220
NORD_25	526173	9597242	0.7	6.1	23.2	0.7	6.8	30	325	1100	20.5	365
NORD_26	528042	9597667	0.9	5.6	22.5	0.9	6.5	29	99.5	250	20	385
NORD_27	528718	9599692	1.1	1.4	23	1.1	2.5	25.5	1400	150	7	150
NORD_28	525920	9598996	1	3.9	2.1	1	4.9	7	1200	2000	250	15
SEV_29	524832	9599097	1.2	7.9	35	1.2	9.1	44.1	425	1700	120	480
SEV_30n	523745	9599198	2	5	23	2	7	30	6000	300	830	250
NORD_31n	520290	9602042	10	0	0	10	10	10	1000	850	1250	65
SEV_32	518870	9603415	1.1	6.9	18	1.1	8	26	18000	230	20	300
NORD_33n	520012	9600704	13	0	0	13	13	13	256	500	300	20
NORD_34	520958	9598106	1.1	5	23	1.1	6.1	29.1	370	280	50	450
NORD_35	520677	9597591	0.8	2.3	7.3	0.8	3.1	10.4	400	110	390	60

NORD_36	520855	9597847	1.2	2.6	23.8	1.2	3.8	27.6	900	350	42	1200
NORD_37	521047	9596992	1.2	5.5	25	1.2	6.7	31.7	330	125	20	450
NORD_38	521047	9597457	3.3	10	23	3.3	13.3	36.3	100	35	50	220
NORD_39	521066	9597821	1.7	7.8	0	1.7	9.5	9.5	40	8	145	0
NORD_40	521491	9597600	0.9	5	0	0.9	5.9	5.9	68	4.5	94	0
NORD_41	521377	9597107	3	9	0	3	12	12	130	30	300	0
NORD_42	520587	9597679	0.9	9	19	0.9	9.9	28.9	365	340	40	300
NORD_43	540388	9591976	1.4	5.2	38.4	1.4	6.6	45	47	76	5.4	30.5
NORD_44	488805	9601630	2.1	18.9	0	2.1	21	21	472	59	173	0
NORD_45	490908	9606629	1.5	3	25.4	1.5	4.5	29.9	3700	260	35	260
NORD_46	493121	9614660	6.8	24.5	0	6.8	31.3	31.3	1880	13	255	0
NORD_47	496276	9614421	3.2	28	0	3.2	31.2	31.2	432	10	156	0
NORD_48	497550	9613270	5	30	75	5	35	110	1500	15	50	17.5
NORD_49	502923	9611463	1	6.8	67.7	1	7.8	75.5	1980	1050	15	77.5
NORD_50	505548	9609519	1.1	10	63	1.1	11.1	74.1	540	2000	60	135
NORD_51	509051	9607582	2.3	8.5	39	2.3	10.8	49.8	9132	305	26	285
NORD_52	538247	9592851	1.7	3.7	21	1.7	5.4	26.4	630	117	5	100
NORD_53	535910	9594504	1.1	6	15.5	1.1	7.1	22.6	1220	100	15	135
NORD_54	533782	9596645	1.2	7	30	1.2	8.2	38.2	3400	130	60	270
NORD_55	531001	9598418	0.9	3.2	24	0.9	4.1	28.1	3650	115	25	175
NORD_56	519439	9606930	2.5	9.5	26	2.5	12	38	2400	160	15	260
NORD_57	515152	9607081	2.1	5	24	2.1	7.1	31.1	2500	470	20	260
SEV_58	512085	9607521	1.6	9.5	47	1.6	11.1	58.1	5450	600	40	70
NORD_59	510978	9607718	1.6	9.5	44	1.6	11.1	55.1	9100	600	75	20
NORD_60	538553	9588022	1.5	5.5	24	1.5	7	31	715	210	8.5	63
SEV_61	539368	9590525	2	11.5	0	2	13.5	13.5	100	7	3	0
NORD_62	540064	9591734	1.2	7.3	0	1.2	8.5	8.5	0.2	0.6	13	0
NORD_63	539838	9589048	4.9	17.7	0	4.9	22.6	22.6	113	5	120	0
NORD_64	496596	9620607	2.3	13.7	54	2.3	16	70	2015	950	15	150
NORD_65	500878	9618947	1.6	9.4	64	1.6	11	75	7100	345	13	83
NORD_66	503216	9618413	1.1	7.3	16	1.1	8.4	24.4	4900	2500	160	25
NORD_67	537759	9589703	4	6	28	4	10	38	210	123	20	280
SEV_68	520350	9596210	0.7	2.6	0	0.7	3.3	3.3	500	7	100	0
NORD_69	510865	9601095	0.7	1.2	11	0.7	1.9	12.9	1200	250	10	50
NORD_70	510730	9599170	1.7	5.5	12	1.7	7.2	19.2	2200	290	35	140
NORD_71	521521	9602455	0.5	6.5	30	0.5	7	37	717	2000	60	190
NORD_72	537355	9590821	0.7	7	10.5	0.7	7.7	18.2	455	870	90	7
NORD_73	532047	9593292	1.1	7	23	1.1	8.1	31.1	235	140	8	250

NORD_74	532938	9594592	2	7	10	2	9	19	3250	4800	1200	20
NORD_75	537830	9591802	0.8	1.5	7.3	0.8	2.3	9.6	160	102	190	13
NORD_76	494453	9611796	5	16	70	5	21	91	4500	300	30	56
NORD_77	493744	9612952	7	10.5	33	7	17.5	50.5	4900	370	17	460
NORD_78	504533	9618140	6	13.5	60	6	19.5	79.5	2600	430	18	34
NORD_79	503258	9615830	3.5	15	50	3.5	18.5	68.5	13000	1000	25	110
NORD_80	504603	9614317	2	6.5	20	2	8.5	28.5	2500	1300	1800	40
NORD_81	495232	9618659	2.3	24	75	2.3	26.3	101.3	8100	290	15	53
NORD_82	494781	9616614	3.5	16	70	3.5	19.5	89.5	3500	150	15	185
NORD_83	493491	9608472	1.4	4.4	30	1.4	5.8	35.8	2500	10	150	100
NORD_84	511425	9603656	1.7	7.5	25	1.7	9.2	34.2	16000	750	11	150
NORD_85	509061	9603805	2	7	22.5	2	9	31.5	3600	280	12	60
NORD_86	507087	9605334	1	3.3	22	1	4.3	26.3	870	2000	80	1500
NORD_87	507030	9606860	2.2	7	22.5	2.2	9.2	31.7	6300	100	10	100
NORD_88	503451	9609046	1	6.5	30	1	7.5	37.5	2800	6500	20	210
NORD_89	501690	9607315	1.7	18	80	1.7	19.7	99.7	3200	25	41	35
SEV_90	502504	9603113	2.3	7	23	2.3	9.3	32.3	700	23	8	140
NORD_91	501474	9605899	1.1	3	7.5	1.1	4.1	11.6	1700	3000	240	12
NORD_92	517063	9599818	1.9	18	44	1.9	19.9	63.9	12000	1400	55	900
NORD_93	492182	9611965	1.6	5	16	1.6	6.6	22.6	23000	1700	160	25
NORD_94	493954	9607859	3.2	21	0	3.2	24.2	24.2	840	70	115	0
NORD_95	512415	9605623	1.7	8	37	1.7	9.7	46.7	44000	1200	45	290
NORD_96n	509444	9612771	8	0	31	8	8	39	4000	200	20	10
NORD_97	525805	9601272	1.6	6	27	1.6	7.6	34.6	8150	200	40	570
NORD_98	534743	9595702	2	20	0	2	22	22	115	9	165	0
NORD_99	539480	9592071	1.7	5	12	1.7	6.7	18.7	510	45	3	40
SEV_100	523608	9604604	1.2	6.7	29	244	7.9	36.9	1300	450	45	85
SEV_101	520907	9597258	3	7	23	3	10	33	440	250	22	140
NORD_102	525458	9601618	1.2	6.8	30	1.2	8	38	3160	130	13	450
NORD_103	524060	9601640	1.7	6.3	17	1.7	8	25	4110	280	25	400
NORD_104	524020	9603578	1.7	6.3	13	1.7	8	21	5350	800	145	780
NORD_105	523161	9601325	1.1	6.2	27	1.1	7.3	34.3	1780	2500	26	750
NORD_106	522420	9596906	1.1	1.2	4.7	1.1	2.3	7	585	180	390	92
NORD_107	521937	9598831	2	0	11.5	2	13.5	13.5	4818	38	606	0
NORD_108	522464	9597411	1.4	0	12.1	1.4	13.5	13.5	491	40	542	0
NORD_109	522120	9600006	1.4	5.1	23.5	1.4	6.5	30	2530	4600	32	150
PEC_09n	520480	9606208	25	0	55	25	25	80	1862	418	27.7	0
PEC_08n	520409	9603406	15	0	38	15	15	53	6800	156.6	43.4	0

PEC_07	519888	9598447	11.5	10.1	0	11.5	21.6	21.6	0	610	48.2	0
PEC_10	519367	9597008	0	3.1	0	0	3.1	3.1	0	283.7	0	58.6
PEC_11	519376	9594165	0	1.1	10.7	0	1.1	11.8	0	345.8	5	36.4
PEC_5	527313	9596485	15	0	3.6	5.3	0	3.6	0	0	511.3	16
PEC_06	517933	9592284	17	0	1	0	0	1	0	0	212.4	16.6
PEC_04	514850	9592144	0	1.1	5.6	0	1.1	6.7	0	206.3	17.6	0
PEC_03	515913	9594685	0	0	1.6	0	0	1.6	0	0	79.6	7.7
PEC_02	516163	9597132	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68.7
PEC_01	517326	9602775	2.7	10.9	16.6	2.7	13.6	30.2	14351.7	672.7	35.4	0
PEC_211	510285	9612443	0.7	6	19	0.7	6.7	25.7	3700	250	33	11
PEC_213	521818	9606712	2	23	15	0	0	0	0	0	0	0
PEC_220	517809	9607958	2.5	9.5	26	0	0	0	0	0	0	0
PEC_214	514744	9610114	15	0	3.6	5.3	0	3.6	0	0	511.3	16
PEC_215	511477	9612443	6.8	24.5	0	6.8	31.3	31.3	1880	13	255	0

B2 - MÉTODO ELETROMAGNÉTICO

Os métodos de prospecção por campos eletromagnéticos variáveis podem ser utilizados tanto para estudar a variação das propriedades das rochas no sentido vertical como para investigações no sentido horizontal. O método eletromagnético é influenciado principalmente pelas variações, em subsuperfície, da condutividade dos materiais terrestres.

O principal objetivo do uso dessa técnica eletromagnética de indução é a caracterização da variação lateral de condutividade nos materiais em profundidade.

- Equações Básicas

Segundo McNeill (1990), o método eletromagnético indutivo é baseado na variação dos componentes e inclinação do vetor campo eletromagnético resultante, gerado por uma bobina transmissora e medido por uma bobina receptora.

Uma corrente elétrica alternada circulando por uma bobina transmissora (Tx), cria ao seu redor um campo eletromagnético indutivo alternado (campo magnético primário, H_p), que induz correntes elétricas secundárias no subsolo, sob o aparelho. Estas correntes secundárias (Ts) por sua vez geram um campo eletromagnético alternado (campo magnético secundário, H_s) que é proporcional à corrente induzida. Uma parte deste campo secundário induz corrente em uma bobina receptora (Rx), que é ligada à transmissora por meio de um cabo de referência, e produz um resultado que é proporcional à condutividade do subsolo (Mendes, 1987).

De maneira geral, admite-se que a relação entre os módulos dos dois campos seja dada por $H_s = K H_p$, onde K depende da frequência do campo (f), da permeabilidade magnética no vácuo (μ_0), do espaçamento entre as bobinas (L) e da condutividade do meio (σ) (Costa & Ferlin, 1992).

Os valores medidos representam os efeitos combinados das diferentes camadas, suas espessuras e condutividade, desde a superfície até a profundidade de alcance do aparelho.

A rapidez do método permite o aumento da densidade de medidas, possibilitando a delimitação mais precisa das camadas geoeletricas e possíveis zonas fraturadas/falhadas.

– Profundidade de Investigação e Profundidade de Penetração

A **profundidade de investigação** pode ser considerada, sem um erro apreciável, como dependente 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 cerca de 0,75 vez o espaçamento das bobinas. No modo dipolo vertical (DV), isto é, com o eixo da bobina na

horizontal, a profundidade de investigação é de cerca de 1,5 vez o espaçamento das bobinas. O EM34-3XL (Geonics, Ltd.), equipamento utilizado nesta pesquisa, permite três espaçamentos interbobinas: 10, 20 e 40 m. Assim, em condições ideais, é possível investigar profundidades de aproximadamente 7,5, 15 e 30m no modo DH e 15, 30 e 60 m no modo DV (Tabela B.1 e Figura B.3).

O modo dipolo vertical atinge 2 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 em um levantamento deste tipo 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, caso contrário tenderá a ser menor.

O método EM permite realizar sondagem e caminhamento eletromagnéticos, com procedimentos semelhantes ao método elétrico de corrente contínua (Mendes, 1987). Os dados são apresentados em mapa, traçando-se curvas de isocondutividade para as quatro profundidades de investigação e em perfis e/ou pseudo-seções verticais.

Tabela B.1 - Profundidades de penetração do EM34-3XL para diferentes espaçamentos interbobinas e frequência.

<i>Espaçamento interbobinas</i>	<i>Frequência</i>	<i>Profundidade modo DH</i>	<i>Profundidade modo DV</i>
10 metros	6400 Hz	7,5	15
20 metros	1600 Hz	15	30
40 metros	400 Hz	30	60

O equipamento utilizado permite obter a condutividade elétrica aparente do subsolo diretamente em mS/m (mili Siemens/metro). A função que indica a leitura direta no instrumento requer que o número de indução B satisfaça a seguinte condição (Goldstein *et al.*, 1990; Steward, 1990):

$$B = \omega \mu_0 \sigma_a L/2 \ll 1 \quad \text{EQ-B.7}$$

onde: σ_a = condutividade aparente do solo (S/m),

$$\omega = 2 \pi f,$$

f = frequência (s^{-1}),

μ_0 = permeabilidade do vácuo ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)

L = espaçamento entre as bobinas

Isto é conhecido como operação a “baixo número de indução” (Mcneill, 1980a), que garante uma *skin depth* (profundidade de investigação) sempre significativamente maior para cada espaçamento interbobinas, caso a frequência de operação seja baixa (Mcneill, 1990). Sob estas circunstâncias, a resposta do subsolo é a fase da componente EM quadratura do sinal recebido. Nos casos em que os valores de condutividade são moderados a baixos, a resposta é linearmente proporcional à condutividade do terreno, tal que a unidade de leitura do instrumento seja mS/m , mas para altas condutividades (da ordem de centenas de mS/m) a resposta não é linear (Mcneill, 1980a).

Para estas condições, a condutividade é diretamente proporcional à razão do campo magnético secundário pelo primário:

$$\sigma_a = 4 (H_s) / \omega \mu_0 l^2 (H_p) \quad \text{EQ-B.8}$$

onde: H_s = campo magnético secundário,

H_p = campo magnético primário.

Segundo Mcneill (1980b), a relação entre condutividade real e condutividade indicada não é linear em ambiente de alta condutividade. Quando os valores são superiores a 700 mS/m , a condutividade indicada com dipolo vertical tende a zero. Em terrenos onde a condutividade é muito baixa, a resposta do instrumento é também zero. Steward (1990) também descreve que a aproximação linear entre os valores reais e o indicado pelo equipamento é cada vez pior para valores de condutividade acima de 100 a 200 mS/m (ou abaixo de 5 a 10 Ohm.m) para dipolo horizontal, e acima de 60 a 70 mS/m (ou abaixo de 15 Ohm.m) para dipolo vertical (Figura B.3).

Figura B.3 - Modo de operação no campo do instrumento EM34-3 XL. À esquerda, bobina transmissora e à direita,



bobina receptora, ambas posicionadas em modo Dipolo Horizontal.

Neste trabalho, utilizaram-se os cabo de 40 e 20 metros, obtendo-se leituras a $7,5$, 15 , 30 e 60 metros de profundidade nos modos DH e DV. As leituras do espaçamento de 10 metros foram feitas com o cabo de 20 metros, no entanto, fez-se necessário adquirir dados em uma estação a cada dia de amostragem com o cabo de 10 metros de extensão para futuras correções. A diferença entre as leituras obtidas com o cabo de 20 m e de 10 m é descontada ou acrescentada nas demais estações do perfil adquirido posteriormente naquele dia. Este procedimento também foi feito com o cabo de 40 metros, reduzindo-o para 20 metros de distância interbobinas.

Com o objetivo de verificar o erro associado a este procedimento foi adquirido com o modo DH e DV com a distância interbobinas de 20 metros utilizando-se o cabo de 40 m e o cabo de 20 m . A Figura B.5 traz os resultados que habilitam o procedimento adotado.

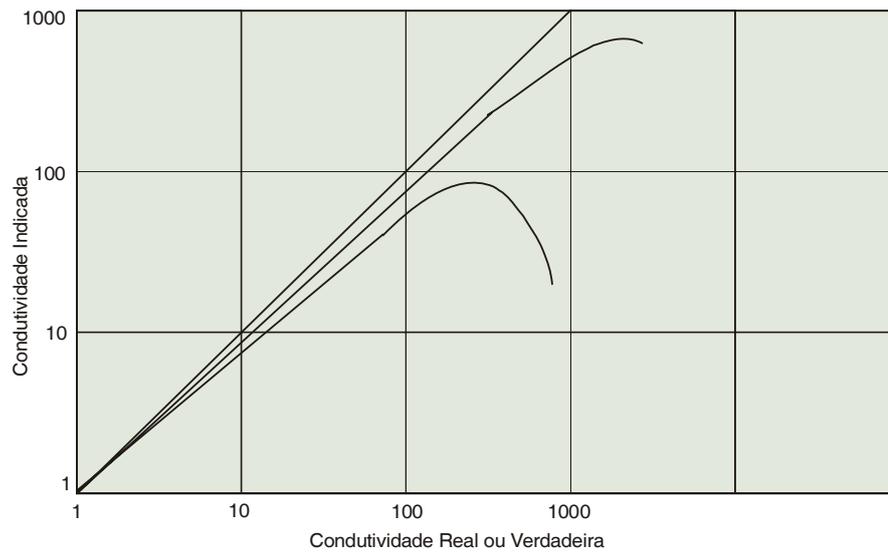


Figura B.4 - Relação entre condutividade verdadeira do solo e a condutividade medida para ambas as configurações (McNeill, 1980b).

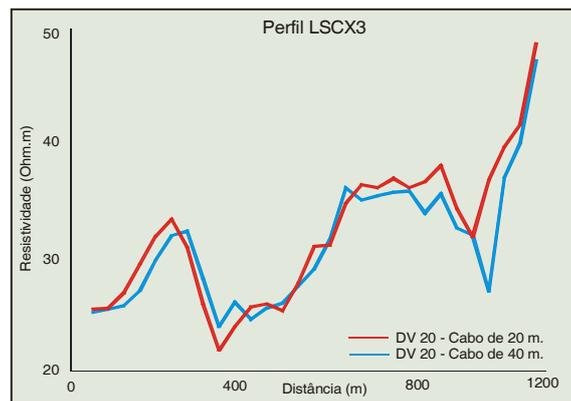


Figura B.5 - Relação entre leituras obtidas com os cabos de 40 e 20 metros para o modo DV20.

C1 - MÉTODOS ESPECÍFICOS (CAPÍTULO V)

C1.1 - CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Permeâmetro de Carga Variável

O procedimento de coleta e análise em laboratório foi realizado de acordo com as instruções normativas do Laboratório de Solos do Departamento de Transportes, da Universidade Federal do Ceará, local dos ensaios realizados.

Em campo o procedimento de coleta da amostra seguiu as seguintes etapas:

- ✓ Coleta de amostra, preservando da melhor forma possível a estrutura natural do material de estudo, utilizando um cilindro de metal.
- ✓ Nivelamento da superfície da amostra com as bordas do cilindro, retirando o excesso e vedando a amostra, tanto em cima quanto embaixo, com argila para sua melhor conservação.
- ✓ Identificação de cada amostra coletada em campo. No transporte da amostra para o laboratório deve-se ter o cuidado para a mesma não sofrer choques ou batidas.
- ✓ Em laboratório retira-se a Lama das extremidades da amostra, e aplica-se uma tela de nylon em sua extremidade inferior. Em seguida registra-se o diâmetro para o cálculo da área do corpo de prova e também a altura “L” a ser usada no cálculo da permeabilidade.
- ✓ Posteriormente a amostra é colocada no permeâmetro, preenchendo-se para ser saturada por água no período mínimo de 24 horas, deixando-se 1 cm da amostra aflorar acima do nível d' água (Figura C.1.1 – a e b).
- ✓ É importante vedar o espaço vazio entre o cilindro e a pedra porosa com um material argiloso, por exemplo, bentonita, para permitir que a água passe somente pela pedra porosa.
- ✓ Conecta-se ao permeâmetro, através de uma mangueira, um recipiente e enchendo-o com água. Entre a mangueira e o permeâmetro conecta-se uma torneira que irá regular a passagem da água assim que o nível d'água começar a baixar dentro do cilindro da amostra, fluindo imediatamente para o cilindro e mantendo-se assim o nível da água, ou a carga, do permeâmetro constante (Figura C.1.1c).
- ✓ Determina-se a altura da carga (Figura C.1.1d).
- ✓ Com auxílio de um cronômetro e uma bureta graduada coleta-se a água que percola pela amostra num determinado tempo. Anotando-se o volume coletado por um determinado tempo (Figura C.1.1d).

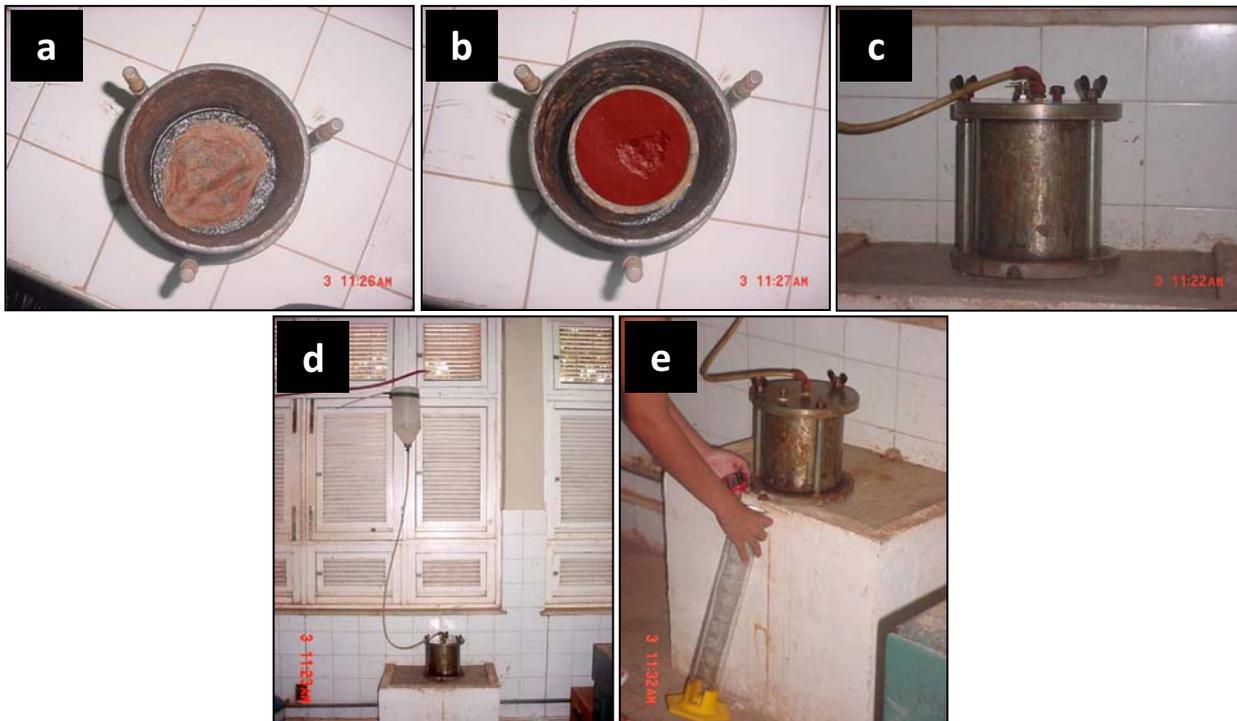


Figura C1.1 – Ensaio de Permeabilidade com o permeâmetro de carga variável para obtenção da condutividade hidráulica, **a** – visão de topo do permeâmetro, onde será colocado o corpo de prova, **b** – o corpo de prova já colocado, **c** – Permeâmetro fechado conectado a uma mangueira no topo para o fornecimento de água, **d** – visão geral do permeâmetro, **e** - processo de coleta d'água que passa pelo corpo de prova para mensuração do volume e do tempo gasto para atravessá-la.

C1.2 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A seguir, apresentam-se aspectos detalhados das etapas de preparação, análise e classificação que as amostras superficiais dos sedimentos terciários do Grupo Barreiras e as amostras oriundas da construção dos poços de monitoramento foram submetidas. Tal descrição é um resumo do método de análise granulométrica utilizado por Bezerra (2006).

As análises granulométricas que consistem de um processo mecânico que permite estabelecer uma expressão quantitativa da distribuição granulométrica de certos materiais foram realizadas no Laboratório de Oceanografia Abiótica do Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR/UFC).

Etapa 1

Preparação

- Secagem em estufa a 60°C para em seguida serem quarteadas e fracionadas em amostras de 100,0 g.

- Peneiramento úmido o qual separa a fração lama da arenosa (limites das classes = 0,062mm de diâmetro). Consequente, a amostra sofre o peneiramento mecânico separando-se as classes arenosas e cascalhos, frações de 0,062mm até 2,00mm, pois, cascalho tem frações com diâmetro superior a 2,00mm.

Etapa 2

- Cálculos estatísticos dos parâmetros granulométricos

Os parâmetros granulométricos são calculados a partir de dados gráficos obtidos das curvas acumulativas de distribuição e frequência elaborada na escala (ϕ), caracterizando a curva em relação a sua tendência central, grau de dispersão, grau de assimetria e grau de agudez dos picos. Estes valores avaliam a descrição dos sedimentos em termos de suas várias propriedades, incluindo a média e a mediana, obtendo-se ainda as medidas de tendência central, o grau de seleção, grau de assimetria e a curtose.

Etapa 3

- Interpretação dos resultados

A interpretação dos parâmetros de cada amostra permite classificar os sedimentos e tentar correlacioná-los de modo a inferir aspectos sobre a sua gênese, transporte e modo deposição.

Etapa 4

- Escalas granulométricas

No caso das análises granulométricas, existem várias escalas propostas apoiadas em critérios das propriedades físicas envolvidas no transporte de grãos, por exemplos, suspensão e tração. Além do sistema MESH adotado pela A.S.T.M. (*American Society Testing Materials*), a escala de Atterberg onde intervalos de classes foram baseados no valor unitário 2 mm dispostos numa divisão logarítmica sistemática de base 10, a escala de Wentworth que embora seja sistemática e logarítmica, é baseada na base 2 e, a escala de Krumbein que é correntemente utilizada apresenta a granulometria logaritmo negativo de base 2 ($\phi = -\log_2 d$) do diâmetro (d) dos grãos analisados. Com essa última escala a diferença entre materiais finos e grosseiros tende a ser realçada, pois, granulações mais finas têm valores de ϕ positivos e granulações mais grosseiras têm valores negativos.

Etapa 5

- Representação gráfica

Após as etapas anteriores os resultados são analisados inicialmente com o suporte gráfico de curvas de frequência simples e curvas de frequência acumulada.

Curvas de frequência simples

As curvas de frequência simples são equivalentes a curvas de contornos suaves desenhadas sobre os histogramas. Possuem formas senoidais mais ou menos definida e correspondente ao limite dos histogramas. Em uma curva de frequência simples podem ser rapidamente visualizadas: granulações com máxima ou mínima frequência, intervalos de diferentes distribuições das diferentes classes, parâmetros granulométricos de simetria da distribuição granulométrica, entre outros.

Curvas de frequência acumulada

As Curvas de frequência acumuladas ou também chamadas de curvas acumulativas fornecem uma boa visualização das distribuições granulométricas dos sedimentos, onde cada ponto da curva corresponde a uma determinada granulometria, as percentagens dos materiais mais grosseiros ou mais finos do que aquela granulometria podem ser rapidamente extraídas. O eixo das ordenadas representa os valores retidos e, ao longo do eixo das abscissas está representada a escala de frequência de 0 a 100%. Nesta pesquisa uma curva-padrão que exprime um intervalo onde se encaixam todos os sedimentos provenientes de dunas foi utilizada para plotar os resultados obtidos da área de pesquisa para efeito comparativo.

Etapa 5

- Análise estatística de dados granulométricos

Os parâmetros de análise estatística mais usado atualmente, são calculados com base nos dados extraídos graficamente de curvas acumulativas de distribuição de frequência das amostras de sedimentos analisados. Estes parâmetros são geralmente calculados com dados granulométricos na escala de ϕ de Krumbein e servem para caracterizar a curva no que se diz respeito a tendência central, grau de dispersão e grau de assimetria.

Classificação de Folk e Ward

A classificação de Folk e Ward (1957) In Suguio & Bigarella (1979) baseia-se na média, mediana, curtose e assimetria.

Para a Média (Mz), o valor é obtido de uma extensão de curva de frequência e tomado a partir de uma série de valores. Objetiva-se com isso refletir a média geral de tamanho dos sedimentos, sendo dada pela fórmula:

$$Mz = (\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}) / 3$$

ϕ_n = Diâmetro da peneira na qual n % do peso da amostra teria diâmetro superior (enésimo percentil);

A Mediana (Md) corresponde a uma medida de posição tomada no percentual de 50 % da curva acumulativa. A fórmula relativa à mediana é a seguinte:

$$Md = \phi_{50}$$

ϕ_{50} = Diâmetro da peneira na qual 50% do peso da amostra teria diâmetro superior;

A Curtose (Kg) é um parâmetro que define o grau de agudez dos picos nas curvas de distribuição de frequência. Para a curtose, tem-se:

$$Kg = (\phi_{95} - \phi_{05}) / (2.44 * (\phi_{75} - \phi_{25}))$$

ϕ_n = Diâmetro da peneira na qual n % do peso da amostra teria diâmetro superior;

Assimetria (Sk) determina a tendência da distribuição em afastar-se para forma simétrica, sendo determinado pela distância entre a média e a mediana. O cálculo da assimetria consiste em:

$$Sk = [(\phi_{16} + \phi_{84} - 2 * \phi_{50}) / (2 * (\phi_{84} - \phi_{16}))] + [(\phi_{05} + \phi_{95} - 2 * \phi_{50}) / (2 * (\phi_{95} - \phi_{05}))]$$

ϕ_n = Diâmetro da peneira na qual n % do peso da amostra teria diâmetro superior;

O Grau de Seleção (So) é um aspecto muito importante nas análises granulométricas dos sedimentos. O desvio-padrão pode ser usado como uma medida da dispersão. Em uma curva normal, cerca de 2/3 da amostra ficam situados dentro dos valores dados pelo desvio padrão. Desta forma Folk e Ward sugeriram para calcular o desvio padrão a fórmula:

$$So = [(\varphi_{84} - \varphi_{16}) / 4] + [(\varphi_{95} - \varphi_{05}) / 6.6]$$

φ_n = Diâmetro da peneira na qual n % do peso da amostra teria diâmetro superior;

Variável	Condição	Valor(es) crítico(s)	Classificação
Grau de Seleção	Seja menor ou igual a	0.35	Muito Pobrememente selecionado
Grau de Seleção	Esteja entre	0.35 e 0.5	bem selecionado
Grau de Seleção	Esteja entre	0.5 e 1.0	Moderadamente selecionado
Grau de Seleção	Esteja entre	1.0 e 2.0	Pobrememente selecionado
Grau de Seleção	Esteja entre	2.0 e 4.0	Muito Pobrememente selecionado
Grau de Seleção	Seja maior que	4.0	Extremamente mal selecionado

Etapa 6

- Classificação

A classificação pode ser feita pelo Grau de Seleção, Média ou Mediana.

Grau de Seleção

A classificação pelo grau de seleção testa uma seqüência de condições que levam até a obtenção de um valor de texto, como detalhado a seguir (Tabela C1):

Tabela C1 – Seqüência de procedimentos e Condições a serem satisfeitas para a classificação granulométrica pelo o Grau de Seleção.

Média

A classificação pela média segue a mesma lógica da anterior sendo de fácil programação (Tabela C2):

Tabela C2 – Sequência de procedimentos e Condições a serem satisfeitas para a classificação granulométrica com a Média.

Variável	Primeira condição	Valor	Segunda Condição	Valor	Classificação
Mediana	Maior que	9	Menor ou igual a	10	Argila Média
Mediana	Maior que	8	Menor ou igual a	9	Argila Grossa
Mediana	Maior que	7	Menor ou igual a	8	Silte Muito Fino
Mediana	Maior que	6	Menor ou igual a	7	Silte Fino
Mediana	Maior que	5	Menor ou igual a	6	Silte Médio
Mediana	Maior que	4	Menor ou igual a	5	Silte grosso
Mediana	Maior que	3	Menor ou igual a	4	Areia Muito Fina
Mediana	Maior que	2	Menor ou igual a	3	Areia Fina
Mediana	Maior que	1	Menor ou igual a	2	Areia Média
Mediana	Maior que	0	Menor ou igual a	1	Areia Grossa
Mediana	Maior que	-1	Menor ou igual a	0	Areia Muito Grossa
Mediana	Maior que	-2	Menor ou igual a	-1	Grânulo
Mediana	Maior que	-6	Menor ou igual a	-2	Seixo
Mediana	Maior que	-8	Menor ou igual a	-6	Calhau

Mediana

Seguindo o mesmo procedimento, temos (Tabela C3):

Tabela C3 – Sequência de procedimentos e Condições a serem satisfeitas para a classificação granulométrica com a Mediana.

Variável	Primeira condição	Valor	Segunda Condição	Valor	Classificação
Média	Maior que	9	Menor ou igual a	10	Argila Média
Média	Maior que	8	Menor ou igual a	9	Argila Grossa
Média	Maior que	7	Menor ou igual a	8	Silte Muito Fino
Média	Maior que	6	Menor ou igual a	7	Silte Fino
Média	Maior que	5	Menor ou igual a	6	Silte Médio
Média	Maior que	4	Menor ou igual a	5	Silte grosso
Média	Maior que	3	Menor ou igual a	4	Areia Muito Fina
Média	Maior que	2	Menor ou igual a	3	Areia Fina
Média	Maior que	1	Menor ou igual a	2	Areia Média
Média	Maior que	0	Menor ou igual a	1	Areia Grossa
Média	Maior que	-1	Menor ou igual a	0	Areia Muito Grossa
Média	Maior que	-2	Menor ou igual a	-1	Grânulo
Média	Maior que	-6	Menor ou igual a	-2	Seixo
Média	Maior que	-8	Menor ou igual a	-6	Calhau