UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

RECARGA DO AQÜÍFERO DUNAS/PALEODUNAS, FORTALEZA-CE

Sônia Maria Silva Vasconcelos

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Geologia Econômica e Hidrogeologia

São Paulo

1999

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

RECARGA DO AQÜÍFERO DUNAS/PALEODUNAS, FORTALEZA-CE

SÔNIA MARIA SILVA VASCONCELOS

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

TESE DE DOUTORAMENTO

Instituto de Geociências
BIBLIOTECA
T2768
U.S.P.

COMISSÃO JULGADORA

	Nome	Assinatura
Presidente:	Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças	
Examinadores:	Prof. Dr. Hélio Nóbile Diniz	
	Prof. Dr. João Manoel Filho	
	Prof. Dr. Osmar Sinelli	
	Prof. Dr. Uriel Duarte	

SÃO PAULO
1999

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC
30900005909

RECARGA DO AQÜÍFERO DUNAS/PALEODUNAS, FORTALEZA-CE

Instituto de Geociências
BIBLIOTECA
T2768
U. S. P.

Sônia Maria Silva Vasconcelos

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Geologia Econômica e Hidrogeologia

São Paulo

1999

Dedicatória:

À meu marido Maurílio e a meus filhos

Soraia, Lorena e Reno.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que me concedeu a graça de concluir este trabalho.

Agradeço aos professores funcionários e colegas do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo e aos colegas do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará.

Agradeço às instituições abaixo relacionadas pela contribuição à realização deste trabalho:

Fundação de Meteorologia e Recursos Hídricos do Ceará - FUNCEME.

Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará - CAGECE.

Fundação Banco do Brasil.

Agradeço à imprescindível colaboração dos colegas: Francisco Lopes Viana, Antonio Ribeiro Zaranza, Maria Amélia Menezes e Horst Frishkorn.

Agradeço, pela confiança e valiosa contribuição oferecida, ao Dr. Francisco José Moura Cavalcante (SEDURB – Secretaria de Desenvolvimento Urbano do Ceará) e à Dra. Vera Lúcia Feijão (IPLAM –Instituto de Planejamento do Município de Fortaleza).

Agradecimentos especiais ao Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças e à Profa. Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago.

Finalmente, peço desculpas por alguma possível omissão, mas manifesto os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização do presente trabalho.

RESUMO

O estudo foi realizado em uma área situada na porção nordeste do município de Fortaleza, Ceará, Brasil. Foram utilizados os métodos do balanço hídrico para avaliar a infiltração eficaz, e da medida direta da variação do nível potenciométrico para determinar a recarga direta. Estes métodos foram aplicados usando dados de temperatura, de precipitação medidos em um ponto de observação, através de um pluviômetro, e dados de monitoramento de nível estático em seis poços de observação. Foram monitoradas as características físico-químicas da água subterrânea para observar variações ocasionadas pelo aporte da recarga direta.

O regime climático da área é marcado por um período seco, de julho a dezembro, e um úmido, de janeiro a junho. A precipitação anual média é cerca de 1500 mm com temperaturas médias mensais variando entre 26,1 e 27,5°C.

O sistema aqüífero é constituído por sedimentos quaternários: dunas, paleodunas e aluviões, considerados como um sistema único para efeitos de regionalização da estimativa de recarga. Este aqüífero, que se estende por toda a faixa litorânea do município de Fortaleza, assume uma importância estratégica, tendo em vista que o abastecimento da cidade é realizado por reservatórios de água superficial cujo potencial fica comprometido por freqüentes ocorrências de anos com baixo índice de precipitação.

A recarga direta calculada no ponto de observação a partir da variação potenciométrica para os anos de 1996 e 1997 foi respectivamente 10% e 16% da infiltração eficaz, determinada pelo balanço hídrico. No ano de 1998, que teve precipitação muito abaixo da média, a recarga excedeu o valor da infiltração eficaz.

As características físico-químicas mostraram a existência de um aumento de salinidade do topo para a base do aqüífero. Com a recarga há uma tendência de uniformização com a redução de salinidade das águas mais profundas.

Foi utilizado o critério L para o cálculo da recarga total, considerando o zoneamento da superfície potenciométrica, chegando-se aos volumes de 6,59 Mm^3; 4,04 Mm^3 e 1,20 Mm^3 respectivamente para os anos de 1996, 1997 e 1998 quando a infiltração eficaz foi de 17,51Mm^3, 6,84 Mm^3 e 0,18 Mm^3.

ABSTRACT

In an area located in the northeastern part of the Municipality of Fortaleza / Ceará – Brazil, we used the water balance for determining effective infiltration and water level observations for the determination of direct recharge. Data use compose temperature, precipitation and water level form six observations wells. Physical-chemistry of the pound waters was monitored in order to detect changes through recharge.

Climatic conditions are characterized by a dry period, from July to December, and a rainy season from January to June. Mean annual precipitation is about 1500 mm monthly medium temperatures varying between 26,1 and 27,5°C.

The aquifer system is constituted by quaternary sediments: dunes, paleo-dunes and alluviums, considered as an only system for effects of regionalization of the recharge estimate. This system, that extends to all coastal line of Fortaleza, assumes a strategic importance during periods of drought when surface reservoirs that supply water to the city are falling dry.

Direct recharge calculated for the observation point from piezometric data for 1996 and 1997 amounts 10% and 16% of the effective infiltration determined through the water balance. In 1998, a year with very reduced rainfall, recharge surpassed effective infiltration.

Physical-chemistries parameters increasing salinity with depth. Recharge causes a slight mixing that reduces the salt concentration in the deep waters.

The criterion L was used for the calculation of the total recharge over all the potentiometric surface: 6,59 Mm^3; 4,04 Mm^3 and 1,20 Mm^3 respectively for the years 1996, 1997 and 1998. Effective infiltration for the same years was 17,51 Mm^3; 6,84 Mm^3 and 0,18 Mm^3.

ÍNDICE

RESUMO i

ABSTRACT ii

ÍNDICE iii

ÍNDICE DE FIGURAS v

ÍNDICE DE TABELAS vii

1. INTRODUÇÃO 1

2. ÁREA DE ESTUDO E DADOS DISPONÍVEIS 5

2.1. Localização 5

2.2. Aspectos climáticos 5

2.3. Contexto geológico 7

2.4. Contexto hidrogeológico 10

2.5. Hidroquímica 16

2.6. Dados geofísicos 16

3. RECARGA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA: REVISÃO COMENTADA 20

3.1. Visão conceitual 20

3.2. Métodos de estimativa de recarga 22

3.3. Método do balanço hídrico 23

3.4. Método da variação do nível potenciométrico 26

3.5. Princípios do uso combinado dos métodos do balanço hídrico e da variação do nível potenciométrico 29

3.6. Regionalização da recarga subterrânea 31

4. METODOLOGIA 35

4.1. Considerações gerais 35

4.2. Levantamento de dados 36

4.3. Tratamento dos dados disponíveis 37

4.3.1 Mapa potenciométrico 37

4.3.2 Parâmetros Hidrodinâmicos do Aqüífero 39

4.3.3 Caracterização Hidroquímica 42

4.4. Monitoramento 42

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 44
5.1. Características gerais da área 44
5.2. Caracterização hidrodinâmica 47
5.3. Caracterização hidroquímica 51
5.4. Determinação da infiltração total pelo balanço hídrico 58
5.5. Resultados do monitoramento do sistema subterrâneo 59
5.6. Observações sobre as características físico-químicas 69
5.7. Concentração isotópica 80
6. AVALIAÇÃO DA RECARGA 83
6.1. Estimativa da infiltração eficaz 83
6.2. Estimativa da recarga 85
6.3. Análise comparativa 86
6.4. Regionalização da recarga 87
6.5. Avaliação da recarga direta total 88
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS 93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 96

ANEXOS:
ANEXO 1 - POÇOS CADASTRADOS
ANEXO 2 - PERFÍS LITOLÓGICOS
ANEXO 3 - GRÁFICOS DE SOLUÇÃO PRODUZIDOS PELO *AQUIFER TEST*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Localização da área. 6
Figura 2.2 - Precipitações e temperaturas médias mensais referentes ao período de 1974 a 1994. 7
Figura 2.3 - Totais anuais de precipitação referentes ao período de 1974 a 1994. 7
Figura 2.4 - Mapa geológico do Município de Fortaleza. 8
Figura 2.5 - Posicionamento esquemático das áreas já exploradas pela CAGECE. 13
Figura 4.1 - Localização dos poços cadastrados. 38
Figura 5.1 - Curva granulométrica representativa do sistema dunas/ paleodunas. 44
Figura 5.2 - Aspecto do relevo. 45
Figura 5.3 - Mapa potenciométrico. 46
Figura 5.4 - Histograma de "transmissividades". 51
Figura 5.5 - Classificação hidroquímica das águas subterrâneas na área 3, Parque do Cocó, segundo o diagrama de Piper. 56
Figura 5.6 - Classificação hidroquímica das águas subterrâneas na área 1, Praia do Futuro, segundo o diagrama de Piper. 57
Figura 5.7 - Precipitação e níveis estáticos dos poços observados. 62
Figura 5.8 - Correlação entre precipitação e variação potenciométrica. 65
Figura 5.9 - Gráfico infiltração total *versus* variação potenciométrica. 67
Figura 5.10 - Precipitação total mensal e concentrações iônicas e de $CaCO_3$ na água bombeada, de 09/95 a 09/96. 72
Figura 5.11 - Precipitação total mensal e concentrações iônicas e de $CaCO_3$ na água do poço surgente, de 09/95 a 09/96. 73
Figura 5.12 - Precipitação total mensal e sólidos totais dissolvidos, no período de 09/95 a 09/96. 74
Figura 5.13 - Precipitação total mensal e condutividade elétrica, pH e

oxigênio consumido para água de poço surgente, no período de 09/95 a 09/96. 76

Figura 5.14 - Precipitação total mensal e condutividade elétrica, pH e oxigênio consumido para água bombeada, no período de 09/95 a 09/96. 77

Figura 5.15 - Medidas *in situ* de condutividade elétrica, pH e oxigênio dissolvido para água bombeada. 79

Figura 5.16 - Medidas *in situ* de condutividade elétrica, pH e oxigênio dissolvido para água do poço surgente. 79

Figura 5.18 - Precipitação mensal em 1997 e concentrações de ^{18}O. 82

Figura 6.1 - Zoneamento de áreas para avaliação da recarga. 90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Espessura saturada das dunas. 14
Tabela 2.2 - Resumo das características do aqüífero dunas/paleodunas determinadas para o Parque do Cocó, em trabalhos anteriores. 16
Tabela 2.3 - Características dos horizontes determinados por eletrorresistividade na campanha desenvolvida no campo de dunas da Praia do Futuro, curvas da família I . 17
Tabela 2.4 - Características dos horizontes determinados por eletrorresistividade na campanha desenvolvida ao longo do canal do Rio Cocó, área de salinas, curvas da família II. 18
Tabela 3.1 - Infiltrações obtidas para diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração real. 26
Tabela 4.1 - Rebaixamento residual de testes em poços do Parque do Cocó, área 3. 40
Tabela 4.2 - Rebaixamento residual de testes em poços da Praia do Futuro, área 1. 41
Tabela 5.1 - Características do aqüífero dunas/paleodunas determinadas para a área do Parque do Cocó. 48
Tabela 5.2 - Características do aqüífero dunas/paleodunas determinadas para a área da Praia do Futuro. 49
Tabela 5.3 – Transmissividades determinadas para a área da Cidade 2000, área 2. 50
Tabela 5.4 - Análises físico-químicas das águas do Parque do Cocó, área 3. 52
Tabela 5.5 - Análises físico-químicas das águas da Praia do Futuro, área 1. 53
Tabela 5.6 - Percentuais iônicos e erro nas águas de poços do Parque do Cocó. 54
Tabela 5.7 - Percentuais iônicos e erro nas águas de poços da Praia do Futuro. 54
Tabela 5.8 - Planilha de determinação da infiltração total (a) 1996, 58

(b) 1997 e (c) 1998. 59
Tabela 5.9 - Precipitação total mensal medida de 08/95 a 08/98. 60
Tabela 5.10 - Medidas de nível estático nos poços de observação. 61
Tabela 5.11 - Precipitação e variação do nível potenciométrico correspondentes ao mesmo intervalo de tempo. 64
Tabela 5.12 - Valores de P_o e dos coeficientes de correlação das retas de regressão apresentadas na figura 5.8. 66
Tabela 5.13 - Variação de potencial hidráulico registrado nos ramos de recessão de nível d'água. 67
Tabela 5.14 - Medidas *in situ* na água bombeada e na água de poço surgente. 69
Tabela 5.15 - Análises físico-químicas. a) Água bombeada e b) Água do poço surgente. 70
Tabela 5.16 – Erros calculados para as análises químicas. 71
Tabela 5.17 – Dados físico-químicos do Rio Cocó no período entre 21/02/90 e 21/05/91. 75
Tabela 5.18 - Precipitação total mensal e concentrações isotópicas das amostras coletadas. 81
Tabela 6.1 - Planilha de determinação da infiltração eficaz a) 1996, b) 1997 e 84
c) 1998. 85
Tabela 6.2 - Planilha de avaliação da recarga direta para uma área unitária no Parque do Cocó. 86
Tabela 6.3 – Valores calculados para infiltração eficaz e recarga. 86
Tabela 6.4 – Planilha de avaliação da recarga nas áreas 1 e 2, usando o critério L. 88
Tabela 6.5 – Valores estimados para a recarga direta, e valores de variação potenciométricas previstos para as regiões de potenciais hidráulicos: 5, 15 e 25 a) 1996, b) 1997 e c) 1998. 91

1. INTRODUÇÃO

O município de Fortaleza, por estar situado em uma região onde a irregularidade de precipitações é uma constante, apresenta alta vulnerabilidade a problemas de abastecimento de água que tendem a se agravar, progressivamente, com o natural crescimento demográfico da cidade.

O abastecimento d'água de Fortaleza é feito a partir de represamento de rios cuja vazão fica seriamente comprometida nos anos de escassez de chuva, provocando uma intensa procura de água subterrânea num processo desenfreado de perfuração de poços.

A região metropolitana de Fortaleza tem um considerável potencial de água subterrânea representado por dunas que cobrem uma superfície de 131,4 km^2 numa extensão de 70,5 km ao longo da costa e por paleodunas que cobrem uma superfície de 194,7 km^2. Para a unidade hidrogeológica constituída por dunas e paleodunas, cuja espessura saturada varia entre 5 e 10 m, foi avaliada uma reserva explotável de 55 x 10^6 m^3/ano. Em 1984, esta reserva correspondia a 47% da demanda humana de toda a região metropolitana de Fortaleza (Bianchi et al.,1984).

Esta unidade representa o mais importante manancial subterrâneo da região metropolitana de Fortaleza e exerce uma função estratégica, segundo conceituação de Rebouças (1996), constituindo-se em uma importante alternativa para complementar o abastecimento de água em situações de crise.

No ano de 1993, uma grave crise no abastecimento d'água da cidade teve como conseqüência natural uma grande procura de água subterrânea através da perfuração de poços profundos. Diante desta crescente solicitação, surgiu a preocupação com a possibilidade de comprometimento da potencialidade deste aqüífero, cujas dimensões são relativamente limitadas.

Neste contexto, surgiu a motivação para realizar uma pesquisa cujo objetivo principal é a investigação do comportamento de aqüíferos livres como elemento componente do ciclo hidrológico, com especial enfoque para a estimativa da recarga.

Sabe-se que a principal fonte de recarga de água subterrânea é a infiltração da parcela da precipitação que cai sobre o terreno, portanto, a reserva renovável está intimamente relacionada com as condições climáticas da região. Especialmente, os

aqüíferos livres com superfícies potenciométricas pouco profundas e pequena espessura saturada, como é o caso do aqüífero dunas/paleodunas de Fortaleza, estão extremamente vulneráveis a variações climáticas.

Embora a informação quantitativa sobre recarga seja geralmente crítica para otimização do modelamento e gerenciamento dos recursos de água subterrânea, nenhuma técnica de estimativa preferencial pode ainda ser identificada no espectro dos métodos disponíveis. Diferenças em fontes e processos de recarga significam que a aplicabilidade dos procedimentos disponíveis não é genérica para diferentes áreas, com implicações práticas significativas atreladas à insegurança associada a se os resultados obtidos em cada procedimento se aplicam a um ponto ou a uma área mais ampla (Lerner et al.,1990). Publicações tratando das questões de variabilidade espaço/tempo e regionalização colocam uma série de problemas ainda não resolvidos, identificando, claramente, uma frente de grande interesse para pesquisas, cujos resultados serão de grande aplicabilidade na análise de procedimentos propostos para solução de problemas de cidades desenvolvidas, tais como, reuso de águas, preservação e explotação de recursos hídricos subterrâneos.

De forma geral, para a explotação de um reservatório de água subterrânea é necessário o conhecimento do sistema aqüífero no que se refere a suas características geométricas e hidrodinâmicas, visando o dimensionamento de suas reservas e o planejamento da explotação. Em aqüíferos livres e de capacidade de armazenamento limitada devido à sua pequena espessura, como é o caso do aqüífero dunas/paleodunas em Fortaleza, o conhecimento da reserva reguladora ou renovável (recarga) é de extrema importância pois dela vai depender a definição de sua real potencialidade.

A infiltração da água da chuva tem influência tanto na quantidade quanto na qualidade da água subterrânea, portanto, a estimativa da quantidade de infiltração (recarga) é essencial para a gestão de aqüíferos, especialmente, aqueles que exercem função estratégica por estarem em regiões vulneráveis a problemas de abastecimento e de preservação destes recursos.

Pesquisas anteriores sobre infiltração da água de precipitação estão concentradas, principalmente, em duas áreas:

- estudo dos mecanismos de infiltração e processos de recarga usando experimentos, soluções analíticas e simulações numéricas;

- investigações das relações precipitação-recarga usando dados do regime de água subterrânea (Venetis, 1971; Viswanathan, 1983, 1984).

No primeiro caso, a precisão dos resultados pode ser maior, porém há uma exigência de dados, nem sempre disponíveis. O segundo método é apropriado especialmente para aqüíferos livres rasos, onde há uma estreita correspondência entre eventos de chuva e flutuações do nível hidrostático (Wu et al., 1996).

Uma outra possibilidade para obtenção da infiltração, é uma forma indireta, onde se utiliza a curva de recessão do hidrograma de rios da região, ao nível do fluxo de base. No caso específico de Fortaleza, este procedimento torna-se inviável devido à ausência de postos hidrométricos na região urbana.

A idéia da presente pesquisa está baseada na proposta de utilização de metodologia simples, aplicável às condições de baixa disponibilidade de dados, para a quantificação da recarga de um sistema de dunas/paleodunas. Neste caso, quando há insuficiência de dados, o método do balanço hídrico, apesar de todas as suas limitações, é o que tem sido amplamente utilizado para uma primeira avaliação. Na tentativa de minimizar as já conhecidas limitações deste método, a observação de variações do nível potenciométrico oferece a possibilidade de propor ajustes no modelo adotado para utilização do método do balanço hídrico, permitindo uma estimativa de recarga plenamente utilizável a nível de planejamento e gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Os objetivos propostos para esta pesquisa podem ser assim enumerados:

1. Obter parâmetros representativos para a caracterização do sistema aqüífero estudado.

2. Obter quantificação da recarga direta do aqüífero, utilizando os métodos do balanço hídrico e da medida direta da variação do nível de água em um ponto de observação.

3. Utilizar esta quantificação para estimar a recarga direta em uma área maior.

4. Observar as variações físico-químicas devidas à recarga.

A partir do monitoramento de precipitação e níveis de água em poços, foi feita uma análise do comportamento do aqüífero em um ponto de observação, incluindo a observação de variações nas características físico-químicas da água, visando a proposição de uma metodologia para estimativa de recarga utilizável em condições de baixa disponibilidade de dados.

Para esse estudo, foi escolhida uma parte da área do aqüífero dunas/paleodunas, no município de Fortaleza, Ceará. A escolha desta área teve como base a necessidade de um melhor conhecimento da real potencialidade deste sistema aqüífero, considerando a sua função estratégica. E, nesse contexto, a obtenção da estimativa da recarga direta se constitui em elemento de grande importância, tendo em vista que esta região da cidade está sendo submetida a um processo de crescente urbanização. Além disso, esta área já foi objeto de estudos anteriores e, a existência dos poços e dos dados resultantes destes trabalhos anteriores foi fator determinante para tornar possível a realização desta pesquisa.

2. ÁREA DE ESTUDO E DADOS DISPONÍVEIS

2.1 - Localização

A área objeto da presente pesquisa está situada no município de Fortaleza, abrangendo uma extensão de 21 km^2, na porção nordeste do município, a norte do Rio Cocó (Figura 2.1). Tem como limite sul este rio, como limites norte e leste o oceano Atlântico e o limite oeste foi estabelecido na coordenada UTM de 557.000 m da zona 24 que tem como centro o meridiano de 39° a oeste do meridiano de Greenwich.

Trata-se de uma área já urbanizada, excetuando-se alguns trechos de dunas fixas e móveis que ainda resistem ao crescente processo de urbanização, e duas áreas de preservação delimitadas ao longo das margens do Rio Cocó (Parque do Cocó) e em torno da Lagoa do Papicú.

2.2 – Aspectos climáticos

O município de Fortaleza apresenta clima quente com regime de chuva distribuído em dois períodos bem definidos, um seco e outro chuvoso. Segundo Araújo e Leal (1990) usando dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, referentes ao período de 1974 a 1989, obtidos na Estação Meteorológica de Fortaleza, a precipitação média anual foi de 1.506,3 mm, sendo que, nos anos de 1983 e 1985, registraram-se respectivamente a menor (931,8 mm) e a maior (2841,3 mm) taxa de implúvio. A estação chuvosa tem início em janeiro, estendendo-se até meados de julho e, neste período, a precipitação ocorre entrecortada e de curta duração. A estação seca prolonga-se de julho até dezembro verificando-se, no mês de novembro, o registro do menor índice de precipitação. De acordo com a mesma fonte, a temperatura média anual em Fortaleza é de 26,8° C com médias mensais oscilando entre 27,5° C em dezembro e 26,1° C em julho, sendo a amplitude térmica de 1,4° C. A maior freqüência de temperaturas máximas situa-se entre 31 e 32°C (Brandão, 1995).

A figura 2.2 apresenta o comportamento dos totais médios mensais de precipitação e das temperaturas médias mensais para o município de Fortaleza,

utilizando dados da FUNCEME para um período de 20 anos, de 1974 a 1994, e a figura 2.3 apresenta os totais anuais para o mesmo período (Vasconcelos, 1996).

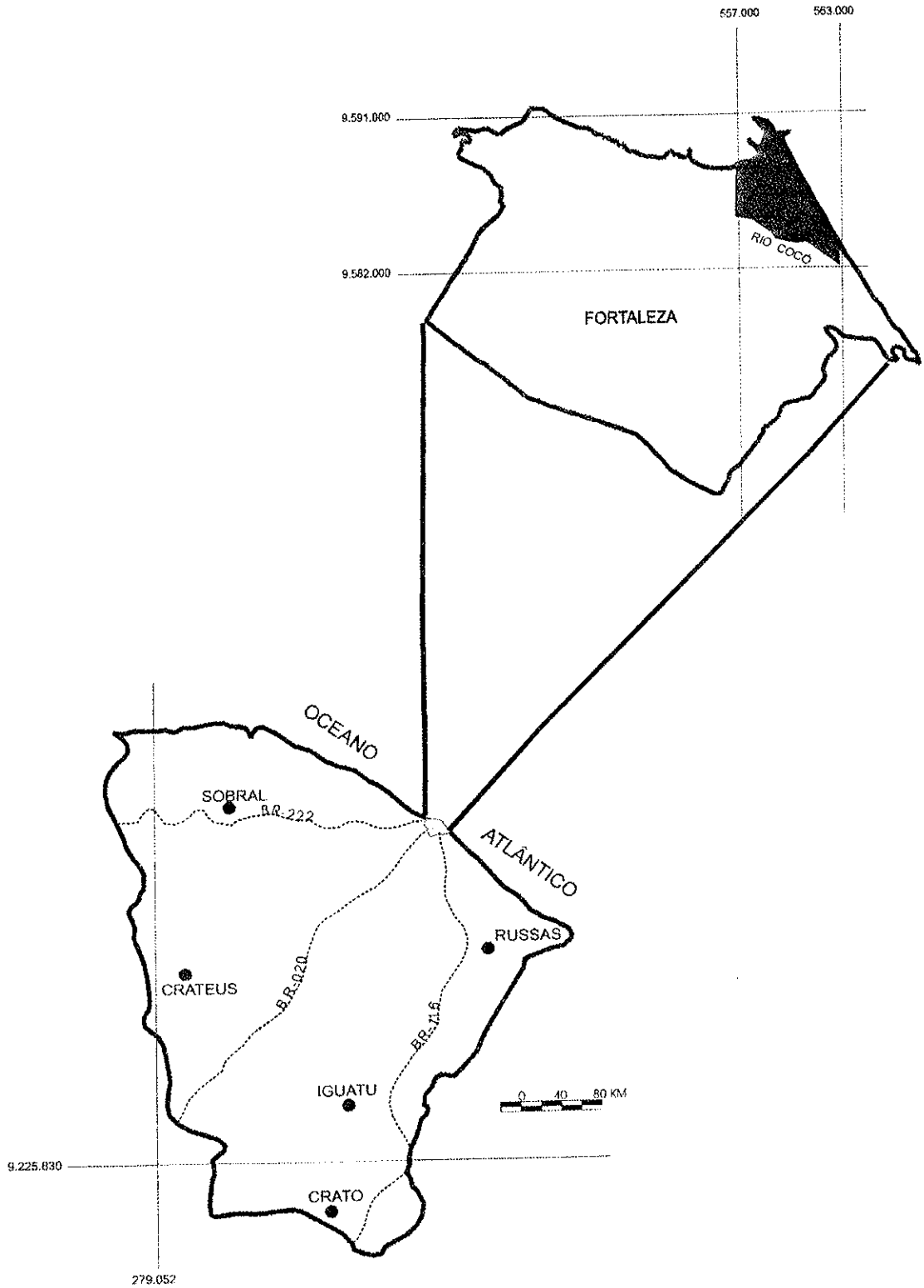


Figura 2.1- Localização da área.

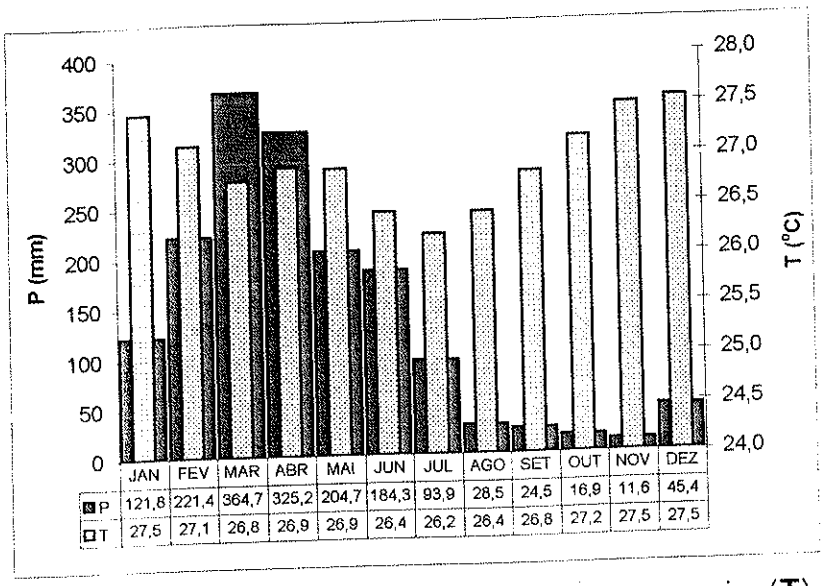


Figura 2.2 – Precipitações (**P**) e temperaturas médias mensais (**T**) referentes ao período de 1974 a 1994.

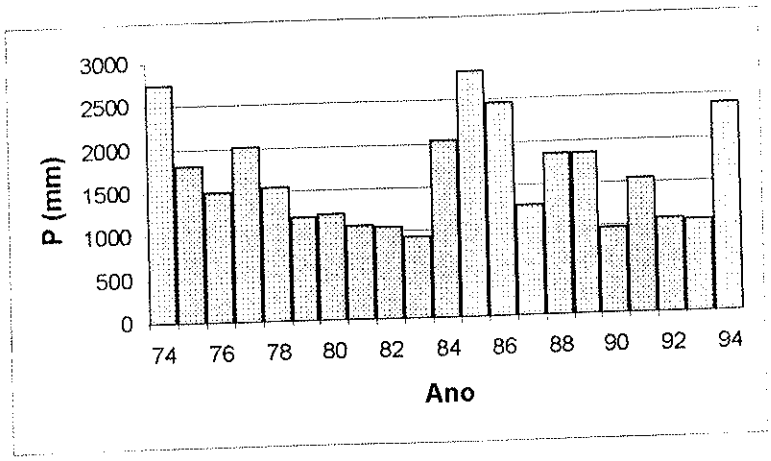


Figura 2.3 - Totais anuais de precipitação referentes ao período de 1974 a 1994.

2.3 – Contexto geológico

O município de Fortaleza é, geologicamente, constituído por sedimentos Tércio-Quaternários e Quaternários (Figura 2.4), já muito bem descritos em vários trabalhos anteriores, dentre os quais escolheu-se como referência Braga et al. (1977).

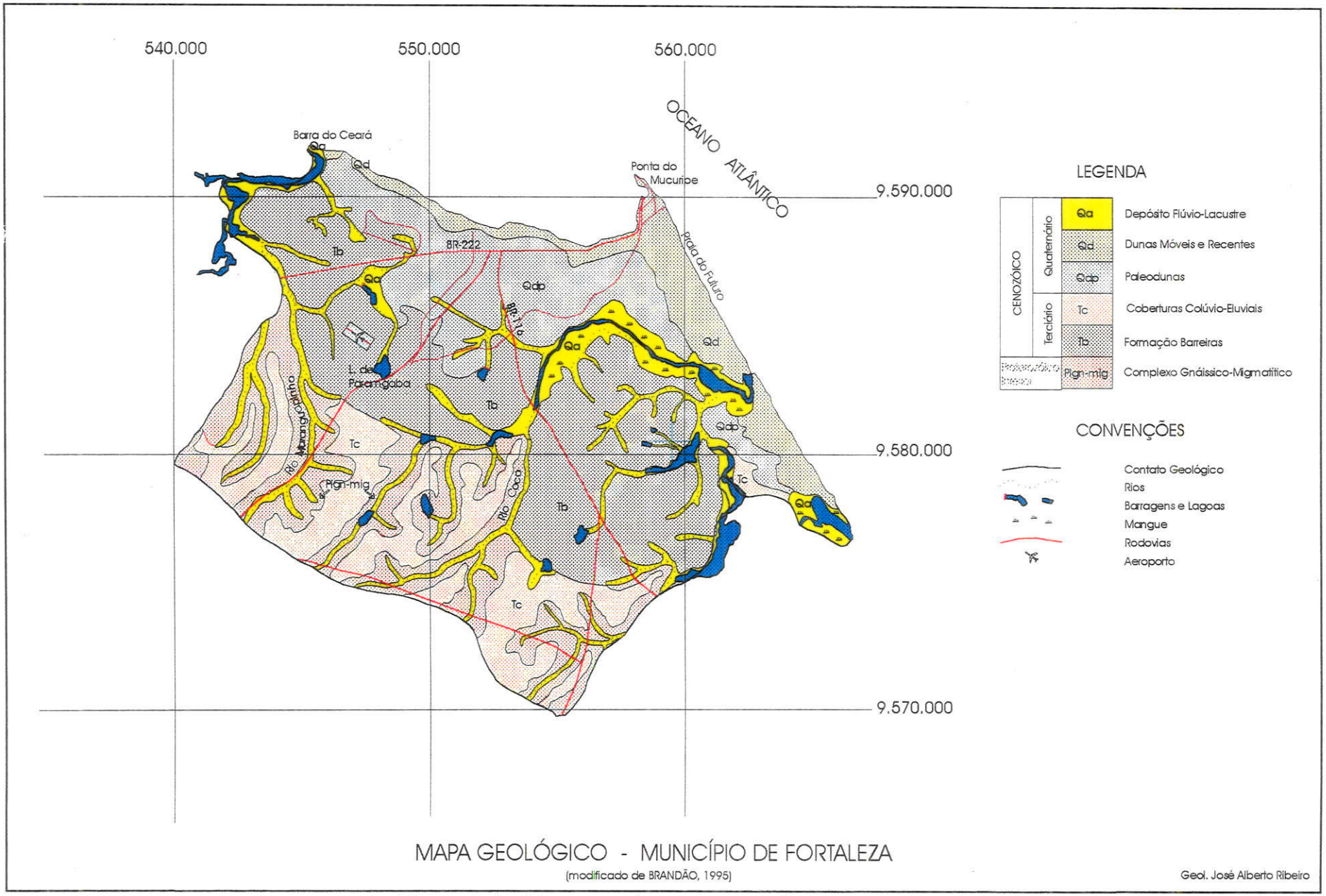


Figura 2.4 – Mapa geológico do Município de Fortaleza

O Quaternário é representado por areias de praia, dunas móveis ou recentes, paleodunas e depósitos flúvio-aluvionares.

As areias de praia formam corpos alongados por toda a extensão da costa entre os limites da baixa maré e o início das dunas móveis. Consistem de depósitos de areia de granulação média, às vezes grosseira, comumente laminados e bem selecionados, constituídos, principalmente, por grãos de quartzo polidos e bem trabalhados pelas ondas.

As dunas móveis ou recentes formam um cordão contínuo de areias secas que se desenvolvem na porção nordeste da área estudada. Tem espessura média de 20m chegando a atingir 40m nas zonas de cristas. São desnudas de cobertura vegetal, permitindo uma intensificação da ação do vento. Constituem-se de areias claras, comumente esbranquiçadas, de granulação fina, formadas principalmente por grãos de quartzo arredondados, bem classificados e comumente foscos, com raras concentrações de minerais pesados.

Os depósitos flúvio-aluvionares constituem uma faixa sedimentar, ao longo do curso do rio Cocó, cujos sedimentos provém do retrabalhamento de arenitos argilosos do Grupo Barreiras. Esses depósitos constituem-se de areias finas misturadas a materiais pelíticos com matéria orgânica em decomposição.

As paleodunas formam corpos de sedimentos arenosos inconsolidados distribuídos em toda zona intracosteira, repousando discordantemente sobre o Grupo Barreiras. Representam as dunas antigas, cobertas por uma flora estável, tem coloração branco-acinzentada refletindo o efeito da presença de matéria orgânica. Sua espessura varia em torno de 15m e, em alguns locais, apresenta-se com alguma compactação.

Especificamente na área estudada, as paleodunas apresentam coloração avermelhada contrastando com a tonalidade branca das dunas móveis, mostrando alguma semelhança com a fácies superior do Grupo Barreiras, mas que apresentam características granulométricas típicas de dunas. Esta coloração avermelhada pode ser associada a um retrabalhamento dos sedimentos do Grupo Barreiras que serviram de fonte para a deposição dunar.

O Tércio-Quaternário é representado pelo Grupo Barreiras, constituído de arenitos argilosos, coloração variada com matizes avermelhados, amarelados e cinza esbranquiçados. A matriz apresenta material caulinítico e cimento argiloso, ferruginoso ou silicoso. Aparecem ainda níveis lateríticos. Estruturalmente, apresenta-se horizontalizado, não distinguindo-se estratificação, senão um visível paralelismo entre os níveis de constituição faciológica diferentes. Observa-se também variação faciológica no sentido horizontal. Na área em estudo, os sedimentos do Grupo Barreiras estão recobertos pelos sedimentos dunares e/ou pelas aluviões na região circunvizinha ao rio Cocó.

O substrato cristalino, que serve de base aos sedimentos do Grupo Barreiras, não tem nenhuma exposição na área em estudo. No afloramento mais próximo, situado na região sul do município de Fortaleza, está representado por gnaisses a muscovita, muito quartzosos, um tanto alterados com lineação estrutural bem perceptível na direção aproximada N-S. Este substrato se aprofunda na direção do litoral, sob os depósitos do Grupo Barreiras que são recobertos por dunas/paleodunas.

2.4. Contexto hidrogeológico

A reconhecida precariedade do sistema de abastecimento de água de Fortaleza tem conduzido a Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CACEGE) a recorrer ao sistema aqüífero da região, como fazem milhares de habitantes da Capital, há muitos anos.

A partir de 1965, a CAGECE (antiga SAAGEC), visando um esforço de emergência, implantou uma bateria de 66 poços para exploração do aqüífero dunas na área do Parque do Cocó. Durante alguns anos, essa bateria de poços forneceu aproximadamente 5.000 m^3/dia, no entanto, já em 1972, este sistema era reconhecido como precário, de operação difícil e pouco compensador, o que levou ao seu abandono.

A partir de 1970, foram efetuados diversos estudos hidrogeológicos, notadamente pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), destacando-se o último deles, concluído em 1973 (Beltrão e Manoel Filho,1973), como o mais completo.

De acordo com este estudo, o sistema aqüífero é representado por areias dunares quaternárias e por sedimentos areno-argilosos do Grupo Barreiras. Os depósitos de dunas, areias finas e médias, homogêneas, repousam diretamente sobre os sedimentos do Grupo Barreiras. O Grupo Barreiras é constituído por sedimentos areno-argilosos e argilas com pronunciadas variações de fácies e de espessura, apresentam baixa condutividade hidráulica ($K=10^{-6}$ m/s) e espessura entre 30 e 45 m. As dunas constituem o único aqüífero explorável, com espessura inferior a 30 m, espessura saturada entre 5 e 10 m, coeficiente de uniformidade próximo de 2 e diâmetro efetivo de 0,15 mm.

Os dados relativos a dois testes de aqüífero efetuados na área do Parque do Cocó indicam os seguintes parâmetros médios para o aqüífero dunas, no trecho compreendido entre o Farol do Mucuripe e a barra do rio Cocó:

Condutividade hidráulica: $K = 1,8 \times 10^{-4}$ m/s

Espessura saturada: $b = 10,0$ m

Transmissividade : $T = 1,8 \times 10^{-3}$ m^2/s

Porosidade efetiva: $s = 44,3 \times 10^{-2}$

A vazão de escoamento natural ao longo dos 6 Km de costa que separam o Farol do Mucuripe da foz do Rio Cocó foi estimada em $1,6 \times 10^{-3}$ m^3/s ou 50.000 m^3/ano, considerando um gradiente hidráulico de $1,5 \times 10^{-2}$.

A reserva permanente foi avaliada para uma área de 12 km^2 abrangendo a faixa costeira de 6 km de extensão por 2 km de largura, com uma espessura saturada média de 10 m e uma porosidade efetiva de 44%, determinando um valor de 53×10^6 m^3. A reserva periódica foi avaliada a partir de uma precipitação efetiva anual de 410 mm, obtida por balanço hídrico, fornecendo um valor de 5×10^6 m^3/ano, que foi confirmado por observação de variação anual do nível piezométrico, de 0,94m, na área acima mencionada. Então, para esta faixa de dunas, foi estimada uma reserva total entre 50 e 60 milhões de m^3/ano, e a reserva explotável foi considerada como sendo o valor da recarga anual.

Em junho de 1976, visando reforçar o sistema de abastecimento d'água de Fortaleza, a CAGECE solicitou à PLANAT - Consultoria em Recursos Naturais, uma análise das possibilidades de captação de águas subterrâneas nas dunas do setor leste da cidade. O exame dos dados disponíveis, constantes do relatório CAGECE/PLANAT (1976a), onde foram retrabalhados alguns dados de ensaios de

bombeamento realizados pela SUDENE, em 1973, revelou os seguintes parâmetros médios para o aqüífero dunas, na área do rio Cocó:

Condutividade hidráulica: $K = 4,4 \times 10^{-4}$ m/s

Espessura saturada: $b = 11,0$ m

Transmissividade : $T = 4,8 \times 10^{-3}$ m^2/s

Porosidade efetiva: $s = 20 \times 10^{-2}$

Observa-se que o valor de transmissividade é pelo menos duas vezes maior que aquele adotado em Beltrão e Manoel Filho (1973).

Considerando uma segunda frente de escoamento na direção do Rio Cocó, com extensão de 5 km, além daquela da praia do Futuro de 6 km de extensão, e uma transmissividade de 4×10^{-3} m^2/s, o escoamento natural seria de 660 L/s, ou 60 L/s/km.

Além da área do Cocó, foram sugeridas mais duas áreas para exploração, uma no bairro Cidade 2000, área do Conjunto Habitacional Cidade 2000, onde consta um valor de transmissividade média de $7,5 \times 10^{-3}$ m^2/s, e outra na Praia do Futuro, ao longo dos 6 Km de costa entre o Farol do Mucuripe e a foz do Rio Cocó, localizadas de forma esquemática no mapa da figura 2.5.

A partir do exame dessa avaliação preliminar onde foi evidenciada a possibilidade de aproveitamento de até 600 L/s no âmbito de toda a área de dunas do setor leste da cidade, foi estabelecida uma programação de sondagens de pequeno diâmetro para determinar a espessura saturada nas três áreas sugeridas para exploração:

- Área 1: Praia do Futuro.
- Área 2: leste da Cidade 2.000.
- Área 3: margem esquerda do Rio Cocó.

Na área 1 foram realizadas 67 sondagens com um total de 572 m perfurados; na área 2, 30 sondagens com 576,1 m perfurados; e na área 3, 25 sondagens com 294,8 m perfurados. Nas três áreas as sondagens foram concluídas ao atingirem sedimentos areno-argilosos, considerados como o topo do Grupo Barreiras, e os resultados obtidos estão apresentados na tabela 2.1, que foi elaborada a partir das informações constantes do relatório CAGECE/PLANAT (1976b).

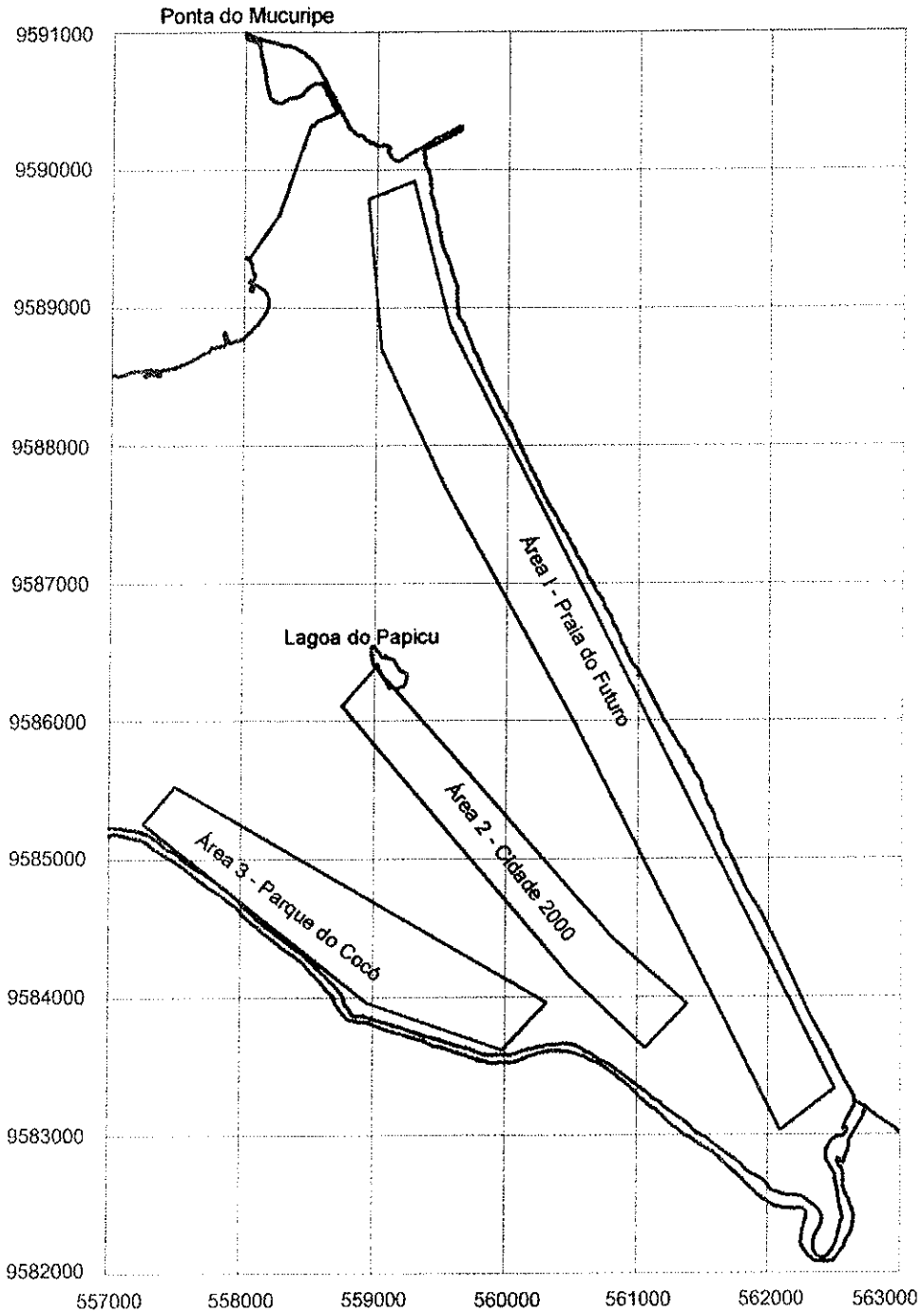


Figura 2.5 - Posicionamento esquemático das áreas já exploradas pela CAGECE.

Tabela 2.1 - Espessura saturada das dunas (Fonte: CAGECE/PLANAT, 1976b).

Local	Etapa	Nº de Sondagens	Espessura máxima(m)	Espessura mínima (m)	Espessura média (m)
Área 1 (Pr. do Futuro)		25	12,05	8,45	10,00
Área 2 (Cidade 2000)		30	14,60	7,00	11,81
Área 3 (Parque do Cocó)	1ª	12	10,93	6,20	8,37
	2ª	20	11,70	5,00	6,67
	3ª	35	12,40	4,30	7,00

De acordo com este relatório, a vazão de escoamento natural foi avaliada considerando os seguintes parâmetros:

Condutividade hidráulica: $K = 4,4 \times 10^{-4}$ m/s

Espessura saturada: $b = 6,0$ m

Transmissividade : $T = 2,64 \times 10^{-3}$ m^2/s

A disponibilidade de água para explotação, na faixa de 700 m às margens do rio Cocó, junto à estação de tratamento d'água da CAGECE, foi estimada variando entre um mínimo de 55 L/s, para um gradiente hidráulico de 0,03, e um máximo de 90 L/s, para um gradiente hidráulico de 0,05. Então, foi prevista uma vazão explotável de 60 L/s, o que implicaria na perfuração de 30 a 35 poços com vazão em torno de 2 L/s.

Após estes estudos preliminares, foram perfurados 35 poços dos quais apenas 30 foram aproveitados. Cinco destes poços foram abandonados devido à baixa vazão, condicionada pela baixa transmissividade.

De acordo com o relatório das perfurações supra citadas (CAGECE/PLANAT, 1977), a condutividade hidráulica média, para 135 determinações efetuadas, foi de $K = 2,5 \times 10^{-4}$ m/s, com desvio padrão de $\rho = 1,24 \times 10^{-4}$ m/s, e espessura saturada média $b = 7,76$ m, com $\rho = 1,78$ m, variando de 4,4 a 11,2 m. Conhecidos os valores médios de espessura saturada e de condutividade hidráulica, foi atualizada a vazão de escoamento natural considerando os seguintes parâmetros:

Transmissividade :	$T = 1,93 \times 10^{-3}\ m^2/s$
Condutividade hidráulica:	$K = 2,5 \times 10^{-4}\ m/s$
Espessura saturada média:	$b = 7,7\ m$
Gradiente hidráulico:	$i = 0,04$

O escoamento natural por unidade de comprimento, então, foi determinado:

$$q = T \times i = 1,93 \times 10^{-3} \times 0,04 = 0,0772\ m/s/m$$

E, considerando a faixa de 700 m, paralela ao curso do Rio Cocó, pertencente à CAGECE, foi obtido o valor abaixo:

$$Q = 0,0772 \times 10^{-3} \times 700 = 53,9 \times 10^{-3}\ m^{-3}/s = 54\ L/s$$

Então, a vazão explorável dos 30 poços foi avaliada em 180 m^3/h que corresponde a um escoamento natural de 50 L/s ou 180 m^3/h.

Em 1984, após longo período de estiagem que afetou o nordeste e, particularmente, o sistema de abastecimento d'água de Fortaleza, a CAGECE adotou uma série de medidas de emergência que consistiram de perfuração de novos poços e desobstrução e testes de bombeamento em sistemas já existentes. Nessa época, foram perfurados 31 poços ao longo de uma faixa de 2 km de largura de dunas móveis na Praia do Futuro, cujos dados encontram-se em relatório elaborado pela empresa GEONORD Engenharia e Geologia LTDA (GEONORD,1984). Neste relatório, consta que, a partir de testes de bombeamento efetuado em 28 poços, a vazão fornecida por esta bateria seria de 228.832 m^3/h. Estes dados, bem como aqueles dos 30 poços anteriormente citados, serão utilizados, no capítulo 5, para avaliação de parâmetros hidrodinâmicos representativos para as dunas.

Ainda em 1984, foram perfurados 130 poços no Município de Fortaleza, dentro de um programa de combate à seca, sob a coordenação da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM. Como conseqüência deste programa, foi elaborado um mapa hidrogeológico para o município (Morais, 1984).

O resumo de valores dos parâmetros hidráulicos (condutividade hidráulica **K**, "transmissividade" **T**, porosidade efetiva $\mathbf{S_y}$) e de espessuras **E**, determinados em trabalhos anteriores, está apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Resumo das características do aqüífero dunas/paleodunas determinadas para no Parque do Cocó, em trabalhos anteriores.

Fonte	K (m/s)	E (m)	T (m^2 /s)	S_y (%)	Obs.
SUDENE (1973)	$1,8x10^{-4}$	10,0	$1,8x10^{-3}$	44	
CAGECE/ PLANAT (1976a)	$4,4x10^{-4}$	11,0	$4,8x10^{-3}$	20	Dados da SUDENE
CAGECE/ PLANAT (1976b)	$4,4x\ 10^{-4}$	6,0	$2,64x10^{-3}$	–	35 furos
CAGECE/ PLANAT (1977)	$2,5x10^{-4}$	7,7	$1,93x10^{-3}$	–	135 ensaios

2.5 - Hidroquímica

O sistema dunas/paleodunas apresenta grande variação no que se refere à classificação química das águas. De forma genérica, as águas deste sistema apresentam uma composição química cloretada sódica dominante, com boa potabilidade e baixo risco de sódio, destacando-se alguns casos de altos teores de sólidos totais dissolvidos e de ferro (Araújo e Leal, 1990).

Bianchi et al. (1984) destacou a possibilidade de altos teores de nitritos, nitratos e mesmo gás sulfídrico, devido ao fato de que os exultórios interiores dos campos de dunas sempre se fazem para áreas alagadiças ou pantanosas.

2.6 - Dados geofísicos

Em 1973, a SUDENE desenvolveu uma campanha geofísica no extremo leste da cidade de Fortaleza, na Praia do Futuro e no Parque do Cocó. A área objeto desta

campanha era limitada a oeste pela perimetral Fortaleza-Messejana; ao sul, grosseiramente, pelo vale do rio Cocó; ao norte e a leste pela linha de costa. Foi conduzida aplicando-se o método de eletrorresistividade, através de Sondagens Elétricas Verticais com arranjo Schlumberger, utilizando um registrador potenciométrico SERVO-riter/PERGEO (Beltrão e Manoel Filho, 1973).

Foram identificadas duas famílias de curvas bem diferenciadas cujos resultados de interpretação estão descritos nas tabelas 2.3 e 2.4 e identificadas como família I e família II, respectivamente.

As dunas saturadas apresentam espessuras entre 5 e 10 m e o substrato cristalino tem profundidade de, no mínimo 100 m. As fácies do Grupo Barreiras apresentam grande variação de espessura.

O horizonte 1 apresenta espessura entre 7 e 15 m e, quer sejam as aluviões ou a fácies argilosa do Grupo Barreiras, encontra-se saturado em água muito salgada.

Tabela 2.3 - Características dos horizontes determinados por eletrorresistividade na campanha desenvolvida no campo de dunas da Praia do Futuro, curvas da família I (Fonte: Beltrão e Manoel Filho, 1973).

HORIZONTE	RESISTIVIDADE (Ωm)	LITOLOGIA
1	5.000 - 40.000	dunas secas.
2	100 - 300	dunas saturadas.
3	5 - 10	topo argiloso do Grupo Barreiras.
4	50 - 80	horizonte arenoso do Grupo Barreiras.
5	5 - 8	parte inferior, argilosa do Grupo Barreiras e/ou alteração do cristalino.
6	> 100	substrato cristalino.

Tabela 2.4 - Características dos horizontes determinados por eletrorresistividade na campanha desenvolvida ao longo do canal do Rio Cocó, área de salinas, curvas da família II (Fonte: Beltrão e Manoel Filho, 1973).

HORIZONTE	RESISTIVIDADE (Ωm)	LITOLOGIA
1	0,3 - 0,6	aluviões e/ou parte superior, argilosa, do Grupo Barreiras.
2	8 - 10	parte inferior, argilosa do Grupo Barreiras e/ou alteração do cristalino.
3	> 100	substrato cristalino.

Munis (1984) realizou levantamento geofísico por eletrorresistividade na área da Praia do Futuro, estendendo-se desde a Rua Ismael Bordéus, próximo à ponta do Mucuripe, até a foz do rio Cocó, cobrindo uma área de 6,5 km de extensão, paralela à linha de costa, por 0,5 km de largura, na direção perpendicular à linha de costa (Figura 2.5). Foram realizados quatro perfis, paralelos à linha de costa, sendo três com extensão de 6,5 km e um com 3,5 km. Estes perfis foram compostos a partir de sondagens elétricas verticais (SEV's) onde foi utilizado o arranjo Schlumberger.

Os perfis geoelétricos mostraram a presença de quatro horizontes distintos, denominados de cima para baixo, de **A**, **B**, **C** e **D**.

O horizonte **A** é caracterizado por resistividades altas, da ordem de 1.000 a 2.000 Ωm podendo chegar a mais de 10.000 Ωm nas partes mais elevadas e secas das dunas e, raramente, registrando valores de algumas centenas de Ωm nas partes mais baixas, onde existe o desenvolvimento de solo orgânico superficial. A espessura deste horizonte corresponde à profundidade do nível estático e varia entre 2 e 5 metros.

O horizonte **B** tem resistividade intermediária entre a do horizonte **A** e a do horizonte **C** condutivo. Apresenta uma resistividade que varia em torno de 140 Ωm, espessura entre 3 e 10 metros, e corresponde às areias saturadas das dunas.

O horizonte C tem resistividade baixa, espessura variável, e corresponde aos sedimentos areno-argilosos do Grupo Barreiras. Do ponto de vista geoelétrico, foi subdividido em três níveis. O nível C-1 com resistividade entre 10 e 15 Ωm correspondente ao topo argiloso do Grupo Barreiras. O nível C-2 um pouco mais resistivo, entre 20 e 30 Ωm, podendo atingir valores um pouco maiores, não mostrou continuidade e foi considerado como devido a intercalações ou bolsões mais arenosos dentro do Grupo Barreiras. Estes bolsões arenosos são de grande importância para captação de água subterrânea. O nível C-3, com resistividades inferiores a 10 Ωm, foi correlacionado à base argilosa do Grupo Barreiras.

O horizonte D apareceu em algumas SEV's com ramo terminal ascendente, tem resistividade de algumas dezenas de Ωm, em geral da ordem de 30 Ωm, e foi correlacionado ao embasamento cristalino alterado. Para este horizonte foram registradas profundidades superiores a 100 metros, com exceção das sondagens situadas próximo à Praça 31 de março (região intermediária da área 1, figura 2.5), onde foram registradas profundidades inferiores a 50 metros.

3. RECARGA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA:

REVISÃO COMENTADA

3.1. Visão Conceitual

Recarga subterrânea é usualmente considerada como um processo de movimento de água que atinge a zona saturada sob forças gravitacionais, ou em uma direção específica por condicionamento hidráulico. De forma geral, recarga subterrânea é considerada como a quantidade de água que contribui para aumentar a reserva subterrânea permanente ou temporária de um aqüífero, e, no caso da reserva temporária, é considerada como reserva reguladora ou renovável, e, em geral, reserva explotável.

Lerner et al. (1990) define, de forma geral, a recarga de água subterrânea como sendo o fluxo de água que alcança o aqüífero, constituindo uma adição ao reservatório de água subterrânea, e faz uma distinção entre a quantidade de água disponível para recarga e a recarga real como definida acima, ou seja, nem toda a água disponível para recarga subterrânea, água infiltrada, irá se constituir em acréscimo às reservas do aqüífero. Rushton (1988) já mencionara esta distinção sugerindo que estas duas quantidades poderiam diferir devido à influência da zona não saturada e/ou à não aceitação do valor potencial pelo aqüífero. Ele denomina de **recarga potencial** aquela que penetra no solo e **recarga real** aquela que, efetivamente, chega até o aqüífero.

Nas expressões de balanço hídrico, a parcela da precipitação relativa à recarga subterrânea é denominada de **infiltração eficaz** (Castany, 1975). Fazendo uma uniformização da terminologia, a **infiltração eficaz** corresponde à **recarga real**, enquanto que a **recarga potencial** corresponde à **infiltração total** mencionada nas expressões de balanço hídrico.

Em avaliações de recarga a partir do balanço hídrico, a **infiltração eficaz** é mencionada como a própria variação no armazenamento subterrâneo (Rushton e Ward, 1979).

Balek (1988), levando em consideração o fator tempo, identificou quatro distintos tipos de recarga: - recarga curta, que ocorre após grandes eventos de chuva;

- recarga sazonal, que ocorre durante o degelo em regiões de clima temperado ou em período chuvoso em regiões com estações secas e chuvosas bem definidas; - recarga perene, que ocorre nos trópicos úmidos onde existe um fluxo contínuo de água; e - recarga histórica, aquela que ocorreu a longo tempo atrás e que foi responsável pela formação dos atuais recursos subterrâneos.

A recarga de água subterrânea pode ocorrer naturalmente de precipitação, rios, canais e lagos, e como um fenômeno induzido pelo homem através de atividades de irrigação e urbanização. O volume de água adicionado ao aqüífero por percolação vertical diretamente da precipitação através da zona não saturada é designado como **recarga direta**. O volume de água que percola até o aqüífero advindo das demais fontes acima mencionadas recebe a designação de **recarga indireta**.

Rushton (1988) enumerou alguns dos mais importantes fatores que tem influência no mecanismo de recarga:

- Topografia.
- Precipitação: intensidade, duração, distribuição espacial.
- Escoamento superficial.
- Evapotranspiração real.
- Irrigação e urbanismo.
- Interação rio-aqüífero.
- Solo: natureza, espessura, propriedades hidráulicas.
- Mecanismos de fluxo na zona não saturada.
- Aqüífero: capacidade de receber recarga, características hidrodinâmicas e suas variações com o tempo.

A diversidade de fatores de influência e a dificuldade de quantificação e controle de alguns destes fatores, para avaliação de seu nível de influência no processo de recarga, exige a utilização de mais de um método para sua estimativa, de forma que possibilite a representação destes fatores e permita ajustes àqueles cuja avaliação quantitativa apresente maiores dificuldades. Deve-se ressaltar que o procedimento utilizado com sucesso para estimativa de recarga em uma certa localidade pode não ser bem sucedido quando utilizado em outra localidade. Portanto, no estudo deste processo, é de fundamental importância a identificação das fontes de recarga e a definição de um modelo conceitual dos mecanismos de fluxo.

3.2. Métodos de Estimativa de Recarga

Na bibliografia especializada encontra-se uma grande variedade de procedimentos para estimativa da recarga subterrânea. Dependendo do número de fontes de recarga considerado e do tipo de fonte, a recarga pode ser quantificada por vários métodos que apresentam similaridades entre si para diferentes tipos de recarga.

Lerner et al. (1990) individualizaram cinco tipos de fontes e agrupou os métodos de estimativa em cinco grupos. Foram individualizadas as seguintes fontes: precipitação, rios, fluxos interaqüíferos, irrigação e recarga urbana. Os métodos foram agrupados da seguinte forma: medidas diretas, balanço hídrico, aproximações Darcinianas, técnicas que utilizam traçadores e outros métodos (onde estão incluídos os métodos empíricos). Na realidade, esta sistematização não fornece contribuições significativas porque, o fato é que, a complexidade inerente ao processo de recarga sempre gerará incertezas em quaisquer métodos utilizados e, nenhum dos métodos irá satisfazer os requisitos exigidos para sua qualificação como um bom método.

Na prática, a questão principal é a escolha do método a ser adotado na estimativa da recarga subterrânea. Esta escolha depende, em princípio, dos objetivos a serem atingidos, que estão diretamente relacionados com o nível de exigência, no que se refere à precisão dos resultados, e à dimensão do sistema envolvido. A seguir, vêm as características climáticas a que este sistema está submetido e o número de fontes de recarga a ser considerado.

Considerando apenas a recarga direta, destacam-se dois principais métodos: o método do balanço hídrico, onde estima-se a água que infiltra, restando determinar a quantidade de água que atravessa a zona não saturada; e o método de variação do nível potenciométrico, onde tem-se uma observação direta da resposta do aqüífero à recarga, isto é, pela medida do nível hidrostático, a recarga é inferida a partir das variações de nível observadas, considerando as características do aqüífero.

Estes dois métodos foram destacados pelas facilidades oferecidas no que se refere à seu uso e à obtenção de dados. O método do balanço hídrico foi destacado porque exige dados facilmente disponíveis e o método da variação do nível potenciométrico porque, em sendo uma medida direta da resposta do aqüífero à recarga, se constitui em uma excelente forma de ajuste.

3.3. Método do Balanço Hídrico

Este modelo tem sido amplamente utilizado na estimativa da recarga potencial, que é calculada como o resíduo das perdas deduzidas a partir da precipitação, identificadas na forma de escoamento superficial e evapotranspiração.

Castany (1975), partindo do balanço hídrico global para um ano hidrológico, propõe uma expressão para o balanço hídrico de aqüíferos livres a partir de simples discriminação das parcelas em que se divide a água proveniente da precipitação.

Sabe-se que a lâmina precipitada sobre o solo, **P**, pode ser dividida em três parcelas: o escoamento superficial **ES**, a infiltração total I_T e a evapotranspiração real **ETR**. Portanto, a expressão geral do balanço hídrico médio é:

$$P = ES + ETR + I_T \qquad (3.1)$$

A infiltração total I_T inclui a água retida no solo I_r e a água que penetra no subsolo I_e denominada infiltração eficaz, que corresponde à parcela da precipitação que alimenta a reserva subterrânea. Esta parcela está diretamente relacionada com as flutuações da superfície potenciométrica que refletem a variação das reservas de água subterrânea.

As regras gerais de balanço hídrico, originalmente utilizadas em bacias hidrográficas, são aplicáveis no caso de aqüíferos livres, porém é necessário destacar que, neste caso, o volume considerado não é constante devido às variações verificadas na superfície potenciométrica **dh** e que o principal aporte de um aqüífero livre é a infiltração eficaz I_e.

Castany (1975) sugere a introdução da infiltração eficaz I_e, calculada por diferença a partir da precipitação **P**, da evapotranspiração real **ETR** e do escoamento superficial **ES**, segundo a expressão:

$$I_e = P - (ETR + ES) \qquad (3.2)$$

No caso de balanço hídrico de aqüíferos, em geral, o escoamento superficial **ES** é insignificante por conta da morfologia do solo. Quando é importante, uma parte infiltra, outra evapora e o resto volta ao fluxo. Todas estas quantidades já estão

contabilizadas no balanço e, portanto, pode-se omitir o escoamento superficial **ES** e escrever a seguinte expressão para a obtenção da infiltração eficaz :

$$I_e = P - ETR \tag{3.3}$$

A infiltração eficaz determinada desta maneira, rigorosamente, deveria ser considerada como **infiltração potencial**, de acordo com Rushton (1988).

A evapotranspiração real **ETR** é o termo mais importante, porém o menos conhecido, de um balanço hídrico. Em geral, sua determinação é feita com a utilização de fórmulas empíricas baseadas em fatores climáticos: temperatura média, altura de precipitação e, às vezes, insolação e velocidade dos ventos. No caso de regiões com estações secas e chuvosas bem distintas, a variação dos fatores climáticos com o tempo, no decorrer de um ano hidrológico é de extrema importância para a avaliação da evapotranspiração real **ETR,** e a altura média mensal de precipitação é muito mais importante que dados anuais.

Deste modo, dentre algumas das diversas fórmulas propostas (Coutagne e Turc, In: Castany, 1975) para a determinação da evapotranspiração real, o método proposto por Thornthwaite é o que melhor se adapta às áreas com as características climáticas que apresentam alternância de períodos secos e chuvosos bem diferenciados (Vasconcelos, 1996).

A fórmula de Thornthwaite, considerando a temperatura média mensal, fornece a evapotranspiração potencial mensal (**ETP**), em milímetros, através da seguinte fórmula:

$$ETP = 16\ (10\ T/\ I)^a\ K \tag{3.4}$$

onde, **T** é a temperatura média mensal em °C, **I** é o índice térmico e **K** é um fator de correção que depende da latitude (Vilela e Matos,1975).

O índice térmico **I** é obtido da seguinte maneira:

$$I = \sum_{i=1}^{12} I_i \tag{3.5}$$

onde,

$$I_i = (T_i /5)^{1,5} \qquad (3.6)$$

sendo, **T** a temperatura média de cada mês do ano, portanto, **i** varia de 1 a 12 e os índices térmicos mensais, assim obtidos, somados darão o índice térmico anual.

O termo **a** é obtido em função do índice térmico:

$$a = 0,49239 + 1792 \times 10^{-5} I - 771 \times 10^{-7} I^2 + 675 \times 10^{-9} I^3 \qquad (3.7)$$

A evapotranspiração real **ETR** é obtida a partir da comparação da evapotranspiração potencial com a precipitação, estabelecendo-se um valor para a quantidade máxima de água que o solo pode armazenar. Este valor é arbitrado de acordo a com a natureza do terreno. Sabe-se que é de 50 mm em solos arenosos e 200 mm em solos argilosos (Castany, 1975), e corresponde à quantidade de água retida no solo **C** que é denominada de **capacidade de saturação do solo**.

Então, a **ETR** é determinada para cada um dos meses do ano, considerando a retenção de água no solo **C,** as médias mensais de precipitação **P** e os valores de evapotranspiração potencial **ETP**, calculados para a série de anos utilizada na determinação das médias mensais de precipitação e temperatura.

Usando dados de uma série de 46 anos, coletados em um posto situado no centro da cidade de Fortaleza, referentes ao período de 1919 a 1967 com falha de 3 anos, a avaliação da infiltração efetuada por Beltrão e Manoel Filho (1973), chegou a um valor de 410 mm para a média anual de infiltração que corresponde a 29% da precipitação anual média (1.390 mm). Esta taxa de infiltração foi, praticamente, referendada pelo valor obtido por um infiltrômetro instalado na Praia do Futuro, onde foi revelada uma infiltração efetiva da ordem de 30% da precipitação. Pelo método de Thornthwaite, usando médias mensais de precipitação e temperatura para o período de 1931 a 1960, a infiltração anual (excesso) determinada foi de 297 mm, que corresponde a 24% da precipitação anual, 1.256,1 mm (soma das médias mensais).

Três diferentes procedimentos, de Thornthwaite, de L. Turc e de Coutagne foram utilizados para avaliação da evapotranspiração real anual média, **ETR**, para o município de Fortaleza, usando os mesmos dados meteorológicos de precipitação, **P**,

e temperatura, para o período de 1964 a 1994. A infiltração eficaz (i_e), determinada como resíduo na expressão do balanço hídrico, através dos três procedimentos, está apresentada na tabela 3.1 (Vasconcelos,1996). No método de Thornthwaite, **P** é a soma das médias mensais de precipitação do período considerado e, nos métodos de L. turc e Coutagne, **P** é a média dos totais anuais para o período.

Tabela 3.1 – Infiltrações obtidas para diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração real.

	P (mm)	**ETR (mm)**	**I_e (mm)**	**I_e (% de P)**
Thornthwaite	1642,9	1037,9	505,0	30
L. Turc	1637,1	1291,1	346,0	21
Coutagne	1637,1	1050,2	586,9	35

A avaliação da infiltração pelo balanço hídrico utilizando o método proposto por Thornthwaite revela-se como o mais adequado para regiões com alternância de estações secas e chuvosas bem definidas, permitindo uma correlação entre a precipitação e a evapotranspiração real, a partir de médias mensais de uma série histórica de dados. As incertezas inerentes a este método estão na própria utilização de uma fórmula empírica para determinação da evapotranspiração potencial e no uso de uma capacidade de saturação do solo constante (100 mm).

Considerando o nível de incerteza apresentado na quantificação dos fatores que interferem na estimativa de recarga de aqüíferos livres pelo balanço hídrico, mesmo na sua mais simples forma de expressão, pretende-se abordar este problema com o auxílio do método da variação do nível potenciométrico.

3.4. Método da Variação do Nível Potenciométrico

Neste método, a suposição básica é que o acréscimo da espessura saturada de um aqüífero livre é devido à recarga por precipitação. Sabe-se que outros fatores interferem no mecanismo de recarga, tais como: bombeamento de poços e/ou irrigação, e vazamento nos tubos de abastecimento de água e esgoto, porém estes fatores serão objeto de algumas considerações em uma etapa posterior de análise.

O fluxo subterrâneo pode ser tratado de uma forma matematicamente sofisticada utilizando as equações de fluxo de água subterrânea em aqüíferos livres que podem ser resolvidas através de soluções numéricas e analíticas para diferentes condições de contorno.

Com as suposições usuais de fluxo estacionário (Todd, 1959), existem duas formas básicas que expressam a relação entre o potencial hidráulico **h(x,y)** e a recarga **q(x,y)**. A forma mais geral é a equação integral:

$$\mathbf{h(x,y) = Aq(x,y) = \int_{\Omega} H(x,\xi,y,\eta)T(\xi,\eta)d\xi d\eta} \tag{3.8}$$

onde, **A** é o operador integral e **H** uma função "kernel", a função de Green em duas dimensões (Butkov, 1978).

O "kernel" **H** depende das condições de contorno, que nem sempre são bem definidas para um aqüífero. O domínio **Ω** é também duvidoso porque um aqüífero é parte de um ambiente natural e é difícil determinar onde os limites de integração devem ser escolhidos.

O operador inverso, diferencial, $\mathbf{A^{-1}}$ dispensa as condições de contorno, e permite que as derivadas da transmissividade sejam explicitadas:

$$\mathbf{q(x,y) = A^{-1}h(x,y) = \frac{\partial}{\partial x}\left[T\frac{\partial h}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[T\frac{\partial h}{\partial y}\right] = T\nabla^2 h + \frac{\partial T}{\partial x}\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y}\frac{\partial h}{\partial y}} \tag{3.9}$$

Esta expressão sugere que a recarga pode ser calculada por operações diferenciais sobre medidas de potenciais **h(x,y)** e transmissividades **T(x,y)**. A instabilidade numérica da diferenciação e o fato de que, em geral, o potencial hidráulico e a transmissividade são conhecidos somente em poucos pontos, exigem aproximações consideráveis para a utilização do modelo inverso. Allison (1988) analisou alguns procedimentos de solução afirmando que o método das diferenças finitas deve ser usado com cautela.

Quando deixa-se o estado estacionário, ou seja, quando consideram-se as variações de nível d'água com o tempo, a estimativa da recarga subterrânea a partir das flutuações de nível também pode ser efetuada utilizando as equações diferenciais

de fluxo subterrâneo. Evidentemente, qualquer um dos procedimentos a ser utilizado na solução das equações diferencias exigirá informações que nem sempre estarão disponíveis. Porém, existe uma outra forma de tratamento do problema que utiliza informações qualitativas no local de recarga (Johansson, 1987).

Em lugar de resolver as equações de fluxo, que precisam dos parâmetros hidrodinâmicos e geométricos do aqüífero e de condições de contorno, algumas pesquisas tem sido desenvolvidas com base na observação do declínio da curva de recessão do nível hidrostático, quando não ocorre nenhuma recarga. Sabe-se que a forma da curva de recessão é uma função da porosidade efetiva, da transmissividade e da geometria do aqüífero. Heterogeneidades verticais também podem influenciar fazendo com que a curva de recessão assuma formas extremamente complicadas. Se o nível hidrostático for raso, a forma da curva pode também ser influenciada pela evapotranspiração. Porém, não se sabe como avaliar o nível de influência de cada um destes fatores.

Em condições de estado estacionário, o nível hidrostático é uma função da quantidade de recarga, da transmissividade do aqüífero e de sua geometria. Em estado não estacionário, as propriedades de retenção do meio aqüífero devem ser consideradas de uma forma bastante simples. Considerando uma certa área **A,** se a variação na espessura saturada em um certo período Δt é Δh, a recarga devido à precipitação ΔS, em unidade de volume, pode ser estimada como:

$$\Delta S = S_y \, \Delta h \times A + Q_a \Delta t - R_i \qquad (3.10)$$

onde, S_y é a porosidade específica, Q_a é o fluxo subterrâneo e R_i é a recarga devida a outras fontes.

Desprezando o fluxo subterrâneo e considerando a precipitação como única fonte de recarga, a recarga por unidade de área será:

$$\Delta S = S_y \, \Delta h \qquad (3.11)$$

A porosidade efetiva é um termo importante neste procedimento de determinação de recarga, na medida em que é utilizada para transformar uma

variação de nível hidrostático de um aqüífero livre em uma variação equivalente do armazenamento de água neste aqüífero.

3.5. Princípios do uso combinado dos Métodos do Balanço Hídrico e da Variação de Nível Potenciométrico

O princípio básico do uso combinado destes dois métodos baseia-se no monitoramento da resposta do aqüífero **Δh** que deverá fornecer a recarga do aqüífero **ΔS**, visando testar uma relação de igualdade ou permitir o estabelecimento de correlação com a infiltração eficaz, determinada pelo balanço hídrico.

Rushton e Ward (1979) já consideraram a infiltração eficaz como a própria variação de armazenamento subterrâneo **ΔS** expressa da seguinte maneira:

$$\Delta S = P - ES - ETR \qquad (3.12)$$

onde, **P** é a precipitação, **ES** o escoamento superficial e **ETR** a evapotranspiração real.

Os valores negativos de **ΔS** representam um acréscimo no déficit de umidade do solo, o que ocorre quando não há precipitação e a demanda da evapotranspiração é retirada do solo, e os valores positivos indicam a recarga potencial, ou seja, um decréscimo no déficit de umidade do solo.

Em um balanço hídrico padrão, o cálculo do volume de água requerido para saturar o solo é expresso como uma profundidade equivalente de água e é denominado de **déficit de umidade**. Se o déficit de umidade do solo é maior que um valor crítico constante **C**, **capacidade de saturação**, a evapotranspiração real será menor que a evapotranspiração potencial. O valor da capacidade de saturação depende da vegetação, de seu estágio de crescimento e da natureza do solo.

Para que haja recarga é necessário que a quantidade de água disponível seja maior que o déficit de umidade do solo. Neste caso, após reduzir o déficit de umidade do solo a zero, o excesso de água escoará em superfície ou o solo drena o excesso de água que será transmitido para o aqüífero como recarga potencial, ou recarga real se a capacidade de aceitação do aqüífero assim o permitir.

Este procedimento adota algumas simplificações:

1. Há uma zona totalmente saturada e uma não saturada com uma mudança abrupta entre as duas. Sabe-se que o conteúdo volumétrico de água na zona não saturada varia de forma complexa, (Wellings e Bell, 1982);

2. O déficit de umidade do solo supõe que a recarga ocorre somente quando o solo está totalmente saturado e torna-se drenante. Na prática, pode ocorrer alguma forma de drenagem vertical em outras condições.

Considerando que a avaliação da infiltração eficaz pelo método do balanço hídrico de Thornthwaite, em períodos chuvosos, apresenta valores muito próximos dos reais, então, no período de ascensão do nível hidrostático, pode ser estabelecida uma expressão para estimar a porosidade efetiva do aqüífero com a introdução da expressão do balanço hídrico (Equação 3.3) na equação 3.11, da seguinte maneira (Walton, 1970):

$$S_y = \frac{\mathbf{P - ETR}}{\mathbf{\Delta h}} \qquad (3.13)$$

Nesta expressão, está sendo admitido que a infiltração eficaz $\mathbf{I_e}$ é igual à recarga efetiva $\mathbf{\Delta S}$. Sabe-se que esta relação de igualdade, rigorosamente, pode não ser verdadeira e que a utilização de uma porosidade efetiva constante pode ser uma fonte de erro, porém resta investigar se este método pode dar informações quantitativas de valor prático. Deve-se ressaltar ainda, que esta hipótese de igualdade é amplamente utilizada na avaliação de reservas renováveis sem maiores esclarecimentos.

Desta forma, a infiltração eficaz, determinada pelo método do balanço hídrico, poderá ser convertida em variação de nível hidrostático. Sabe-se que este processo de conversão apresenta sérias limitações de ordem teórica, porém, os valores gerados, se comparados a valores observados, permitirão a realização de ajustes na expressão do balanço hídrico.

O ajuste de fatores utilizados na determinação da infiltração eficaz $\mathbf{I_e}$ pode ser efetuado a partir de uma análise criteriosa, quantitativa e/ou qualitativa, dos ramos de ascensão e recessão do nível hidrostático. A análise do ramo ascendente poderá fornecer informações diretas sobre a recarga efetiva $\mathbf{\Delta S}$. O ramo de recessão, no caso

de aqüíferos rasos, é fortemente influenciado pela evapotranspiração, além de outros fatores cuja identificação e avaliação do nível de influência é praticamente impossível.

A recarga potencial anual, estimada pela técnica do balanço hídrico, pode ser similar, em ordem de grandeza, àquela calculada por métodos mais precisos, porém, sua distribuição durante o ano é, de alguma forma, diferente.

Em áreas de clima semi-árido, a recarga estimada através do balanço hídrico pode diferir significativamente entre anos que tem precipitação similar. Se muito da precipitação ocorre de forma curta e intensa, o déficit de umidade pode ser satisfeito com o excesso de chuva e torna-se recarga. Entretanto, quando a chuva é distribuída uniformemente em vários meses, o solo pode nunca alcançar a saturação, de modo que ocorre pouca recarga (Khan, 1986).

A verificação destas variações deve ser constatada através de observações de variações no nível potenciométrico que indicam que a recarga anual total não pode ser estimada como uma fração constante da precipitação anual.

Desta maneira, haverá a viabilidade de ajuste de alguns dos fatores utilizados em cada um dos dois métodos e, a partir de um modelo estabelecido, gerar as variações de nível $\Delta\mathbf{h}$ a partir da precipitação **P**, para um certo intervalo de tempo.

3.6. Regionalização da Recarga Subterrânea

Allison e Peck (1989) propuseram um método prático e simplificado, utilizando a teoria de escala, que permite a extensão da estimativa de recarga obtida em uma pequena parte de um aqüífero, analisada em detalhe, para uma parte maior do mesmo aqüífero. Este método segue uma idéia análoga a apresentada por Peck et al. (1977) quando estabeleceu o fator de escala para a condutividade hidráulica, $\mathbf{a_k}$:

$$\mathbf{a}_k = \mathbf{a}_p^2 \tag{3.14}$$

onde, $\mathbf{a_p}$ é o coeficiente escalar da dimensão dos poros, isto é, a transformação de coordenadas do meio poroso.

Sejam duas áreas de recarga, uma com coordenadas **x** e **y** e outra com coordenadas $\mathbf{x_1}$ e $\mathbf{y_1}$ que são relacionadas através dos coeficientes de escala $\mathbf{a_x}$ e $\mathbf{a_y}$,

enquanto a transmissividade é escalada pelo coeficiente $\mathbf{a_T}$, o potencial hidráulico pelo coeficiente $\mathbf{a_h}$ e a recarga pelo coeficiente $\mathbf{a_q}$:

$$\begin{aligned} x &= a_x.x_1 & y &= a_y.y_1 & & \\ T &= a_T.T_1 & h &= a_h.h_1 & q &= a_q.q_1 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Sabe-se que a transmissividade é espacialmente variável e supor que a função transmissividade na área de recarga seja simplesmente um múltiplo da transmissividade em pequena escala não é uma hipótese realística, mas está na mesma categoria do conceito de "média similar" (Allison,1977, apud Allison, 1988).

O conceito de "média similar" foi introduzido na literatura por Miller e Miller (1955a) e Miller e Miller (1955b), cujos trabalhos induziram vários estudos posteriores. Para a média similar, a geometria interna do meio difere somente pelo fator tamanho. O meio deveria ser constituído de material granular apresentando a mesma porosidade e a mesma distribuição relativa de partículas e poros (Warrick et al., 1977).

Com o objetivo de determinar o coeficiente de escala $\mathbf{a_q}$ para a recarga em função dos demais coeficientes para os outros parâmetros do sistema, será utilizada a equação (3.9). Substituindo as derivadas de **T** e **h**, tem-se:

$$q = T\left(\frac{1}{a_x^2}.\frac{\partial^2 h}{\partial x_1^2} + \frac{1}{a_y^2}.\frac{\partial^2 h}{\partial y_1^2}\right) + \frac{1}{a_x^2}.\frac{\partial T}{\partial x_1}.\frac{\partial h}{\partial x_1} + \frac{1}{a_y^2}.\frac{\partial T}{\partial y_1}.\frac{\partial h}{\partial y_1} \tag{3.16}$$

Aceitando a hipótese da isotropia do sistema, $\mathbf{a_x = a_y = a_p}$, os fatores de escala dos diferentes parâmetros serão independentes da posição, portanto a equação (3.16) torna-se:

$$a_q q_1 = \frac{a_T a_h}{a_p^2}\left[T_1\left(\frac{\partial^2 h_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 h_1}{\partial y_1^2}\right) + \frac{\partial T_1}{\partial x_1}.\frac{\partial h_1}{\partial x_1} + \frac{\partial T_1}{\partial y_1}.\frac{\partial h_1}{\partial y_1}\right] \tag{3.17}$$

A base da teoria hidráulica de escala é a suposição de que as equações que regem um fenômeno natural, são invariantes da escala. Portanto, a equação (3.11) é mantida para quantidades escaladas. Consequentemente, o termo entre colchetes na equação (3.17) deve ser igual a $\mathbf{q_1}$, e então:

$$a_q = \frac{a_T . a_h}{a_p^2} \tag{3.18}$$

o que permite a determinação do coeficiente de escala da recarga a partir dos valores escalados da transmissividade, nível potenciométrico e escala horizontal.

O problema de comparação de recargas estimadas em diferentes escalas pode ser facilitado pela introdução do "critério **L** de recarga escalada" (Allison, 1988):

$$L = \frac{a_q . a_p^2}{a_T . a_h} \equiv 1 \tag{3.19}$$

Como a área de recarga é um termo de grande importância na estimativa de recarga, torna-se mais prático escrever o critério **L** como:

$$L = \frac{a_q . a_A}{a_T . a_h} \equiv 1 \tag{3.20}$$

onde, $a_A = a_p^2$ é a escala da área de recarga.

Na maioria dos casos práticos, o critério **L** pode ser usado para determinar o fator de escala de recarga, a_q, supondo que a teoria de escala é aplicável. Se uma recarga conhecida **q** em uma pequena parte da área de recarga onde, **h** e **T** são conhecidos, usando a teoria de escala, a recarga natural q_1, em uma área maior A_1 onde h_1 e T_1 são conhecidos, pode ser estimada por substituição das fórmulas de coeficientes de escala no critério **L**:

$$\frac{qA}{Th} = \frac{q_1 A_1}{T_1 h_1} \tag{3.21}$$

Esta dedução matemática exige similaridade da forma das áreas **A** e A_1 e similaridade de dependência espacial entre **T** , T_1 e **h** , h_1, condições que muito dificilmente poderão ser encontradas em situações práticas. No entanto, esta fórmula

pode ser utilizadas para estimativa prática da recarga reescalada desde que se tenha a plena consciência de que os resultados são somente aproximados.

A igualdade da equação 3.21 pode ser utilizada para aqüíferos similares. Este número, denominado de **RATH** *recharge responsivity* é uma variável adimensional do aqüífero que combina suas características mais importantes permitindo a regionalização através de uma única variável. Então, em vez da regionalização de q, T e h separadamente, obtém-se um único parâmetro adimensional, onde a área **A** corresponde à escala do *grid* de regionalização, como em Hendricks et al. (1986).

4. METODOLOGIA

4.1. Considerações gerais

Os problemas associados à estimativa de recarga subterrânea exigem uma conceituação bem definida e o uso de mais de uma técnica para verificação dos resultados. Na realidade, a estimativa de recarga deve ser vista como um processo interativo, nunca como um cálculo definitivo porque, além das já conhecidas incertezas a que este tipo de cálculo está sujeito, verificam-se variações associadas às questões de desenvolvimento, tais como: deteorização da qualidade da água subterrânea, super exploração de recursos e variações no uso territorial.

Um outro problema a ser superado em estimativa de recarga subterrânea é a inexistência de dados adequados para permitir uma calibração razoável de qualquer modelo, o que tem como conseqüência a introdução de falhas no estabelecimento de opções de gerenciamento. A obtenção de dados adicionais em grande escala, para implementação de projetos de pesquisa referentes à recarga, é normalmente inviável por razões de custo e de tempo requeridos para este fim.

Infelizmente, os dados disponíveis são, em geral, escassos e correspondem a períodos curtos. Um elemento comum a todas as decisões de gestão de recursos hídricos envolvendo recarga é a necessidade de iniciar programas de investigação com base em um modelo hidrogeológico conceitual, definido como uma descrição das condições hidrogeológicas, incluindo a distribuição e propriedades das rochas e do fluxo de água. Tal modelo conceitual é a chave para o desenvolvimento lógico subsequente da técnica matemática/numérica mais apropriada. Porém a exequibilidade de um programa deste gênero nem sempre é possível.

Embora os perigos de simplificações e generalizações sejam óbvios, a nível de planejamento, a recarga é, usualmente, calculada como o termo residual do balanço hídrico, considerando as perdas identificadas na forma de escoamento superficial (nem sempre considerado) e evapotranspiração. A precisão deste método depende da precisão dos dados iniciais, particularmente, da estimativa da evapotranspiração real. A grande vantagem deste método consiste na facilidade de obtenção dos dados

necessários para sua utilização.

A proposta metodológica que norteia este trabalho tem como meta fornecer um modelo para estimativa de recarga de um aqüífero livre, a partir da observação de sua resposta diante de uma única fonte de recarga considerada, no caso a precipitação. Esta observação pontual deverá ser utilizada para inferir a recarga para o sistema estudado utilizando a teoria de escala (Allison e Peck, 1989).

Desta maneira, pretende-se obter um dimensionamento da reserva renovável usando uma conceituação mais adequada a este sistema que possa se constituir em uma informação a ser utilizada na tomada de decisões da gestão do recurso hídrico subterrâneo disponível.

De acordo com esta proposta metodológica, os diferentes aspectos necessários para a abordagem deste problema envolvem o conhecimento das características do aqüífero, especialmente, área disponível de recarga, potencial hidráulico e "transmissividade". Além destes aspectos, foram consideradas informações adicionais referentes às características hidroquímicas, visando a possibilidade da constatação de variações sazonais associadas à recarga direta.

As atividades necessárias ao desenvolvimento da metodologia adotada consistiram, inicialmente, no levantamento dos dados básicos existentes sobre o aqüífero dunas/paleodunas na área de estudo para caracterização de sua geometria e comportamento hidráulico, além de sua caracterização hidroquímica.

Paralelamente, foi iniciado o processo de monitoramento que consistiu de medidas diárias de precipitação pluviométrica, medidas mensais de nível estático, condutividade elétrica, pH e oxigênio dissolvido, e coleta de amostras de água para análises físico-químicas. Adicionalmente, foram coletadas algumas amostras para determinação das concentrações isotópicas de ^{18}O e do ^{2}H. A metodologia adotada será descrita a seguir, abordando os diferentes aspectos do desenvolvimento dos trabalhos.

4.2. Levantamento de Dados

O levantamento de dados consistiu do cadastramento de pontos de água subterrânea para elaboração do mapa potenciométrico e de consulta a relatórios técnicos de perfuração de poços para obtenção de dados pormenorizados relativos a

perfis litológicos, ensaios de bombeamento e análises físico-químicas visando a caracterização geométrica, hidrodinâmica e hidroquímica do sistema em estudo. Foram também consultados relatórios referentes a levantamentos geofísicos, por eletrorresistividade, realizados na área, para detalhamento de informações relativas à espessura das dunas, além de outros relatórios, mais gerais, sobre geologia e/ou hidrogeologia da região.

4.3. Tratamento dos dados disponíveis

4.3.1. Mapa potenciométrico

O mapa potenciométrico foi preparado em ambiente digital, a partir dos pontos de água subterrânea, cujo posicionamento foi obtido com a utilização de GPS, e de dados altimétricos, em arquivo digitalizado, conseguido junto ao Instituto de Planejamento do Município de Fortaleza (IPLAM), órgão que coordenou um levantamento com alta densidade de pontos cotados, compatível com a escala de 1:2000. Para a geração do mapa potenciométrico foi utilizada uma densidade de pontos cotados de aproximadamente um ponto para um *grid* de 200 x 200m.

Os pontos de água subterrânea consistem de poços tubulares profundos cadastrados durante a elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos, 1989, que constam do banco de dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Deste banco de dados, foram selecionados 459 poços perfurados a partir do ano de 1970, com litologia identificada como dunas/paleodunas, situados na região da área em estudo. A este banco de dados foram adicionados dados de 238 poços perfurados por empresas privadas, em data posterior à 1989, perfazendo um total de 697 poços cadastrados. Com este cadastro de poços passou-se para a fase de seleção daqueles com localização precisa. Esta seleção foi difícil tendo em vista que nenhum dos poços cadastrados apresentava coordenadas geográficas que definissem o seu posicionamento, e a maioria deles não tinha endereço bem especificado. Desta forma, dos 697 poços cadastrados, somente 113, apresentados no Anexo 1, foram devidamente identificados e posicionados, em coordenadas UTM, com a utilização de GPS (Figura 4.1).

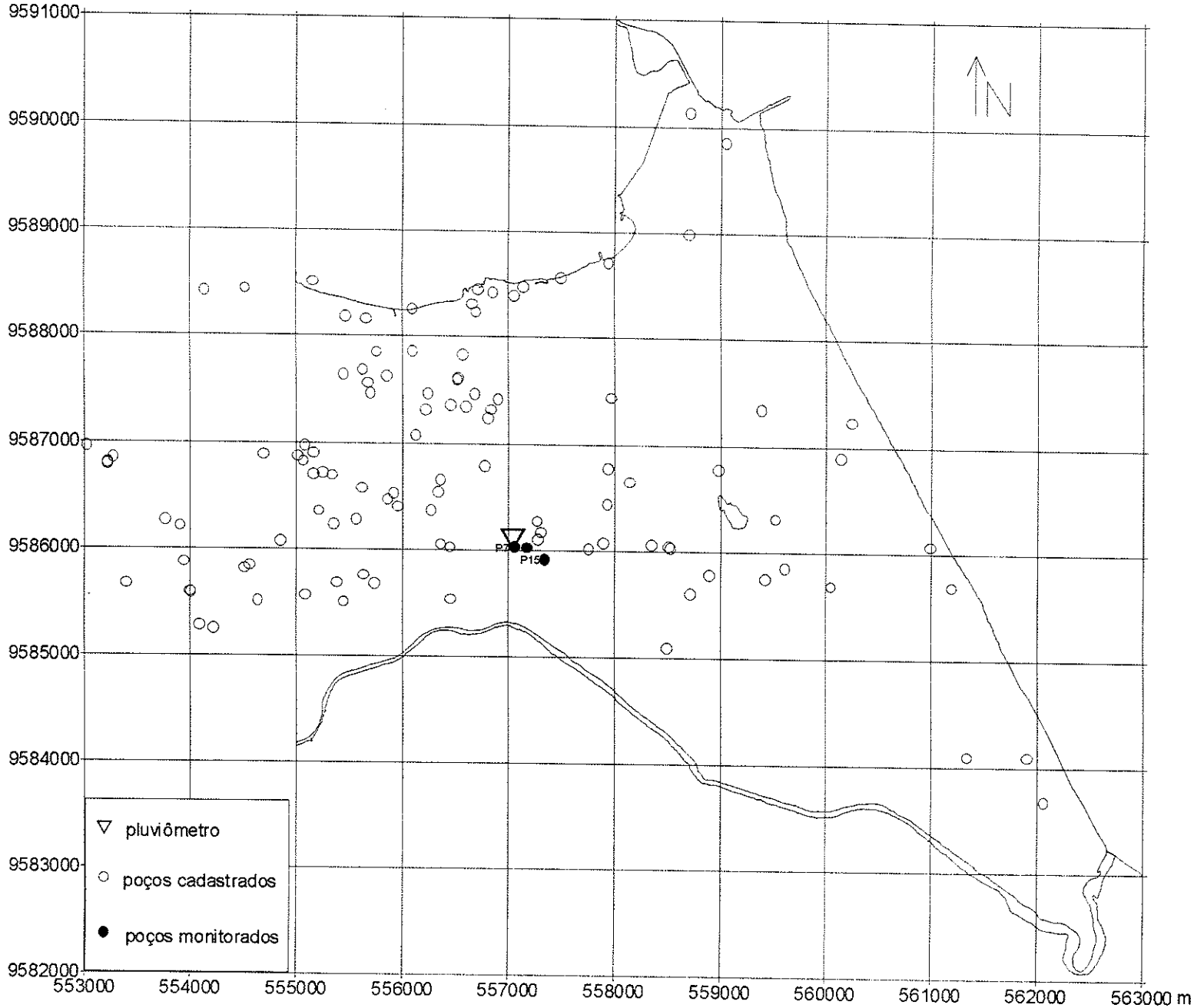


Figura 4.1 - Localização dos poços cadastrados.

A elaboração do mapa potenciométrico foi realizada a partir da altimetria digitalizada e dos dados de nível estático dos poços cadastrados. Para interpolação de dados, utilizou-se o procedimento de *krigagem*, com modelo de variograma linear usando um *grid* de 200 x 200 m. No caso da altimetria, cuja densidade de dados era maior, foi utilizado o método de busca por quadrante; para os níveis estáticos foram utilizados todos os dados disponíveis na interpolação. A malha de potenciais foi obtida por subtração dos valores de altitude e de nível estático calculados por interpolação. Para o traçado das linhas de isopotencial utilizou-se o procedimento *spline* de suavização com inserção de dois nós.

4.3.2. Parâmetros Hidrodinâmicos do Aqüífero

Na determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do aqüífero, condutividade hidráulica **K** e "transmissividade" **T**, foram considerados, para efeito de comparação, os valores determinados em trabalhos anteriores, já descritos no capítulo 2, e aqueles obtidos a partir de 28 ensaios de bombeamento realizados nas baterias de poços da CAGECE situadas na Praia do Futuro, área 1 (GEONORD, 1984) e 32 realizados no Parque do Cocó, área 3 (CAGECE/PLANAT, 1977) (Figura 2.5).

Os dados resultantes destes ensaios de bombeamento foram plotados em diagrama **S x log t** para determinação da "transmissividade" utilizando o método simplificado de Jacob. No entanto, as curvas resultantes dos ensaios em vários destes poços apresentam formas inesperadas denotando falhas durante sua execução, tais como imprecisão nas medidas e/ou execução dos ensaios com a interferência de bombeamento em outros poços. Desta forma, optou-se pela utilização do método da recuperação de Theis & Jacob a partir dos diagramas de rebaixamento residual **S'** *versus* **log t/t'** cujos dados estão apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Rebaixamento residual (m) de testes em poços do Parque do Cocó, área 3 (Fonte:CAGECE/PLANAT, 1977).

t/t'	P 01	P 02	P 03	P 04	P 05	P 06	P 07	P 08	P 09	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 17	P 18	P 19	P 20	P 21	P 22	P 23	P 24	P 25	P 26	P 27	P 29	P 30	P 31	P 32	P 34	P 35
1441,00	0,360	0,493	0,370	0,454	0,515	0,621	0,425	0,325	0,170	0,166	0,300	0,305	0,415	0,062	0,975	0,485	0,571	0,550	0,470	0,236	0,165	0,142	0,540	0,295	0,865	0,406	0,415	1,153	1,164	0,917	0,250
721,00	0,225	0,351	0,395	0,395	0,455	0,445	0,398	0,277	0,160	0,165	0,261	0,230	0,215	0,120	0,420	0,414	0,532	0,415	0,391	0,231	0,110	0,117	0,501	0,263	0,556	0,299	0,265	0,715	0,932	0,559	0,194
481,00	0,199	0,328	0,371	0,370	0,453	0,416	0,383	0,268	0,144	0,154	0,271	0,220	0,160	0,095	0,365	0,335	0,487	0,385	0,388	0,206	0,095	0,109	0,449	0,245	0,451	0,265	0,238	0,540	0,752	0,464	0,165
361,00	0,186	0,305	0,358	0,357	0,439	0,400	0,370	0,265	0,142	0,150	0,261	0,210	0,157	0,082	0,345	0,325	0,458	0,365	0,370	0,193	0,083	0,102	0,412	0,233	0,397	0,260	0,209	0,447	0,653	0,401	0,138
289,00	0,178	0,305	0,348	0,347	0,420	0,388	0,362	0,256	0,141	0,143	0,255	0,200	0,150	0,077	0,329	0,315	0,437	0,352	0,355	0,183	0,076	0,096	0,385	0,224	0,363	0,244	0,189	0,395	0,582	0,353	0,099
241,00	0,172	0,296	0,341	0,339	0,411	0,376	0,354	0,256	0,140	0,138	0,249	0,198	0,130	0,062	0,320	0,310	0,420	0,340	0,339	0,176	0,070	0,093	0,363	0,215	0,332	0,239	0,177	0,353	0,517	0,353	0,092
181,00	0,161	0,280	0,329	0,326	0,386	0,361	0,340	0,245	0,137	0,131	0,242	0,195	0,123	0,033	0,313	0,300	0,345	0,325	0,320	0,168	0,064	0,084	0,330	0,196	0,311	0,226	0,159	0,278	0,453	0,318	0,080
145,00	0,152	0,268	0,318	0,321	0,378	0,346	0,328	0,236	0,133	0,122	0,234	0,180	0,123	0,020	0,303	0,295	0,335	0,315	0,307	0,164	0,056	0,077	0,308	0,190	0,289	0,217	0,146	0,264	0,403	0,293	0,078
97,00	0,138	0,247	0,300	0,304	0,355	0,322	0,306	0,227	0,121	0,112	0,217	0,125	0,113	0,010	0,283	0,280	0,332	0,295	0,277	0,146	0,037	0,069	0,303	0,182	0,253	0,204	0,135	0,223	0,326	0,261	0,065
73,00	0,125	0,231	0,287	0,291	0,350	0,315	0,290	0,222	0,119	0,103	0,208	0,130	0,105	0,007	0,275	0,260	0,328	0,275	0,265	0,141	0,028	0,065	0,274	0,166	0,240	0,190	0,128	0,182	0,295	0,242	0,054
58,60	0,117	0,217	0,272	0,276	0,347	0,298	0,269	0,216	0,115	0,084	0,201	0,120	0,112	0,003	0,256	0,257	0,317	0,263	0,252	0,134	0,022	0,062	0,255	0,161	0,231	0,184	0,125	0,169	0,273	0,230	0,053
49,00	0,110	0,211	0,259	0,267	0,335	0,270	0,252	0,212	0,110	0,084	0,191	0,120	0,106	0,000	0,260	0,252	0,307	0,257	0,245	0,126	0,018	0,059	0,221	0,147	0,220	0,176	0,123	0,154	0,243	0,217	0,047
37,00	0,095	0,188	0,240	0,252	0,313	0,255	0,233	0,200	0,105	0,082	0,178	0,117	0,075		0,247	0,242	0,317	0,243	0,240	0,123	0,013	0,057		0,135	0,206	0,163	0,114	0,131	0,202	0,210	0,043
29,80	0,088	0,176	0,229	0,237	0,299	0,233	0,214	0,186	0,105	0,065	0,169	0,112	0,070		0,235	0,230	0,265	0,228	0,231	0,120	0,010	0,055	0,194	0,128	0,187	0,163	0,110	0,110	0,190	0,200	0,039
25,00	0,080	0,165	0,212	0,227	0,266	0,215	0,203	0,176	0,100	0,068	0,160	0,105	0,076		0,230	0,215	0,272	0,222	0,225	0,113	0,006	0,054	0,183	0,120	0,179	0,140	0,106	0,089	0,185	0,195	0,035
21,57	0,075	0,153	0,203	0,212	0,277	0,202	0,200	0,175	0,098	0,067	0,152	0,102	0,070		0,226	0,210	0,267	0,213	0,221	0,108	0,005	0,052	0,184	0,118	0,161	0,134	0,104	0,080	0,160	0,179	0,035
19,00	0,070	0,145	0,190	0,204	0,261	0,190	0,182	0,172	0,097	0,060	0,145	0,097	0,100		0,220	0,205	0,260	0,205	0,215	0,106	0,004	0,051	0,180	0,110	0,167	0,129	0,102	0,071	0,152	0,168	0,035
15,40	0,062	0,129	0,124	0,185	0,245	0,175	0,168	0,165	0,095	0,056	0,138	0,088	0,055		0,210	0,192	0,249	0,195	0,212	0,099	0,002	0,048	0,169	0,109	0,160	0,118	0,096	0,060	0,147	0,135	0,035
13,00	0,054	0,116	0,113	0,169	0,232	0,165	0,153	0,156	0,092	0,050	0,125	0,082	0,055		0,180	0,185	0,242	0,186	0,204	0,092	0,001	0,045	0,159	0,101	0,151	0,110	0,090	0,052	0,130	0,128	0,035
10,60	0,047	0,111	0,097	0,149	0,212	0,140	0,138	0,150	0,087	0,040	0,113	0,080	0,055		0,160	0,170	0,229	0,177	0,195	0,090	0,000	0,038	0,159	0,093	0,147	0,100	0,081	0,038	0,116	0,128	0,033
9,00	0,045	0,098	0,085	0,135	0,201	0,128	0,063	0,136	0,085	0,035	0,107	0,063	0,055		0,150	0,162	0,218	0,165	0,189	0,088	0,022	0,035	0,136	0,085	0,135	0,093	0,061	0,016	0,107	0,122	0,030
7,00	0,034	0,086	0,058	0,107	0,180	0,110	0,073	0,070	0,066	0,010	0,090	0,051	0,055		0,120	0,140	0,215	0,160	0,180	0,081	0,028	0,035	0,122	0,078	0,123	0,081	0,072	0,009	0,073	0,116	0,025
5,80	0,027	0,051	0,058	0,092	0,160	0,093	0,061	0,046	0,045	0,013	0,072	0,038	0,055		0,105	0,125	0,213	0,157	0,133	0,072	0,022	0,034	0,118	0,067	0,111	0,070	0,063	0,008	0,064	0,110	0,025
5,00	0,024	0,043	0,115	0,075	0,142	0,080	0,050	0,039	0,038		0,060	0,034	0,060		0,090	0,120	0,210	0,152	0,170	0,071	0,022	0,035	0,112	0,060	0,116	0,053	0,057	0,006	0,056	0,108	0,025
4,43	0,020	0,032	0,122	0,065	0,138	0,073	0,043	0,034	0,060		0,057	0,031	0,075	0,010	0,090	0,120	0,206	0,150	0,157	0,071	0,022	0,036	0,110	0,050	0,157	0,042	0,055	0,005	0,045	0,112	0,020
4,00	0,016	0,030	0,122	0,055	0,129	0,058	0,041	0,027	0,065	0,012	0,057	0,026	0,080	0,010	0,090	0,120	0,198	0,160	0,112	0,071	0,020	0,036	0,107	0,045	0,100	0,038	0,051	0,004	0,040	0,106	0,020
3,67	0,012	0,022	0,122	0,045	0,129	0,050	0,041	0,027	0,065	0,012	0,057	0,026	0,085	0,010	0,100	0,120	0,239	0,160	0,111	0,070	0,019	0,036	0,106	0,040	0,103	0,031	0,046	0,003	0,039	0,104	0,020
3,40	0,012	0,016	0,122	0,040	0,124	0,046	0,030	0,015	0,070	0,000	0,052	0,021	0,090	0,010	0,110	0,115	0,171	0,172	0,111	0,069	0,015	0,036	0,104	0,035	0,105	0,029	0,035	0,002	0,035	0,097	0,020
3,00	0,006	0,003	0,092	0,030	0,124	0,038	0,013	0,012	0,070		0,053	0,015	0,080	0,010	0,110	0,100	0,152	0,115	0,111	0,059	0,014	0,036		0,035	0,106	0,027	0,026	0,002	0,035	0,103	0,020

Tabela 4.2 - Rebaixamento residual (m) de testes em poços da Praia do Futuro, área 1 (Fonte:GEONORD, 1984).

t/t'	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P23	P24	P25	P26	P27	P01A	P01E3	P02E3	P03E3
361,00	0,060	0,111	0,074	0,047	0,063	0,044	0,049	0,098	0,131	0,092	0,107	0,115	0,121	0,337	0,102	0,327	0,560	0,443	0,529	0,123	0,058	0,058	0,066	0,074	0,418	0,548	0,105	0,098
181,00	0,046	0,086	0,068	0,034	0,054	0,035	0,045	0,089	0,119	0,084	0,088	0,089	0,090	0,318	0,087	0,295	0,507	0,408	0,481	0,110	0,040	0,026	0,052	0,050	0,169	0,136	0,081	0,071
121,00	0,038	0,068	0,060	0,030	0,049	0,033	0,042	0,083	0,114	0,055	0,075	0,076	0,076	0,307	0,080	0,277	0,468	0,385	0,443	0,105	0,034	0,020	0,047	0,041	0,108	0,076	0,072	0,069
91,00	0,035	0,059	0,056	0,027	0,048	0,032	0,040	0,079	0,108	0,049	0,066	0,067	0,068	0,298	0,075	0,260	0,437	0,371	0,412	0,101	0,029	0,017	0,043	0,038	0,096	0,063	0,067	0,061
73,00	0,033	0,055	0,054	0,025	0,045	0,030	0,037	0,076	0,104	0,046	0,060	0,062	0,059	0,290	0,070	0,248	0,413	0,359	0,384	0,097	0,025	0,015	0,041	0,036	0,087	0,055	0,062	0,054
61,00	0,031	0,052	0,052	0,026	0,044	0,029	0,035	0,074	0,101	0,043	0,054	0,059	0,053	0,284	0,065	0,239	0,392	0,349	0,360	0,094	0,023	0,014	0,039	0,034	0,080	0,050	0,056	0,045
46,00	0,028	0,047	0,049	0,022	0,041	0,027	0,031	0,071	0,096	0,039	0,047	0,052	0,046	0,273	0,056	0,219	0,355	0,326	0,316	0,088	0,020	0,012	0,036	0,031	0,074	0,045	0,050	0,040
37,00	0,026	0,045	0,047	0,020	0,039	0,026	0,028	0,068	0,093	0,035	0,043	0,046	0,040	0,268	0,051	0,203	0,326	0,312	0,290	0,084	0,018	0,011	0,034	0,029	0,070	0,042	0,044	0,036
25,00	0,023	0,039	0,043	0,017	0,035	0,022	0,022	0,062	0,084	0,030	0,036	0,042	0,032	0,250	0,044	0,167	0,267	0,283	0,235	0,075	0,015	0,008	0,030	0,025	0,067	0,037	0,030	0,024
19,00	0,020	0,035	0,041	0,014	0,033	0,018	0,018	0,057	0,078	0,026	0,031	0,036	0,028	0,236	0,040	0,146	0,236	0,259	0,187	0,068	0,014	0,007	0,027	0,022	0,063	0,034	0,022	0,016
15,40	0,019	0,033	0,037	0,012	0,030	0,015	0,015	0,053	0,072	0,024	0,028	0,031	0,026	0,224	0,037	0,127	0,204	0,240	0,143	0,061	0,013	0,006	0,025	0,020	0,059	0,032	0,016	0,014
13,00	0,017	0,030	0,035	0,009	0,025	0,012	0,012	0,050	0,068	0,022	0,026	0,027	0,024	0,217	0,034	0,114	0,182	0,224	0,114	0,055	0,012	0,006	0,024	0,018	0,056	0,031	0,014	0,012
10,00	0,016	0,028	0,031	0,004	0,018	0,007	0,008	0,044	0,060	0,018	0,023	0,020	0,021	0,204	0,028	0,091	0,137	0,191	0,079	0,047	0,010	0,005	0,022	0,017	0,054	0,028	0,011	0,008
8,20	0,015	0,026	0,028	0,001	0,013	0,004	0,004	0,041	0,056	0,016	0,021	0,014	0,019	0,193	0,025	0,076	0,114	0,172	0,057	0,041	0,009	0,005	0,020	0,016	0,051	0,025	0,008	0,006
7,00	0,015	0,023	0,026	0,000	0,009	0,002	0,001	0,038	0,051	0,015	0,020	0,010	0,016	0,185	0,023	0,065	0,088	0,155	0,042	0,035	0,008	0,005	0,019	0,015	0,048	0,023	0,006	0,004
6,14	0,014	0,021	0,023	0,004	0,005	0,000	0,000	0,035	0,045	0,014	0,018	0,008	0,018	0,177	0,020	0,053	0,074	0,142	0,034	0,031	0,008	0,004	0,019	0,015	0,044	0,022	0,005	0,004
5,50	0,014	0,020	0,021	0,005	0,002	0,000	0,004	0,033	0,041	0,012	0,017	0,007	0,017	0,170	0,019	0,047	0,063	0,134	0,026	0,028	0,007	0,004	0,018	0,014	0,041	0,020	0,004	0,003
4,60	0,014	0,018	0,018	0,007	0,000	0,003	0,008	0,030	0,036	0,010	0,015	0,004	0,016	0,161	0,017	0,038	0,044	0,120	0,017	0,023	0,007	0,004	0,018	0,014	0,038	0,017	0,003	0,003
4,00	0,013	0,017	0,016	0,010	0,007	0,003	0,013	0,027	0,034	0,009	0,014	0,002	0,016	0,153	0,016	0,032	0,030	0,106	0,011	0,020	0,007	0,004	0,017	0,014	0,036	0,016	0,003	0,002
3,40	0,013	0,016	0,013	0,012	0,010	0,004	0,017	0,025	0,030	0,009	0,013	0,001	0,015	0,138	0,014	0,027	0,022	0,093	0,008	0,016	0,006	0,003	0,017	0,013	0,033	0,015	0,002	0,002
3,00	0,012	0,016	0,011	0,012	0,011	0,004	0,020	0,023	0,027	0,008	0,013	0,001	0,014	0,124	0,013	0,021	0,016	0,082	0,005	0,013	0,006	0,003	0,017	0,013	0,030	0,014	0,002	0,002

4.3.3. Caracterização Hidroquímica

Para a caracterização hidroquímica foram utilizadas análises físico-químicas realizadas em amostras coletadas quando da perfuração dos poços das baterias estudadas para determinação dos parâmetros mencionados no item anterior.

A classificação hidroquímica das águas foi obtida utilizando a plotagem das concentrações percentuais dos ions maiores: Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, NO_3^{-}, $CO_3^{=}$, HCO_3^{-} e $SO_4^{=}$, em Diagrama de Piper, após a seleção daquelas análises que apresentaram erro menor ou igual a 15%. O erro utilizado como critério de seleção das análises foi obtido pelo balanço iônico a partir da seguinte fórmula:

$$E = \left|\frac{p - n}{p + n}\right| x100 \qquad (4.1)$$

onde, **E** é o erro em percentual, **p** é a concentração de cátions em miliequivalentes por litro e **n** é a concentração de ânions na mesma unidade.

4.4. Monitoramento

O monitoramento consistiu de observação, registro e acompanhamento, de precipitações, de medidas de nível de água em poços e de características físico-químicas das águas subterrâneas. O registro de precipitações e monitoramento de nível de água foi realizado no período de julho de 1995 a julho de 1998.

Para as medidas de precipitação foi utilizado um pluviômetro, instalado pela FUNCEME na Estação de Tratamento de Água da CAGECE, situada no mesmo local onde está a bateria de poços (Figura 4.1), de onde se obteve, diariamente, os registros de precipitações, através de leituras efetuadas no início da manhã de cada dia, desde agosto de 1995 a agosto de 1998.

Para monitoramento de nível de água foi utilizada uma bateria de poços da CAGECE, situada na área do Parque do Cocó (Figura 4.1). Com uma freqüência mensal, a partir de setembro de 1995, foram efetuadas medidas de nível estático em seis dos poços da bateria e medidas, *in situ*, de condutividade elétrica, pH e oxigênio

dissolvido da água do poço surgente e da água bombeada de um dos poços observados. A expectativa associada ao acompanhamento físico-químico das águas subterrâneas era a verificação de variações que pudessem estar relacionadas à recarga, em analogia ao que ocorre com as águas superficiais (Bhangu e Whitfield, 1997).

No início do período de monitoramento, foi constatada uma diferença significativa entre condutividade da água de um poço surgente (~300 μS/cm), devido à condições topográficas, e da água obtida via bombeamento (~500 μS/cm). Esta diferença, considerada significativa, induziu à decisão de fazer o acompanhamento das características físico-químicas da água do poço surgente e da água bombeada.

Desta forma, foram coletadas duas amostras para análise físico-química a cada mês, durante o período de um ano, de setembro de 1995 a setembro de 1996, sendo uma do poço surgente e outra da água bombeada de um dos poços da bateria. As análises químicas foram realizadas no laboratório da CAGECE. Dureza, concentração dos ions de Ca^{++}, Mg^{++}, Cl^{-} e oxigênio consumido foram determinados por titulação; concentração dos ions de sódio e potássio no fotômetro de chama; concentração dos ions sulfato, ferro, alumínio, nitrato, nitrito e amônia no espectrofotômetro; e concentração do ion de manganês e, às vezes, ferro por absorção atômica.

As amostras para análise de concentração isotópica de ^{18}O e de ^{2}H foram coletadas no período anterior e posterior à ocorrência de precipitações, no segundo período de chuvas detectado pelo monitoramento, 1997, e as análises foram realizadas no laboratório do CENA/USP.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Características gerais da área

O sistema em estudo é um aqüífero livre, constituído de areias de praia, dunas móveis, dunas fixas por vegetação e aluviões. Todas estas feições, incluídas no domínio geomorfológico denominado **planície litorânea** (Moreira e Gatto, 1981; Souza, 1988, 1989) são formadas por materiais clásticos, predominantemente, areias de granulação média a fina, podendo apresentar lentes de argila, especialmente nas regiões de relevo mais baixo, onde se registram menores espessuras da fácies arenosa, nas áreas 1 e 3, (Perfis de sondagens no Anexo 2). Na área 1, Praia do Futuro, tem-se a presença de areias com uma granulação relativamente mais grossa. De forma geral, a granulometria encontrada neste sistema pode ser representada pela curva granulométrica mostrada na Figura 5.1, proveniente de amostra coletada em área de paleoduna, numa região intermediária entre as áreas 1 e 2.

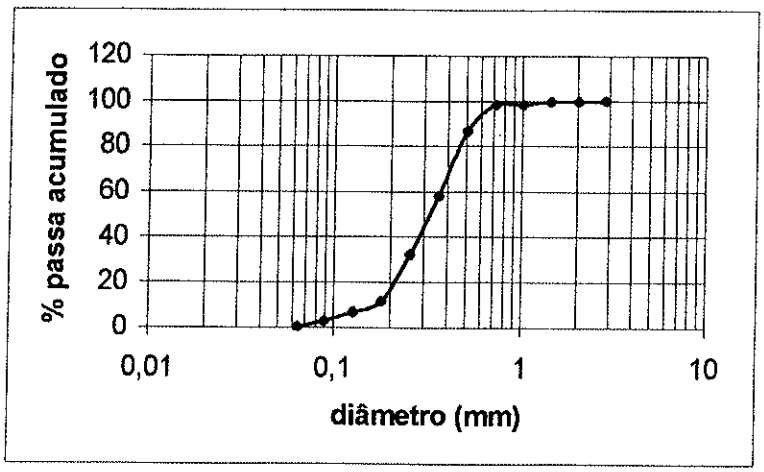


Figura 5.1 – Curva granulométrica representativa do sistema dunas/paleodunas.

Esta curva granulométrica, representativa de todo o sistema, apresenta um diâmetro efetivo de 0,17 mm e um coeficiente de uniformidade de 2,12. Este último valor, por ser inferior a 5, caracteriza uma areia muito uniforme.

A forma do relevo é característica de sistemas dunares com altitudes variando entre 0,58 e 64,37 metros, conforme mostra a figura 5.2.

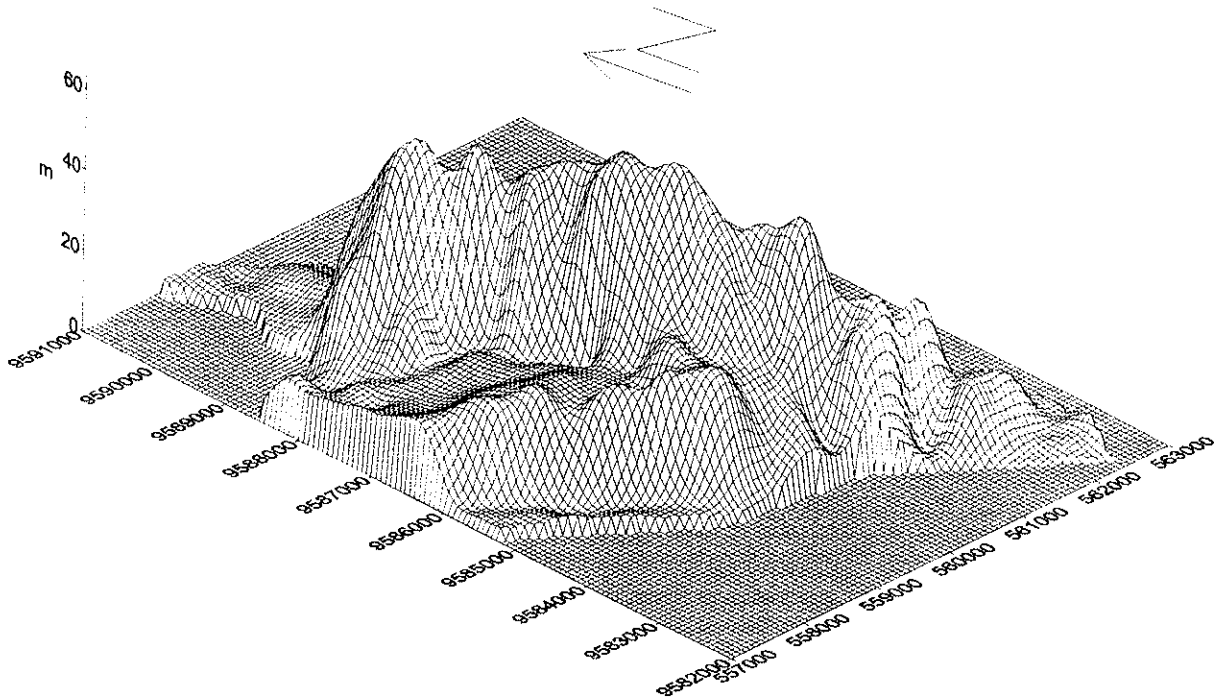


Figura 5.2 – Aspecto do relevo.

A superfície hidrostática, de forma geral, parece acompanhar o relevo. O fluxo subterrâneo dirige-se para o litoral, para o Rio Cocó e para a região central da área onde está situada a lagoa do Papicú (Figura 5.3).

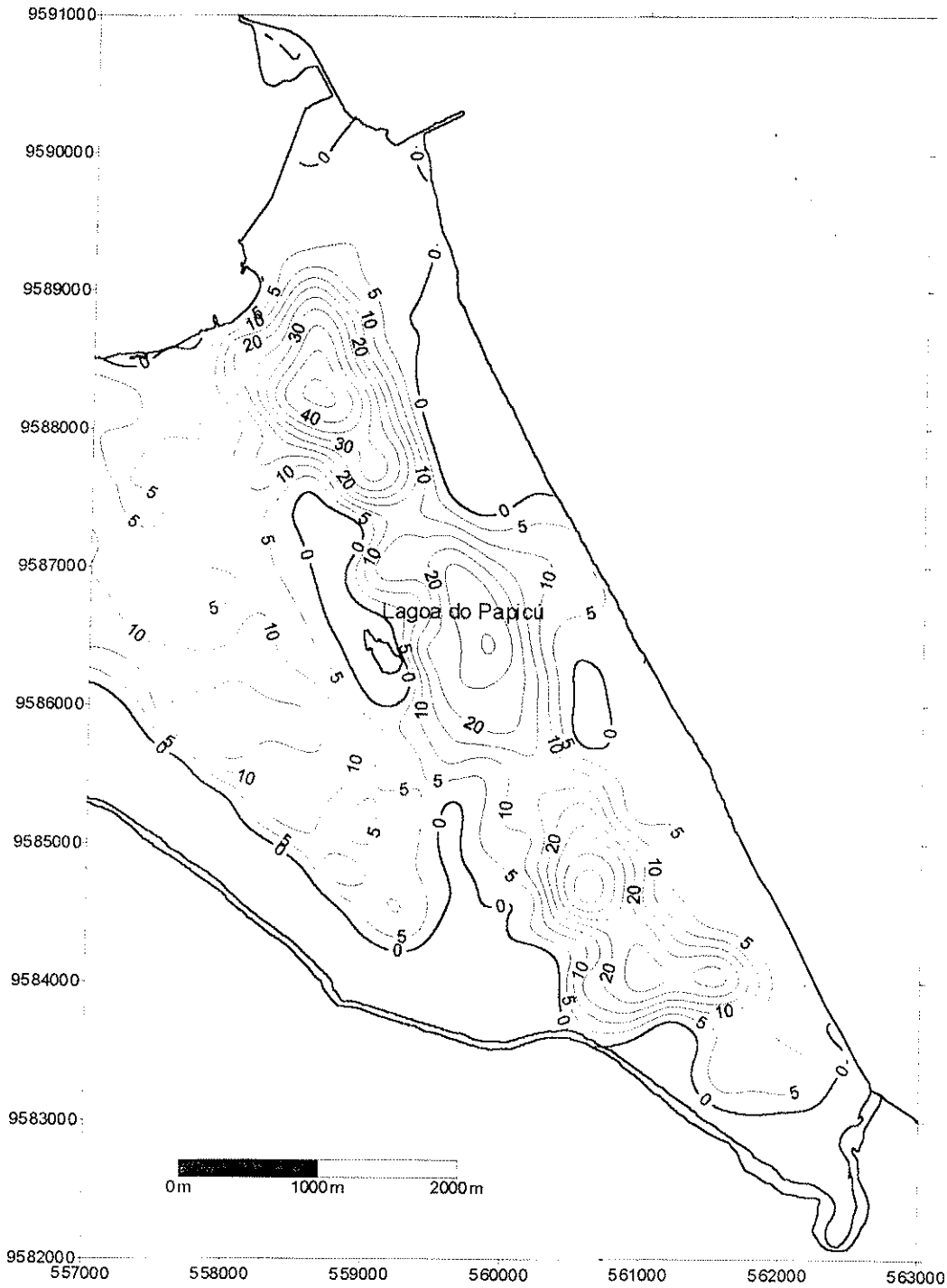


Figura 5.3 – Mapa potenciométrico.

5.2. Caracterização Hidrodinâmica

Na determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do aqüífero, condutividade hidráulica **K** e "transmissividade" **T**, foram considerados os valores determinados em trabalhos anteriores para a região da Cidade 2000 (Área 2) e aqueles obtidos a partir de ensaios de bombeamento realizados nas baterias de poços da CAGECE situadas na Praia do Futuro (Área 1) e na margem norte do rio Cocó (Área 3 na figura 2.2).

No que se refere às espessuras **E**, condutividades hidráulicas **K** e "transmissividades" **T**, os valores adotados nos diversos trabalhos não mostram variações tão significativas quanto àquela verificada no caso da porosidade efetiva $\mathbf{S_y}$ cuja variação é superior a 100% do menor valor (Tabela 2.2). A porosidade efetiva $\mathbf{S_y}$ é definida como a quantidade de água por unidade de volume de material poroso que é drenada de uma coluna deste material a partir do nível hidrostático até o nível mais profundo, por unidade de rebaixamento do nível hidrostático. Esta é a porosidade de drenagem e, neste sentido, pode ser avaliada pela equação de Biecinski (Pazdro, 1983, In: Alvarez e Niedzielski, 1996):

$$\mathbf{S_y = 0{,}117\sqrt[7]{K}} \qquad (5.1)$$

para a condutividade hidráulica **K** expressa em m/dia. Desta forma, utilizando-se os valores médios de condutividade hidráulica (Tabelas 5.1 e 5.2), foram estimadas as porosidades efetivas de 19,5 % para o Parque do Cocó (Área 3) e 26,4 % para a Praia do Futuro (Área1). Ambos os valores estão dentro dos limites propostos para areia média e fina (Johnson, 1967 In: Fetter, 1994).

No que se refere à **transmissividade** sabe-se que este termo, na sua conceituação original, não é rigorosamente adequado quando se trata de aqüíferos livres, no entanto, esta designação está aqui sendo utilizada para expressar o parâmetro obtido pelo produto da condutividade hidráulica **K** pela espessura saturada **E**.

As determinações das "transmissividades" foram realizadas com o auxílio do *software Aquifer test* da Watlerloo University, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2, juntamente com a vazão de teste **Q**, espessura saturada do aqüífero **E**, e condutividade hidráulica calculada **K**. Dois exemplos de saída do *Aquifer test*, referentes aos poços P26 da área 3 e P3 da área 1, estão contidos no Anexo 3. A área 1 (Praia do Futuro) apresenta valores de condutividade hidráulica superiores àqueles determinados para a área 3 (Parque do Cocó), consequentemente, esta relação é

preservada para as os valores de "transmissividades" já que a ordem de grandeza da espessura, para as duas áreas, é a mesma.

Tabela 5.1 – Características do aqüífero dunas/paleodunas determinadas para a área do Parque do Cocó (Área 3).

Poço	Q (m^3/h)	E (m)	K (m/s)	T (m^2/s)
P01	4,156	4,450	4,72E-04	2,10E-03
P02	6,500	5,900	3,72E-04	2,20E-03
P03	6,500	4,870	5,12E-04	2,48E-03
P04	5,900	7,060	2,82E-04	1,98E-03
P05	5,632	5,380	3,75E-04	2,02E-03
P06	6,500	6,160	2,98E-04	1,83E-03
P07	9,294	6,980	4,13E-04	2,88E-03
P08	6,500	8,380	3,35E-04	2,82E-03
P09	5,900	9,300	7,33E-04	6,82E-03
P10	5,918	6,520	6,32E-04	4,12E-03
P11	12,638	8,810	7,27E-04	6,40E-03
P12	7,538	11,220	3,58E-04	4,02E-03
P13	5,900	5,800	5,70E-04	3,30E-03
P14	5,410	10,410	3,65E-04	3,80E-03
P17	5,900	9,590	1,52E-04	1,46E-03
P18	3,809	7,970	2,03E-04	1,63E-03
P19	8,120	7,870	3,93E-04	3,10E-03
P20	6,575	7,060	3,83E-04	2,70E-03
P21	10,830	9,140	5,12E-04	4,67E-03
P22	9,280	11,020	6,57E-04	7,25E-03
P23	10,822	8,940	1,17E-03	1,05E-02
P24	7,517	11,750	8,77E-04	1,03E-02
P25	12,340	8,290	4,70E-04	3,90E-03
P26	7,735	8,810	4,78E-04	4,22E-03
P27	7,755	7,900	2,48E-04	1,95E-03
P29	8,107	7,550	4,67E-04	3,52E-03
P30	9,642	7,610	6,25E-04	4,75E-03
P31	6,853	7,600	1,46E-04	1,11E-03
P32	5,900	7,450	1,17E-04	8,68E-02
P33	4,088	5,240	6,95E-05	3,63E-04
P34	6,868	8,180	1,98E-04	1,63E-03
P35	5,900	8,450	4,92E-04	4,15E-03
Mínimo	**3,809**	**4,450**	**6,95E-05**	**3,63E-04**
Máximo	**12,638**	**11,750**	**1,17E-03**	**8,68E-02**
Média	**7,260**	**7,864**	**4,41E-04**	**6,27E-03**

Tabela 5.2 – Características do aqüífero dunas/paleodunas determinadas para a área da Praia do Futuro (Área 1).

Poço	Q (m^3/h)	E (m)	K (m/s)	T (m^2/s)
P01	9,280	5,040	4,53E-03	2,28E-02
P02	10,830	5,405	2,52E-03	1,37E-02
P03	8,120	4,777	2,90E-03	1,39E-02
P04	13,000	5,738	4,20E-03	2,40E-02
P05	10,830	5,370	2,75E-03	1,48E-02
P06	10,830	5,305	4,12E-02	2,18E-02
P07	10,830	5,237	2,98E-03	1,57E-02
P08	10,830	5,585	2,67E-03	1,49E-02
P09	9,280	5,570	1,63E-03	9,10E-03
P10	6,500	4,963	1,88E-03	9,37E-03
P11	10,830	4,443	2,85E-03	1,27E-02
P12	2,700	4,414	5,97E-04	2,63E-03
P13	9,28	6,520	1,50E-03	9,80E-03
P14	9,280	4,375	1,10E-03	4,80E-03
P15	5,900	5,670	1,26E-03	7,12E-03
P16	9,280	5,620	5,27E-04	2,97E-03
P17	10,830	5,667	3,48E-04	1,97E-03
P18	7,220	4,625	4,58E-04	2,12E-03
P19	3,610	4,820	1,37E-04	6,58E-04
P23	3,090	3,395	8,33E-04	2,83E-03
P24	13,000	6,810	4,43E-03	3,02E-02
P25	10,830	6,388	4,27E-03	2,73E-02
P26	13,000	6,462	4,60E-03	2,97E-02
P27	10,830	6,035	3,65E-03	2,20E-02
P01A	1,085	6,470	6,50E-04	4,20E-04
P01E3	1,105	4,767	6,70E-05	3,20E-04
P02E3	3,419	4,075	8,40E-04	3,42E-03
P03E3	3,209	4,411	6,75E-04	2,97E-03
Mínimo	**1,085**	**3,395**	**6,70E-05**	**3,20E-04**
Máximo	**13,000**	**6,810**	**4,12E-02**	**3,02E-02**
Média	**8,172**	**5,284**	**3,43E-03**	**1,16E-02**

Para a região central da área de estudo, Cidade 2000 (Área 2) dispõe-se somente dos valores citados no trabalho da SUDENE (Beltrão e Manoel Filho,1973),

que constam da tabela 5.3. Observa-se que a "transmissividade" média para esta área apresenta valor da mesma ordem de grandeza daquele determinado para a área 3.

Tabela 5.3 – Transmissividades determinadas para a área da Cidade 2000, área 2 (Fonte:CAGECE/PLANAT, 1976b).

Piezômetros	**T (m^2/s)**
C-04/71	$7,8x10^{-3}$
C-05/71	$3,4x10^{-3}$
C07/71	$4,3x10^{-3}$
Média	$5,2x10^{-3}$

Nesta área, foram realizadas 30 sondagens ao longo de uma linha orientada na direção NW-SE, perfazendo um total perfurado de 576,1 metros. A espessura saturada média verificada a partir destas sondagens foi de 11,81 m com um valor mínimo de 7 m e máximo de 14,6 m (CAGECE/PLANAT, 1976b).

Analisando-se o histograma de "transmissividades" para a área 1, que apresentou maior amplitude, observa-se uma distribuição do tipo lognormal, para uma amplitude de classe de 0,005 m^2/s iniciando em 0,003 m^2/s. Representando-se as freqüências das áreas 2 e 3 no mesmo histograma (Figura 5.4), verifica-se que, nas três áreas, a maior freqüência de valores está no primeiro intervalo de classe, cujo valor médio é: **T = 0,0028 m^2/s**.

Este é um valor subestimado para a "transmissividade", pois é inferior à todas as médias calculadas para cada uma das três áreas, no entanto, considera-se um valor seguro para o caso de um modelo simplificado de sistema homogêneo, englobando as três áreas.

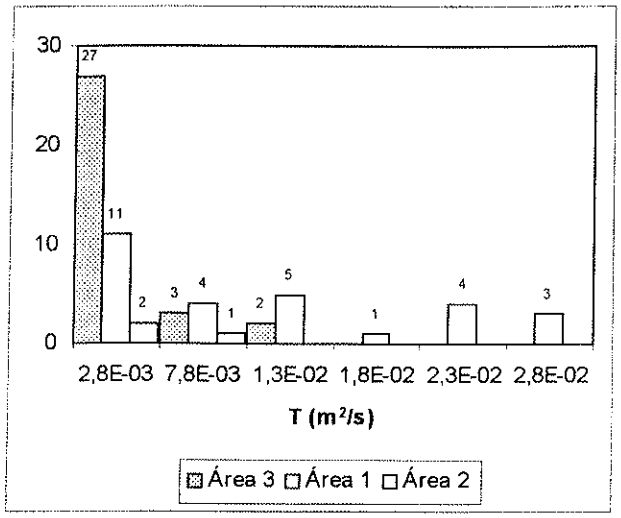


Figura 5.4 – Histograma de "transmissividades".

5.3. Caracterização Hidroquímica

Foram tratadas 32 análises físico-químicas de águas coletadas de poços no Parque do Cocó, e 28 análises físico-químicas de águas coletadas de poços da Praia do Futuro (Tabelas 5.4 e 5.5). Além das análises apresentadas nas tabelas 5.4 e 5.5 foram determinadas as concentrações de CO_3^-, OH^-, NH_4^+ e Mn^{+2} que foram nulas para todas as amostras, com exceção do valor 0,70 mg/L de para o poço 27 da área 1 e de 18 mg/L de CO_3^- para o poço 17 na Praia do Futuro.

Nas 32 análises do Parque do Cocó, não foram determinadas as concentrações de Na^+ e K^+. Optou-se por inferir o valor da concentração de Na^+ considerando-se que esta seja igual à concentração do ion Cl^-, em meq/L. Das 32 análises disponíveis somente 14 apresentaram erro inferior a 15% (Tabela 5.6). Da mesma forma, dentre as 28 análises da Praia do Futuro somente 7 apresentaram erro inferior a 15% (Tabela 5.7).

Tabela 5.4 - Análises físico-químicas das águas do Parque do Cocó, área 3.

Poço	Data	T (°C)	Cond.elét. microS/cm	pH	Concentrações em mg/L										
					HCO_3^-	$CaCO_3$	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Cl^-	SO_4^{-2}	Fe^+	NO_2^-	NO_3^-	NH_4^+	STD
1	21/03/77	25	650	6,2	10	176	35,2	21,12	46	14	**0,24**	0,10	**105,5**	0,00	341,34
2	07/03/77	25	400	5,5	6	94	18,4	13,52	36	6	**0,20**	0,10	**125,0**	0,00	261,20
3	04/03/77	25	500	5,5	10	84	16,8	10,08	37	8	**0,40**	0,10	**125,0**	0,00	256,20
4	04/03/77	25	500	4,5	6	78	15,2	9,60	43	4	**1,00**	0,10	**125,0**	0,00	251,10
5	02/03/77	25	400	4,5	4	78	15,2	9,60	40	2	**0,40**	0,05	35,0	0,00	155,45
6	02/03/77	25	450	5,3	4	98	19,2	12,00	44	2	**0,20**	0,20	35,0	0,00	179,40
7	28/02/77	25	500	7,1	8	54	9,6	7,20	40	9	**0,40**	0,10	36,0	0,00	139,50
8	28/02/77	25	500	6,7	10	66	14,8	8,16	44	9	**0,30**	0,05	40,0	0,00	160,60
9	26/02/77	25	500	6,8	14	82	16,0	10,08	48	7	**0,30**	0,10	45,0	0,00	183,00
10	26/02/77	25	700	6,9	12	76	15,2	9,12	7	7	**0,30**	0,10	38,0	0,00	170,10
11	24/02/77	25	700	6,9	10	80	16,0	9,60	47	8	**2,00**	0,10	6,0	0,00	143,50
12	24/02/77	25	600	7,0	14	56	11,2	6,72	53	9	**1,00**	0,05	10,0	0,00	130,50
13	22/02/77	25	600	7,0	10	74	15,2	8,64	53	3	**0,20**	0,05	**52,0**	0,00	183,20
14	22/02/77	25	600	6,7	8	76	15,2	9,12	43	3	**0,20**	1,10	**98,0**	0,00	240,20
17	29/02/77	25	400	6,7	6	90	18,4	10,56	41	5	**0,40**	0,05	40,0	0,00	176,45
18	19/02/77	25	490	6,9	6	96	19,2	11,52	38	6	**0,20**	0,05	36,0	0,00	176,30
19	18/02/77	25	350	5,5	4	50	9,6	6,24	42	32	**0,20**	10,00	35,0	0,00	169,40
20	18/02/77	25	450	4,8	2	84	16,8	10,08	36	28	**2,00**	0,05	**70,0**	0,00	220,00
21	14/02/77	25	400	4,5	6	68	13,6	8,16	33	18	**0,32**	0,20	**88,0**	0,00	207,52
22	14/02/77	25	400	5,0	4	70	14,4	8,60	41	12	**0,20**	0,20	**98,0**	0,00	221,40
23	14/02/77	25	450	5,5	10	80	16,0	9,60	40	9	**0,28**	0,40	**61,0**	0,00	130,68
24	21/01/77	25	500	5,5	10	56	11,2	6,72	50	7	**0,32**	2,00	**97,0**	0,00	212,32
25	28/01/77	25	500	4,8	6	76	13,6	10,08	26	30	**0,64**	0,40	**105,0**	0,00	238,04
26	19/01/77	25	400	5,5	4	64	12,8	7,63	27	13	**0,24**	0,50	38,0	0,00	112,75
28	20/01/77	25	500	5,5	12	76	15,2	9,12	49	19	**0,32**	1,50	**180,0**		325,82
29	11/01/77	25	400	5,2	8	110	21,6	13,44	49	18	**0,20**	0,90	2,0	0,00	180,10
30	19/01/77	25	500	5,0	8	80	16,0	10,20	31	16	**0,36**	2,50	37,0	0,00	166,86
31	11/01/77	25	200	5,5	8	58	11,2	7,20	29	12	**0,24**	2,00	1,0	0,00	102,24
32	23/12/76	25	350	6,0	6	90	17,6	11,04	39	3	**0,20**	4,00	0,0	0,00	136,20
33	19/01/77	25	500	4,8	6	90	17,6	11,04	56	18	**0,25**	0,70	**85,0**	0,00	249,29
34	11/01/77	25	400	5,6	14	100	20,0	12,00	44	16	**0,28**	0,90	1,5	0,00	162,68
35	23/12/76	25	500	6,0	20	72	14,4	8,64	56	14	**0,16**	1,00	0,0	0,00	143,16

Tabela 5.5 - Análises físico-químicas dos poços da Praia do Futuro, área 1.

Poço	Data	Cond.elét. microS/cm	pH	Concentrações em mg/L												
				HCO_3^-	$CaCO_3$	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{-2}	Fe^+	NO_2^-	NO_3^-	NH_4^+	STD
1	02/04/84	300	5,77	16	36	6,4	4,80	22,0	2,5	52	30,8	0,10	0,24	3,10	0,00	140
2	26/06/84	410	6,65	10	36	10,4	2,40	27,0	0,0	67	20,4	**0,80**	0,00	0,66	0,00	140
3	02/04/84	340	5,86	17	30	7,2	2,88	17,5	1,0	47	34,4	**1,00**	0,18	3,10	0,07	130
4	02/04/84	350	5,94	11	40	10,4	3,36	23,5	1,0	57	19,0	**1,00**	0,31	1,77	0,07	190
5	28/06/84	380	7,05	45	36	8,0	3,84	12,5	0,0	39	6,0	**0,22**	0,00	2,21	0,00	130
6	26/06/84	300	6,75	13	40	11,2	2,88	6,5	0,0	47	15,0	**0,65**	0,00	5,53	0,00	110
7	04/04/84	280	6,61	21	38	10,4	2,80	11,5	0,5	33	20,0	**0,37**	0,00	4,20	0,00	130
8	26/06/84	300	6,65	17	34	8,0	3,36	5,5	1,1	44	15,0	**0,80**	0,00	2,21	0,00	110
9	28/06/84	1400	7,62	80	170	48,0	12,00	45,0	2,5	132	18,6	**0,32**	0,99	**55,30**	0,00	340
10	28/06/84	1000	6,62	99	104	20,8	12,48	41,5	14,0	112	18,4	**1,12**	0,00	3,54	0,00	270
11	26/06/84	800	7,28	38	98	24,0	9,12	41,0	3,0	134	20,0	**0,53**	0,48	1,10	0,00	260
12	26/06/84	700	7,04	27	76	17,6	7,68	29,0	1,5	78	19,4	**0,32**	4,45	19,04	0,00	200
13	26/06/84	600	6,78	30	84	18,4	9,12	30,5	2,5	90	17,8	**0,71**	0,00	**55,37**	0,00	220
14	26/06/84	760	7,15	43	114	27,2	11,04	31,5	2,5	95	15,0	**0,80**	0,00	28,79	0,00	240
15	02/04/84	1500	7,50	101	194	40,0	22,50	62,5	12,0	274	28,0	**0,26**	0,35	**66,47**	0,05	660
16	30/03/84	1000	7,47	103	136	29,6	14,80	66,5	8,0	130	19,8	**0,76**	0,18	21,70	0,07	370
17	28/06/84	1200	8,34	72	146	36,8	12,96	41,0	4,5	140	21,2	**0,42**	0,01	35,40	0,00	340
18	28/06/84	1300	6,80	85	130	28,8	13,92	53,0	6,5	125	26,8	**1,00**	0,00	13,29	0,00	320
19	04/04/84	900	7,41	70	204	56,0	15,30	45,0	2,5	118	21,2	**0,18**	0,05	**48,70**	0,00	360
23	28/06/84	1500	7,84	74	202	56,0	14,88	53,5	4,5	150	23,2	**0,42**	0,08	**146,19**	0,00	380
24	28/06/84	700	6,72	15	44	10,4	4,32	28,0	2,5	87	26,0	**1,68**	0,21	2,65	0,05	210
25	28/06/84	750	6,92	7	60	9,6	8,64	34,0	6,5	129	26,0	**1,30**	0,00	7,08	0,00	240
26	28/06/84	1000	6,10	70	80	18,4	8,16	48,5	9,5	126	16,8	**1,48**	0,41	3,98	0,00	270
27	28/06/84	1200	6,94	169	132	24,8	16,80	60,5	30,5	118	?	**?**	0,65	3,30	0,70	?
01A	04/04/84	600	7,08	49	56	4,0	11,00	59,5	4,5	79	22,0	**1,00**	0,08	1,77	0,00	240
´01E03	28/06/84	2400	7,18	92	146	32,0	15,84	75,0	11,5	244	24,0	**0,52**	0,01	39,87	0,00	530
´02E03	26/06/84	300	7,30	25	40	9,6	3,84	9,0	0,0	46	5,6	**0,34**	0,00	11,29	0,00	110
´03E03	02/04/84	800	7,58	78	100	20,0	12,00	60,5	6,0	99	17,0	**0,62**	0,40	12,84	0,10	300

Tabela 5.6 – Percentuais iônicos e erro nas águas de poços do Parque do Cocó.

Poço	Data	Ca^{+2} (%)	Mg^{+2} (%)	Na^{+} (%)	$Cl^{-}+NO_3^{-}$ (%)	SO_4^{-2} (%)	HCO_3^{-} (%)	Erro (%)
2	07/03/77	25,5	30,9	43,5	90,3	3,7	6,0	3
3	04/03/77	25,6	25,3	49,1	86,0	4,7	9,4	4
4	04/03/77	22,2	23,1	54,7	91,9	2,4	5,7	1
7	28/02/77	17,0	21,1	61,9	79,0	8,7	12,3	13
10	26/02/77	41,8	41,4	16,8	59,8	10,7	29,5	14
14	22/02/77	22,4	22,2	55,3	89,5	2,0	8,5	4
19	18/02/77	17,0	18,2	64,8	68,5	26,3	5,2	5
20	18/02/77	25,9	25,7	48,4	76,8	20,9	2,4	7
21	14/02/77	24,4	24,1	51,5	80,4	12,8	6,8	2
22	14/02/77	22,4	22,0	55,6	87,7	8,0	4,3	1
23	14/02/77	24,0	23,7	52,3	80,2	7,1	12,7	12
24	21/01/77	17,0	16,8	66,2	86,1	4,2	9,6	2
25	28/01/77	25,7	31,4	42,9	74,6	19,2	6,2	10
33	19/01/77	20,8	21,5	57,7	83,7	10,6	5,7	9

Tabela 5.7 – Percentuais iônico e erros nas águas de poços da Praia do Futuro.

Poços	Data	Ca^{+2} (%)	Mg^{+2} (%)	$Na^{+}+K^{+}$ (%)	$Cl^{-}+NO_3^{-}$ (%)	SO_4^{-2} (%)	HCO_3^{-} (%)	Erro (%)
4	02/04/84	28,2	15,0	56,8	68,2	16,5	15,3	13
12	26/06/84	31,3	22,5	46,3	65,8	10,6	23,6	15
14	26/06/84	36,7	24,6	38,8	64,3	6,4	29,3	14
16	30/03/84	25,5	21,0	53,5	51,1	5,2	43,7	15
19	04/04/84	46,0	20,7	33,3	59,7	6,4	33,9	6
01A	04/04/84	5,2	23,8	71,0	51,9	10,5	37,6	7
03E03	02/04/84	20,9	20,7	58,4	50,4	5,9	43,7	11

Estas análises foram utilizadas para classificação hidroquímica das águas através do diagrama de Piper (Figuras 5.5 e 5.6). Observa-se que as águas, tanto da área da Praia do Futuro como do Parque do Cocó, refletem o resultado esperado apresentando tendência geral para uma classificação como águas do tipo cloretadas sódicas. Uma pequena diferenciação é percebida nas águas da Praia do Futuro que exibem uma concentração cálcica mais elevada.

Do ponto de vista de utilização para abastecimento humano as concentrações dos ions maiores e de **$CaCO_3$** estão abaixo dos limites recomendáveis, salvo as concentrações de ferro total que embora na maioria seja superior ao limite da OMS (Organização Mundial de Saúde), de 0,1 mg/L, não causam prejuízos à saúde. Por isso, as águas do aqüífero dunas/paleodunas podem ser consideradas como de muito boa qualidade. No entanto, é fundamental o estabelecimento de controle e proteção contra contaminação oriunda de fossas e esgoto. Nas análises aqui utilizadas já se constatam alguns teores de nitrato acima dos limites estabelecidos pela OMS, que é de 45 mg/l, indicando contaminação.

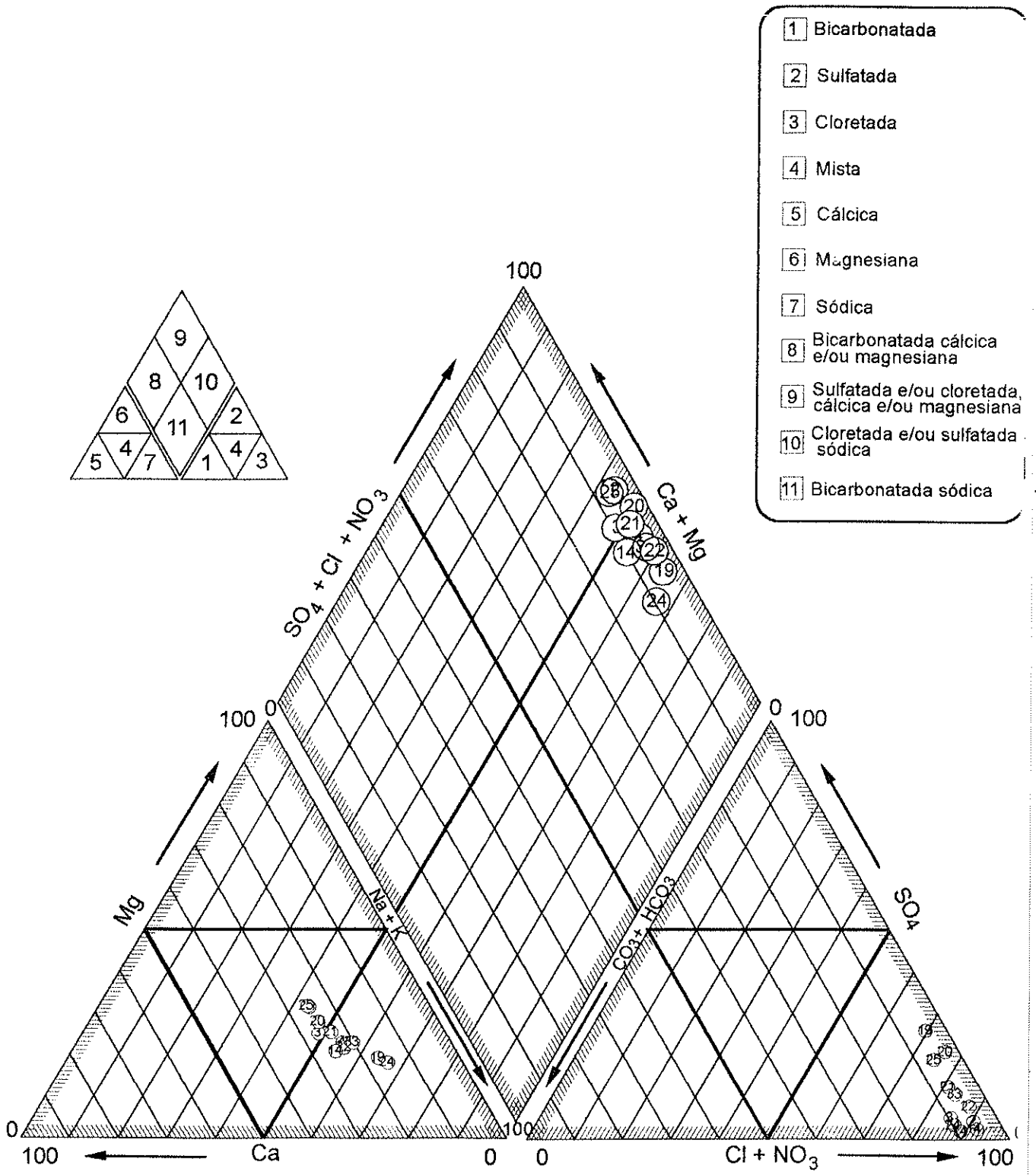


Figura 5.5 - Classificação hidroquímica das águas subterrâneas na área 3, Parque do Cocó, segundo o diagrama de Piper.

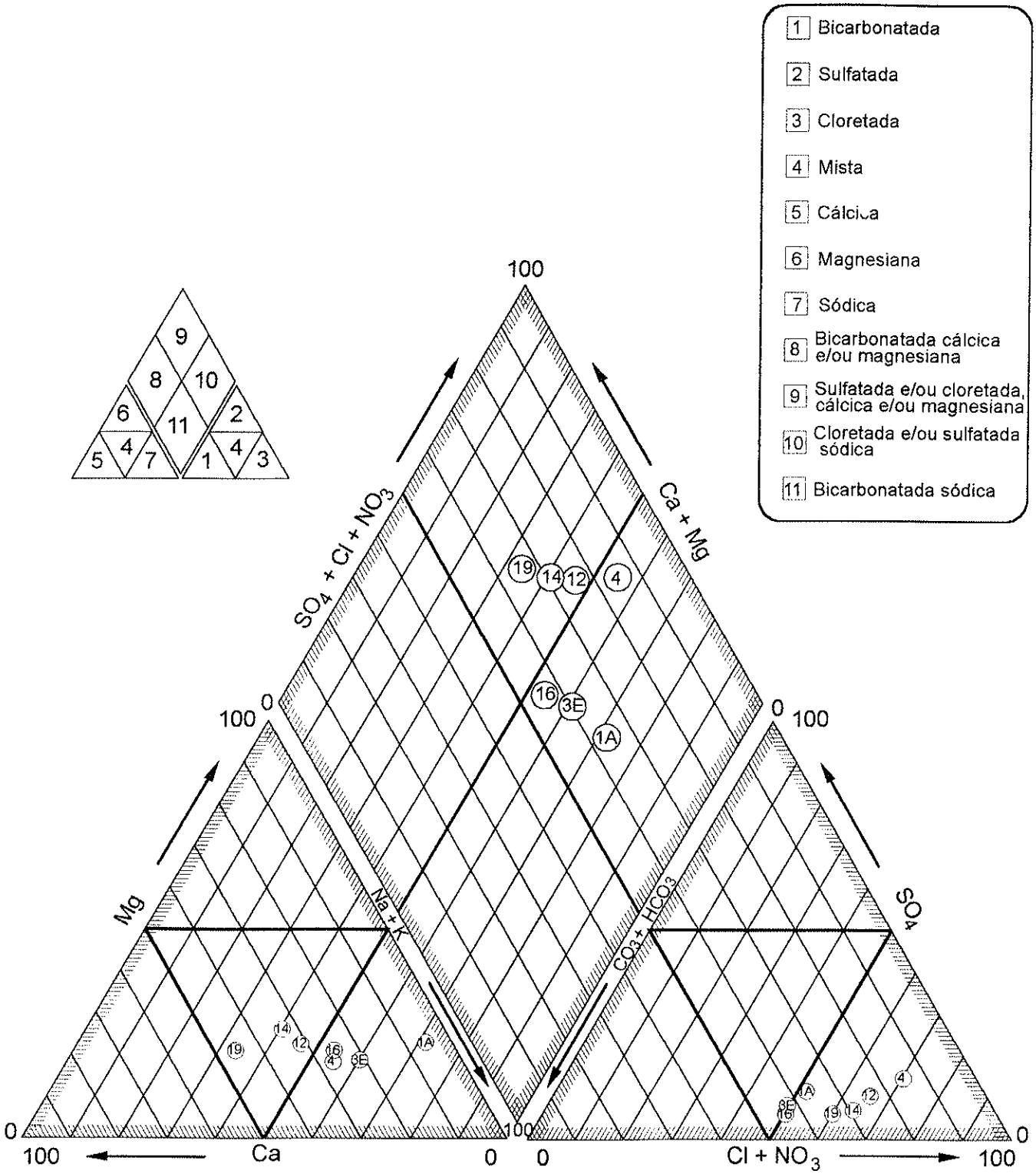


Figura 5.6 – Classificação hidroquímica das águas subterrâneas na área1, Praia do Futuro, segundo o diagrama de Piper.

5.4. Determinação da infiltração total pelo balanço hídrico

A avaliação da infiltração a partir do balanço hídrico estabelece um valor médio de infiltração considerando uma série de dados de precipitação e temperatura durante períodos maiores que 10 anos.

Esta técnica foi utilizada para obtenção da infiltração total, I_T, durante cada um dos três anos de observação. Esta forma de aplicação não é usual, porém, considera-se que não existe nenhuma restrição teórica à este tipo de uso.

A evapotranspiração potencial foi determinada pela expressão de Thornthwaite (Equação 3.4) utilizando os valores de temperaturas médias mensais fornecidas pela FUNCEME e os valores dos parâmetros: **I**, índice térmico (Equação 3.5) e expoente **a** (Equação 3.7), calculados para uma série de 20 anos de dados, período de 1974 a 1994, obtendo-se: $\mathbf{I} = \mathbf{149{,}899}$ e $\mathbf{a} = \mathbf{3{,}72}$.

A infiltração total I_T, obtida pela diferença entre precipitação e evapotranspiração potencial, está apresentada na tabela 5.8 a, b e c.

Tabela 5.8 – Planilha de determinação da infiltração total.

a) 1996

	P(mm)	T	K	ETP(mm)	P-ETP(mm)	I_T(mm)
JAN	55,3	27,8	1,06	168,5	-113,2	0,0
FEV	190,8	27,7	0,95	149,0	41,8	34,0
MAR	490,8	26,7	1,04	142,2	348,6	354,0
ABR	553,3	26,5	1,00	133,0	420,3	420,3
MAI	317,1	27,5	1,02	155,7	161,4	164,4
JUN	54,6	27,3	0,99	147,1	-92,5	0,0
JUL	17,0	27,1	1,02	147,4	-130,4	0,0
AGO	75,6	27,2	1,03	150,9	-75,3	0,0
SET	17,9	27,6	1,00	154,7	-136,8	0,0
OUT	12,5	27,9	1,05	169,1	-156,6	0,0
NOV	8,6	28,1	1,03	170,4	-161,8	0,0
DEZ	10,8	28,4	1,06	182,4	-171,6	0,0
ANO	1642,9			1870,5		972,7

b) 1997

	P(mm)	T	K	ETP(mm)	P - ETP(mm)	I_T(mm)
JAN	4,2	28,5	1,06	184,8	-180,6	0,0
FEV	33,4	28,2	0,95	159,2	-125,8	0,0
MAR	189,0	28,0	1,04	169,8	19,2	25,8
ABR	409,5	26,9	1,00	140,6	268,9	268,9
MAI	314,0	26,7	1,02	139,5	174,5	177,2
JUN	7,6	27,1	0,99	143,1	-135,5	0,0
JUL	8,2	26,8	1,02	141,5	-133,3	0,0
AGO	27,4	26,8	1,03	142,9	-115,5	0,0
SET	0,0	27,1	1,00	144,6	-144,6	0,0
OUT	0,8	27,4	1,05	158,1	-157,3	0,0
NOV	39,8	27,7	1,03	161,5	-121,7	0,0
DEZ	37,0	28,2	1,06	177,7	-140,7	0,0
ANO	1070,9			1863,2		471,9

c) 1998

	P(mm)	T	K	ETP(mm)	P - ETP(mm)	I_T(mm)
JAN	125,3	28,1	1,06	175,3	-50,0	0,0
FEV	75,2	29,0	0,95	176,7	-101,5	0,0
MAR	286,6	26,7	1,04	142,2	144,4	149,8
ABR	112,2	28,9	1,00	183,6	-71,4	0,0
MAI	113,2	28,7	1,02	182,5	-69,3	0,0
JUN	55,6	28,0	0,99	161,6	-106,0	0,0
JUL	15,4	27,1	1,02	147,4	-132,0	0,0
SOMA	783,5			1169,5		149,8

Observa-se que a infiltração total atinge 59%, 44% e 19% do total precipitado respectivamente, nos anos de 1996, 1997 e 1998.

5.5. Resultados do monitoramento do sistema subterrâneo

Os resultados das observações durante o período de monitoramento, que são medidas de precipitação (Tabela 5.9) e de nível estático em seis poços (Tabela 5.10): P07, P08, P09, P13, P14 e P15 (Figura 4.1), estão apresentados na Figura 5.7.

Analisando o ramo ascendente do nível hidrostático, observa-se que, no ano de 1996, o período de ascensão ocorre entre os meses de fevereiro e maio quando

Tabela 5.9 – Precipitação total mensal medida de 08/95 a 08/98.

1995		1996		1997		1998	
Mes	P (mm)	Mes	P (mm)	Mes	P (mm)	Mes	P (mm)
		JAN	55,3	JAN	4,2	JAN	125,3
		FEV	190,8	FEV	33,4	FEV	75,2
		MAR	490,8	MAR	189,0	MAR	286,6
		ABR	553,3	ABR	409,5	ABR	112,2
		MAI	317,1	MAI	314	MAI	113,2
		JUN	54,6	JUN	7,6	JUN	55,6
		JUL	17,0	JUL	8,2	JUL	15,4
AGO	3,0	AGO	75,6	AGO	27,4	AGO	32,8
SET	4,7	SET	17,9	SET	0,0		
OUT	21,1	OUT	12,5	OUT	0,8		
NOV	25,7	NOV	8,6	NOV	39,8		
DEZ	1,2	DEZ	10,8	DEZ	37,0		

a precipitação total foi de 1552,0 mm, para os três meses. Em 1997, a ascensão ocorreu no período de março a maio, com precipitação total para estes três meses de 912,5 mm, e, em 1998, ocorreu uma ascensão muito sutil entre os meses de janeiro e abril cuja precipitação total foi de 599,3 mm.

Durante o todo o período observado, verifica-se que a resposta do nível hidrostático à precipitação é rápida (Figura 5.7). Esta resposta rápida do aqüífero é natural considerando que os níveis são rasos, entre 0,40 e 1,95 metros, e que o solo é predominantemente arenoso, característica que tem grande influência no sentido de facilitar o processo de infiltração. Tomando-se a diferença entre os picos de precipitação e de nível estático, em média, 6 dias para os três anos de observação, chega-se a uma velocidade de infiltração que varia entre 7,7 cm/dia no poço P14, de nível estático mais raso e 23,2 cm/dia no poço P13, de nível estático mais profundo.

Tabela 5.10 - Medidas de nível estático nos poços de observação.

Data	NE (m)					
	P07	P08	P09	P13	P14	P15
27/07/95	0,87	0,90	0,46	1,36	0,45	0,57
01/09/95	1,00	0,97	0,70	1,36	0,47	0,67
27/09/95	0,94	1,00	0,77	1,45	0,53	0,76
31/10/95	1,00	1,03	0,78	1,51	0,59	0,75
28/11/95	0,98	1,02	0,81	1,56	0,60	0,76
28/12/95	1,06	1,12	0,90	1,67	0,68	0,87
08/02/96	1,06	1,13	0,94	1,68	0,71	0,90
05/03/96	1,06	1,06	0,87	1,58	0,66	0,83
02/04/96	0,98	0,90	0,70	1,39	0,46	0,65
07/05/96	0,73	0,77	0,49	1,09	0,27	0,48
04/06/96	0,76	0,76	0,51	1,06	0,27	0,50
02/07/96	0,87	0,87	0,68	1,27	0,40	0,54
07/08/96	0,98	0,98	0,73	1,39	0,46	0,65
03/09/96	0,98	0,98	0,76	1,45	0,49	0,69
03/10/96	0,98	1,01	0,77	1,50	0,54	0,73
05/11/96	1,07	1,07	0,87	1,57	0,63	0,77
03/12/96	1,09	1,09	0,70	1,64	0,67	0,86
07/01/97	1,19	1,22	0,81	1,70	0,72	0,90
04/02/97	1,19	1,17	0,81	1,70	0,73	0,88
06/03/97	1,30	1,24	1,00	1,76	0,76	0,97
03/04/97	1,27	1,20	0,99	1,73	0,73	0,94
06/05/97	1,05	1,00	0,69	1,42	0,53	0,70
03/06/97	1,12	1,12	0,84	1,49	0,53	0,73
03/07/97	1,17	1,13	0,89	1,54	0,59	0,78
07/08/97	1,21	1,18	0,96	1,63	0,67	0,84
04/09/97	1,27	1,21	1,00	1,70	0,73	0,90
02/10/97	1,31	1,29	1,06	1,77	0,79	0,95
04/11/97	1,38	1,33	1,11	1,83	0,84	0,99
04/12/97	1,41	1,35	1,05	1,85	0,87	1,01
06/01/98	1,43	1,38	1,12	1,90	0,91	1,05
03/02/98	1,36	1,28	1,05	1,87	0,86	1,00
13/03/98	1,39	1,33	1,10	1,90	0,88	1,05
07/04/98	1,34	1,28	1,06	1,83	0,82	1,00
01/05/98	1,36	1,33	1,08	1,84	0,86	1,01
11/06/98	1,37	1,32	1,05	1,88	0,88	1,03
30/06/98	1,43	1,36	1,06	1,91	0,90	1,05
30/07/98	1,45	1,39	1,11	1,95	0,94	1,08

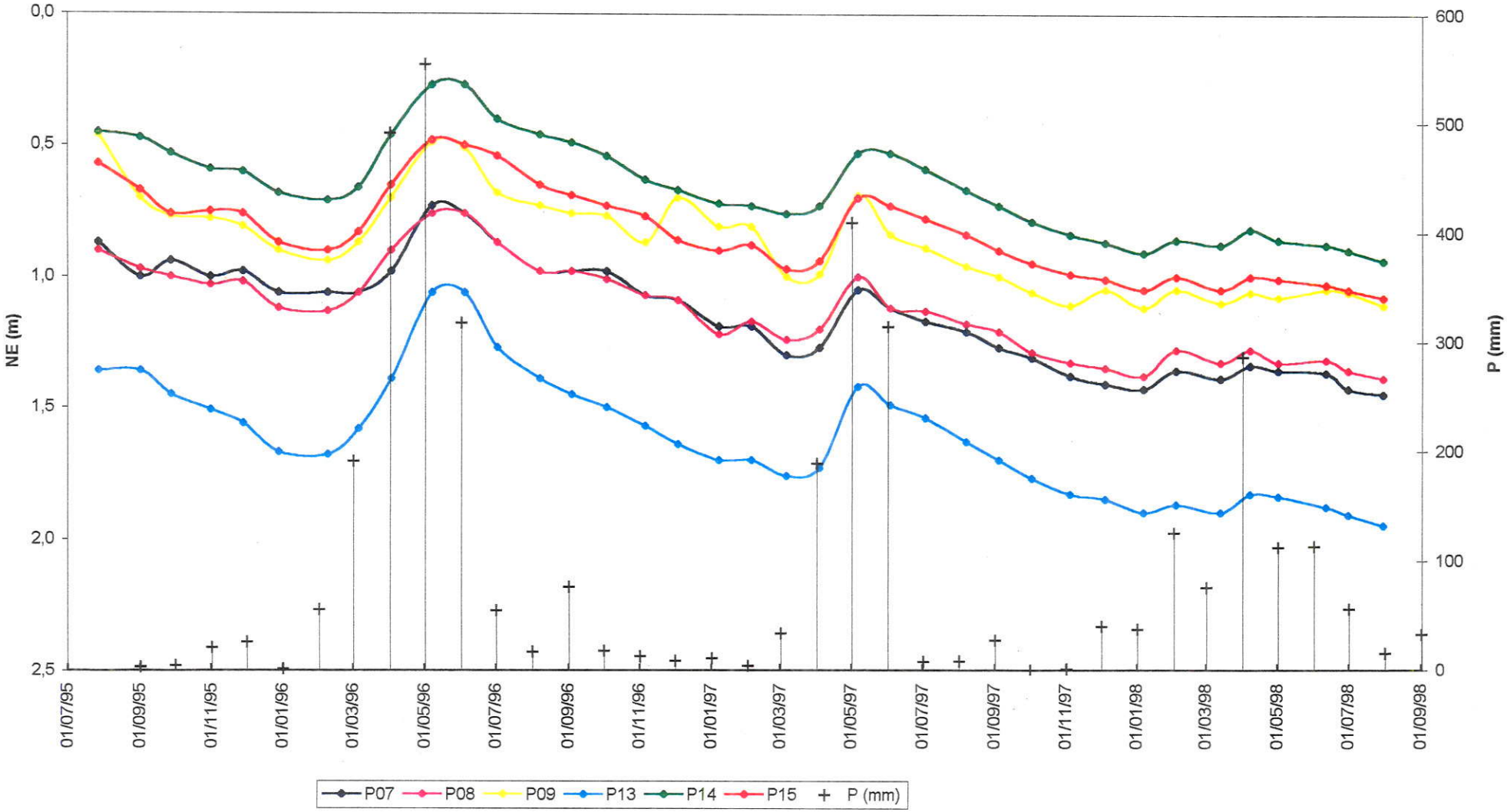


Figura 5.7 - Precipitação e níveis estáticos dos poços observados.

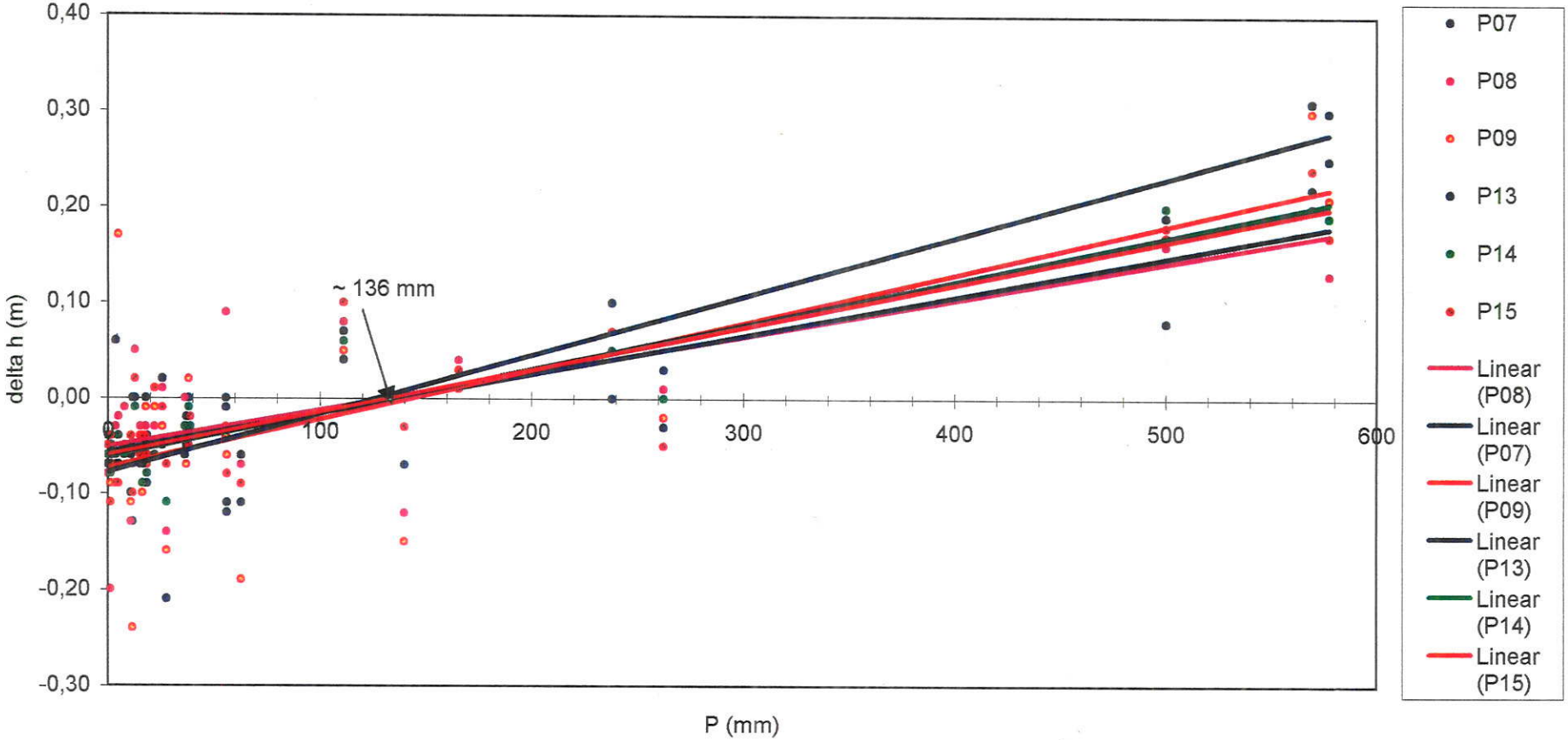
Com relação ao poço P13, apesar de apresentar nível estático relativamente mais profundo, não foi detectada defasagem na posição dos picos de nível estático em relação aos outros poços observados. Acredita-se que a freqüência das observações não foi suficiente para detectar uma diferenciação, devida à maior profundidade do nível estático, na posição do pico de resposta à recarga. Observa-se ainda que este poço é o que sofre maior variação de nível indicando que, nesta situação, o sistema aqüífero está potencialmente mais disponível à recepção de recarga.

No que se refere ao ramo de recessão de nível estático, todos os poços observados apresentam o mesmo comportamento pois as curvas apresentam, praticamente, a mesma declividade, significando que a recessão do nível hidrostático não é afetada por sua profundidade. Esta observação está restrita às variações de profundidade da ordem de grandeza das registradas nos poços de observação.

Na busca de uma correlação entre a precipitação, responsável pela recarga direta, e a resposta do sistema aqüífero, foram plotados em gráfico cartesiano a precipitação **P** e a variação potenciométrica **Δh**, considerando a precipitação registrada no mesmo intervalo de tempo do registro da variação de nível de água (Tabela 5.11). Todas as retas de correlação apresentaram coeficiente de determinação superior a **0,5**, ou seja, coeficiente de correlação superior a 70%, mostrando um nível de correlação entre médio e forte (Figura 5.8). Neste diagrama de dispersão, observa-se também que todas as retas de tendência cruzam o eixo das abcissas (precipitação) no intervalo entre 120 e 140 mm, induzindo à conclusão de que a capacidade de saturação do solo, **C**, é um pouco superior a 100 mm, valor habitualmente utilizado para solos com granulometria intermediária entre argila e areia ou mistura de ambos. Através das retas de tendência obtidas para cada um dos seis poços monitorados, obteve-se o valor médio de 136 mm de precipitação para o ponto $\mathbf{P_o}$, que estabelece o limite entre os valores negativos e positivos de **Δh**. Este seria o valor de precipitação necessário para que haja a saturação do solo e a conseqüente ascensão do nível hidrostático que corresponde à capacidade de saturação do solo (Tabela 5.12).

Tabela 5.11 – Precipitação P e variação do nível potenciométrico Δh correspondentes ao mesmo intervalo de tempo.

Intervalo	Delta t (dia)	P (mm)	Delta h (m)					
			P07	P08	P09	P13	P14	P15
27/07a01/09/95	36	11,8	-0,13	-0,07	-0,24	0,00	-0,10	-0,10
01/09a27/09/95	26	3,7	0,06	-0,03	-0,07	-0,09	-0,06	-0,09
27/09a31/10/95	34	22,1	-0,06	-0,03	-0,01	-0,06	-0,06	0,01
31/10a28/11/95	28	25,7	0,02	0,01	-0,03	-0,05	-0,01	-0,01
28/11a28/12/95	30	1,2	-0,08	-0,20	-0,09	-0,11	-0,08	-0,11
28/12a06/02/96	40	55,9	0,00	0,09	-0,04	-0,01	-0,03	-0,03
06/02a05/03/96	27	238,1	0,00	0,07	0,07	0,10	0,05	0,07
05/03a02/04/96	28	500,3	0,08	0,16	0,17	0,19	0,20	0,18
02/04a07/05/96	35	577,7	0,25	0,13	0,21	0,30	0,19	0,17
07/05a04/06/96	28	262,5	-0,03	0,01	-0,02	0,03	0,00	-0,05
04/06a04/07/96	30	27,8	-0,11	-0,14	-0,16	-0,21	-0,11	-0,07
04/07a07/08/96	34	56,2	-0,11	-0,08	-0,06	-0,12	-0,08	-0,08
07/08a03/09/96	27	36,4	0,00	0,00	-0,03	-0,06	-0,03	-0,04
03/09a03/10/96	30	17,9	0,00	-0,03	-0,01	-0,05	-0,05	-0,04
03/10a05/11/96	33	16,3	-0,09	-0,06	-0,10	-0,07	-0,09	-0,04
05/11a03/12/96	28	4,8	-0,02	-0,02	0,17	-0,07	-0,04	-0,09
03/12a07/01/97	35	10,8	-0,10	-0,13	-0,11	-0,06	-0,05	-0,04
07/01a04/02/97	28	12,6	0,00	0,05	0,00	0,00	-0,01	0,02
04/02a06/03/97	30	63,0	-0,11	-0,07	-0,19	-0,06	-0,03	-0,09
06/03a03/04/97	28	165,8	0,03	0,04	0,01	0,03	0,03	0,03
03/04a06/05/97	33	569,7	0,22	0,20	0,30	0,31	0,20	0,24
06/05a03/06/97	28	140,0	-0,07	-0,12	-0,15	-0,07	0,00	-0,03
03/06a03/07/97	30	7,8	-0,05	-0,01	-0,05	-0,05	-0,06	-0,05
03/07a07/08/97	35	18,4	-0,04	-0,05	-0,07	-0,09	-0,08	-0,06
07/08a04/09/97	28	15,2	-0,06	-0,03	-0,04	-0,07	-0,06	-0,06
04/09a02/10/97	28	0,0	-0,04	-0,08	-0,06	-0,07	-0,06	-0,05
02/10a04/11/97	33	1,6	-0,07	-0,04	-0,05	-0,06	-0,05	-0,04
04/11a04/12/97	30	39,0	-0,03	-0,02	-0,04	-0,02	-0,03	-0,02
04/12a06/01/98	33	37,0	-0,02	-0,03	-0,07	-0,05	-0,04	-0,04
06/01a22/01/98	16	38,1	0,00	0,02	0,02	-0,01	-0,01	-0,05
22/01a03/02/98	12	111,2	0,07	0,08	0,05	0,04	0,06	0,10



y = 0,0004x - 0,0565 R^2 = 0,6029	y = 0,0004x - 0,0507 R^2 = 0,5241	y = 0,0005x - 0,0728 R^2 = 0,5303	y = 0,0006x - 0,0778 R^2 = 0,8309	y = 0,0005x - 0,0618 R^2 = 0,869	y = 0,0004x - 0,0595 R^2 = 0,7508

Figura 5.8 - Correlação entre precipitação e variação potenciométrica, delta h.

Tabela 5.12 – Valores de P_0 e dos coeficientes de correlação **r** das retas de regressão apresentadas na figura 5.8.

Seqüência	P_0 (mm)	r (%)
P07	141,25	78
P08	126,75	72
P09	129,67	91
P13	145,60	73
P14	123,60	93
P15	148,75	87
Média	**135,94**	

Determinados os valores da infiltração total, pelo método do balanço hídrico, e a variação de nível hidrostático para os três períodos de ascensão, a relação entre estes valores pode ser verificada através da figura 5.9. Em princípio, observa-se que a relação entre a infiltração total e a variação de nível hidrostático não é de linearidade. Para os valores mais altos de infiltração total percebe-se claramente, uma redução no gradiente da variação do nível potenciométrico. Porém, no caso do poço P13, que apresenta nível estático mais profundo, existe uma tendência à dependência linear, ou seja, há uma maior capacidade da água infiltrada se constituir, efetivamente, em recarga.

Sabe-se que os dados disponíveis não permitem o estabelecimento de correlação mas os polinômios apresentados na figura 5.9 podem funcionar somente como sugestão para o estabelecimento de uma relação de dependência com uma base de dados mais longa. Observa-se que o poço P13, de nível estático mais profundo, apresenta uma relação aproximadamente linear, ou seja, apresenta uma resposta mais positiva à infiltração.

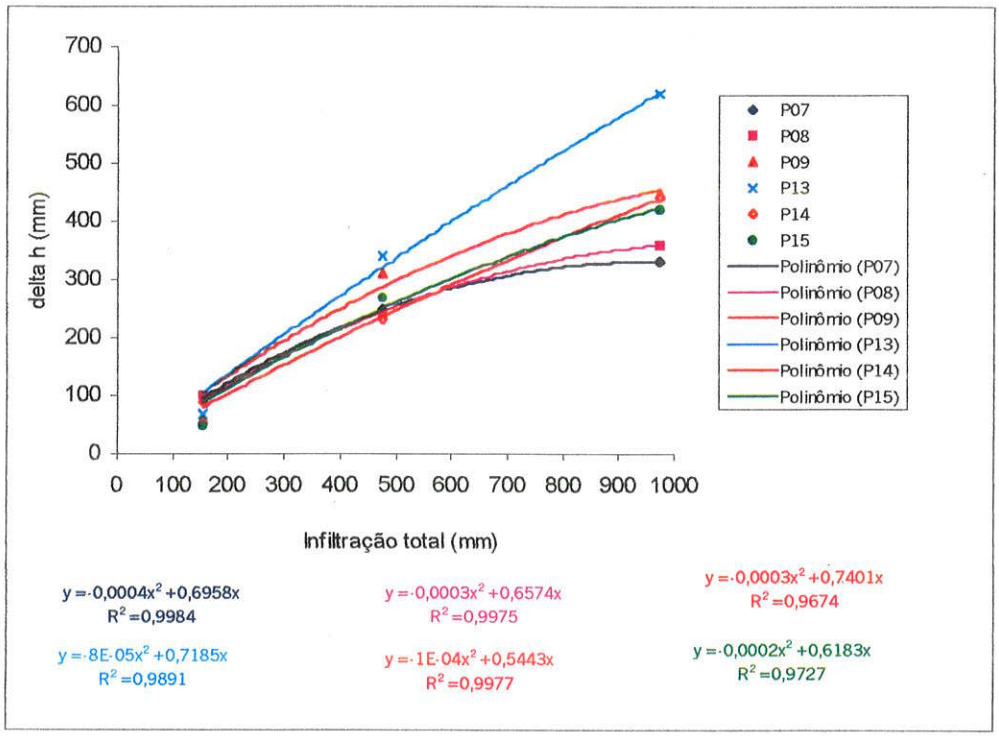


Figura 5.9 – Gráfico infiltração total **I** *versus* variação potenciométrica **Δh**.

Com relação ao período de recessão do nível hidrostático, as variações registradas parecem refletir um gradiente constante (Figura 5.7). A maior variação negativa ocorreu quando o nível estático esteve mais raso, fato ocorrido em maio de 1996, para todos os poços de observação (Tabela 5.13). Este comportamento é um indicativo de que existe uma superfície hidrostática de equilíbrio em torno da qual ocorrem as variações devidas à recarga, ou seja, para as altas variações de nível de água no ramo de ascensão há correspondentemente maiores variações negativas no ramo de recessão.

Tabela 5.13 – Variação de potencial hidráulico **Δh** registrado nos ramos de recessão de nível d'água.

	Período	**Δh (mm)**					
		P07	**P08**	**P09**	**P13**	**P14**	**P15**
1995/96	**JUL-FEV**	-190	-230	-480	-320	-330	-330
1996/97	**MAI-MAR**	-570	-480	-510	-700	-490	-490
1997/98	**MAI-JAN**	-380	-380	-430	-480	-380	-350

5.6. Observações sobre as características físico-químicas

A composição química das águas superficiais e subterrâneas está relacionada com a água de recarga e com os processos responsáveis por mudanças de concentrações de sais, tais como a evapotranspiração. Rebouças (1973) mostrou, através de análises físico-químicas de águas de chuva, que sais originários dos oceanos são aerotransportados e depositados continuamente na região Nordeste sendo uma das fontes responsáveis pelo conteúdo salino das águas, especialmente da costa. Principalmente em regiões litorâneas, ocorre aporte de sais, como aerossois de deposição seca aerotransportados ou de deposição úmida, conduzidos de forma diluída nas águas de precipitações.

O registro das medidas realizadas *in situ* e os resultados das análises físico-químicas estão apresentados nas tabelas 5.14 e 5.15 a e b. Como nas amostragens antigas, as concentrações de OH^- e CO_3^- foram nulas. As análises foram submetidas ao balanço iônico para determinação dos erros, cujos resultados estão apresentados na tabela 5.16. O erro não foi calculado para as análises correspondentes à coleta do dia 02/07/96 por falta das concentrações de sódio e potássio que não foram determinadas por problemas de equipamento no laboratório de análises. Os valores em negrito são aqueles que extrapolaram o valor de tolerância aqui adotado (15%). Considera-se que estes valores não invalidam a utilização destes resultados para uma análise das variações das concentrações iônicas em função da recarga direta.

As figuras 5.10 e 5.11 mostram, em princípio, que as variações das concentrações iônicas individuais parecem não estar relacionadas à sazonalidade das precipitações. Porém, quando observa-se detalhadamente o gráfico referente à água coletada através de bombeamento (Figura 5.10), nota-se que há uma leve variação no patamar entre as concentrações iônicas antes e após o período de precipitações. Esta variação ocorre no sentido de uma redução de concentração, excetuando-se o íon nitrato que varia para um patamar de mais alta concentração. Este fato não se verifica na água do poço surgente, onde há uma maior monotonia nas concentrações iônicas.

Tabela 5.14 - Medidas "in situ" na água bombeada **Ab** e na água de poço surgente **As**.

DATA	T (°C)		Cond.elét. (microS/cm)		pH		O diss. (ppm)	
	Ab	As	Ab	As	Ab	As	Ab	As
27/07/95		29,0		342		4,2		1,5
01/09/95	27,8	27,3	573	339	5,1	4,5	2,5	1,5
27/09/95	28,7	26,9	614	337	5,4	4,3	3,2	0,6
31/10/95	29,9	29,5	619	334	5,3	4,3	4,0	1,1
28/11/95	30,4	29,9	611	336	5,1	4,8	2,3	0,8
28/12/95	30,1	29,8	641	336	5,4	4,2	4,3	0,4
08/02/96		29,5						0,8
05/03/96	27,4	29,4	471	336	4,4	4,3	2,5	0,9
02/04/96	27,4	29,7	431	341	4,5	4,6	2,6	0,5
07/05/96	28,9	29,4	419	345	4,3	4,3	3,2	0,7
04/06/96	28,4	29,3	409	345	4,5	4,6	3,5	0,7
02/07/96	28,2	29,2	415	345	4,5	4,4	3,8	0,6
07/08/96	28,3	29,1	490	345	4,5	4,3	2,6	1,2
03/09/96	28,1	29,4	502	344	4,4	4,4	3,2	0,5
03/10/96	28,2	29,7	546	346	4,4	4,6	1,9	0,7
05/11/96	28,5	29,6	586	347	4,2	4,2	3,0	0,6
03/12/96	28,5	29,1	577	351	4,0	4,4	2,9	0,6
07/01/97	30,4	29,8	543	348	3,9	4,2	3,5	0,5
04/02/97	28,6	29,2	578	350	4,2	4,5	3,0	1,1
06/03/97	29,1	29,5	590	350	3,9	4,4	2,1	0,6
03/04/97	28,9	29,2	592	353	3,7	4,1	2,1	0,5
06/05/97	28,6	28,9	554	362	4,1	4,4	2,2	0,9
03/06/97	29,0	29,8	498	360	3,9	4,6	2,0	0,7
03/07/97	28,9	29,1	526	359	3,8	4,3	2,2	0,5
07/08/97	29,3	29,4	578	360	3,4	4,6	2,5	0,4
04/09/97	29,0	29,5	589	358	3,8	4,1	1,3	0,4
02/10/97	30,0	29,5	577	358	3,6	4,0	1,3	0,5
04/11/97	29,7	29,7	593	353		4,1		0,5
06/01/98		30,0	565	360				
22/01/98	30,2	29,8	553	361				
03/02/98		29,7		364				
07/04/98				382				
01/05/98		29,9		384				

Tabela 5.15 - Análises físico-químicas

a) Água bombeada

Data	Cond.elét. microS/cm	pH	Concentrações em mg/L															
			Ocons.	HCO_3^-	$CaCO_3$	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{-2}	Fe^{+2}	Mn^{+2}	NO_2^-	NO_3^-	NH_3^-	Al^+	STD
27/09/95	512	6,43	2,8	26	190	36,8	23,50	96	19	164	30,40	0,21	0,02	0,14	12,80	0,12	0,19	307
31/10/95	507	5,87	2,0	16	120	22,4	15,36	78	18	96	33,78	0,16	0,02	0,20	2,50	0,07	0,09	304
28/11/95	557	6,02	1,5	15	126	24,0	15,80	80	20	97	34,90	0,24	0,04	0,27	20,00	0,05	0,23	334
02/01/96	551	6,03	2,5	23	132	26,4	15,84	64	19	102	15,46	0,24	0,00	0,14	21,80	0,06	0,23	331
06/02/96	578	6,05	3,8	24	130	34,4	10,56	**152**	22	102	38,48	0,16	0,06	0,12	21,50	0,15	0,16	347
05/03/96	**290**	5,42	2,2	5	98	16,8	33,60	58	12	87	24,00	0,19	0,03	0,07	7,00	0,22	0,28	174
02/04/96	**398**	6,30	2,0	7	96	8,0	18,20	58	10	71	26,00	0,07	0,01	0,12	6,60	0,15	0,22	239
07/05/96	401	5,51	2,4	5	84	16,8	10,08	51	11	64	28,20	0,19	0,03	0,10	16,80	0,10	0,18	241
04/06/96	**383**	5,38	3,5	4	76	17,6	7,68	66	12	70	20,00	0,16	0,08	0,06	15,20	0,07	0,13	230
02/07/96	**395**	5,58	2,2	6	88	18,4	10,00			78	35,00	0,10	0,09	0,16	43,68	0,02	0,13	237
07/08/96	469	5,26	3,2	6	100	22,4	10,50	80	16	81	31,50	0,16	?	0,31	2,10	0,02	0,06	281
03/09/96	471	5,31	1,6	6	114	21,6	14,40	76	13	94	28,00	0,19	?	0,18	54,97	0,05	0,26	283

a) Água do poço surgente

Data	Cond.elét. microS/cm	pH	Concentrações em mg/L															
			Ocons.	HCO_3^-	$CaCO_3$	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{-2}	Fe^{+2}	Mn^{+2}	NO_2^-	NO_3^-	NH_3^-	Al^+	STD
27/09/95	267	5,87	1,2	15	54	4,0	10,50	80	8	**154**	3,69	0,16	0,09	0,16	6,40	0,07	0,05	160
31/10/95	307	5,14	1,5	8	50	4,0	9,60	70	10	86	6,89	0,19	0,14	0,18	7,60	0,07	0,04	184
28/11/95	330	5,91	1,3	10	44	4,0	8,16	71	10	79	**0,00**	0,10	0,03	0,20	5,40	0,05	0,05	198
02/01/96	311	5,68	1,8	10	52	3,2	10,56	62	8	83	5,37	0,19	0,00	0,14	5,60	0,05	0,10	187
06/02/96	315	5,30	2,8	10	24	4,0	3,36	**144**	11	81	6,05	0,21	0,03	0,14	4,30	0,12	0,08	189
05/03/96	310	6,74	2,4	14	38	4,8	6,24	62	10	83	1,51	0,16	0,07	0,07	3,60	0,07	0,16	186
02/04/96	332	**7,05**	2,5	8	48	3,2	9,60	62	9	84	3,02	0,05	0,08	0,14	4,90	0,07	0,06	199
07/05/96	327	5,55	3,3	10	30	3,2	5,28	59	11	73	6,05	0,30	0,09	0,16	11,20	0,07	0,15	196
04/06/96	324	5,77	4,8	6	**72**	2,4	15,84	76	10	85	8,50	0,16	0,15	0,16	7,60	0,07	0,02	194
02/07/96	325	5,69	2,0	8	40	5,6	6,24			87	**13,00**	0,13	0,05	0,16	42,75	0,02	0,02	195
07/08/96	325	5,61	2,5	8	46	4,0	8,64	80	13	87	6,00	0,13	0,00	0,22	7,60	0,02	0,02	195
03/09/96	336	5,61	0,0	8	36	4,0	6,24	74	10	86	2,50	0,13	0,00	0,16	26,58	0,05	0,02	202

Tabela 5.16 – Erros calculados para as análises químicas.

Data	Erro (%)	
	Água bombeada	**Poço surgente**
27/09/95	12	4
31/10/95	**24**	14
28/11/95	12	**21**
02/01/96	7	13
06/02/96	**27**	**42**
05/03/96	**29**	13
02/04/96	**20**	14
07/05/96	6	4
04/06/96	14	**22**
07/08/96	**30**	**18**
03/09/96	10	4

Com relação à água coletada por bombeamento, verificam-se picos de concentração dos ions de cloro e sódio em janeiro, de magnésio em fevereiro e dos ions sulfato e nitrato no mês de julho. As variações de concentração dos ions de cloro e sódio podem estar associadas a um maior conteúdo em sais nas primeiras precipitações.

No que se refere à água do poço surgente, registra-se uma alta concentração do ion de cloro na primeira análise (setembro/95) e um pico de concentração do ion de sódio, associado às primeiras precipitações (fevereiro), que não ocorrem de forma coincidente. Verifica-se ainda uma alta concentração de nitrato nos meses de julho e setembro/96, após o período de precipitações, comportamento este coincidente com aquele apresentado pela água coletada por bombeamento.

Constata-se que a água coletada no poço surgente apresenta variações no conteúdo de sais significativamente inferiores àquelas apresentadas pela água coletada por bombeamento. Este fato fica claro quando se compara as variações de sólidos totais dissolvidos **STD** (Figura 5.12), que refletem a variação de patamar de concentrações iônicas na a água bombeada, enquanto que na água do poço surgente

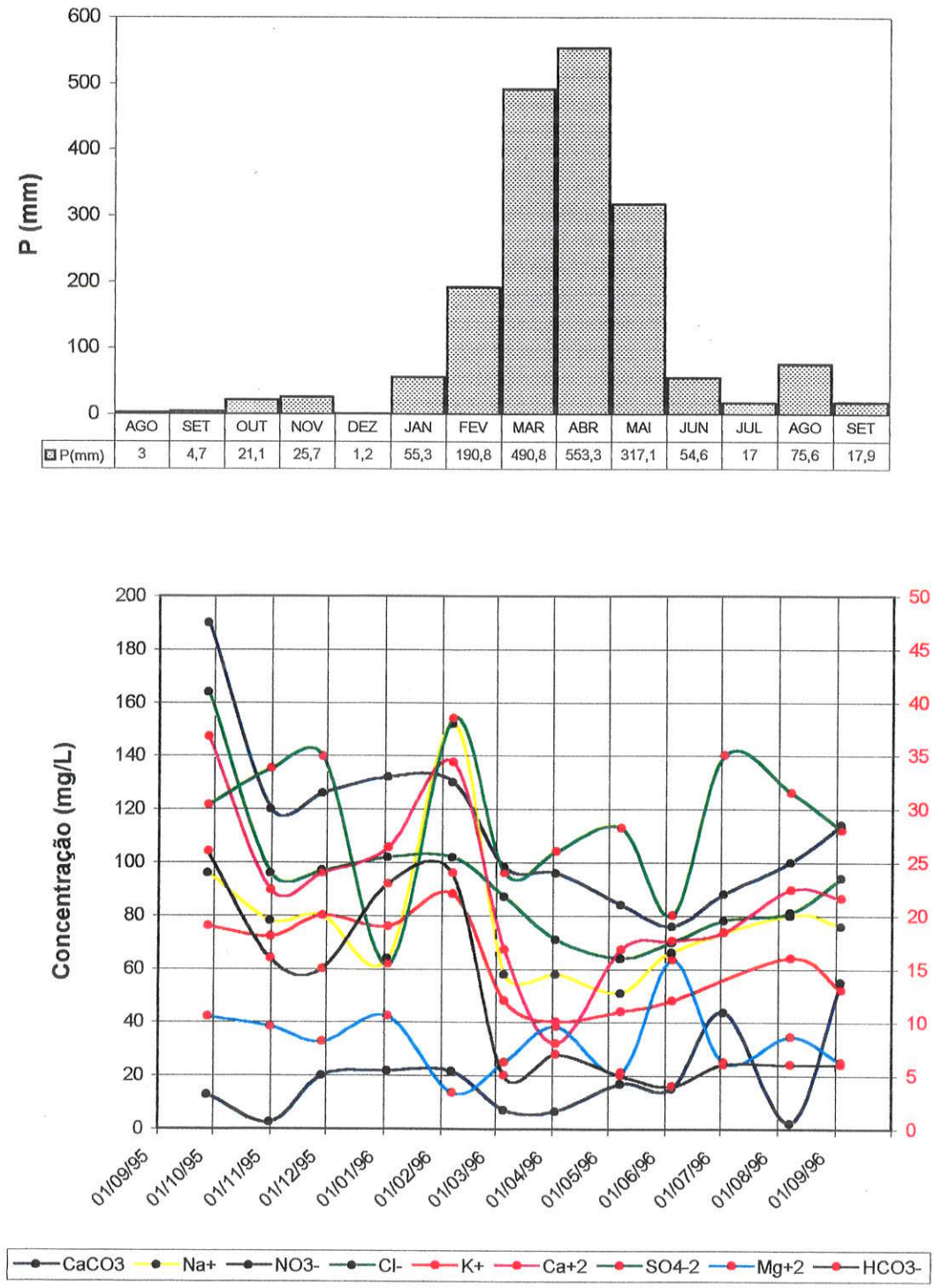
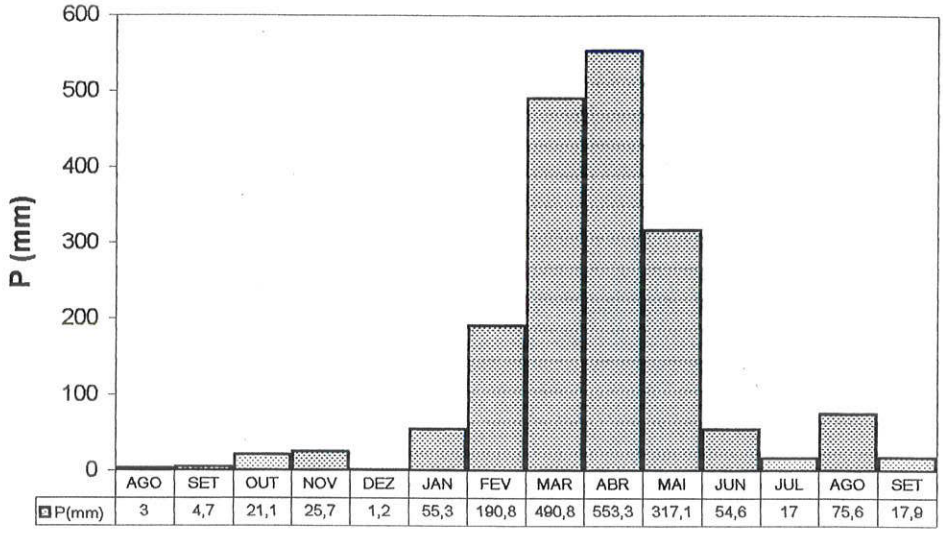


Figura 5.10 – Precipitação total mensal e concentrações iônicas e de $CaCO_3$ na água bombeada, de 09/95 a 09/96.



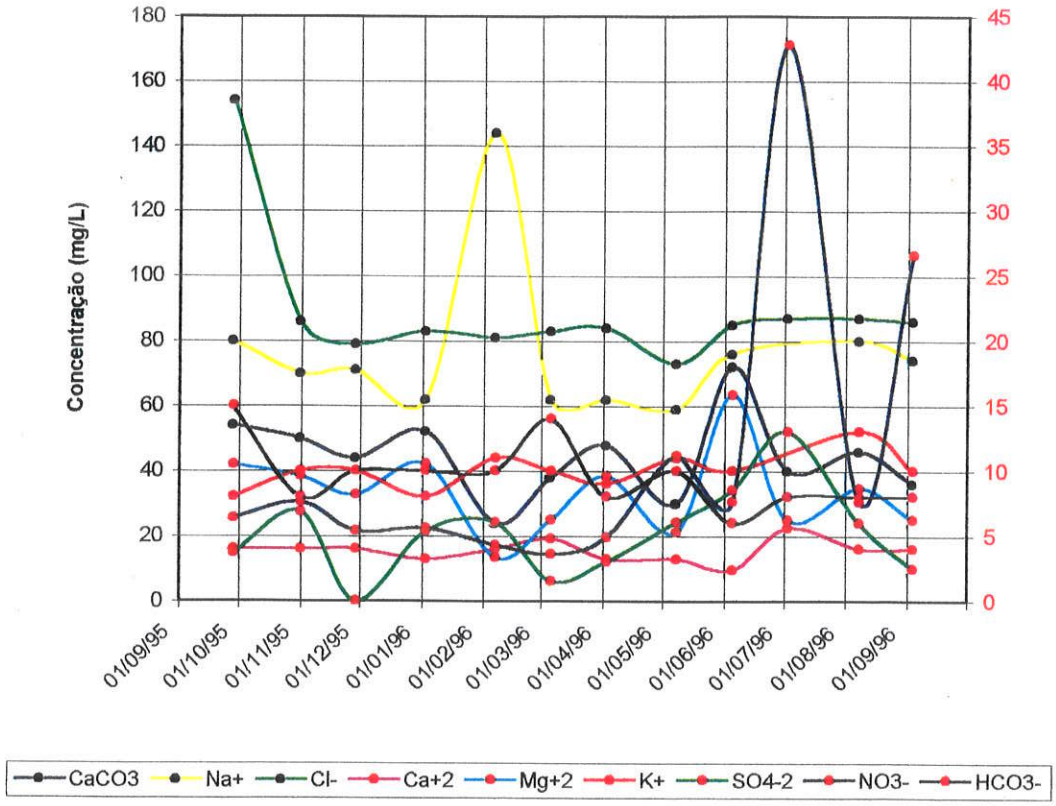
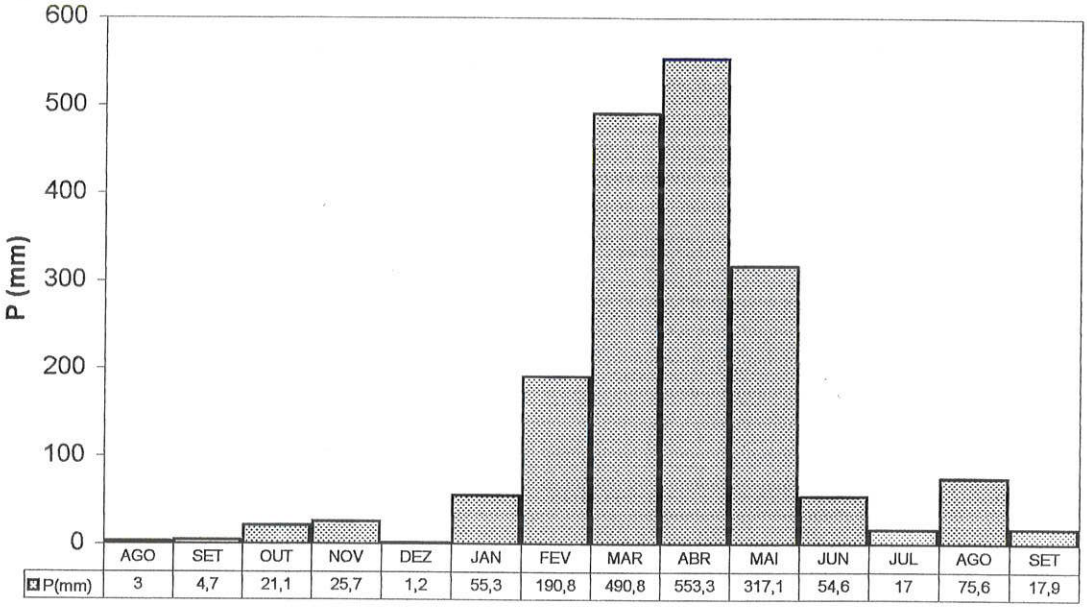


Figura 5.11 - Precipitação total mensal e concentrações iônicas e de $CaCO_3$ na água do poço surgente, de 09/95 a 09/96.



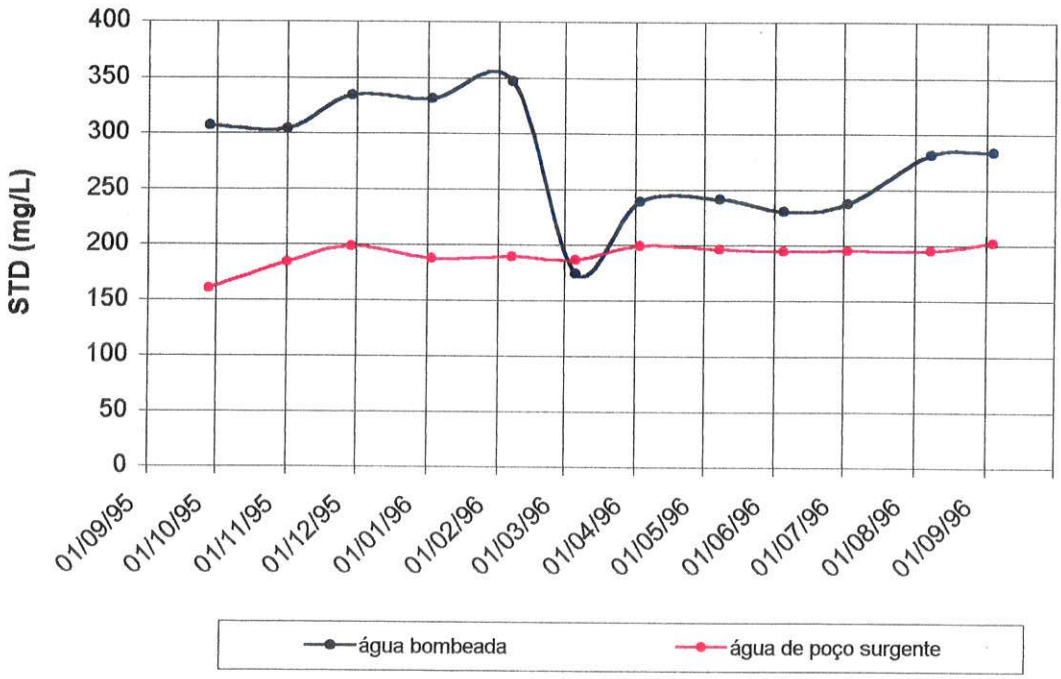


Figura 5.12 - Precipitação total mensal e sólidos totais dissolvidos, no período de 09/95 a 09/96.

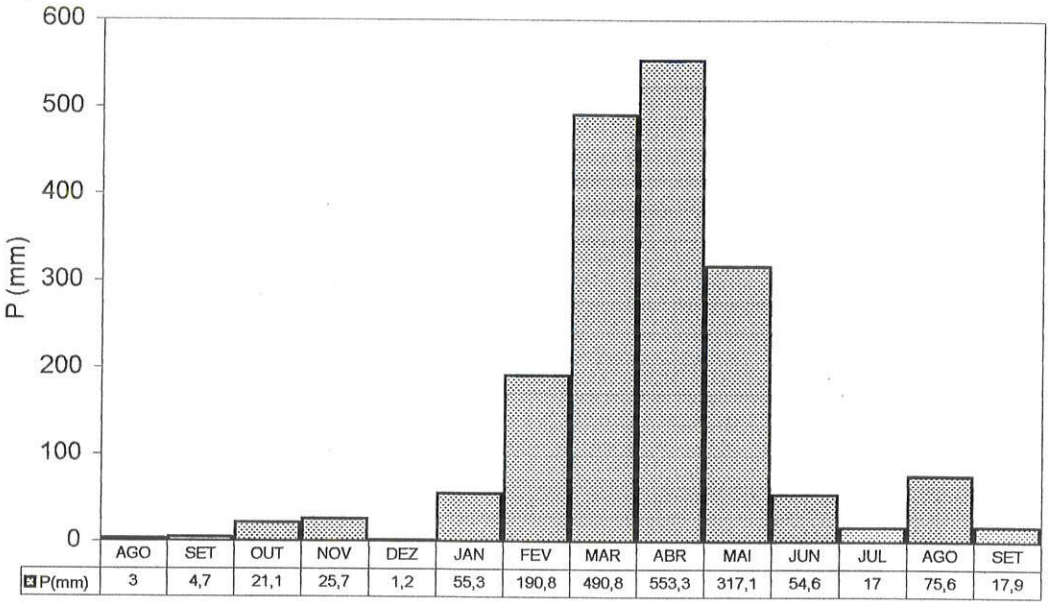
o **STD** permanece praticamente constante (Figura 5.12). A água coletada por bombeamento apresenta uma significativa variação de **STD**, do patamar de 300 mg/L para 200 mg/L, que é o patamar de **STD** para a água coletada no poço surgente. Este fato parece indicar que, no período correspondente à recessão do nível potenciométrico, há um processo precipitação de sais que gera uma variação gradacional de teor salino crescente do topo para a base do sistema aqüífero. Este variação gradacional desaparece quando a água de recarga é adicionada ao sistema.

O comportamento manifestado através do **STD** é referendado pelas medidas de condutividade elétrica que permanecem praticamente constantes, no patamar de 300 μS/cm, para a água do poço surgente e que sofrem uma variação de 500 para 300 μS/cm com a introdução da água de precipitação na água coletada por bombeamento (Figura 5.13).

Estes valores de condutividade são bastante inferiores aos valores medidos para o Rio Cocó. Marvignier (1992) registrou , em um ponto a 8 km da foz do rio, portanto, próximo aos poços observados, valores que variaram de 0,8 mS/cm, em abril de 1990, a 6,1 mS/cm, em janeiro de 1992. Este fato é um indicativo de que não existe influência do rio no lençol subterrâneo. Da mesma forma, os valores das concentrações iônicas do Rio Cocó (Tabela 5.17) também são muitos superiores àqueles das águas subterrâneas.

Tabela 5.17 – Dados físico-químicos do Rio Cocó no período entre 21/02/90 e 21/05/91 (Fonte: Marvignier,1992).

Data	Cond. elétrica (mS/cm)	(mg/L)						
		pH	HCO^{3-}	Ca^{2+}	Cl^-	$CaCO_3$	Mg^{2+}	NH_3
21/02/90	1,4	7,3	173	42	575	304	48	0,2
04/04/90	0,8	7,1	125	23	258	420	19	0,0
12/09/90	3,3	7,2	149	56	1325	490	17	0,0
13/11/90	5,2	7,1	191	59	1120	684	130	2,8
15/01/91	6,1	7,9	199	57	2130	786	156	3,0
21/05/91	1,0	7,2	98	23	197	144	120	3,0



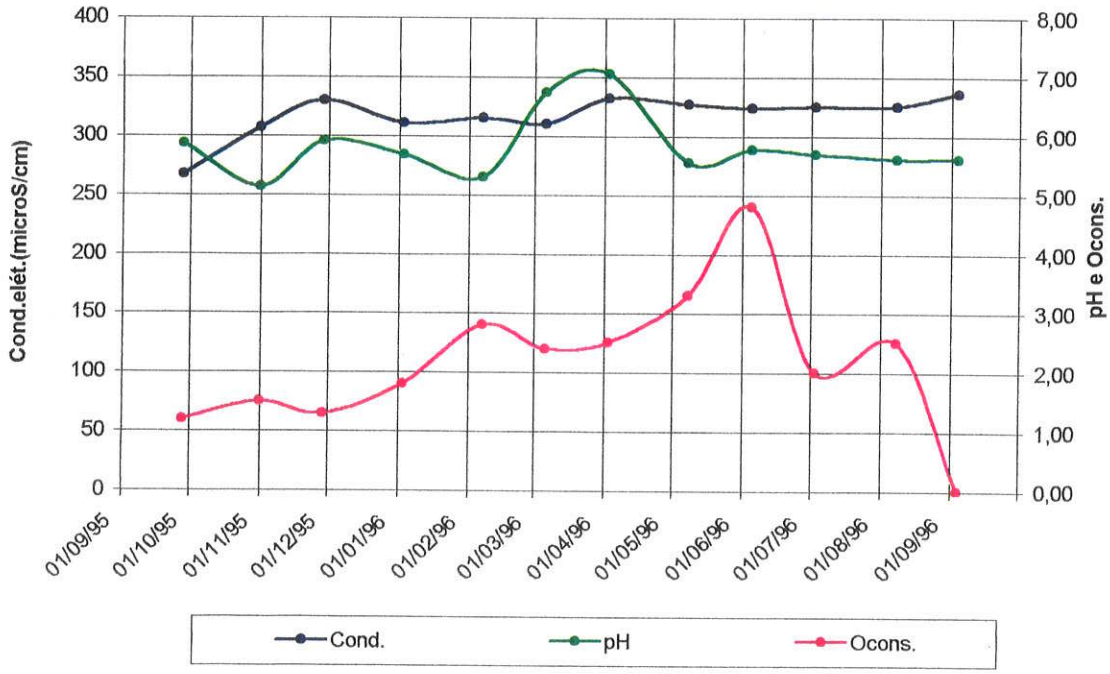
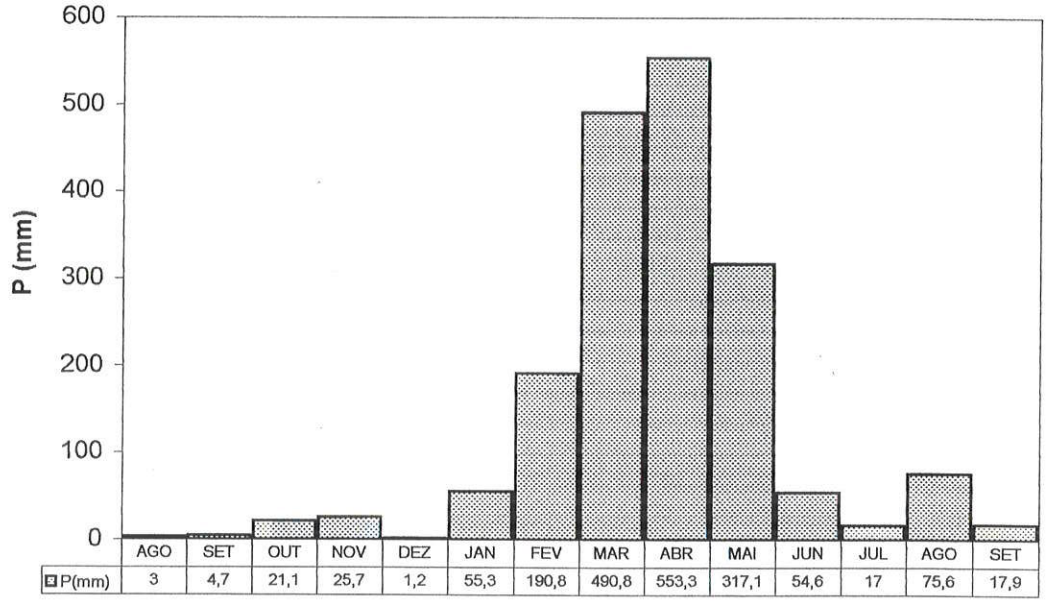


Figura 5.13 - Precipitação total mensal e condutividade elétrica, pH e oxigênio consumido para água de poço surgente, no período de 09/95 a 09/96.



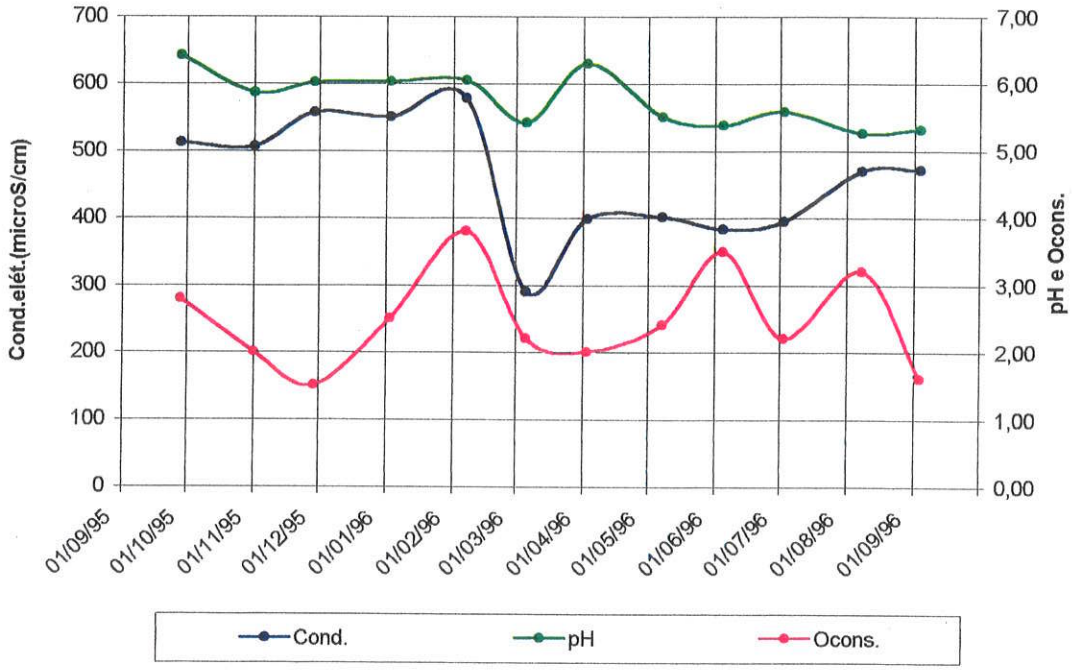


Figura 5.14 - Precipitação total mensal, e condutividade elétrica, pH e oxigênio consumido para água bombeada, no período de 09/95 a 09/96.

No período correspondente às maiores precipitações, observa-se uma variação positiva de pH, na água do poço surgente e na coletada por bombeamento. Estes valores variam entre 5 e 7, jamais excedendo aqueles registrados por Marvignier para o Rio Cocó.

As medidas de oxigênio consumido, fornecidas pelo laboratório, para ambas as águas apresentam uma variação cíclica sem qualquer relação com o período de precipitações (Figuras 5.13 e 5.14).

As análises físico-químicas das águas do poço surgente e das coletadas por bombeamento foram realizadas somente durante o período de 09/95 a 09/96; no entanto, as medidas de campo continuaram até 05/98 e estão apresentadas nas figuras 5.16 e 5.17.

As medidas efetuadas *in situ* confirmam o comportamento acima descrito para o primeiro ano de amostragem. As medidas de pH de campo acompanham as oscilações apresentadas pelas medidas de laboratório, porém com leituras inferiores e as leituras de condutividade elétrica mostram a mesma tendência, sendo as leituras de campo superiores àquelas de laboratório.

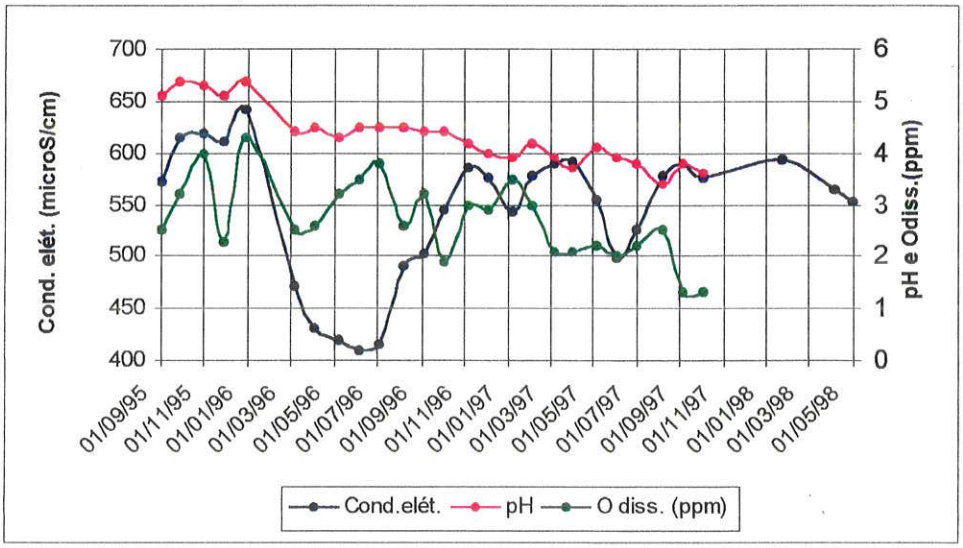


Figura 5.15 – Medidas *in situ* de condutividade elétrica, pH e oxigênio dissolvido para água bombeada.

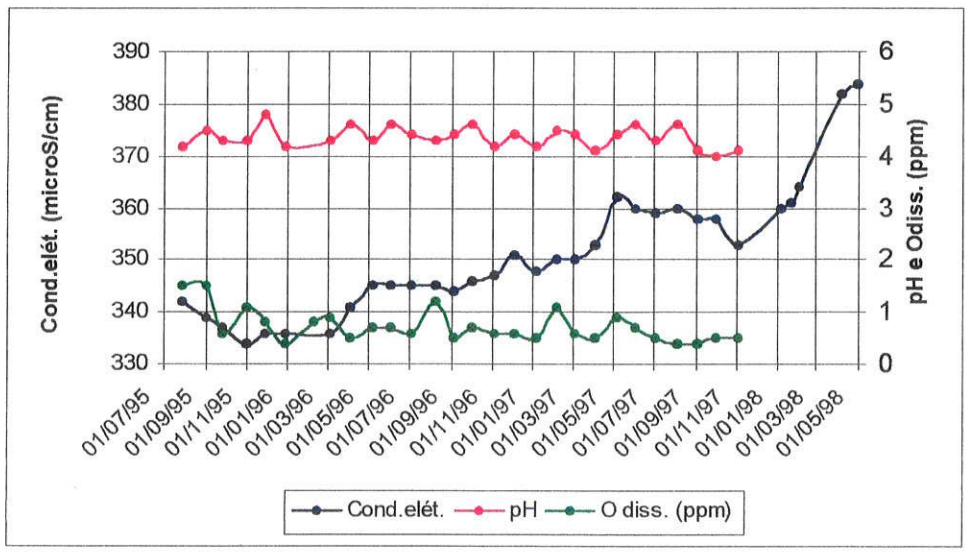


Figura 5.16 – Medidas *in situ* condutividade elétrica, pH e oxigênio dissolvido para água do poço surgente.

5.7. Concentração isotópica

A composição de isótopos estáveis na água subterrânea é importante para fornecer informações sobre sua origem. As chuvas individuais têm concentrações isotópicas variadas, mas em cada região, obtém-se um valor médio característico da concentração isotópica para a água de precipitação que é ponderado com a intensidade das precipitações. A composição isotópica da água subterrânea corresponde a esta média ponderada se não há evaporação antes ou durante a infiltração. Esta variação da concentração isotópica da água da chuva depende da temperatura do ar, por isso, no inverno as águas de precipitação apresentam concentrações de isótopos pesados mais baixas que no verão.

De forma geral, a composição isotópica da água de precipitação em um grande número de estações espalhadas por todo o mundo obedece à equação de Craig (1961a):

$$\delta D = 8\delta^{18}O + 10$$

onde, δD e $\delta^{18}O$ são as as concentrações isotópicas expressas em $^{0}/_{00}$ (por mil) respectivamente de deutério e ^{18}O, , em relação ao padrão SMOW (*Standart Mean Ocean Water* - Craig, 1961b) definidos da seguinte forma:

$$\delta = \frac{R - R_{SMOW}}{R_{SMOW}} 10^3$$

onde, **R** e R_{SMOW} são as razões isotópicas **D/H** ou $^{18}O/^{16}O$ da amostra de água e do padrão, respectivamente.

Foram coletadas amostras da água do poço surgente e de água coletada por bombeamento no início do período de chuvas e ao final deste período. Os resultados das concentrações isotópicas estão apresentados na tabela 5.18, onde está apresentada também a precipitação total mensal **P**.

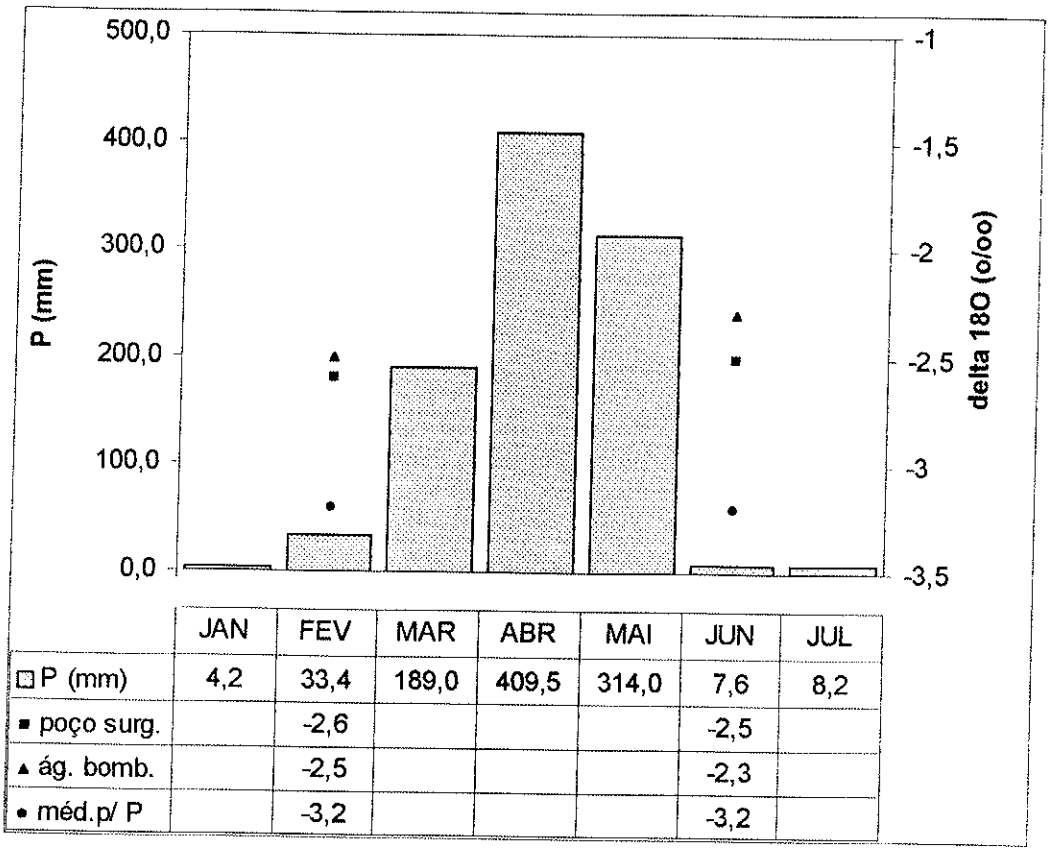
Tabela 5.18 – Precipitação total mensal e concentrações isotópicas das amostras coletadas.

Data	P (mm)	$\delta^{18}O$ (°/oo)		$\delta^{2}H$ (°/oo)	
		poço surg.	ág. bomb.	poço surg.	ág. bomb.
JAN/97	4,2				
FEV/97	33,4	-2,61	-2,49	-9,79	-9,13
MAR/97	189,0				
ABR97	409,5				
MAI/97	314,0				
JUN/97	7,6	-2,52	-2,34	**-12,21**	-8,00
JUL/97	8,2				

Em geral, verifica-se um enriquecimento em isótopos pesados com a chegada da água de precipitação, destacando-se o valor obtido para δ^2**H** da água do poço surgente que denota um empobrecimento em deutério.

Considerando uma composição de isótopos estáveis constante para a água de precipitação, um enriquecimento em isótopos pesados significa que a água, proveniente da precipitação, já passa por um processo de evaporação antes de se constituir em recarga.

No caso de δ^{18}**O**, utilizando como referência o valor -3,2 °/oo, correspondente à chuva média ponderada em Fortaleza, todas as medidas são menos negativas significando que são águas evaporadas (Figura 5.18) sendo que a evaporação foi maior no mês de junho, ou seja, posterior ao período de maiores precipitações.



	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL
□ P (mm)	4,2	33,4	189,0	409,5	314,0	7,6	8,2
■ poço surg.		-2,6				-2,5	
▲ ág. bomb.		-2,5				-2,3	
• méd.p/ P		-3,2				-3,2	

Figura 5.18 – Precipitação mensal em 1997 e concentrações de oxigênio-18.

6. AVALIAÇÃO DA RECARGA

Uma boa estimativa para a recarga subterrânea deveria compreender dados referentes a um longo período de observação, independente do método ou dos métodos escolhidos para esta estimativa. Porém, a geração de dados específicos para este fim, durante períodos suficientemente longos (séries maiores que 10 anos), apresenta grandes dificuldades de ordem prática para sua viabilização. Neste sentido, os métodos de estimativa de recarga que utilizam dados de monitoramento prontamente disponíveis, tais como precipitação e temperatura, têm uso preferencial em relação àqueles que exigem observações mais especializadas.

Os resultados aqui apresentados foram obtidos nessa perspectiva e com o objetivo de chegar a uma metodologia de estimativa de recarga que possa ser facilmente utilizada e que exija dados facilmente disponíveis. Nesse sentido, o método de avaliação da recarga a partir da infiltração determinada pelo método do balanço hídrico se apresentaria como um método de larga aplicabilidade tendo em vista que as informações necessárias para sua utilização, em geral, estão prontamente disponíveis.

Dadas as dificuldades intrínsecas aos estudos do processo de recarga, é necessário tecer algumas considerações relativas à hipóteses simplificadoras necessárias dentro da abordagem exposta neste trabalho.

Como já mencionado no capítulo 3, podem existir várias fontes de recarga para o sistema subterrâneo e cada fonte deve ser considerada separadamente na estimativa de recarga. Aqui, será considerada apenas a recarga direta, ou seja, aquela devida unicamente à precipitação. Outra simplificação adotada, também já mencionada no capítulo 3, se refere a não considerar o escoamento superficial na expressão do balanço hídrico, hipótese aceitável, tendo em vista que a área em estudo é constituída de areias de dunas.

6.1 Estimativa da infiltração eficaz

A parcela de precipitação que efetivamente contribui para a recarga subterrânea, denominada de infiltração eficaz I_e, é a forma mais acessível para uma primeira estimativa de recarga. A infiltração eficaz é obtida quando se retira da infiltração total I_T

a parcela que fica retida na zona não saturada, durante o processo de infiltração. Esta parcela, que é a capacidade de saturação do solo **C**, é admitida como uma constante que depende das características do meio não saturado, especialmente das granulométricas, e do tipo de cobertura vegetal. Aqui foi utilizado o valor de 136 mm, obtido com base na correlação **Δh** *versus* **P**. Os resultados para os três períodos de ocorrência de recarga estão apresentados na tabela 6.1 a), b) e c).

Tabela 6.1 – Planilha de determinação da infiltração eficaz.

a)1996

	P(mm)	ETP(mm)	P-ETP(mm)	C (mm)	ETR (mm)	Ie (mm)
JAN	55,3	168,5	-113,2	0	55,3	0
FEV	190,8	149,0	41,8	41,8	149	0
MAR	490,8	142,2	348,6	136	142,2	254,4
ABR	553,3	133,0	420,3	136	133	420,3
MAI	317,1	155,7	161,4	136	155,7	161,4
JUN	54,6	147,1	-92,5	43,5	54,6	0
JUL	17,0	147,4	-130,4	0	17	0
AGO	75,6	150,9	-75,3	0	75,6	0
SET	17,9	154,7	-136,8	0	17,9	0
OUT	12,5	169,1	-156,6	0	12,5	0
NOV	8,6	170,4	-161,8	0	8,6	0
DEZ	10,8	182,4	-171,6	0	10,8	0
ANO	1642,9	1870,5			832,2	836,1

b) 1997

	P(mm)	ETP(mm)	P - ETP(mm)	C (mm)	ETR (mm)	Ie (mm)
JAN	4,2	184,8	-180,6	0	4,2	0
FEV	33,4	159,2	-125,8	0	33,4	0
MAR	189,0	169,8	19,2	19,2	169,8	0
ABR	409,5	140,6	268,9	136	140,6	152,1
MAI	314,0	139,5	174,5	136	139,5	174,5
JUN	7,6	143,1	-135,5	0,5	7,6	0
JUL	8,2	141,5	-133,3	0	8,2	0
AGO	27,4	142,9	-115,5	0	27,4	0
SET	0,0	144,6	-144,6	0	0	0
OUT	0,8	158,1	-157,3	0	0,8	0
NOV	39,8	161,5	-121,7	0	39,8	0
DEZ	37,0	177,7	-140,7	0	37	0
ANO	1070,9	1863,2			608,3	326,6

c) 1998

	P(mm)	ETP(mm)	P - ETP(mm)	C (mm)	ETR (mm)	Ie (mm)
JAN	125,3	175,3	-50,0	0	125,3	0
FEV	75,2	176,7	-101,5	0	75,2	0
MAR	286,6	142,2	144,4	136	142,2	8,4
ABR	112,2	183,6	-71,4	0	0	0
MAI	113,2	182,5	-69,3	0	0	0
JUN	55,6	161,6	-106,0	0	0	0
JUL	15,4	147,4	-132,0	0	0	0
SOMA	783,5	1169,5			342,7	8,4

A infiltração eficaz por ano, expressa em milímetro, significa que em uma área de 1 m^2, infiltrou o volume correspondente a 0,8361; 0,3266 e 0,0084 m^3 de água respectivamente nos anos de 1996, 1997 e 1998. Considerando a área total de 20,94 km^2 teríamos, um volume de infiltração de 17,51 Mm^3; 6,84 Mm^3 e 0,18 Mm^3 respectivamente para estes três anos,.

6.2 Estimativa da recarga

Considera-se que a recarga direta, **R**, é resultante da medida da variação do nível estático, **Δh**, registrada através da leitura direta nos poços de observação. O volume de água adicionado ao aqüífero é:

$$\mathbf{R} = \Delta \mathbf{h} \mathbf{A} \mathbf{S}_y \qquad (6.1)$$

onde, **A** é a área total disponível para infiltração e $\mathbf{S_y}$ a porosidade efetiva do aqüífero.

As leituras efetuadas de forma sistemática registraram a ascensão do nível estático nos seis poços de observação (Figura 5.7) sendo os períodos de ascensão, associados à precipitação correspondente, registrada nos anos de 1996, 1997 e 1998.

Considerando uma célula de 1 m^2 de área, a recarga será:

$$\mathbf{R} = \Delta \mathbf{h} \mathbf{S}_y \qquad (6.2)$$

Usando o valor médio da variação de potencial registrada nos poços de observação e a porosidade efetiva estimada para a área 3 (Parque do Cocó), como sendo $\mathbf{S_y = 19{,}5}$, tem-se os valores apresentados na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Planilha de avaliação da recarga direta para uma área unitária (1 m^2) no Parque do Cocó.

Ano	Período	Δh(m)						$\overline{\Delta h}$	R
		P7	P8	P9	P13	P14	P15	(m)	(m^3)
1996	FEV-MAI	0,33	0,37	0,45	0,62	0,44	0,42	0,44	0,08580
1997	MAR-MAI	0,25	0,24	0,31	0,34	0,23	0,27	0,27	0,05265
1998	JAN-ABR	0,09	0,10	0,06	0,07	0,09	0,05	0,08	0,01560

6.3 Análise comparativa

Os valores obtidos para infiltração eficaz (Tabela 6.1) e a recarga como coluna de água em milímetros para uma área de 1m^2 (Tabela 6.2), são comparados na tabela 6.3. Verifica-se que a recarga, calculada pela variação de nível potenciométrico nos anos de 1996 e 1997, que tiveram regime de precipitação normal, tem valor correspondente a 10% da infiltração eficaz estimada pelo balanço hídrico. No ano de 1998, que teve um regime de precipitação muito abaixo da média, o valor da recarga excede o valor estimado para a infiltração eficaz.

Tabela 6.3 – Valores calculados para infiltração eficaz I_e e recarga **R**.

Ano	I_e		R		R/I_e
	Período	(mm)	Período	(mm)	(%)
1996	MAR-MAI	836,1	FEV-MAI	85,80	10
1997	ABR-MAI	326,6	MAR-MAI	52,65	16
1998	MAR	8,4	JAN-ABR	15,60	186

Estes resultados induzem a uma revisão das premissas adotadas na estimativa da infiltração eficaz pelo balanço hídrico, bem como confirmam a sua inaplicabilidade para estimativas de infiltração em períodos anuais, isoladamente. Uma outra conseqüência, é que a relação proposta por Walton (1970) (Equação 3.13) para avaliar a porosidade efetiva do sistema aqüífero, partindo da igualdade entre infiltração eficaz e recarga, é incompatível com os resultados aqui apresentados.

6.4. Regionalização da recarga

A regionalização da recarga é um recurso que visa atender necessidades práticas de hidrólogos com uma forma simples de estimar a recarga para uma área de um sistema aqüífero a partir de dados obtidos de uma pequena parte deste sistema. Inversamente, pode haver a necessidade de comparar recargas estimadas, feitas em uma escala espacial maior, com aquelas para um mesmo aqüífero em um experimento de menor escala.

A suposição de que a teoria de escala é aplicável significa admitir que a transmissividade, a carga hidráulica e a recarga são escaladas por fatores de escala definidos pelas equações 3.15. Então, conhecidos **q**, **h** e **T** em uma área **A**, pode ser conhecida a recarga $\mathbf{q_1}$ em uma área $\mathbf{A_1}$, onde **h** e **T** são conhecidos:

$$\mathbf{q_1 = q \frac{T_1}{T} \frac{h_1}{h} \frac{A}{A_1}} \qquad (6.3)$$

Desta forma, a recarga calculada para a área 3, pode ser usada para estimar as recargas naturais para as áreas 1 e 2.

Considerando áreas unitárias, as recargas ficam em função da relações entre as transmissividades e potenciais das áreas consideradas. Então, os valores calculados para a área 3 correspondentes às recargas referentes aos três anos de observação (Tabela 6.3) podem ser utilizados para estimar os valores de recarga para as áreas 1 e 2, conhecendo-se suas transmissividades e cargas hidráulicas. Os potenciais hidráulicos nas três áreas assumem os mesmos valores entre 0 e 5 m, portanto, a relação entre as cargas hidráulicas vai ser unitária. Isto significa que a recarga vai ficar em função apenas da relação entre as transmissividades. A tabela 6.4 apresenta os valores estimados para as áreas 1 e 2.

Tabela 6.4 – Planilha de avaliação da recarga nas áreas 1 e 2, usando o critério L.

	T_1 (m^2/s)	T_1/T	Ano	q (mm)
Área 3 (Parque do Cocó)	$6,27 \times 10^{-3}$	1,00	1996	85,80
			1997	52,65
			1998	15,60
Área 1 (Praia do Futuro)	$1,16 \times 10^{-2}$	1,85	1996	130,17
			1997	97,40
			1998	28,86
Área 2 (Cidade 2000)	$5,20 \times 10^{-3}$	0,82	1996	70,36
			1997	43,17
			1998	12,79

6.5. Avaliação da recarga direta total

Mesmo partindo da hipótese de que o sistema aqüífero é homogêneo no que se refere à porosidade efetiva e condutividade hidráulica, sabe-se que a recarga assimilada por este sistema é variável em função da posição, tendo em vista que a "transmissividade" e a carga hidráulica assumem valores diferenciados para diferentes locais. Desta forma, a estimativa de recarga exige a consideração de hipóteses simplificadoras tornando qualquer avaliação quantitativa vulnerável a questionamentos.

A avaliação aqui apresentada estabelece considerações simplificadoras, sem as quais seria impossível chegar-se a qualquer avaliação quantitativa da recarga direta para toda a área de estudo.

No que se refere à "transmissividade", considera-se que a regionalização por um simples fator de escala não é realística. Apesar da constatação de variações dentro do sistema, as informações relativas a este parâmetro não são suficientes para efetuar um zoneamento de regiões diferenciadas. Optou-se , então, pelo estabelecimento de um único valor de "transmissividade" para toda a área. O valor adotado foi o valor médio da classe de maior freqüência, 0,0028 m^2/s, para as áreas 1, 2 e 3. Este talvez seja um valor demasiadamente prudente, pois, além de ser inferior a todas as médias

calculadas, desconsidera os valores de alta transmissividade verificados na área 1, Praia do Futuro. No entanto, entende-se que este seja o melhor valor a ser adotado considerando o desconhecimento da variabilidade espacial da "transmissividade".

Com relação ao potencial hidráulico, observa-se no mapa potenciométrico (Figura 5.3) duas regiões bem distintas: uma monótona, com potenciais variando entre 0 e 10 metros e outra, correspondente a um cordão de dunas paralelo ao litoral, com potenciais variando entre 10 e 45 metros. Esta área, potencialmente mais favorável à assimilação de recarga, foi avaliada em 5 km^2. Para a avaliação da recarga, da área total, precisamente 20,94 km^2, foram subtraídas as áreas com potenciais inferiores a zero que totalizam uma extensão de 4,17 km^2, restando 16,77 km^2. Para efeito de cálculo, foram consideradas três classes de áreas correspondentes aos potenciais entre 0 e 10 m, entre 10 e 20 m e superiores a 20 m (Figura 6.1). Para a primeira área foi utilizado o potencial de 5 m, onde foram considerados os valores de recarga calculados a partir da diferença de potencial média registrada nos poços de observação. Para a segunda área foi considerado o valor de 15 m e para a terceira o valor de 25 m. Desta forma, através do critério L para avaliação de recarga, pode-se estimar a recarga em cada uma destas regiões, para uma área unitária de 1m^2, através da equação 6.1 utilizando para $\mathbf{T_1}$ o valor médio da classe de maior freqüência (Tabela 5.1) e para **T** o valor médio obtido para a área 3, onde estão situados poços observados, sobre a linha de potencial hidráulico de 1 m:

$$\mathbf{q_1 = \frac{0{,}0028}{0{,}00627}\,\frac{h_1}{1}\,q} \qquad (6.4)$$

A tabela 6.5 mostra os valores da recarga **q** calculada por uma área unitária, a variação de potencial **Δh** prevista, considerando a porosidade efetiva da área 3 (19,5 %) e a recarga total $\mathbf{q_T}$ nas áreas diferenciadas. Desta forma, chega-se a uma estimativa da recarga total para toda a área de estudo em cada um dos três anos de observação.

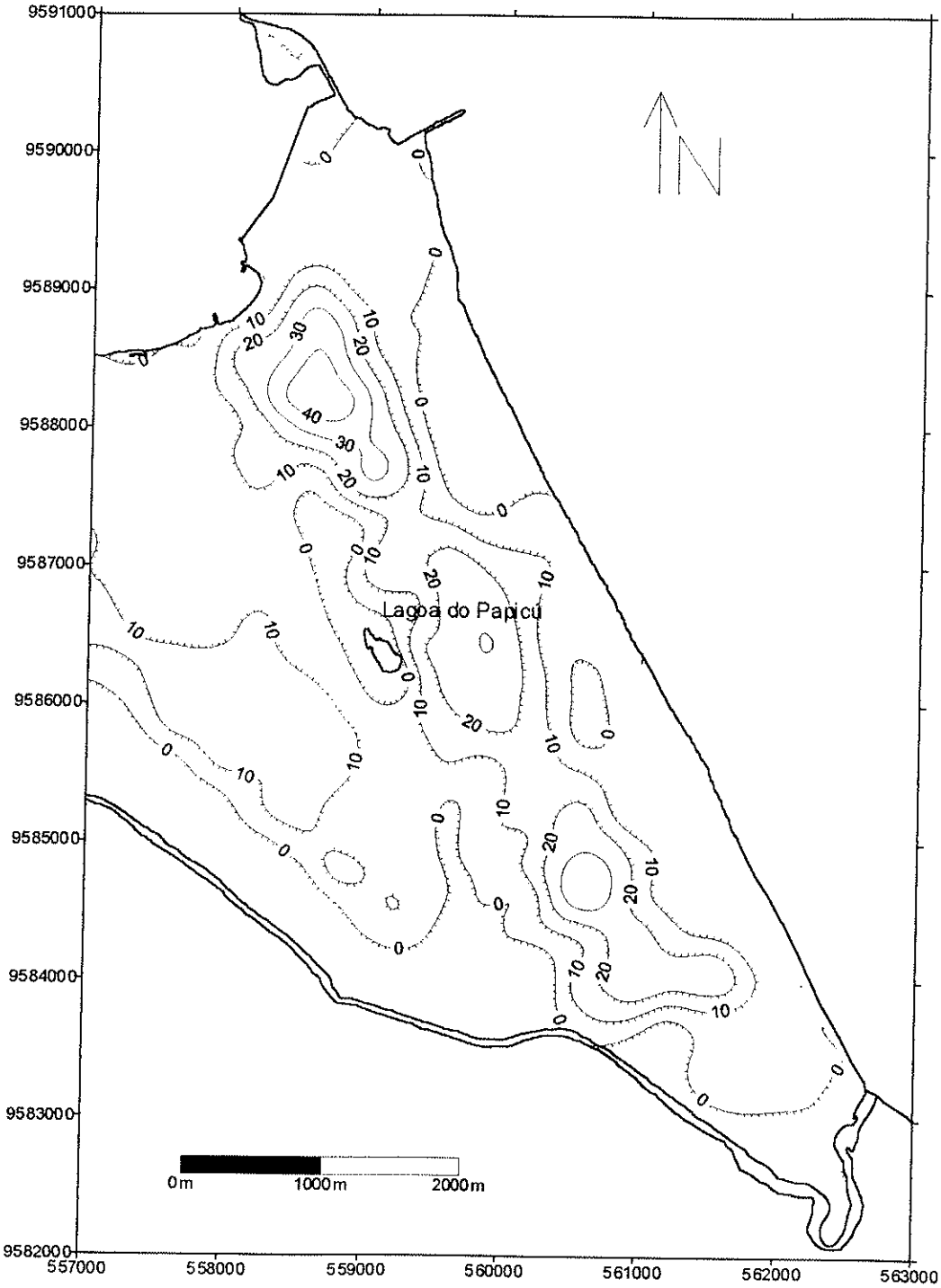


Figura 6.1 – Zoneamento de áreas para avaliação da recarga.

Tabela 6.5 – Valores estimados para a recarga direta **q**, e valores de variação potenciométrica **Δh** previstos para as regiões de potenciais hidráulicos: 5, 15 e25 m.

a) 1996

h (m)	q (mm)	Δh (m)	Área (km^2)	q_T (Mm^3)
1	85,80	0,44		
5	191,58	0,98	10,24	1,96
15	574,74	2,95	4,21	2,41
25	957,89	4,91	2,32	2,22
Total			16,77	6,59

b) 1997

h (m)	q (mm)	Δh (m)	Área (km^2)	q_T (Mm^3)
1	52,65	0,27		
5	117,56	0,60	10,24	1,20
15	352,68	1,81	4,21	1,48
25	587,80	3,01	2,32	1,36
Total			16,77	4,04

c) 1998

h (m)	q (mm)	Δh (m)	Área (km^2)	q_T (Mm^3)
1	15,60	0,08		
5	34,83	0,18	10,24	0,35
15	104,50	0,53	4,21	0,45
25	174,16	0,89	2,32	0,40
Total			16,77	1,20

Comparando-se as recargas diretas por unidade de área com a infiltração eficaz (Tabela 6.1), verifica-se que, para regiões com potencial hidráulico de 25 m, a recarga excede a infiltração eficaz. Na zona de potencial hidráulico de 15 m a recarga corresponde a 69 % da infiltração eficaz em 1996 e, em 1997, apresenta um valor muito próximo àquele da infiltração eficaz.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compreensão do processo de recarga de água subterrânea e sua relação com a precipitação assume uma importância crítica para o gerenciamento de sistemas subterrâneos. A literatura registra os enormes esforços que tem sido aplicados no sentido de compreender, em sua totalidade, o processo de recarga por infiltração direta para estimar a quantidade de recarga a partir de dados de precipitação. No entanto, a determinação exata da recarga direta, certamente, ainda deverá ser tema de futuras pesquisas a serem desenvolvidas.

Um requisito básico para investigação é o monitoramento contínuo, durante um período de tempo suficientemente longo, para detectar o nível de influência das inúmeras variáveis envolvidas.

No que se refere à gestão de água, para a determinação de recursos hídricos subterrâneos disponíveis o interesse está, geralmente, na quantidade de recarga total (recarga como sendo a reserva renovável ou reguladora) e sua variabilidade espacial e temporal, porque a otimização de uso do recurso depende da distribuição tanto espacial quanto temporal. Porém, a estimativa desta recarga para fins de tomada de decisão no que se refere à gestão dos recursos hídricos, além da dificuldade inerente à complexidade intrínseca do próprio processo, passa pela dificuldade da escassez e/ou do grau de confiabilidade dos dados, de modo que uma estimativa plenamente confiável ainda é uma utopia .

Ao nível do conhecimento atual, a proposta de definir um modelo de estimativa da recarga direta exeqüível com baixa disponibilidade de dados se constitui numa contribuição à gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Porém, este modelo dificilmente será atingido.

Entretanto, considerando a complexidade deste tema e as dificuldades inerentes ao desenvolvimento de qualquer pesquisa que envolva a geração de dados, espera-se que, de alguma forma, as informações constantes no presente trabalho possam ser úteis para o desenvolvimento de outras pesquisas mais conclusivas.

Neste sentido, serão destacados alguns aspectos considerados de maior importância para abordagem do tema, estimativa da recarga direta de aqüíferos livres, aspectos estes, conseqüentes das observações realizadas no sistema dunas/paleodunas do município de Fortaleza-CE, e da análise apresentada neste trabalho.

1. No que se refere ao método do balanço hídrico, este método é, e continuará sendo, uma forma de avaliação simples e representativa da infiltração eficaz média, quando considera-se uma série de dados relativos a um longo período de observação. No entanto, os valores da infiltração eficaz avaliados serão sempre superestimados, para anos de precipitação acima da média, e subestimados, para anos de precipitação abaixo da média.
2. A idéia de que a recarga do aqüífero só ocorre após atingida a capacidade de campo do solo não nos parece mais verdadeira, tendo em vista a constatação de recarga quando o nível de precipitação foi insuficiente para a saturação do solo.
3. A aproximação que iguala a infiltração eficaz à recarga é extremamente grosseira, tendo em vista os resultados obtidos, onde a recarga se constitui em apenas 10% da infiltração eficaz determinada pelo balanço hídrico, para níveis de precipitação em torno da média.
4. É praticamente impossível o estabelecimento de uma relação entre recarga direta e infiltração eficaz para períodos de ocorrência de múltiplos eventos de precipitação, pois, como já foi mencionado, o regime de precipitação provoca variações de difícil controle.
5. A correlação precipitação x recarga direta somente se torna possível quando se tomam eventos isolados e variações de nível de água correspondentes. Tem-se conhecimento de relações lineares obtidas em um experimento de irrigação na província de Hebei, nordeste da China, para 1,5 m e 4,5 metros de profundidade do nível estático (Wu, Zhang, Yang, 1996). Este experimento não é fácil, visto que, durante o tempo de infiltração, é provável a ocorrência de superposição de eventos de precipitação. Além disso, o

conhecimento deste tipo de relação terá pouca aplicação para fins de gerenciamento de recursos hídricos.

Com relação à regionalização da recarga, tem-se as seguintes observações:

1. As transmissividades dos aqüíferos são espacialmente variáveis e, é claro que a condição de que a função transmissividade na versão escalada da área de recarga seja simplesmente um múltiplo da transmissividade em escala menor, é bastante irreal.
2. No entanto, considera-se que o critério L possibilita a avaliação da variabilidade espacial da recarga.

O cálculo da recarga total, aqui determinada, poderia ser mais preciso se a densidade de pontos com dados de nível estático e transmissividade assim o permitissem. Porém, o procedimento aqui adotado poderá ser utilizado em condições de maior densidade de dados permitindo redução nas simplificações relativas às características do sistema aqüífero no que se refere à variabilidade espacial da "transmissividade" e do potencial hidráulico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLISON,H., 1988. The principles of inverse modelling for estimation of recharge from hidraulic head, In: **Estimation of Natural Groundwater Recharge**, I. Simmers (ed.), Netherlands, p.271-282.

ALLISON,H.J., PECK,A.J., 1989. Hidraulic scaling theory in recharge estimation, In: SYMPOSIUM ON GROUNDWATER RECHARGE, Mandurah, **Proceedings** ...: Sharma,M.L., A.A. Balkema, Rotterdan, Netherlands, p.57-67.

ALVAREZ, R.H, NIEDZIELSKI,H., 1996. Estimacion de la recarga en la subcuenca Rio de las Avenidas Pachuca Hidalgo México. In: Congresso Latino-americano de Hid. Sub., 3, México, 1996. **Anais do 3º Congresso Latino-americano de Hid. Sub.**, México: ALHSUD, p.35-46.

ARAUJO,A.L., LEAL,S.E.C., 1990. **Aspectos qualitativos das águas subterrâneas do município de Fortaleza-CE**: Relatório de Graduação. Fortaleza, DEGEO/UFC, 120 p.

BALEK,J., 1988. Groundwater Recharge Concepts , In: I Simmers (ed.), **Estimation of natural groundwater recharge**. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, p.3-9.

BELTRÃO,A.E., MANOEL FILHO,J., 1973. **Abastecimento de água da área metropolitana da cidade de Fortaleza-CE**, Recife: SUDENE / Div. Documentação, Hidrogeologia, 44.

BHANGU,I., WHITFIELD,P.H., 1997. Seasonal and long-term variation in water quality of Skeena River at USK british Columbia. **Water Research**, Vol. 31, N. 9, p.2187-2194.

BIANCHI, L.; MARQUES, J.C. de S.; PADILHA, M.W.M.; TEIXEIRA, J.E.M.; COELHO, M., do C.P.C.; MARTINS JUNIOR, M., AGUIAR, M.T.R., 1984. **Plano de**

aproveitamento dos recursos hídricos na RMF, Fase I - Fatores condicionantes, Recursos de água subterrânea na RMF, Fortaleza, 30 p.

BRAGA, A. de P. G., PASSOS, C. A. B., SOUZA, E. M. de; FRANÇA, J. B. de, MEDEIROS, M. de F., 1977. **Projeto Fortaleza**: Relatório final. Recife: DNPM/CPRM, v.1.

BRANDÃO,R.de L., 1995. **Diagnóstico geoambiental e os principais problemas de ocupação do meio físico da Região Metropolitana de Fortaleza**, Série Ord. Territ., v.1, CPRM, Fortaleza, 87 p.

BUTKOV,E., 1978. **Física matemática**. Rio de janeiro: Editora Guanabara dois, 725 p.

CAGECE/PLANAT, 1976a. **Exploração de água subterrânea na área do Cocó - Fortaleza - dimensionamento de um sistema de captação**., CAGECE, circulação interna, Fortaleza, junho de 1976, 26p.

CAGECE/PLANAT., 1976b. **Sondagens nas dunas de Fortaleza. Áreas do Cocó - Cidade 2000 e Praia do Futuro**: Relatório de conclusão, CAGECE, circulação interna, Fortaleza, dezembro de 1976, 45p.

CAGECE/PLANAT., 1977. **Captação do Cocó - Relatório final de construção: Condições de exploração dos poços perfurados**. CAGECE, circulação interna, Fortaleza, abril de 1977, 230p.

CASTANY,G., 1975. **Prospección y explotación de las aguas subterráneas**. Barcelona: Ediciones Omega, 738p.

CRAIG, H., 1961a. Isotopic variations in meteoric waters. **Science**, New York, v.133, p.1702-1703.

CRAIG, H., 1961b. Standard for reporting concentration of deuterium and oxygen-18 in natural waters. **Science**, New York, v. 133, p.1833-1834.

FETTER,C.W., 1994, **Applied hydrogeology**. USA: Macmillan College Publishing Company, Copyright, 691 p.

GEONORD, 1984. Engenharia e Geologia LTDA. Relatório enviado à CAGECE, CAGECE, circulação restrita, Fortaleza, julho de 1984, 154p.

HENDRICS,M.R., SEYHAN,E., SIMMERS,I., 1986. Determination of grid scales of landscape variables for hidrological regionalization. Gardiner, V., John Wiley & Sons (ed.). In: **International Geomorphology, part II**, , New York, p.125-143.

JOHANSSON,P.-O., 1987. Estimation of Groundwater Recharge in Sandy Till with two Different Methods Using Groundwater Level Fluctuations, **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.90, p.183-98.

KHAN, 1986. Inverse Problem in Groundwater: Model Application. **Groundwater**, v.24, p.39-48.

LERNER,D.N., ISSAR,A.S., SIMMERS,I., 1990. **Groundwater recharge**: A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge. Hannover, Germany: Heire (Iternational Contributions to Hidrogeology, v. 8) , 326 p.

MARVIGNIER,A.L., 1992. **Estudo físico, químico e bacteriológico do Rio Cocó**. Dissertação de Mestrado, Depto. de Hidráulica/UFC, Fortaleza, 108 p.

MILLER,E.E., MILLER,R.D., 1955a. Theory of capillary flow, I, Practical implication, **Soil Sci Soc. Amer. Proc.**, v. 19, p. 267-271.

MILLER,R.D., MILLER,E.E., 1955b. Theory of capillary flow, II, Experimental information, **Soil Sci Soc. Amer. Proc.**, v. 19, p. 271-275.

MORAIS,J.B.A.; SAMPAIO,T.deQ.S. e SALES,J.W.M., 1984. **Projeto Fortaleza: Hidrogeologia e Controle Tecnológico nas Perfurações dos Poços em Fortaleza**, Fortaleza, DNPM/CPRM, v.1, 208p.

MOREIRA,M.M.A. e GATTO,L.C.S., 1981. Geomorfologia. In: MME, **Projeto RADAMBRASIL**, Rio de Janeiro, v. 21, p. 213-252.

MUNIS,M.B. 1984. **Projeto sondagens elétricas verticais em Fortaleza: Relatório Final**. Recife: DNPM/CPRM, 93p.

PAZDRO,Z., 1983. Hydrogeologia Ogólna, W.G. Warszawa, p. 575.

PECK,A.J., LUXMOORE,R.J., STOLZY,J.L., 1977. Efffects of spatial variability of soil hydraulic properties in water budget modelling. **Water Resources Research**, v. 13, p. 348-354.

REBOUÇAS,A.C. , 1973. **Le problème de l'eau dans la zone semi-arie du Brésil**, Tese de doc. ès sci, Univ. L. P. de Strasbourg, 291p.

REBOUÇAS,A.C., 1996. **Diagnóstico do Setor Hidrogeologia PADCT – MCT: Caderno Técnico**, São Paulo: ABAS, agosto de 1996, 46 p.

RUSHTON,K.R., 1988. Numerical and conceptual models for recharge estimation in arid and semi-arid zones. In: Simmers,I. (ed.), **Estimation of Natural Groundwater Recharge**, Netherlands, p. 223-238.

RUSHTON,K.R., WARD,C., 1979. The estimation of groundwater recharge. **J. Hydrol.**, v. 41, p. 345-361.

SOUZA,M.J.N. de, 1988.Contribuição ao estudo das unidades morfológicas do Estado do Ceará, **Revista de Geologia**, v. 1, Imp. Univ. UFC, Fortaleza, p. 73-91.

SOUZA,M.J.N. de, 1989. Geomorfologia. In: SEPLAN-Ceará/IPLANCE, **Atlas do Ceará**, Fortaleza, p. 14-15.

TODD,D.K., 1959, **Hidrologia de Águas Subterrâneas**, Editora Edgard Blücher LTDA., Copyright John Wiley & Sons, Inc., USA, p.60.

VASCONCELOS,S.M.S., 1996. Estimativa da Recarga Subterrânea a partir do Balanço Hídrico - Exemplo de Fortaleza, (CE). **Revista de Geologia**, v. 7, Imp. Univ. UFC, Fortaleza, p. 27-34.

VENETIS,C., 1971. Estimating infiltration and/or the parameters of unconfined aquifer from rainfall-water table relationship. **J. Hydrol.**, v. 12, p.161-169.

VILLELA,S.M., MATTOS,A., 1975, **Hidrologia Aplicada**. Copyrigth da Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., Rio de Janeiro, p. 96.

VISWANATHAN,M.N., 1983.The rainfall-water table level relationship of an unconfined aquifer. **Groundwater**, v. 21, p.49-56.

VISWANATHAN,M.N., 1984. Recharge characteristics of an unconfined aquifer from the rainfall-water table relashionship. **J. Hydrol.**, v. 70, p.233-250.

WALTON,W.C., 1970, **Groundwater Resource Evaluation**, McGraw-Hill Book Company Inc. Copyright, USA, 664 p.

WARRICK,A.W., MULLEN,G.J., NIELSEN, D.R., 1977. Scaling field-measured soil hydraulic properties using a similar media concept, **Water resources Research**, v. 13, n. 2, p. 355-362.

WELLINGS,S.R., BELL,J.P., 1982. The physical controls of water movement in the Unsatureted Zone, **Q. J. Eng. Geol.**, London, v. 3, n. 15, p. 235-241.

WU,J., RENDUO,Z., YANG,J., 1996. Analysis of rainfall-recharge relationships. **J. Hydrol.**, v. 177, p. 143-160.

TZ768

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - USP
— BIBLIOTECA —

ANEXO 1

POÇOS CADASTRADOS

Poços cadastrados.

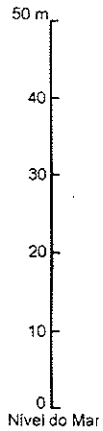
CÓDIGO	LOCALIDADE	BAIRRO	PROPRIETÁRIO	EXECUTOR	DATA	NE(m)	UTM E-W	UTM N-S
FOR0687	RUA JOAQUIM SÁ, 879	DIONISIO TORRES	REINO PECALO ROE	DNOCS	04/08/71	7,0	555088	9585561
FOR0693	AV. PONTES VIEIRA/AV. BARÃO DE STUDART	ALDEOTA	ENEAS BOTELHO	DNOCS	13/09/71	11,0	554089	9585279
FOR0694	AV. RUI BARBOSA, 2991	JOAQUIM TAVORA	JOSUE VIANA DE CASTRO	DNOCS	15/09/71	14,0	554005	9585593
FOR0708	RUA FRANCISCO HOLANDA/RUA JOSÉ VILAR	DIONISIO TORRES	FRANCISCO NEVES	DNOCS	15/12/71	10,0	554518	9585810
FOR0725	RUA JOSÉ VILAR/FRANCISCO HOLANDA	DIONISIO TORRES	ANTONIO DE PADUA MENDES	DNOCS	30/04/72	8,5	554563	9585840
FOR0728	RUA REPÚBLICA DO LIBANO, 723	MEIRELES	RAIMUNDO MONTEFUSCO ARRAES	DNOCS	17/05/72	12,8	556245	9587454
FOR0759	RUA LIGIA ou NUNES VALENTE, 2323	DIONISIO TORRES	JOAO BATISTA FUJITA	DNOCS	26/12/72	17,5	554854	9586069
FOR0765	RUA FREI MANSUETO, 151	MEIRELES	SINDICATO DOS ARRUMADORES	DNOCS	15/01/73	8,5	556700	9588223
FOR0776	AV. PE. ANTONIO TOMAS, 292	ALDEOTA	MAIRAN GONÇALVES MAIA	DNOCS	28/02/73	10,0	555344	9586693
FOR0850	RUA JULIO SIQUEIRA/ NUNES VALENTE	JOAQUIM TAVORA	FERDINANDO MILERIO	DNOCS	28/09/74	6,5	554645	9585513
FOR0853	AV. DIOGUINHO, 3355	PRAIA DO FUTURO	CLUBE DO MÉDICO	DNOCS	29/10/74	2,0	561002	9586060
FOR0888	RUA PROF. OTAVIO LOBO, 701	PAPICU	JOSE CARLOS H. PINHEIRO ?	DNOCS	22/07/75	6,0	557760	9586012
FOR0889	AV. CESAR CALS, 4055	PRAIA DO FUTURO	CLUBE DO ADVOGADO	DNOCS	04/08/75	3,8	561200	9585679
FOR0939	RUA CEL. LINHARES, 1726	ALDEOTA	GERHARD OTTO SCHRADER	DNOCS	11/03/77	12,5	555960	9586400
FOR0940	RUA CEL. LINHARES, 500	MEIRELES	JOAO E. BEZERRA FILHO	DNOCS	31/03/77	8,6	556223	9587304
FOR0949	AV. BEIRA MAR, 1800	MEIRELES	CONST. E INCORP. CAMPOS	DNOCS	26/10/77	2,4	555162	9588503
FOR0973	AV. DESEMBARGADOR MOREIRA, 2060	ALDEOTA	CONST. E INC. CAMPOS LTDA. (ED. D. PEDRO II)	DNOCS	31/10/78	11,8	555353	9588229
FOR1005	RUA REP. LIBANO, 88/J. NABUCO	MEIRELES	JOSE GERARDO PONTES	DNOCS	10/05/80	17,2	555452	9587625
FOR1012	RUA JOAQUIM NABUCO, 1622	ALDEOTA	ESTANISLAU V. DE PAULA	DNOCS	31/07/80	4,2	555257	9586712
FOR1018	RUA VILEBALDO AGUIAR, 1570	COCÓ	AGACIL EGBERTO GUILHON	DNOCS	13/01/81	6,3	558356	9586053
FOR1326	AV. BEIRA MAR, 2780	MEIRELES	ED. ARPOADOR	SOEC	16/02/70	1,9	555666	9588153
FOR1332	IATE CLUBE	BEIRA MAR	IATE CLUBE	SOEC	28/03/70	2,7	557949	9588699
FOR1383	RUA FREI MANSUETO, 106	MEIRELES	UNIAO DOS FUNCIONARIOS DO CEARA	COCESA	23/11/70	8,4	556662	9588300
FOR1399	RUA PEREIRA VALENTE, 391	MEIRELES	DR. BEROALDO ALMEIDA	COCESA	13/01/71	17,3	555679	9587545
FOR1418	RUA MONSENHOR BRUNO, 2710	JOAQUIM TAVORA	RAIMUNDO E. PONTES	COCESA	22/06/71	10,0	553945	9585869
FOR1425	FABRICA DE ASFALTO (ASFOR)	MUCURIPE	SUMOV	COCESA	28/07/71	2,2	558707	9588984
FOR1446	RUA VICENTE LEITE/PE. ANTONIO TOMAZ	ALDEOTA	MA LUIZA F GOMES	SOEC	28/04/72	13,6	555861	9586465
FOR1451	RUA FCO. HOLANDA, 1020	DIONISIO TORRES	DR ENIS S MEDEIROS	SOEC	07/02/73	8,7	555450	9585502
FOR1476	HOSP. GERAL INPS	PAPICU	DR. HÉLIO DA SILVA REIS	SOEC	30/01/74	3,3	558152	9586651
FOR1477	HOSP. GERAL INPS	PAPICU	DR.HÉLIO DA SILVA REIS	SOEC	12/01/74	3,8	558152	9586651
FOR1492	RUA EDUARDO GARCIA, 555	ALDEOTA	OTOMAR FALCAO SOARES	SOEC	06/12/74	6,8	556365	9586660
FOR1493	RUA CEL. LINHARES, 339	MEIRELES	SR HEINZ GRIESER	SOEC	12/12/74	7,2	556605	9587336
FOR1501	AV. RUI BARBOSA, 2970	JOAQUIM TAVORA	INSTITUTO DE PATOLOGIA - ENG. NORDESTE	SOEC	17/07/75	2,0	554015	9585580
FOR1515	RUA PROF. OTÁVIO LOBO, 659	COCÓ	JOSE RANGEL	SOEC	28/04/76	4,5	557901	9586070
FOR1539	AV. PE. ANTONIO TOMÁZ, 828	ALDEOTA	SINVAL ROLIM	SOEC	03/07/77	10,1	555618	9586574
FOR1540	RUA MONSENHOR TABOSA, 777	MEIRELES	J TORQUATO - (CEAG)	SOEC	30/07/77	5,6	554143	9588404
FOR1569	AV. PONTES VIEIRA, 1198	DIONISIO TORRES	INDUST DELTA S/A - ED. DELTA CENTER	SOEC	11/09/78	12,9	554227	9585242

CÓDIGO	LOCALIDADE	BAIRRO	PROPRIETÁRIO	EXECUTOR	DATA	NE(m)	UTM E-W	UTM N-S
FOR1573	RUA D. LEOPOLDINA, 1518	JOAQUIM TAVORA	COELCE	SOEC	09/10/78	6,4	553026	9586952
FOR1575	AV. DIOGUINHO, 2000	PRAIA DO FUTURO	CONST MED MAGALH LTDA	SOEC	30/10/78	2,1	560252	9587225
FOR1577	RUA NICÁCIO PINTO, 279	PRAIA DO FUTURO	CONST SERVIS LTDA - EDIF. VILLAGE COSTA BRAVA	SOEC	28/11/78	1,5	560146	9586890
FOR1586	RUA BARAO DE ARACATI, 145	MEIRELES	COLONIAL PRAIA HOTEL	SOEC	09/04/79	3,0	554524	9588431
FOR1589	RUA PROF. FRANCISCO GONÇALVES, 640	DIONISIO TORRES	DELTA S/A	SOEC	21/05/79	17,0	555640	9585755
FOR1606	AV. DIOGUINHO, 5501	PRAIA DO FUTURO	BENEDITO O SALLES - ED. FIGUEIREDO	SOEC	29/09/79	4,4	561915	9584092
FOR1655	RUA OSVALDO CRUZ, 1985 - TV CANAL 5	DIONISIO TORRES		SOEC	01/11/80	19,0	555220	9586357
FOR1691	RUA VICENTE LEITE, 1611	ALDEOTA		SOEC	04/08/81	17,0	555920	9586528
FOR1699	RUA VICENTE LEITE, 927	ALDEOTA		SOEC	17/09/81	10,0	556127	9587064
FOR1778	AV. ANTONIO JUSTA, 3440	MEIRELES	ED. GIOCONDA	SOEC	10/08/83	10,5	556574	9587818
FOR1787	AV. TIBURCIOCAVALCANTE, 1300	ALDEOTA		SOEC	07/12/83	10,0	555164	9586897
FOR1792	RUA FCO. GONCALVES, 1400	DIONISIO TORRES		SOEC	10/02/84	3,3	556463	9585531
FOR1793	RUA TAVARES COUTINHO, 179	VARJOTA	CONST. ETEVALDO NOGUEIRA	SOEC	29/02/84	6,8	556910	9587410
FOR1830	RUA PE. ANTONIO TOMAZ, 2160	MEIRELES	CARLOS A. C. FERREIRA	SOEC	18/11/86	14,0	556277	9586366
FOR1862	FAROL VELHO	MUCURIPE	SOSP	CONESP	17/11/80	5,0	558718	9590130
FOR1912	RUA SORIANO ALBUQUERQUE, 230	JOAQUIM TAVORA	SOSP/FDC	CONESP	06/03/82	16,0	553406	9585663
FOR2159	RUA VISC. DE MAUA, 267	MEIRELES	QUEIROZ	PHD	01/01/84	9,6	556534	9587595
FOR2189	RUA ANA BIHAR/FREI MANSUETO,777	VARJOTA	CONST COISA	PHD	25/03/85	2,5	556840	9587311
FOR2198	RUA CAROLINA SUCUPIRA, 1425	ALDEOTA	COND ED JEAN MERMOZ	PHD	29/10/85	14,0	556364	9586048
FOR2202	AV. RUI BARBOSA, 640 -ED. MEDELLIN	VARJOTA	ROCHA AGUIAR S/A CONST. E COM.	PHD	01/11/85	6,0	555628	9587673
FOR2204	RUA FREI MANSUETO,1595	VARJOTA	COND EDIF JERICOACARA	PHD	02/12/85	5,0	556780	9586790
FOR2209	RUA JOÃO CARVALHO, 630	ALDEOTA	COLEGIO CHRISTUS	PHD	24/01/86	1,5	554698	9586884
FOR2218	AV. DES MOREIRA, 606	ALDEOTA	ADAMO CONSTRUCOES	PHD	22/04/86	11,0	555859	9587610
FOR2219	RUA MEIRELIRA VALENTE, 1405 E D GABRIEL FILHO	VARJOTA	CRAL - CONST. RAIMUNDO ALVES	PHD	24/03/86	5,0	556813	9587228
FOR2234	RUA SONESO VALENTE, 1405	ALDEOTA	CABS COM. E CONST. LTDA	PHD	10/07/86	4,5	555015	9586870
FOR2239	RUA JOAQUIM LIMA, 950 - ED. PERNINE	PAPICU	CONST. CANDIDO BANDEIRA LTDA	PHD	08/08/86	9,0	557933	9586436
FOR2243	RUA BARBOSA DE FREITAS, 2391	DIONISIO TORRES	FAUSTO P SANTOS	PHD	19/09/86	10,0	555381	9585678
FOR2244	AV DOM LUIS, 1219	ALDEOTA	PAULO BARRETO	PHD	26/10/86	5,5	556457	9587351
FOR2249	AV. PRES. KENNEDY, 3956	MEIRELES	TRAPICHE REST	PHD	08/12/86	2,7	557064	9588376
FOR2254	RUA SILVA JATHAY, 1570	MEIRELES	COND EDIF PORTINARI	PHD	18/12/86	9,0	556522	9587584
FOR2257	RUA NOGUEIRA ACIOLI, 1741	JOAQUIM TAVORA	MONTEIRO REFIGER S/A	PHD	23/01/87	1,5	553276	9586852
FOR2258	AV. DIOGUINHO, 3880	PRAIA DO FUTURO	HOTEL PRAIA VERDE	PHD	09/01/87	3,5	561344	9584092
FOR2276	AL. ADAMANTINA, 255 - Q 46	CIDADE 2000	MARIO HELDER O CARVALH	PHD	26/05/87	16,0	558500	9585080
FOR2278	JOAO BRIGIDO, 365	JOAQUIM TAVORA	MONTEIRO REFRIGERANTE	PHD	01/06/87	13,0	553221	9586809
FOR2281	JOAO BRIGIDO, 365	JOAQUIM TAVORA	MONTEIRO REFRIGERANTES	PHD	09/06/87	12,0	553230	9586792
FOR2299	AV. DES. MOREIRA, 2033	ALDEOTA	COND EDIFICIO VANESSA	PHD	02/09/87	13,0	555570	9586272
FOR2302	PADRE ANTONIO TOMAZ, 150	ALDEOTA	COND ABRAAO BAKIT	PHD	12/09/87	8,0	555164	9586705
FOR2304	RUA ANA BILHAR/OSW. CRUZ	MEIRELES	CONIL CONST IMOB LTDA	PHD	30/09/87	4,0	555759	9587844
FOR2305	RUA CEL. LINHARES, 2455	DIONISIO TORRES	CONDOMINIO MIRELE	PHD	30/09/87	5,0	555740	9585670

CÓDIGO	LOCALIDADE	BAIRRO	PROPRIETÁRIO	EXECUTOR	DATA	NE(m)	UTM E-W	UTM N-S
FOR2314	RUA CEL. JUCA, 981	ALDEOTA	CIPEME	PHD	07/12/87	5,0	556342	9586537
FOR2322	SILVA JATAHY, 1071	MEIRELES	CONDOM COPENHAGUE	PHD	28/01/87	6,0	556100	9587849
FOR2326	RUA CEL. LINHARES, 250	MEIRELES	CONDOM EDIF MANACAS	PHD	16/03/88	9,0	556687	9587447
FOR2327	RUA CARLOS VASCONCELOS, 2500	JOAQUIM TAVORA	COND EDIFICIO ANDRESI	PHD	25/03/88	8,0	553910	9586207
FOR2328	RUA NUNES VALENTE, 1390	ALDEOTA	COND EDIF BURGUESE	PHD	29/03/88	6,0	555085	9586964
FOR2331	RUA BENTO ALBUQUERQUE, 567	COCÓ	PRADO IMOBILIARIA LTDA	PHD	01/06/88	9,0	557310	9586162
FOR2338	RUA NUNES VALENTE, 1571	ALDEOTA	COND LE CORBUSIER	PHD	30/09/88	9,0	555067	9586825
FOR2342	RUA BENTO ALBUQUERQUE, 530	COCÓ	CONDOM EDIFICIO REIS	PHD	28/11/88	7,0	557275	9586266
FOR2354	RUA BARAO DE ARACATI, 2499	JOAQUIM TAVORA	ED. REGINS	PHD	10/03/89	9,0	553769	9586261
PHD0568	RUA VISC. MAUA, 777	ALDEOTA	CONST. ESTRELA LTDA	PHD	01/01/88	7,0	555704	9587454
PHD0697	AV. PRES. KENNEDY, 2800	MEIRELES	HOTEL PRAIANO	PHD	01/11/88	3,0	556100	9588248
PHD0794	AV. PRES.KENNEDY, 4260	MEIRELES	CONST. METRO S/A	PHD	01/12/89	2,5	557501	9586550
PHD1565	AV. SANTOS DUMONT, 7.700	DUNAS	ULTRA LIMPO EMPREENDIMENTOS E SERVIOS	PHD	12/10/91	22,0	559429	9585741
PHD1587	AV. PRES. J. KENNEDY, 2200	MEIRELES	PONTA MAR HOTEL	PHD	20/11/91	3,0	555478	9588170
PHD1652	AV. SANTOS DUMONT, 7.700	DUNAS	ULTRA LIMPO EMPREENDIMENTOS E SERVIOS	PHD	17/09/91	26,0	559429	9585741
PHD1667	AV. PRESIDENTE KENNEDY	BEIRA MAR	PONTA MAR HOTEL	PHD	16/04/92	6,0	555478	9588170
PHD1678	AV. SANTOS DUMONT, 7.700	DUNAS	ULTRA LIMPO EMPREENDIMENTOS E SERVIOS	PHD	18/04/92	28,0	559429	9585741
PHD1993	AVENIDA BEIRA MAR (HOTEL CESAR PARK)	BEIRA MAR	CONSTRUTORA MARQUISE S.A.	PHD	29/05/93	9,0	557147	9588465
PHD1994	AVENIDA BEIRA MAR (HOTEL CESAR PARK)	BEIRA MAR	CONSTRUTORA MARQUISE S.A.	PHD	29/05/93	9,0	557147	9588465
PHD2028	RUA VILEBALDO AGUIAR, 1740	PAPICU	ED. NAPOLES	PHD	26/06/93	6,0	558530	9586028
PHD2039	AV. BEIRA MAR	MEIRELES	COND. EDIFICIO SOLAR VOLTA DA JUREMA	PHD	06/07/93	4,5	556722	9588439
PHD2041	RUA DOLOR BARREIRAS, 1350	PAPICU	ALDO AQUINO FERREIRA	PHD	26/06/93	24,0	558990	9586773
PHD2043	RUA VILEBALDO AGUIAR, 1728	PAPICU	ED. CAMILO DEL MAR	PHD	03/07/93	6,0	558514	9586040
PHD2051	RUA ANDRADE FURTADO, 2105	CIDADE 2000	CONDOMINIO EDIFICIO CIDADE LESTE	PHD	13/07/93	5,0	558722	9585598
PHD2063	AV. BEIRA MAR, 2660	MEIRELES	DIAGONAL ENGENHARIA LTDA	PHD	19/07/93	4,5	556864	9588410
PHD2125	RUA ANDRADE FURTADO, 601-ED.SAN DIEGO	PAPICU	CONST. ETEVALDO NOGUEIRA	PHD	31/08/93	9,0	557282	9586098
PHD2277	GRUPO ESCOLAR LUIZA TAVORA	MUCURIPE	SOHIDRA - SUPERINT. DE OBRAS HIDRAULICAS	PHD	23/03/94	4,0	559053	9589852
PHD2405	RUA GILBERTO STUDART,2125-ED. STUDART PLACE	CIDADE 2000	CONSTRUTORA METRO LTDA	PHD	26/08/95	8,0	558898	9585774
PHD2457	AV. BEIRA MAR, 3980	MEIRELES	MARQUISE EMPREENDIMENTOS HOTELEIROS S.A.	PHD	12/03/96	10,0	557145	9588465
ANG01	RUA PAULO MORAIS, 795	PAPICU	CONST. MARINHO	SOPOÇOS		11,5	557942	9586776
ANG02	AV. SANTOS DUMONT, S/N	PAPICU		SOPOÇOS	06/05/96	46,3	560050	9585680
ANG03	AV. SANTOS DUMONT, S/N	PAPICU		SOPOÇOS	15/05/96	31,0	559810	9585847
SOEC01	AV. DIOGUINHO, 5957	PRAIA DO FUTURO	CLUBE DE RADIAMADORES	SOEC	23/11/81	4,8	562063	9583672
SOEC02	RUA FONSECA LOBO, 1528	DIONISIO TORRES	CEL. UIRANDÉ A. BORGES	SOEC	05/03/87	20 ?	556448	9586016
SOEC03	RUA PASCOAL DE CASTRO ALVES, 259	PAPICU	ETEVALDO NOGUEIRA	SOEC	29/04/82	2,6	557975	9587432
SOEC04	RUA AURÉLIO CAMARA,865	PRAIA DO FUTURO	LUIS AMORIM	SOEC	19/09/86	42,0	559390	9587332
SOEC05	RUA DR. ALEXANDRE ANTONIO / PROF. M. SOLON	PAPICU	METON VIEIRA	SOEC	07/01/86	20,1	559520	9586309

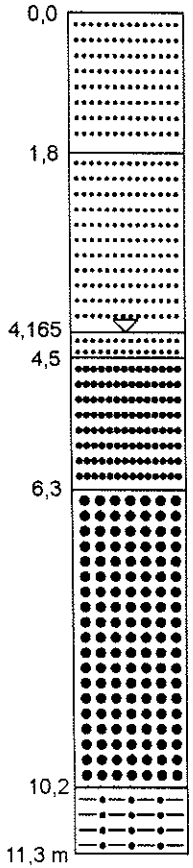
ANEXO 2

PERFÍS LITOLÓGICOS



ÁREA 1 - PRAIA DO FUTURO

P - 27



AREIA FIXA, HOMOGÊNEA, CREME

AREIA FINA, HOMOGÊNEA, CREME

NE

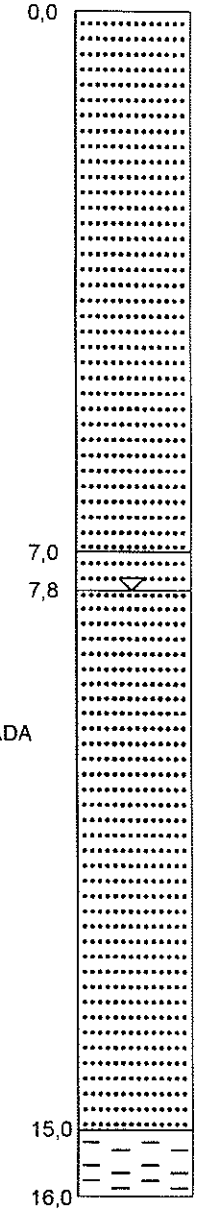
AREIA MÉDIA, HOMOGÊNEA, ESBRANQUIÇADA

AREIA GROSSA, HETEROGÊNEA COM SEIXOS, CREME

ARGILA ARENOSA COM SEIXOS, ESVERDEADA

ÁREA 2 - CIDADE 2000

SONDAGEM 94



AREIA SILTOSA DE COR AMARELA

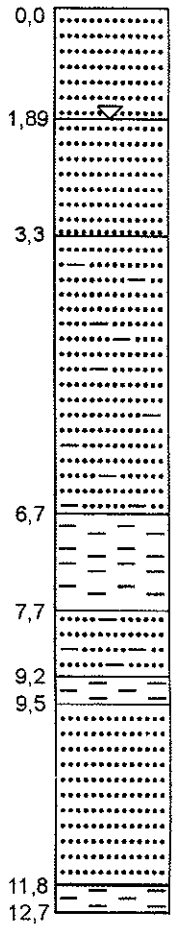
NE

AREIA SILTOSA DE COR ESBRANQUIÇADA

ARGILA ARENOSA DE COR VERMELHA

ÁREA 3 - PARQUE DO COCÓ

P14



AREIA FINA, CLARA

NE

AREIA FINA COM POUCA ARGILA, AMARELA

ARGILA CINZA

AREIA FINA COM POUCA ARGILA, VERMELHA

ARGILA, VERMELHA

AREIA FINA, CLARA

ARGILA CINZA

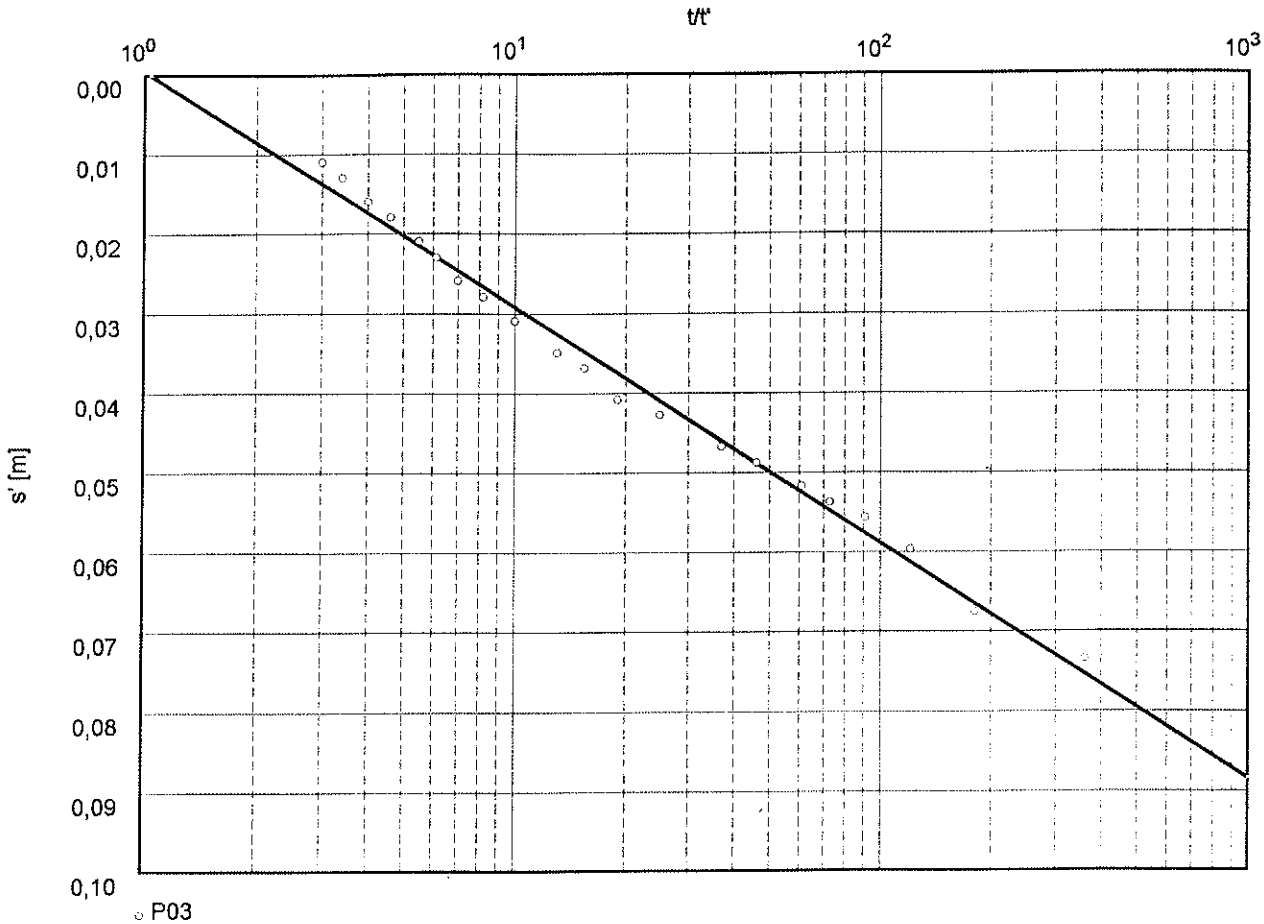
Escala Vertical dos Perfis: 1:100

ANEXO 3

GRÁFICOS DE SOLUÇÃO PRODUZIDOS PELO *AQUIFER TEST*

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ Departamento de Geologia Fortaleza-Ceará-Brasil	Solução de teste de bombeamento Método de Recuperação de THEIS & JACOB Aquífero Não Confinado	Data: 01.10.1998	Página 1
		Projeto: Praia do Futuro	
		Avaliado por: GEONOD/CAGECE	

Teste de Bombeamento No.	Data do Teste : 26/03/84
P03	
Vazão 8,120 m³/h	
	Duração: 360.00 min



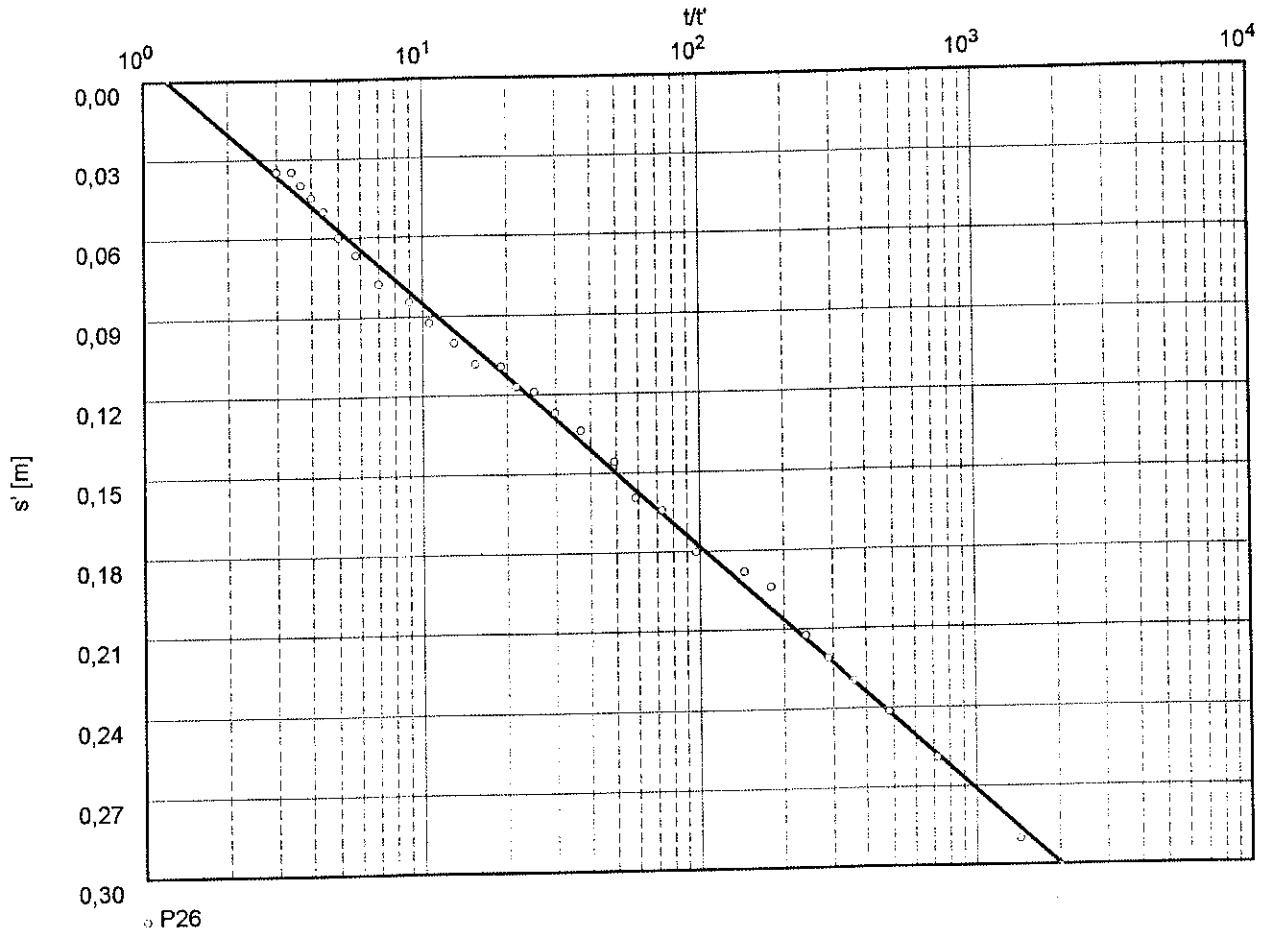
Transmissividade [m²/min]: $8,35 \times 10^{-1}$

Condut. hidráulica (K) [m/min]: $1,74 \times 10^{-1}$

Espessura do Aquífero [m]: 4,777

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ Departamento de Geologia Fortaleza-Ceará-Brasil	Solução de teste de bombeamento Método de Recuperação de THEIS & JACOB Aquífero Não Confinado	Data: 30.09.1998	Página 1
		Projeto: Parque do Cocó	
		Avaliado por: PLANAT/CAGECE	

Teste de Bombeamento No.	Data do Teste : 12/01/77
P26	
Vazão 7,735 m³/h	
	Duração: 1440.00 min



Transmissividade [m²/min]: $2{,}53 \times 10^{-1}$

Condut. hidráulica (K) [m/min]: $2{,}87 \times 10^{-2}$

Espessura do Aquífero [m]: 8,810