

Ministério de Ciência e Tecnologia
Fundo Setorial de Recursos Hídricos
Financiadora de Estudos e Projetos

Rede Cooperativa de Pesquisa

*Comportamento das Bacias Sedimentares da Região
Semi-Árida do Nordeste Brasileiro*

***HIDROGEOLOGIA DA BACIA SEDIMENTAR DO
RIO DO PEIXE - PB***

RELATÓRIO FINAL

Elaboração:

Universidade Federal de Campina Grande
Serviço Geológico do Brasil

OUTUBRO/2007



REDE COOPERATIVA

Coordenação da Rede: Fernando Antônio Carneiro Feitosa

Serviço Geológico do Brasil

Coordenação Geral: Fernando Antônio Carneiro Feitosa

Coordenação Técnica: Jaime Quintas dos Santos Colares

Universidade Federal da Bahia

Coordenação: Luiz Rogério Bastos Leal

Universidade Federal de Campina Grande

Coordenação: Vajapeyam Srirangachar Srinivasan

Universidade Federal do Ceará

Coordenação: Maria Marlúcia Freitas Santiago

Universidade Federal de Pernambuco

Coordenação: José Geilson Alves Demétrio

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Coordenação: José Geraldo de Melo

EQUIPE EXECUTORA

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL

Manoel Julio da Trindade Gomes Galvão (Responsável Técnico)

Waldir Duarte Costa Filho

Franklin de Moraes

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS

Dr. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan (Coordenador)

Msc. José do Patrocínio Tomaz Albuquerque

Msc. Janiro Costa Rêgo

Dr. Hans Dieter Max Schuster

Dr^a. Beatriz Susana Ovruski de Ceballos

Dr. Carlos de Oliveira Galvão

Dr^a. Márcia Maria Rios Ribeiro

Msc. José Rosenilton de Araújo Maracajá

Julio Cesar Sebastiani Kunzler – Mestrando / CT-Hidro/CNPq

Gracieli Louise Monteiro Brito – Mestrando / CT-Hidro/CNPq

Kiosthenes Moreira Pinheiro – Iniciação Científica / PIBIC/CNPq

Renato de Oliveira Fernandes - Iniciação Científica / PIBIC/CNPq

Ismael José Pereira – Técnico em Laboratório

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE	3
3. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOMÉTRICA DA BACIA SEDIMENTAR DO RIO DO PEIXE	5
3.1. SÍNTESE DOS ESTUDOS GEOLÓGICOS.....	5
3.2. SÍNTESE DOS ESTUDOS GEOFÍSICOS	7
3.3. NOVAS CONSIDERAÇÕES SOBRE A GEOLOGIA DA BACIA DO RIO DO PEIXE – UMA PROPOSTA DA UFCG	14
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	17
4. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO SISTEMA AQÜÍFERO	18
4.1. DEFINIÇÃO DA REDE DE POÇOS PARA MONITORAMENTO.....	18
4.1.1. INVENTÁRIO DOS POÇOS EXISTENTES.....	18
4.1.2. SELEÇÃO DOS POÇOS PARA MONITORAMENTO.....	20
4.1.3. NIVELAMENTO DOS PONTOS DE ÁGUA	20
4.2. INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS.....	22
4.2.1. INSTALAÇÃO DE PLUVIÓGRAFOS E PLUVIÔMETROS	23
4.2.2. INSTALAÇÃO DE LISÍMETROS	25
4.2.3. CONSTRUÇÃO DE PIEZÔMETROS	28
4.3. TESTES DE AQÜÍFERO.....	33
4.3.1. PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS TESTES.....	33
4.3.2. INTERPRETAÇÃO DOS TESTES – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS.....	33
4.4. ELABORAÇÃO DE MAPAS POTENCIOMÉTRICOS	38
4.4.1. MONITORAMENTO DOS NÍVEIS DE ÁGUA DOS POÇOS DA REDE	39
4.4.2. MAPAS POTENCIOMÉTRICOS DOS NÍVEIS MONITORADOS	40
4.5. BALANÇO HÍDRICO	45
4.5.1. ELABORAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO PRELIMINAR	46
4.5.2. BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL DIÁRIO – O MODELO BALSEQ	58
4.5.3. COMENTÁRIOS	76
4.6. ELABORAÇÃO DE MODELOS DE FLUXO.....	78
4.6.1. MODELO CONCEITUAL	78

4.6.2. MODELO NUMÉRICO COMPUTACIONAL.....	83
4.6.3. CALIBRAÇÃO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS.....	86
4.6.4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO	97
4.7. AVALIAÇÃO DOS RECURSOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DA BACIA... 99	
4.7.1. AS POTENCIALIDADES.....	99
4.7.2. AS RESERVAS	100
4.7.3. AS DISPONIBILIDADES.....	102
5. CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E DE VULNERABILIDADE	105
5.1. ESTUDOS HIDROGEOQUÍMICOS.....	105
5.1.1. DEFINIÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO DA REDE DE QUALIDADE DAS ÁGUAS E COLETA DE AMOSTRAS	105
5.1.2. ANÁLISE DE AMOSTRAS FÍSICO-QUÍMICAS, BACTERIOLÓGICAS	106
5.1.3. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E ELABORAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS.....	108
5.2. ESTUDO DE VULNERABILIDADE E RISCOS DE CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS	155
5.2.1 AVALIAÇÃO E MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE NATURAL	156
5.2.2. CARACTERIZAÇÃO E MAPEAMENTO DAS FONTES POTENCIAIS DE POLUIÇÃO	164
5.3. MAPEAMENTO DOS RISCOS DE POLUIÇÃO.....	178
6. SUBSÍDIOS À GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA BACIA	180
6.1 ZONEAMENTO EXPLOTÁVEL	180
6.2. OBRAS HÍDRICAS RECOMENDADAS E OUTRAS CONSIDERAÇÕES. 183	
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	187
7.1. CONCLUSÕES	187
7.2. RECOMENDAÇÕES	189
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	192
ANEXOS	196

Capítulo 2

Anexo A2.1 –Relatório do Estado-da-Arte

Capítulo 3

Anexo A3.1 – Geologia da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe

Anexo A3.2 – Estudo Geofísico por Eletrorresistividade

Capítulo 4

Anexo A4.1 – Tabela com Cadastro de Poços

Anexo A4.2 – Cadastro dos Poços de Produção

Anexo A4.3 – Programa Computacional para Determinação da Transmissividade de Aquíferos

Anexo A4.4 – Dados de Precipitação

Anexo A4.5 – Programa Computacional BALSEQ

Capítulo 5

Anexo A5.1 – Resultados da ANOVA – Análise Geral

Anexo A5.2 – Resultados da ANOVA – Análise no Período de Agosto a Novembro de 2005

Anexo A5.3 – Resultados da ANOVA – Análise no Período de Agosto a Novembro de 2006

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 1 – Esboço Geológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe (Rocha;Amaral; 2007).....	6
Figura 3.2. 1 - Compartimentação e estratigrafia da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe. A) Profundidade do embasamento segundo Nogueira <i>et al.</i> (2004); B) Compartimentação tectônica; C) Correlação estratigráfica entre as sub-bacias segundo França (1992).....	8
Figura 3.2.2 – Posição dos perfis (linhas vermelhas) de resistividade (Feitosa, 2006).....	9
Figura 3.2. 3 – Perfis de resistividade horizontal na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe. (Adaptado de Feitosa, 2006).....	10
Figura 3.2. 4 - Cortes Geológicos Propostos por Feitosa (2006) para: (A) Perfil EF, (B) Perfil BLC – Alternativa 1 e (C) Perfil BLC – Alternativa 2.....	13
Figura 3.2. 5 - Perfil topográfico e geológico regional segundo Feitosa (2006).....	14
Figura 3.3. 1 - Nova versão, proposta pela UFCG, do mapa geológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.	16
Figura 4.1.1- Distribuição de 2.460 poços inventariados inicialmente na região da bacia do Bacia Sedimentar Rio do Peixe.....	19
Figura 4.1.2 - Distribuição de 328 poços inventariados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.....	19
Figura 4.1.3 – Rede de poços para monitoramento selecionada na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.....	20
Figura 4.1.4 - Imagem de satélite com o relevo da região e a delimitação da Bacia Sedimentar	21
Figura 4.1.5 - Correlação entre as cotas levantadas através do GPS Geodésico e as do GLOBAL MAPPER	22
Figura 4.2 1 - Projeto de lisímetro de gaveta – escavação e instalação	25
Figura 4.2 2 – Projeto da gaveta coletora.....	25
Figura 4.2 3 - Ficha descritiva do poço Serrote dos Estrela 1.....	30
Figura 4.2 4 - Ficha descritiva do poço Serrote dos Estrela 2.....	31
Figura 4.2 5 - Ficha descritiva do poço da Fazenda Santo Antônio.....	32
Figura 4.4.1 - Antigo mapa piezométrico da Bacia, por Albuquerque, 1986.	38

Figura 4.4.2 – Mapa potenciométrico da campanha de agosto/2005 com base de 71 poços tubulares.	41
Figura 4.4.3 – Mapa potenciométrico da campanha de novembro/2005 com base de 72 poços tubulares.	41
Figura 4.4.4 – Mapa potenciométrico da campanha de maio/2006 com base de 76 poços tubulares.	42
Figura 4.4.5 – Mapa potenciométrico da campanha de agosto/2006 com base de 111 poços tubulares.	42
Figura 4.4.6 – Mapa potenciométrico da campanha de novembro/2006 com base de 116 poços tubulares.	43
Figura 4.4.7 – Mapa potenciométrico da campanha de fevereiro/2007 com base de 117 poços tubulares.	43
Figura 4.4.8 – Mapa potenciométrico da campanha de maio/junho/2007 com base de 114 poços tubulares.	44
Figura 4.5.1 - Precipitação e evapotranspiração potencial mensal nos anos de 2004 a 2007	48
Figura 4.5.2 – Bacia Sedimentar do Rio do Peixe com as 11 estações pluviométricas e suas respectivas áreas de influências.....	49
Figura 4.5.3 - Taxas mensais da precipitação, da evapotranspiração potencial, do excedente hídrico e do déficit hídrico nas sub-bacias no ano de 2004.....	53
Figura 4.5.4 - Taxas mensais da precipitação, da evapotranspiração potencial, do excedente hídrico e do déficit hídrico nas sub-bacias no ano de 2005.....	54
Figura 4.5.5 - Taxas mensais da precipitação, da evapotranspiração potencial, do excedente hídrico e do déficit hídrico nas sub-bacias no ano de 2006.....	55
Figura 4.5.6 - Taxas mensais da precipitação, da evapotranspiração potencial, do excedente hídrico e do déficit hídrico nas sub-bacias no ano de 2007.	56
Figura 4.5 7 - As taxas médias anuais em [mm] da precipitação, da evapotranspiração potencial, do excedente hídrico e do déficit hídrico das sub-bacias nos anos de 2004 até 2007.	57
Figura 4.5 8 – Modelo conceitual e fluxograma do modelo numérico BALSEQ (Paralta et al., 2003).....	60
Figura 4.5.9 – Caracterização do tipo de solo devido ao teor de argila, silte e areia (Lança, 2007).....	62

Figura 4.5.10 - Caracterização litológica (tipo do solo) da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe (Fonte: CPRM/UFCG, 2005).	65
Figura 4.5.11 – Caracterização da classe do uso de solo da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe (Fonte: PERH, 2006).	65
Figura 4.5.12 – Mapa-base sem considerar os aluviões, com o polígono de Thiessen.	66
Figura 4.5.13 - Mapa base com os aluviões e o polígono de Thiessen.	66
Figura 4.5.14 - Taxas mensais da precipitação e da recarga do cenário 1 e do cenário 2 nas três sub-bacias no ano de 2004.	71
Figura 4.5.15 - Taxas mensais da precipitação e da recarga do cenário 1 e cenário 2 das sub-bacias no ano de 2005.	72
Figura 4.5.16 - Taxas mensais da precipitação e da recarga do cenário 1 e cenário 2 das sub-bacias no ano de 2006.	73
Figura 4.5.17 - Taxas mensais da precipitação e da recarga do cenário 1 e cenário 2 das sub-bacias no ano de 2007.	74
Figura 4.5.18 - Taxas de recarga anuais (2004-2007) das Sub-Bacias para cenário 1 e cenário 2.	76
Figura 4.6.1 - Mapa das formações geológicas e os limites da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe	79
Figura 4.6.2 - Hidrografia da região e estações pluviométricas instaladas.	80
Figura 4.6.3 - Topografia em metros acima do nível gerada a partir de imagens SRTM. ..	81
Figura 4.6.4 - Topografia da base do modelo em metros acima do nível de mar gerada a partir da análise dos dados gravimétricos (Françolin, 1992).	81
Figura 4.6.5 - Histograma de chuvas na bacia do Rio de Peixe entre janeiro de 2005 e julho de 2007.	82
Figura 4.6.6 - Malha e condições de contorno utilizadas no modelo.	85
Figura 4.6.7 – Fluxograma das etapas seguidas na calibragem do modelo.	86
Figura 4.6.8 - Localização dos poços de observação no mês de agosto de 2005 com as respectivas elevações das cargas hidráulicas em metros acima do nível de mar.	87
Figura 4.6.9 - Mapa potenciométrico observado com as linhas de fluxo (cor vermelho) para o mês de agosto de 2005.	88
Figura 4.6.10 - Mapa do zoneamento da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe com as respectivas condutividades hidráulicas calibradas.	89

Figura 4.6.11 - Mapa potenciométrico observado (isolinhas azuis) e calibrado (isolinhas vermelhas) para o mês de agosto de 2005 (sem a sub-bacia Pombal).	89
Figura 4.6.12 - Diagrama de dispersão (<i>Scatterdiagram</i>) entre cargas hidráulicas calculadas versus cargas hidráulicas observadas (agosto 2005) após da calibração estacionária das condutividades hidráulicas.....	90
Figura 4.6.13 - Espessura da zona não-saturada (mm) da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.....	91
Figura 4.6.14 - Variação dos níveis potenciométricos observados em 21 poços nas 7 campanhas com todas as medições.	93
Figura 4.6.15 - Diagrama de dispersão (<i>Scatterdiagram</i>) entre cargas hidráulicas calculadas versus cargas hidráulicas observadas após da simulação transitória de 630 dias de duração.....	97
Figura 5.1. 1 - Distribuição espacial dos poços amostrados no período de agosto 2005 a fevereiro 2007 nas diferentes formações geológicas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.....	106
Figura 5.1. 2 - Diagrama de Piper. Íons predominantes nas águas subterrâneas das quatro formações geológicas da Bacia Sedimentar de São João do Rio do Peixe-PB.....	109
Figura 5.1. 3 - Gráficos GT2 (fator único) para os 6 maiores agrupamentos da qualidade da água de 111 poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, em amostras coletadas entre agosto 2005 e fevereiro 2007	112
Figura 5.1. 4 - Distribuição dos agrupamentos dos poços segundo a qualidade de suas águas (111 amostras), na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe – PB, no período de agosto 2005 a fevereiro de 2007.	115
Figura 5.1. 5 - Distribuição dos agrupamentos dos poços segundo a qualidade de suas águas (111 amostras), na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe – PB, no período de agosto 2005 a fevereiro de 2007.	116
Figura 5.1. 6 - Distribuição dos 111 poços amostrados no Diagrama de Riverside - USLL, indicando o risco de salinidade e o risco de sódio de suas águas, se usadas para irrigação.....	118
Figura 5.1. 7 - Mapa com a distribuição das classes d'água para irrigação segundo Riverside (USLL) e das atividades antropogênicas sobre a Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.....	121

Figura 5.1. 8 - Mapas da distribuição espacial na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe dos parâmetros: (A) pH; (B) Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); (C) SDT (mg/L) e (D) Sulfato (mg/L).	123
Figura 5.1. 9 - Mapas da distribuição espacial na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe dos parâmetros: (A) Sódio (mg/L); (B) Cloreto (mg/L); (C) Magnésio (mg/L) e (D) Dureza (mg/L).	124
Figura 5.1. 10 - Mapa da distribuição espacial da qualidade sanitária de 37 poços amostrados em três campanhas (agosto e novembro de 2006 e fevereiro 2007) na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.....	127
Figura 5.1. 11 - Diagrama de Piper. Íons predominantes nas águas subterrâneas de 45 poços na primeira época de seca (agosto-novembro/2005), distribuídos nas quatro formações geológicas da Bacia Sedimentar de São João do Rio do Peixe-PB.	132
Figura 5.1. 12 - Gráficos GT2 (fator único) para os 6 maiores agrupamentos da qualidade da água de 45 poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, em amostras coletadas em agosto a novembro de 2005, época de seca.....	134
Figura 5.1. 13 - Gráficos GT2 (fator único) para os 6 maiores agrupamentos da qualidade da água de 45 poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, em amostras coletadas em agosto a novembro de 2005, época de seca.....	135
Figura 5.1. 14 - Gráficos Box- plot apresentam de forma mais detalhada, as flutuações dos parâmetros na estação seca de 2005.....	136
Figura 5.1. 15 - Gráficos Box- plot apresentam de forma mais detalhada as flutuações dos parâmetros na estação seca de 2005.....	137
Figura 5.1. 16 - Gráficos Box- plot apresentam de forma mais detalhada as flutuações dos parâmetros na estação seca de 2005.....	138
Figura 5.1. 17 - Distribuição dos 45 poços amostrados na seca de 2005, no Diagrama de Riverside - USLL, indicando o risco de salinidade e o risco de sódio de suas águas.....	139
Figura 5.1. 18 - Diagrama de Piper. Íons predominantes nas águas subterrâneas de 45 poços na segunda época seca (agosto-novembro/2006) distribuídos nas quatro formações geológicas da Bacia Sedimentar de São João do Rio do Peixe. PB.....	141

Figura 5.1. 19 - Gráficos GT2 (fator único) para os 4 maiores agrupamentos da qualidade da água de 45 poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, em amostras coletadas em agosto a novembro de 2006, época de seca.....	142
Figura 5.1. 20 - Gráficos Blox-pot 4 com as variações das concentrações de cada parâmetro qualitativo de agosto a novembro de 2006, época de seca.....	143
Figura 5.1. 21 - Gráficos Blox-pot 4 com as variações das concentrações de cada parâmetro qualitativo de agosto a novembro de 2006, época de seca.....	144
Figura 5.1. 22 -Gráficos Blox-pot 4 com as variações das concentrações de cada parâmetro qualitativo de agosto a novembro de 2006, época de seca.....	145
Figura 5.1. 23 - Distribuição dos 45 poços amostrados no período seco de 2006, no Diagrama de Riverside - USLL, indicando o risco de salinidade e o risco de sódio de suas águas, se for usadas para irrigação.....	146
Figura 5.1. 24 - Íons predominantes nas águas subterrâneas de 21 poços na primeira época de chuva (maio 2006) distribuídos nas quatro formações geológicas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe-PB.....	148
Figura 5.1. 25 - Distribuição dos 21 poços amostrados no período de chuva de 2006, no Diagrama de Riverside - USLL, indicando o risco de salinidade e o risco de sódio de suas águas.	149
Figura 5.1. 26 - Íons predominantes nas águas subterrâneas de 21 poços na segunda época de chuva (fevereiro 2007) distribuídos nas quatro formações geológicas da Bacia Sedimentar de São João do Rio do Peixe -PB.....	150
Figura 5.1. 27 - Distribuição dos 21 poços amostrados no período seco de 207, no Diagrama de Riverside - USLL, indicando o risco de salinidade e o risco de sódio de suas águas.	151
Figura 5.1. 28 - Distribuição, por faixa de concentração, de coliformes totais em águas de poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe (agosto e novembro de 2006 e fevereiro de 2007).	153
Figura 5.1. 29 - Distribuição, por faixa de concentração, de E.coli em águas de poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe (agosto e novembro de 2006 e fevereiro de 2007).....	154
Figura 5.2. 1 – Área de ocorrência das aluviões. Índice G = 1,00	158
Figura 5.2. 2 – Poços amazonas monitorados em todas as etapas de campo.	159
Figura 5.2. 3 – Área de ocorrência do Aquífero Rio Piranhas e distribuição dos poços. ..	159

Figura 5.2. 4 – Área de ocorrência do Aquífero Sousa e distribuição dos poços monitorados.....	160
Figura 5.2. 5 – Área de ocorrência do Aquífero Antenor Navarro –quando Livre - e distribuição dos poços monitorados.....	162
Figura 5.2. 6 – Classificação da Bacia Sedimentar Rio do Peixe em relação ao seu grau de vulnerabilidade.....	163
Figura 5.2. 7 – Distribuição percentual dos tipos de saneamento pelas zonas urbanas e rurais.....	165
Figura 5.2. 8 – Distribuição geográfica dos postos de combustíveis e poços tubulares localizados em suas proximidades.....	168
Figura 5.2. 9 – Distribuição geográfica das áreas irrigadas e poços tubulares em suas proximidades.....	173
Figura 5.2. 10 – Distribuição geográfica das principais indústrias cadastradas na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe e dos poços tubulares localizados em suas proximidades.....	174
Figura 5.2. 11 – Localização dos principais lixões e dos poços tubulares localizados em suas proximidades.....	175
Figura 5.2. 12 – Distribuição geográfica dos cemitérios cadastradas na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe e dos poços tubulares localizados em suas proximidades. ...	178
Figura 5.2. 13 – Localização das fontes potenciais de poluições cadastradas na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.....	179
Figura 5.2. 14 – Risco de contaminação; Áreas A e B – risco moderado a alto, Área C – risco baixo de contaminação.....	179
Figura 6.1. 1 - Mapa de rebaixamento para o primeiro cenário (Q=250 m ³ /dia no regime estacionário).....	181
Figura 6.1. 2 - Mapa de rebaixamento para o segundo cenário (Q = 250 m ³ /dia no regime transitório).....	181
Figura 6.1. 3 - Mapa de rebaixamento para o terceiro cenário (Q = 500 m ³ /dia no regime estacionário).....	182
Figura 6.1. 4 - Mapa de rebaixamento para o quarto cenário (Q = 500 m ³ /dia no regime transitório).....	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.2.1 - Localização dos lisímetros e pluviômetros instalados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe	23
Tabela 4.3.1 – Localização dos poços e piezômetros utilizados para testes de aquífero.	33
Tabela 4.3.2 - Resumo dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos nos testes de aquíferos	34
Tabela 4.3.3 - Localização dos 13 poços nos quais foram executados testes de produção..	35
Tabela 4.3.4 - Transmissividades obtidas através da análise dos testes de produção	37
Tabela 4.4.1 - Número de poços com medição de nível, entidade responsável e tipo de poço medido	39
Tabela 4.5.1 – Precipitação Média Anual (1995-2006) dos Postos Pluviométricos da Região	49
Tabela 4.5.2 - Divisão das Sub-Bacias em áreas de influência das estações pluviométricas	50
Tabela 4.5.3 – Precipitação, Evapotranspiração Potencial, Excedente Hídrico e Déficit Hídrico mensais das Sub-Bacias nos anos de 2004 até 2007	52
Tabela 4.5.4 – Precipitação, Evapotranspiração Potencial, Excedente Hídrico e Déficit Hídrico médios anuais das Sub-Bacias nos anos de 2004 até 2007	57
Tabela 4.5.5 – Precipitação, Evapotranspiração Potencial, Excedente Hídrico e Déficit Hídrico médios anuais das Sub-Bacias nos anos de 2004 até 2007	58
Tabela 4.5.6 – Valores do fator <i>CN</i> para bacias rurais (Tucci, 1993).....	62
Tabela 4.5.7 - Condições antecedentes de umidade do solo. (Tucci, 1993)	63
Tabela 4.5.8 – Caracterização dos solos na área de estudo, segundo o Método do SCS (1972)	64
Tabela 4.5.9 – Áreas dos polígonos das estações pluviométricas instaladas nas três Sub-Bacias sem considerar os aluviões (Fig. 4.5.13)	67
Tabela 4.5.10 – Áreas dos polígonos das estações pluviométricas instaladas nas três Sub-Bacias considerando os aluviões (Fig. 4.5.14).....	67
Tabela 4.5.11 – Valores do <i>CN II</i> para as áreas de influência dos pluviômetros.....	68
Tabela 4.5.12 - Valores da capacidade de campo, <i>Cc</i> , do ponto de murchamento, <i>PM</i> , da profundidade de raiz, <i>Rp</i> e de <i>AGUT</i> para as diversas Formações Geológicas.....	68
Tabela 4.5.13 - Parâmetro <i>AGUT</i> em função da geologia da área de estudo.....	69

Tabela 4.5.14 - Parâmetro <i>AGUT</i> para cada estação pluviométrica.....	69
Tabela 4.5.15 - Recarga Médias Mensais [mm] nas Sub-Bacias nos anos de 2004 a 2007 obtidas pelo modelo BALSEQ.....	70
Tabela 4.5.16 - Taxas de recarga anuais (2004-2007) das Sub-Bacias e médias na bacia para cenário 1 e cenário 2.....	75
Tabela 4.6.1 - Valores da condutividade hidráulica calibrada	90
Tabela 4.6.2 - 21 poços utilizados na verificação do modelo e nos quais foram medidos níveis nas 7 campanhas	92
Tabela 4.6.3 - Valores do coeficiente de armazenamento (porosidade efetiva) calibrado...	93
Tabela 4.6.4 - Valores da recarga calibrada para o período entre os meses de novembro de 2005 e maio de 2006	94
Tabela 4.6.5 - Valores da recarga calibrada para o período entre os meses de novembro de 2006 e maio de 2007	94
Tabela 4.6.6 - Valores recalculados da recarga calibrada para o período entre os meses de novembro de 2005 e maio de 2006	95
Tabela 4.6.7 - Valores recalculados da recarga calibrada para o período entre os meses de novembro de 2006 e maio de 2007	95
Tabela 4.6.8 - Comparação de níveis das cargas hidráulicas calculadas versus observadas em todas as 07 campanhas de coleta pela modelagem em regime transitório de 630 dias duração	96
Tabela 5.1. 1 - Estatística básica dos dados de qualidade física e química de amostras de água de 111 poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe – PB, coletadas no período de agosto 2005 a fevereiro 2007	108
Tabela 5.1. 2 - Ocorrência dos diversos grupos por formação geológica e sua predominância	114
Tabela 5.1. 3 - Ocorrência dos diversos grupos por formação geológica e sua predominância	119
Tabela 5.1. 4 - Estatística básica das concentrações de <i>E.coli</i> /100mL em 95 amostras de água de poços	125
Tabela 5.1. 5 - Número e porcentagem de amostras por faixa de concentração de <i>E.coli</i> /100mL.....	125
Tabela 5.1. 6 – Valores de coliformes totais (CT) e <i>E.coli</i> por 100ml de amostra.....	129

Tabela 5.1. 7 - Estatística Básica dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, para o período seco do ano de 2005 (agosto – novembro /05) para 45 amostras	130
Tabela 5.1. 8 - Ocorrência dos diversos grupos na estação seca de 2005 por formação geológica e sua predominância	133
Tabela 5.1. 9 - Estatística Básica dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, para o período seco do ano de 2006 (agosto – novembro /06) para 45 amostras	140
Tabela 5.1. 10 - Ocorrência dos diversos grupos na estação seca de 2006 por formação geológica e sua predominância	142
Tabela 5.1. 11 - Estatística Básica dos parâmetros de qualidade de 21 amostras de águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, para o período de chuva do mês de maio de 2006.....	147
Tabela 5.1. 12 - Estatística Básica dos parâmetros de qualidade dos 21 amostras de águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, para o período de chuva - fevereiro de 2007	150
Tabela 5.1. 13 - Concentração de coliformes totais e <i>E.coli</i> em poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe - PB, ao longo das três campanhas de monitoramento	152
Tabela 5.2 1 – Situação de Saneamento em maio/2007 – Número de instalações nos municípios da Bacia do Rio do Peixe.....	165
Tabela 5.2 2 – Indicadores para avaliação de risco de contaminação segundo as condições sanitárias.....	166
Tabela 5.2 3 – Percentual dos Sistemas de Saneamento (por densidade populacional, domicílios e tipos) existentes nos municípios da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe em maio de 2007	166
Tabela 5.2 4 - Postos de combustíveis cadastrados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe	168
Tabela 5.2 5 - Principais perímetros irrigados e pequenos projetos de irrigação localizados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.	169
Tabela 5.2 6 - Principais perímetros irrigados e pequenos projetos de irrigação localizados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.	173
Tabela 5.2 7 – Localização dos principais lixões cadastrados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe	175
Tabela 5.2 8 - Distribuição geográfica dos cemitérios cadastrados na área da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.	177

1. INTRODUÇÃO

A Rede Cooperativa de Pesquisa “*Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semi-árida do Nordeste Brasileiro*” foi criada através da união, bem sucedida, entre diversas instituições (UFCG/UFPE/UFBA/UFC/UFRGN/CPRM), com o principal intuito de aumentar o grau de conhecimento dessas áreas do semi-árido nordestino, favoráveis à ocorrência, em maior potencial, de águas subterrâneas. Os resultados esperados, expressos através de avaliações quantitativas e qualitativas dos recursos hídricos subterrâneos das bacias estudadas, têm em vista auxiliar na tomada de decisões acerca das políticas a serem adotadas para a gestão desses recursos, objetivando o seu uso sustentável e a minimização dos problemas decorrentes das freqüentes secas que assolam essas áreas.

São reunidos, por esta rede cooperativa de pesquisa, vários projetos de suma importância, por alocarem esforços mútuos de vários profissionais de diferentes instituições, bem como pelo seu caráter multidisciplinar. O presente relatório trata especificamente do projeto “*Hidrogeologia da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe*”, desenvolvido pela Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, e pelo Serviço Geológico do Brasil, CPRM, Superintendência de Recife..

A bacia sedimentar estudada neste projeto está localizada no extremo noroeste do estado da Paraíba, região de clima semi-árido e geologia predominantemente constituída de rochas cristalinas. A Bacia do Rio do Peixe, por sua origem sedimentar, apresenta, em princípio, melhores condições de aproveitamento de água subterrâneo na região, do que o sistema cristalino circundante. Ela ocupa uma área aproximada de 1300 Km², distribuída pelos municípios de Pombal, Aparecida, Sousa, São João do Rio do Peixe, Poço José de Moura, Umari, Triunfo, Uiraúna e Santa Helena.

Para o fiel e regular desenvolvimento da pesquisa, estipulou-se um cronograma com metas e atividades que, em linhas gerais, visavam: i) o resgate de estudos anteriores, observando o estado da arte; ii) estudos geológicos e geofísicos, que renderam novas interpretações, um mapa geológico revisado e, até mesmo, novas concepções do arcabouço estrutural que deu origem a bacia; iii) localização e definição de uma rede de poços a monitorar quantitativamente e qualitativamente, em períodos trimestrais; iv) instrumentação, pela instalação de equipamentos auxiliares no monitoramento hidroclimático; v) realização de testes de bombeamento; vi) execução das campanhas de

monitoramento e vii) tratamento e interpretação dos dados coletados, com emprego de mapas potenciométricos, modelagem do fluxo e parâmetros da qualidade das águas.

O desenvolvimento das atividades planejadas e o nível atingido pelas metas estipuladas são descritos de forma detalhada e, sempre que possível, ilustrada, ao longo dos capítulos que se seguem neste relatório, intitulados:

Capítulo 2. Levantamento do Estado da Arte;

Capítulo 3. Caracterização Geológica e Geométrica da Bacia;

Capítulo 4. Caracterização Hidrogeológica do Sistema Aquífero;

Capítulo 5. Caracterização Hidrogeoquímica e de Vulnerabilidade;

Capítulo 6. Subsídios à Gestão das Águas Subterrâneas da Bacia;

Capítulo 7. Conclusões e Recomendações;

Capítulo 8. Referências;

Anexos.

2. LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE

Foi elaborado, como primeiro produto do Projeto, um relatório do estado da arte sobre a hidrogeologia da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe - PB, que teve como objetivo levantar, gerar e disponibilizar informações e conhecimentos sobre a ocorrência, potencialidades, circulação e utilização das águas subterrâneas na bacia estudada.

Foram tratados diversos aspectos, entre eles: o contexto geológico, o contexto hidrogeológico, os estudos qualitativos (hidrogeoquímica e isotopia) e o contexto hidroclimatológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe-PB.

Em suas conclusões, o citado Relatório do Estado da Arte, apresenta sugestões para o prosseguimento da pesquisa, entre as quais vale salientar aquelas contidas no texto abaixo transcrito:

“Em princípio, o foco da pesquisa seria o aquífero Antenor Navarro, pelos seus caracteres dimensionais e hidrostáticos (cerca de 100 ou mais metros de espessura saturada e do tipo confinado, na maior parte de sua área de afloramento).

No entanto, pelo que se conclui deste relatório, na área sob pressão, o aquífero está a grandes profundidades, às vezes superiores aos 1.000m, o que inviabiliza, técnica e financeiramente, a construção de poços de pesquisa na dimensão requerida (poços totalmente penetrantes), para quantificação de suas propriedades hidráulicas.

Por outro lado, o sub-sistema livre, contido nas aluviões arenosas e nos arenitos da Formação Rio Piranhas, e o aquífero Sousa Superior (este extensa e intensivamente explorado, mas ainda não perfeitamente conhecido) apresentam condições de potencialidade que os recomendam, como unidades bastante produtivas, às pesquisas objeto deste projeto.

Uma escolha mais específica dependerá do andamento e dos resultados iniciais dos trabalhos, inclusive, de campo.”

O texto completo do citado relatório, que corresponde aos objetivos do presente capítulo, pode ser encontrado na seção **Produtos/Relatórios por Metas/Meta A – Levantamento do Estado da Arte da Hidrogeologia**, neste CD, sob o título: *Relatório Síntese com Análise Bibliográfica - Hidrogeologia da Bacia do Rio do Peixe* ([Anexo A2.1](#)).

3. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOMÉTRICA DA BACIA SEDIMENTAR DO RIO DO PEIXE

3.1. SÍNTESE DOS ESTUDOS GEOLÓGICOS

A Revisão Geológica da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe se constitui numa das atividades mais relevantes para o sucesso da pesquisa, pois a configuração geológica e estrutural da bacia, conhecida e delineada através desse estudo, influi diretamente nos processos hidrogeológicos dos seus sistemas aquíferos. A caracterização geológica da bacia foi realizada durante o ano de 2005 pela CPRM-RE, tendo participação da UFCG em seu desenvolvimento.

Para o estudo fez-se uso de fotografias aéreas e imagens de satélite em atividades de foto-interpretação das unidades geológicas e traçado das linhas de rupturas (falhas e/ou fraturas) e observações no campo. O resultado completo dos estudos geológicos é apresentado na seção **Produtos/Relatórios Temáticos**, neste CD, sob o título “*Geologia da Bacia do Rio do Peixe*” (Rocha; Amaral; 2007) ([Anexo A3.1](#)).

A figura 3.1.1 mostra o esboço geológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, resultante dos estudos acima referidos. Ela é composta por três sub-bacias, denominadas: Brejo das Freiras (também conhecida como Triunfo-Uiraúna), Sousa e Pombal, originadas por afundamentos tectônicos, separadas por altos do embasamento, com cerca de 1.300 km². Megaestruturas brasileiras favoreceram o seu surgimento, a exemplo das zonas de cisalhamento de Portalegre e de Malta situadas ao longo de algumas de suas bordas, indicando uma reativação destas estruturas em regime tectônico frágil no fanerozóico. Compõem o Grupo Rio do Peixe (Cretáceo Inferior) os seguintes litotipos: formações Antenor Navarro (inferior), Sousa (intermediária) e Rio Piranhas (superior).

Observa-se na figura 3.1.1, uma abrangente cobertura cenozóica na região da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, sendo representada pelos depósitos aluvionares que se distribuem ao longo dos principais rios, tais como os rios Piranhas e Peixe e seus principais afluentes. São constituídos por sedimentos arenosos, conglomeráticos, bem como por porções argilosas (estas em regiões mais localizadas).

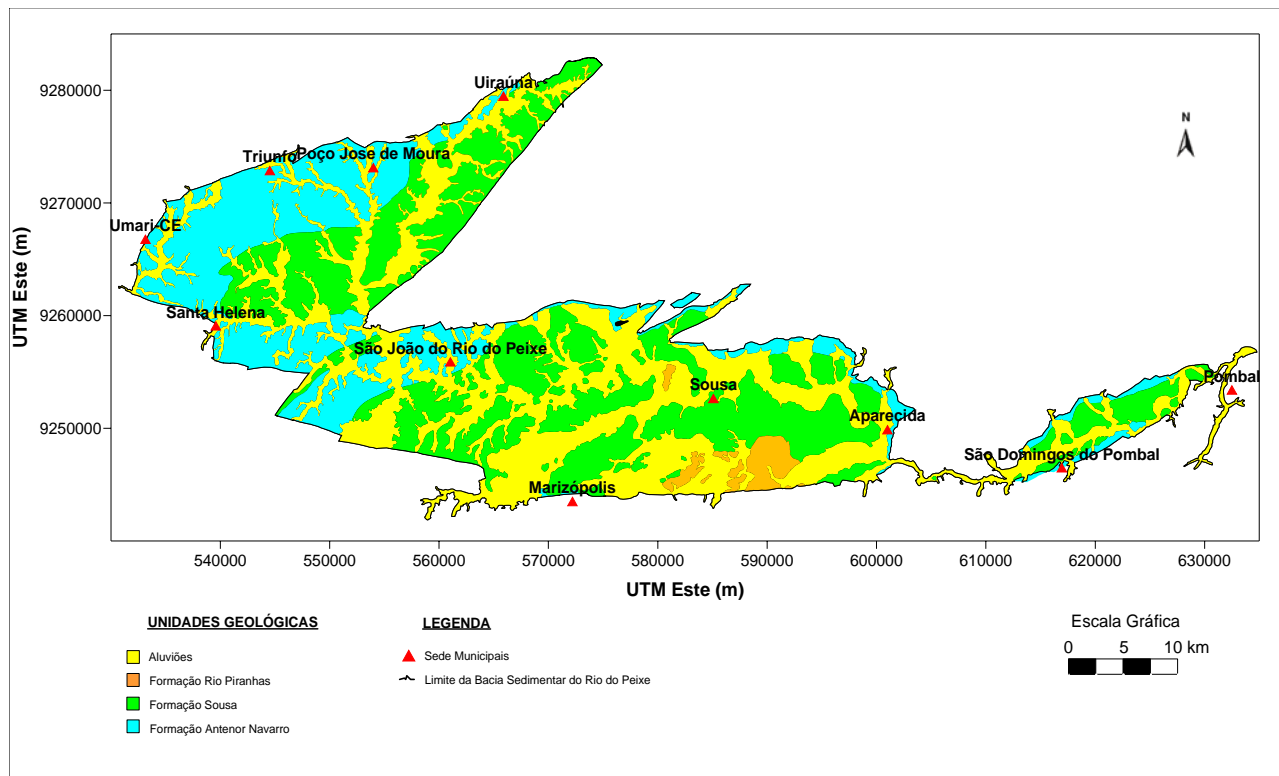


Figura 3.1 1 – Esboço Geológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe (Rocha;Amaral; 2007)

A formação Antenor Navarro é representada predominantemente por arenitos grossos a conglomeráticos (imaturos), de coloração variando de creme a avermelhados, contendo níveis de conglomerados e de arenitos médios a finos, estes últimos ocorrendo mais esporadicamente em direção ao topo da seqüência. São comuns estratificações cruzadas acanaladas de médio porte e tabulares.

A formação Sousa caracteriza-se pela predominância de siltitos e folhelhos vermelhos amarronzados, intercalados com arenitos finos (calcíferos) a médios, além de margas e calcários. Coexistem duas unidades, a superior e a inferior. Na unidade superior predomina uma seqüência arenosa com pelitos subordinados, enquanto que na inferior verifica-se uma notável inversão, com domínio de siltitos e folhelhos. A unidade superior possui maior área de expressão nas bacias de Brejo das Freiras e Pombal enquanto que a inferior predomina na porção central da sub-bacia Sousa.

A formação Rio Piranhas é composta predominantemente por arenitos grossos a conglomeráticos, feldspáticos e líticos, mal selecionados, com coloração cinza claro a marrom avermelhado, possuindo intercalações de arenitos médios a finos e siltitos. Geralmente apresentam estratificações cruzadas acanaladas de médio porte e, mais raramente, marcas de onda. O sentido dominante das paleocorrentes é para norte.

A Foto 3.1.1 mostra as imagens das diferentes formações existentes na bacia, evidenciando as descrições realizadas anteriormente.



Foto 3.1.1 – Fotografias das formações geológicas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe: A) Aluvião, B) Antenor Navarro, C) Rio Piranhas e D) Sousa.

3.2. SÍNTESE DOS ESTUDOS GEOFÍSICOS

Para compreender o arcabouço tectônico da bacia, Françaolin (1992) realizou um estudo por meio de métodos gravimétricos que indicaram espessuras do pacote sedimentar superiores a 2000 metros na sub-bacia Brejo das Freiras e mais de 1500 metros na sub-bacia de Sousa (Figura 3.2.1).

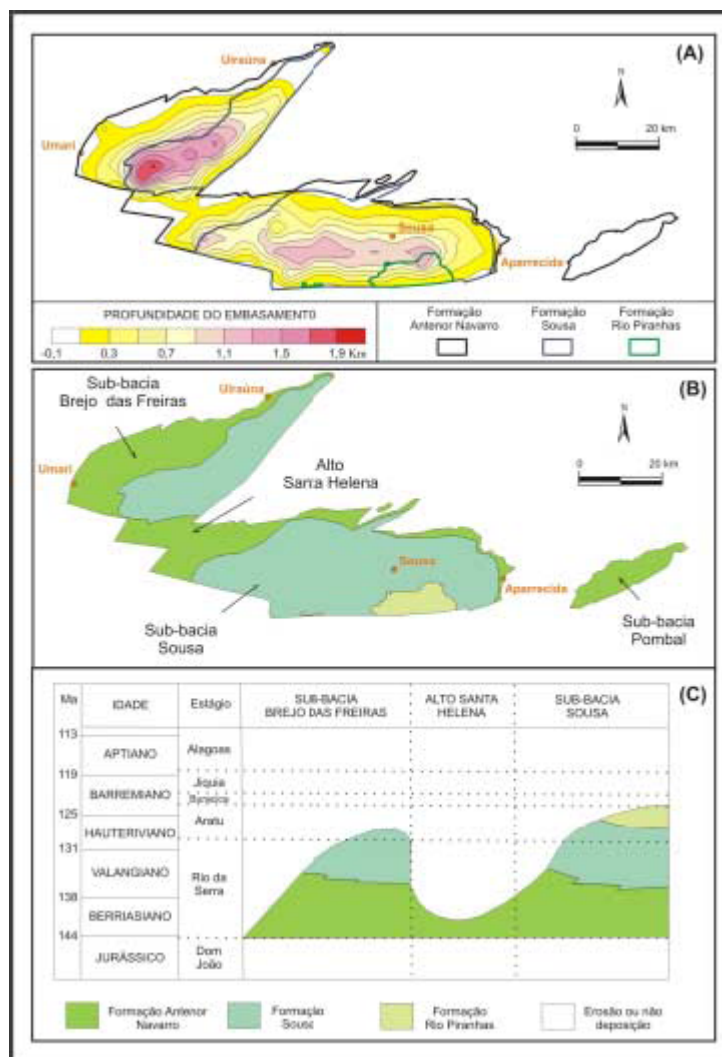


Figura 3.2. 1 - Compartimentação e estratigrafia da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe. A) Profundidade do embasamento segundo Nogueira *et al.* (2004); B) Compartimentação tectônica; C) Correlação estratigráfica entre as sub-bacias segundo Françolin (1992).

Dando continuidade às investigações da configuração geológica e estrutural da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, a CPRM firmou contrato com a Universidade Federal de Pernambuco, através do Laboratório de Hidrogeologia – LABHID, no qual o Prof. Dr. Edilton Carneiro Feitosa coordenou os estudos geofísicos por eletroresistividade, tendo sido aplicadas as técnicas denominadas de exploração vertical (Sondagem Elétrica) e exploração horizontal (Perfil de Resistividade). Este trabalho encontra-se documentado no Relatório: “*Bacia do Rio do Peixe - Estudo Geofísico por Eletroresistividade*” (Anexo A3.2), apresentado na sessão Relatórios Temáticos.

Na sua abordagem, o autor esclarece que não é permitida a determinação da resistividade verdadeira das diferentes rochas, mas sim, as resistividades aparentes cujos valores dependem dos valores das resistividades verdadeiras das rochas presentes.

Nesse estudo, foram realizadas nove sondagens elétricas verticais em diferentes pontos da bacia, visando identificar o comportamento elétrico das principais formações: Sousa e Antenor Navarro. O autor destaca que o objetivo das medições foi atingido, qual seja, a caracterização elétrica das diferentes formações envolvidas no estudo. Com isso, foi possível levantar 140 km de perfil de resistividade utilizando duas linhas de corrente e espaçamento entre as estações de medições iguais a 300 metros. Na Figura 3.2.2 verifica-se que as investigações se concentraram na sub-bacia de Sousa, havendo apenas um perfil na sub-bacia de Triunfo/Brejo das Freiras.

A interpretação dos resultados obtidos restringe-se, segundo o autor, a uma abordagem meramente qualitativa.



Figura 3.2..2 – Posição dos perfis (linhas vermelhas) de resistividade (Feitosa, 2006).

Foram realizados 12 perfis de resistividade horizontal, os quais foram agrupados adequadamente para formar perfis únicos de maior extensão, compondo-se, assim, os 5 perfis da Figura 3.2.3.

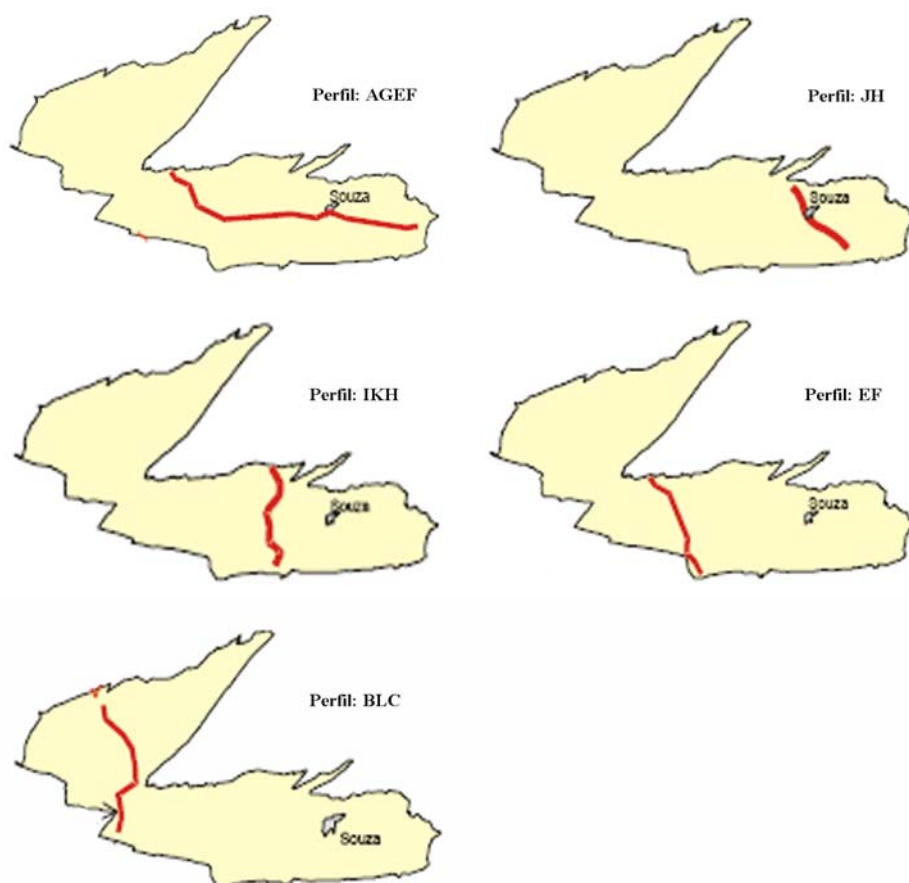


Figura 3.2. 3 – Perfis de resistividade horizontal na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe. (Adaptado de Feitosa, 2006).

Feitosa (2006) faz as seguintes interpretações para os perfis de resistividade horizontal:

Para o perfil AGEF o autor sugere a ocorrência de sedimentos da Formação Sousa muito espessos, praticamente aflorantes, sem coberturas terciário-quadernárias significativas, pelo menos ao longo da BR. Essa abordagem corrobora com o mapa geológico elaborado pela CPRM que mostra a Formação Sousa aflorante nesse trecho da bacia. Segundo Feitosa (2006), de Sousa para oeste entra-se inicialmente num patamar de $\rho_{600} = 18 \text{ ohm.m}$ e em seguida num patamar de $\rho_{600} = 24 \text{ ohm.m}$. Este último prolonga-se até as imediações sul da cidade de Antenor Navarro. Esse comportamento elétrico sugere que a Formação Sousa diminui gradativamente de espessura ao longo do perfil (estrada de ferro) entre Sousa e Antenor Navarro. Interpreta-se aqui essa diminuição de espessura como sendo devida à remoção dos níveis mais superiores da formação, por alçamento tectônico e posterior erosão.

Para o perfil JH, nos primeiros 3 km os valores de ρ_{600} oscilam no patamar de 30 ohm.m, sendo condicionados pela presença dos arenitos Rio Piranhas. Entre 3500 e 4000 metros, os valores de

ρ_{600} caem para o patamar de 8 -10 ohm.m, típico dos folhelhos Sousa muito espessos, e se mantêm assim até os 11 km, quando voltam a subir por efeito de um importante falhamento NE-SW que passa à altura do Vale dos Dinossauros.

O perfil IKH se desenvolve grosseiramente de sul para norte. Seus 18 km de extensão se resumem em realidade a 8 km no início e 5 km no final, com um trecho intermediário de 5 km sem informação. Os 8 km iniciais do perfil situam-se na grande depressão de Sousa. Os valores de ρ_{600} mostram aí um suave aumento na direção norte, desde cerca de 8 ohm.m até cerca de 25 ohm.m ao norte da estrada de ferro, nas proximidades de Caiçara do Batista. Esse suave aumento das resistividades aparentes é compatível com o acentuado mergulho regional dos folhelhos Sousa, na direção sul ou sudeste. De sul para norte, com efeito, os valores de ρ_{600} são influenciados por níveis gradativamente mais inferiores e mais resistivos da Formação Sousa. Entre os kms 4 e 8, nos 8 km iniciais do perfil, chama a atenção a presença de um expressivo recobrimento resistivo denunciado pela razão ρ_{600}/ρ_{140} sensivelmente menor que 1. Essa feição é compatível com o vasto recobrimento Terciário-Quaternário mostrado no mapa geológico da CPRM, ao norte do assentamento do INCRA. No trecho final do perfil ρ_{600} cresce significativamente e a razão ρ_{600}/ρ_{140} assume valores nitidamente maiores que 1, indicando a presença dos arenitos Antenor Navarro a menores profundidades.

O perfil EF, com 17 km de extensão, desenvolve-se de sudeste para noroeste, passando por Antenor Navarro. São aqui bem delineados quatro blocos estruturais distintos. Inicialmente, no extremo sudeste do perfil os valores de ρ_{600} entre 40 e 50 ohm.m, associados a razões ρ_{600}/ρ_{140} maiores que 1, apontam para a manifestação elétrica dos arenitos Antenor Navarro e, por extensão, sugerem a ocorrência de um alto estrutural do embasamento. Segue-se uma ampla zona onde os valores ρ_{600} e ρ_{140} ficam em torno de 10 a 12 ohm.m, sugerindo um pronunciado baixo estrutural. Vem em seguida, na direção noroeste, extensa zona de características elétricas análogas às do extremo sudeste, caracterizando outro pronunciado alto estrutural, no limite noroeste do qual se situa a cidade de Antenor Navarro. Finalmente, entre este alto estrutural e o limite norte da bacia, ao longo da estrada que vai para Brejo das Freiras, delinea-se com nitidez estreita zona onde os valores ρ_{600} e ρ_{140} ficam em torno de 15 a 17 ohm.m, indicando a ocorrência de uma depressão estreita e relativamente profunda.

O perfil BLC, com 26 km de extensão, inicia-se num ponto situado 2,0 km a sudeste de Triunfo e desenvolve-se grosseiramente de norte para sul. O perfil passa imediatamente a oeste do Açude de Pilões, ultrapassa o Alto de Santa Helena na localidade de Melancias e entra na Sub-Bacia de Sousa, buscando o seu limite sul. O perfil e sua posição são mostrados no [Anexo A3.2](#). Na porção do

perfil que foi corrida na Sub-Bacia de Triunfo, observam-se duas expressivas passagens com valores ρ_{600} e ρ_{140} da ordem de 12 a 15 metros, separadas por um importante trecho com ρ_{600} da ordem de 40 ohm.m e razão ρ_{600}/ρ_{140} maior que 1.

Acredita-se que as duas passagens condutivas acima citadas podem fazer parte da ampla depressão estrutural de que nos fala Castro & Castelo Branco, 1999. Essa ampla depressão seria, em realidade, interrompida em sua porção central por um bloco alçado flagrado agora pela eletroresistividade e não percebido pela malha muito esparsa da gravimetria. Considerando as características topográficas do perfil na Sub-Bacia de Brejo das Freiras/Triunfo, a interpretação geológica admite duas possibilidades, que serão discutidas no item 5. Na região de Melancias, sobre o chamado Alto de Santa Helena, foram medidos os maiores valores de ρ_{600} e ρ_{140} , isto é, patamares de 85 e 60 ohm.m respectivamente, com 16 razão ρ_{600}/ρ_{140} maior que 1. Esse comportamento elétrico é perfeitamente compatível com a feição geológica que vem sendo aceita para essa região, ou seja, um pronunciado alto estrutural separando as sub-bacias de Brejo das Freiras/Triunfo e Sousa, e no qual ocorrem arenitos Antenor Navarro aflorantes e repousando sobre (folhelhos?; arenitos finos argilosos?) o embasamento cristalino. Para sul de Melancias entra-se na Sub-Bacia de Sousa, numa zona de características elétricas bastante idênticas às características das duas zonas condutivas acima citadas, quando tratamos da Sub-Bacia de Triunfo.

O Perfil BLC, portanto, intercepta três pronunciadas zonas eletricamente condutivas, separadas por duas zonas resistivas, sendo que, destas últimas, uma delas corresponde ao conhecido Alto de Santa Helena.

Segundo Feitosa (2006) há a ocorrência de descontinuidades elétricas, com variação significativa de resistividade aparente, admitindo-se o surgimento de falhamentos escalonados ou simplesmente deformação plástica dos folhelhos Sousa e das demais formações geológicas em resposta à reativação dos falhamentos do embasamento, mantendo-se a interpretação de blocos alçados e rebaixados, tal como mostrados na Figura 3.2.4.

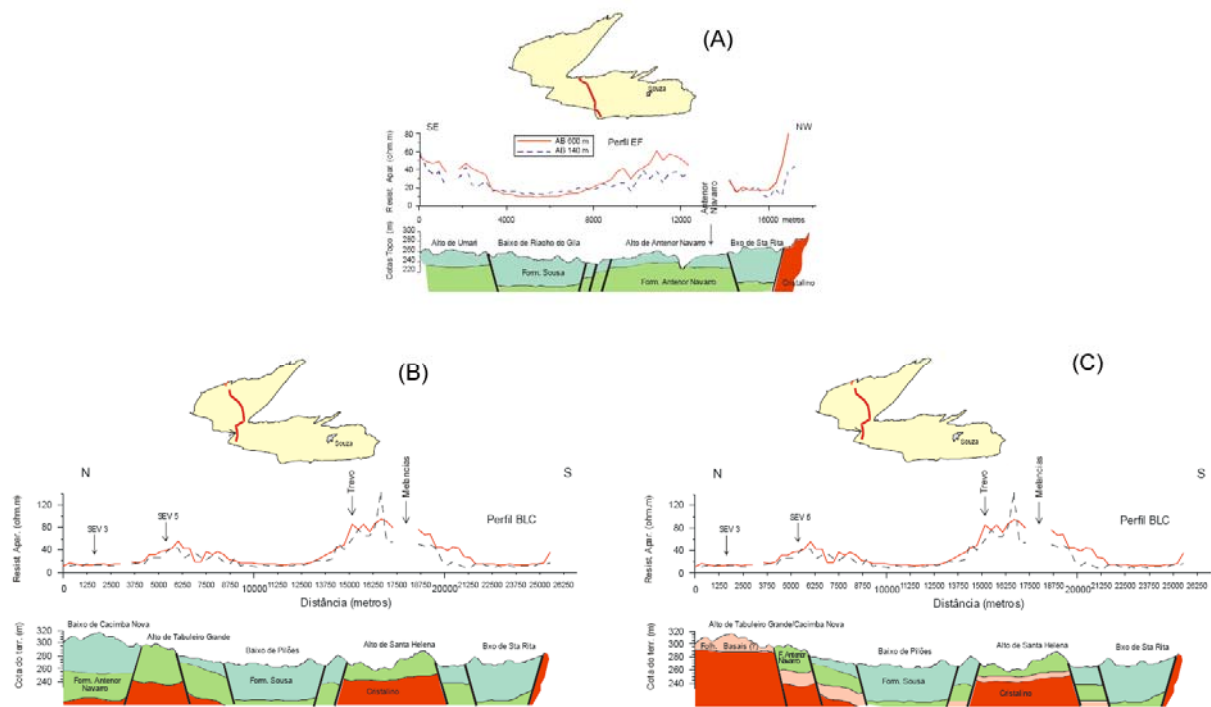


Figura 3.2. 4 - Cortes Geológicos Propostos por Feitosa (2006) para: (A) Perfil EF, (B) Perfil BLC – Alternativa 1 e (C) Perfil BLC – Alternativa 2.

O perfil regional da Figura 3.2.5, elaborado a partir das conclusões feitas por Feitosa (2006) resumem os principais aspectos estruturais tectônicos da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, destacando-se:

Entre Aparecida, no limite leste da sub-bacia Sousa, e o povoado de Melancias, e daí para norte, até a cidade de Triunfo, o substrato cristalino da bacia sobe gradativamente. Esse alçamento do substrato se dá em linhas gerais de sudeste para noroeste, tendo ocorrido em reativação tectônica relativamente recente, que deixou nítido registro na topografia da superfície da bacia. O alçamento do embasamento da bacia não se dá de maneira uniforme. Dá-se, antes, em sucessivos degraus ascendentes entremeados de blocos rebaixados cujos assoalhos são também sucessivamente ascendentes (ver Figura 3.2.5). Constituem, assim, degraus ascendentes, o chamado Degrau de Transição, o Alto de Antenor Navarro, o próprio Alto de Santa Helena e o Alto de Tabuleiro Grande. Os baixos de Santa Rita, Pilões e Cacimba Nova, intercalados entre esses degraus, constituem oscilações do topo do substrato cristalino em sua subida na direção do limite oeste da Sub-bacia Triunfo.

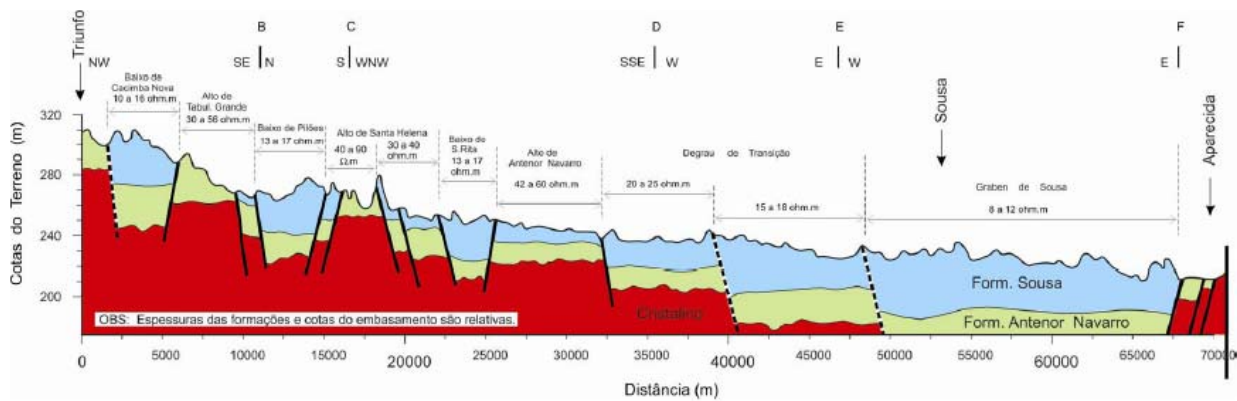


Figura 3.2. 5 - Perfil topográfico e geológico regional segundo Feitosa (2006).

3.3. NOVAS CONSIDERAÇÕES SOBRE A GEOLOGIA DA BACIA DO RIO DO PEIXE – UMA PROPOSTA DA UFCG

Os estudos geológicos e geofísicos realizados, e acima descritos, evidenciam pontos de dissensão entre Rocha & Amaral (2007) e Feitosa (2006) e entre os estudos anteriores de França (1992), não se obtendo, portanto, um mapa geológico definitivo para a Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

No fim de 2006, o programa de informações geográficas “GOOGLE EARTH” disponibilizou novas imagens de satélite, com melhores e maiores resoluções, servindo de subsídios para uma proposta feita pela UFCG visando o esclarecimento das controvérsias evidenciadas nos estudos geológicos e geofísicos supracitados.

A partir das interpretações realizadas nas novas imagens e do levantamento geológico complementar, realizado exclusivamente pela equipe da UFCG, em fevereiro de 2007, com o objetivo de esclarecer as divergências, pode-se tecer as seguintes considerações:

- 1 Que a Bacia Sedimentar do Rio do Peixe é formada por um conjunto de semi-bacias do tipo semi-grabens, tipo rifts, com as “margens passivas” situadas nos limites setentrionais destas semi-bacias e as “margens flexurais”, em seus limites meridionais;
- 2 Que os conglomerados polimictos e as brechas tectônicas marcam o limite das falhas que originaram a bacia e atestam o caráter sintectônico destes depósitos ao longo das paleoescarpas, interdigitando-se, ora com as fácies lacustres da Formação Sousa, ora com os sedimentos

flúvio-deltáicos da Formação Antenor Navarro, conforme, também, constataram Costa *et. al* (2007), não constituindo depósitos destas formações;

- 3 Que a formação Antenor Navarro não aflora superficialmente no Alto de Santa Helena (limite entre as sub-bacias Sousa e Triunfo/Brejo das Freiras), nem nas bordas norte, sul e oeste da sub-bacia Sousa;
- 4 Que as lineações, evidenciadas intensamente nas imagens de satélite, marcam dobras de arrasto, originadas por falhamentos de rejeito direcional (falha de Portalegre, zona de cisalhamento de Patos e falha de Jurema);
- 5 Que falhas inversas soergueram, diferenciadamente, todo o pacote sedimentar Rio do Peixe, com adernamento para o sul, expondo as formações à erosão:
 - a. Mais vigorosa na sub-bacia Triunfo/Brejo das Freiras, com a exposição superficial das formações Antenor Navarro e Sousa (seção inferior);
 - b. Menos intensa na sub-bacia Sousa, com a exposição superficial das formações Sousa (pacote integral) e Rio Piranhas, preservando em profundidade a formação Antenor Navarro, conforme atesta o furo stratigráfico de Lagoa do Forno;
- 6 Que, em consequência do que está caracterizado no item anterior, a espessura do pacote Rio do Peixe deve ser menor na sub-bacia de Brejo das Freiras-Triunfo que na sub-bacia de Sousa, ao contrário do que advoga o trabalho de Françolin (1992), e corroborando com os estudos geofísicos de Feitosa, realizados neste projeto.

Levando-se em considerações esses novos elementos foi possível a proposição, por parte da UFCG, de uma nova versão do mapa geológico da bacia sedimentar do Rio do Peixe, ainda carente de dados dimensionais, o qual é apresentado na Figura 3.3.1.

Embora a UFCG apresente aqui esta proposição, esclarece-se que o mapa utilizado como base dos estudos hidrogeológicos foi o mapa proposto por Rocha *et al.*, 2006. e que os geólogos da CPRM, responsáveis pelo mapeamento geológico no âmbito deste projeto, não corroboram com as idéias e proposições apresentadas pela UFCG aqui neste item.

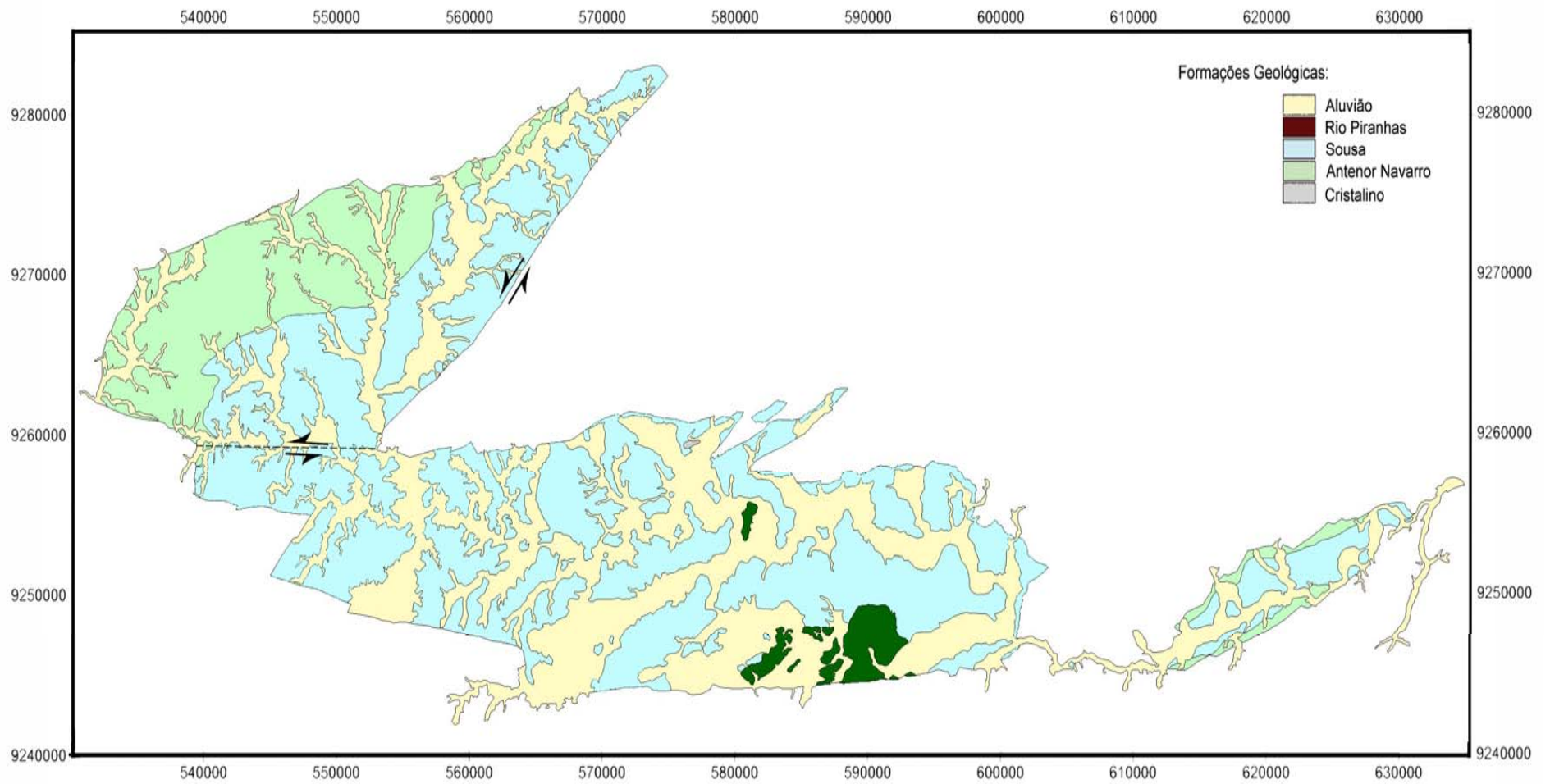


Figura 3.3. 1 - Nova versão, proposta pela UFCG, do mapa geológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Os trabalhos realizados revelaram que a geologia da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe (Figura 3.1.1) é dotada de uma grande complexidade, devido aos vários fenômenos tectônicos que a afetaram, desde a sua origem, conforme diagnosticados por Lima Filho (1991), confirmados por Feitosa (2006) (Fig. 3.2.5) e referendados nesta pesquisa.

Segundo Feitosa (2006), falhamentos de naturezas diversas (transcorrentes, inversos e de gravidade) movimentaram a bacia, ora justapondo, ora sobrepondo formações geológicas distintas, provocando, inclusive, alterações dimensionais nas mesmas. Estas alterações, infelizmente, não puderam ainda ser quantificadas.

Em decorrência disso, a lito-estratigrafia da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, ainda não é consensualmente definitiva e demanda pesquisas geofísicas e geológicas mais aprofundadas.

4. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO SISTEMA AQUÍFERO

Concluída a caracterização geológica e geométrica da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, foi definida uma rede de poços para o monitoramento do sistema aquífero, nos seus aspectos quantitativos e qualitativos. Com os dados coletados, foi estudado o comportamento do fluxo subterrâneo (recarga, circulação e descarga) no sistema, através do traçado de mapas potenciométricos e do emprego criterioso de modelos matemáticos de simulação.

Também foi estudada a variação espacial e temporal dos parâmetros qualidade da água subterrânea do sistema, com o mapeamento de fontes poluidoras e avaliações de graus de vulnerabilidade e risco de contaminação do aquífero.

Para um melhor monitoramento hidroclimático, inclusive para futuras avaliações do balanço hídrico, novos equipamentos foram instalados, tais como: pluviômetros, pluviógrafos e lisímetros.

4.1. DEFINIÇÃO DA REDE DE POÇOS PARA MONITORAMENTO

4.1.1. INVENTÁRIO DOS POÇOS EXISTENTES

Foi realizado um minucioso levantamento nos cadastros de poços existentes em diversos órgãos federais e estaduais ligados a recursos hídricos, tais como: CPRM, CDRM, DNOCS, etc. Ao fim, constatou-se a existência de cerca de 2.460 poços em uma região retangular contendo a Bacia Sedimentar do Rio do Peixe (Fig. 4.1.1).

A partir deste primeiro resultado, foram feitos sucessivos refinamentos, que tiveram como base os seguintes critérios: poços localizados na área sedimentar, facilidades de acesso e espaçamento aproximadamente regular entre poços.

Deste inventário resultou uma rede preliminar de 328 poços (Fig. 4.1.2).

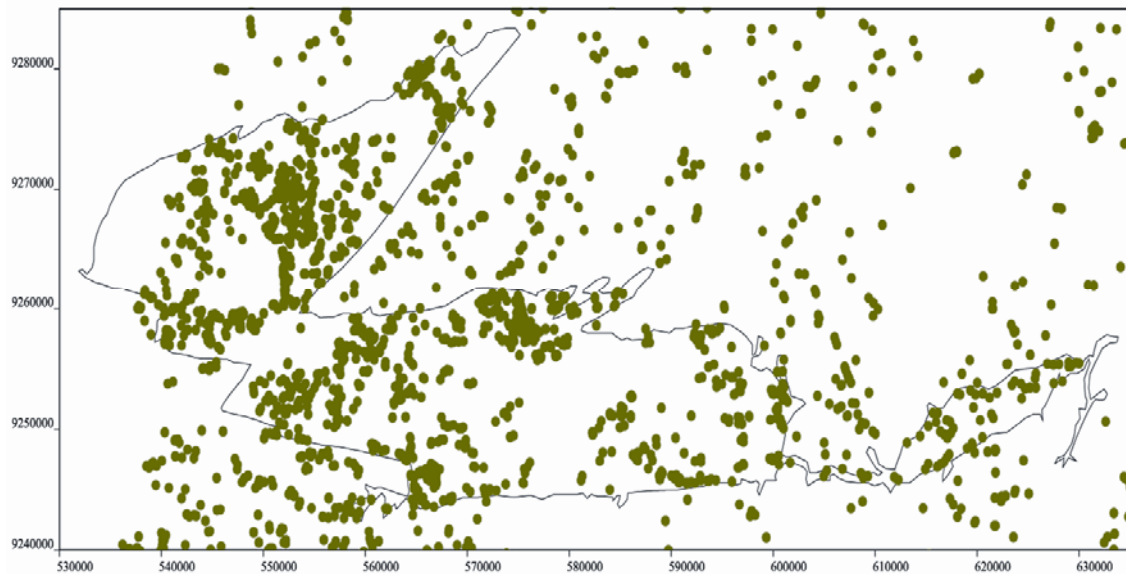


Figura 4.1.1- Distribuição de 2.460 poços inventariados inicialmente na região da Bacia Sedimentar Rio do Peixe.

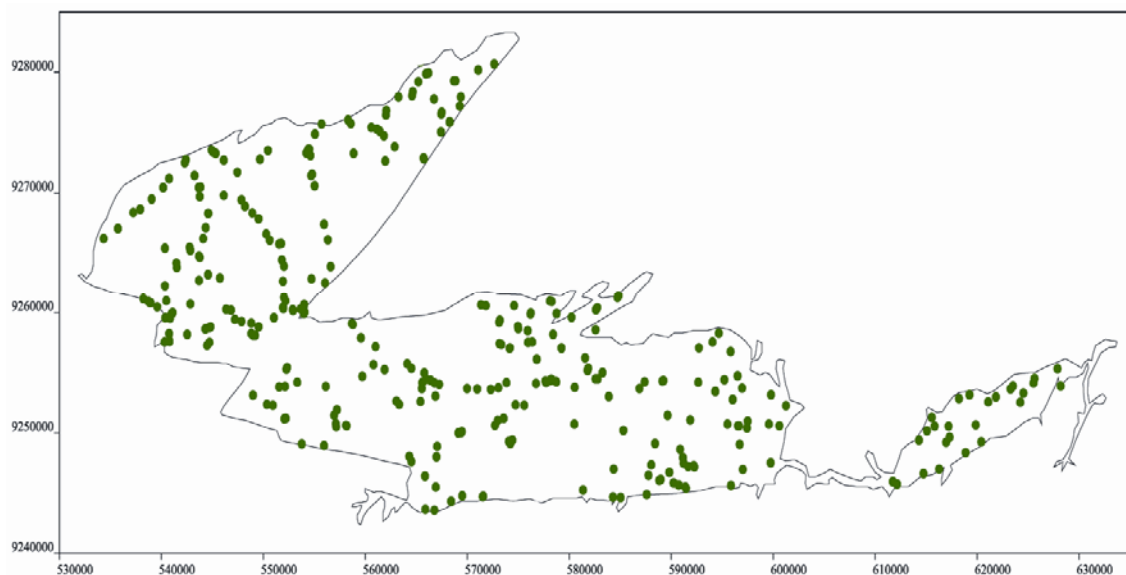


Figura 4.1.2 - Distribuição de 328 poços inventariados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

4.1.2. SELEÇÃO DOS POÇOS PARA MONITORAMENTO

Uma vez inventariados os prováveis poços para composição da rede, a seleção definitiva foi feita através de visitas de campo, onde era constatada a situação de cada poço e avaliadas suas condições para funcionamento como poço de observação. Foram excluídos, naturalmente, os poços obstruídos, os de muito difícil acesso e os que, por qualquer razão, não permitiam a medição do nível d'água, como, por exemplo, os selados e os instalados com cata-ventos.

A rede definitivamente selecionada ficou, assim, reduzida a cerca de 150 poços segundo a distribuição apresentada na Figura 4.1.3.

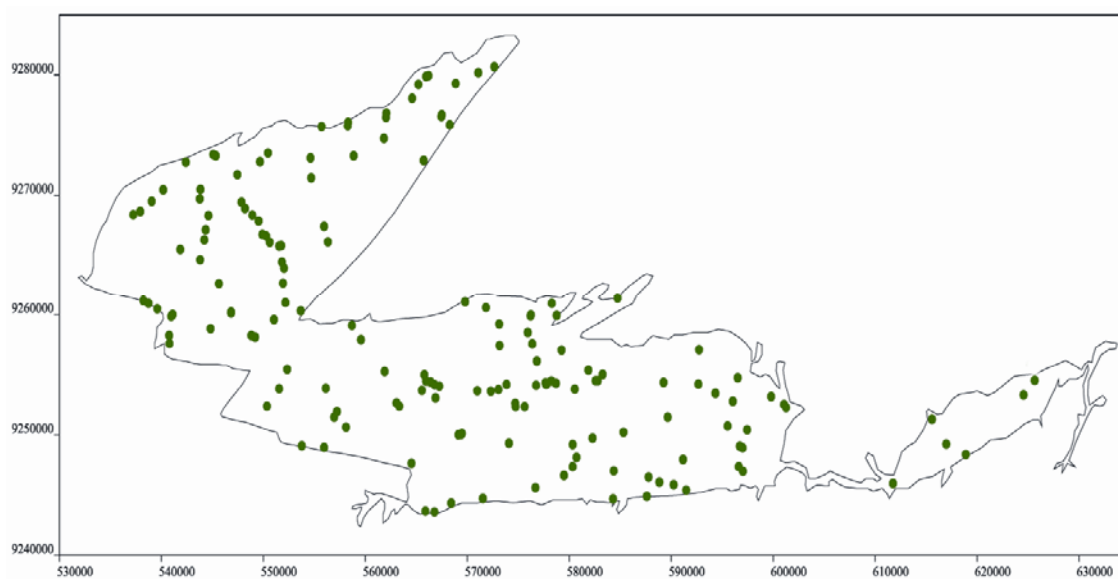


Figura 4.1.3 – Rede de poços para monitoramento selecionada na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

4.1.3. NIVELAMENTO DOS PONTOS DE ÁGUA

Com a rede de poços selecionada, iniciou-se o levantamento plani-altimétrico da mesma. Porém, por problemas técnicos nos equipamentos (GPS Geodésico), a equipe designada pela CPRM levantou apenas 53 poços na área de estudo, ficando cerca de 65 % dos poços sem altimetria conhecida. Tendo em vista que, para os estudos hidrogeológicos previstos, essas informações são imprescindíveis, soluções alternativas foram investigadas, para suprimento dessa deficiência.

Recorreu-se, então, aos antigos dados da SUDENE e aos novos levantamentos dos programas GOOGLE EARTH e GLOBAL MAPPER (NASA), estes últimos através de imagens MDT - Modelo Digital do Terreno – (Fig. 4.1.4), com uma malha de resolução de 90 x 90 metros. Dentre essas alternativas, decidiu-se pela adoção da base topográfica fornecida pelo GLOBAL MAPPER (NASA), pois, em relação às medições de cotas realizadas no campo pelo GPS Geodésico nos poços levantados, os dados obtidos pela base cartográfica do GLOBAL MAPPER não se desviaram significativamente, a eles se ajustando com coeficiente de determinação de 0,997. A Figura 4.1.5 mostra a correlação entre as cotas medidas em campo e as obtidas através da imagem MDT fornecida pelo GLOBAL MAPPER (NASA).

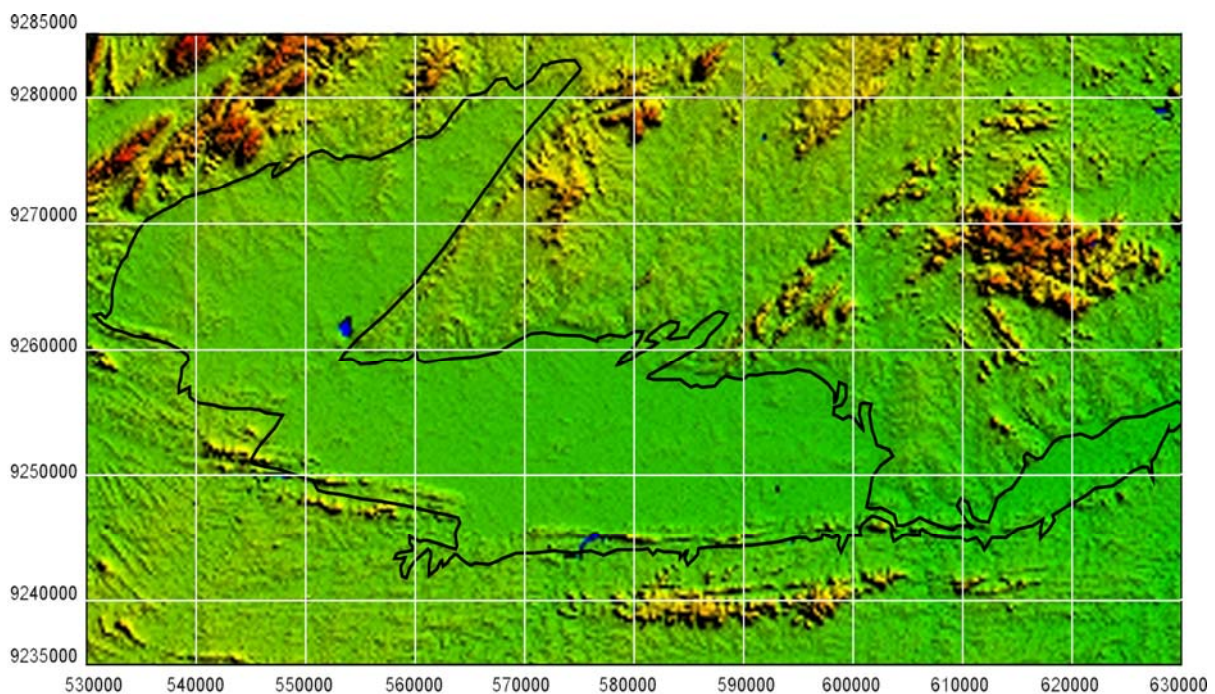


Figura 4.1.4 - Imagem de satélite com o relevo da região e a delimitação da Bacia Sedimentar .

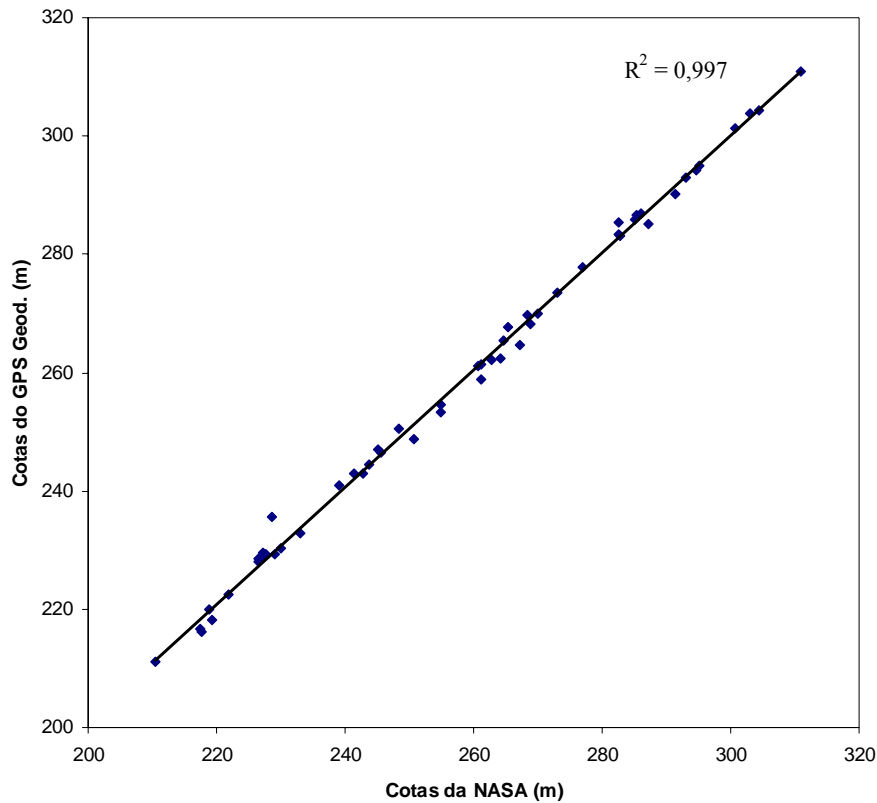


Figura 4.1.5 - Correlação entre as cotas levantadas através do GPS Geodésico e as do GLOBAL MAPPER

O cadastro da rede de poços selecionados para o monitoramento encontra-se no [Anexo A4.1](#), contendo informações diversas, inclusive das suas cotas topográficas.

4.2. INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Foram definidos, conjuntamente, pela UFCG e CPRM-RE, os locais de implantação dos pluviômetros, pluviógrafos e lisímetros das três estações de monitoramento previstas, contemplando estrategicamente as zonas de recarga distribuídas pela bacia. A localização dos três conjuntos instalados está discriminada na Tabela 4.2.1.

Tabela 4.2.1 - Localização dos lisímetros e pluviômetros instalados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe

Equipamento	UTM_N	UTM_E	Localidade	Sub-bacia/Município
Pluviômetro 1	9267529	537337	Sítio Boa Vista	Brejo das Freiras/Umari-CE
Pluviômetro 2	9254797	551701	Faz. Santo Antônio	Brejo das Freiras/Santa Helena-PB
Pluviômetro 3	9259977	576358	Serrote dos Estrela	Sousa/Sousa-PB
Lisímetro 1	9267529	537337	Sítio Boa Vista	Brejo das Freiras/Umari-CE
Lisímetro 2	9254870	551870	Faz. Santo Antônio	Brejo das Freiras/Santa Helena-PB
Lisímetro 3	9259420	576130	Serrote dos Estrela	Sousa/Sousa-PB

4.2.1. INSTALAÇÃO DE PLUVIÓGRAFOS E PLUVIÔMETROS

Os pluviômetros e pluviógrafos citados foram instalados pela equipe de Hidrologia da CPRM, conferindo registros totalizados e automáticos de chuvas, respectivamente, este último com uma autonomia acima de seis meses. No caso do pluviógrafo, os dados são armazenados na memória do aparelho, configurado para um intervalo de armazenagem de uma hora.

Nas leituras, realizadas periodicamente por técnicos especializados, emprega-se um computador portátil conectado ao aparelho através de um cabo serial, que transfere os dados armazenados desde a última visita de manutenção realizada. Para efetuar esta tarefa usa-se um programa, fornecido junto com o aparelho, que permite, além de baixar os dados, a leitura do nível da bateria, escolher os intervalos de armazenagem (existem várias opções disponíveis), fazer uma leitura instantânea no momento da visita, configurar o nome da estação e consultar ou modificar a data e a hora.

Junto aos pluviógrafos, foram instalados os pluviômetros convencionais, nos quais as leituras são feitas por observadores locais, que também zelam pelos aparelhos automáticos. Isto vai permitir, no futuro, uma comparação entre os dados coletados pelos dois aparelhos.

Os conjuntos instalados podem ser vistos nas Fotos 4.2.1 (Sítio Boa Vista), 4.2.2 (Serrote dos Estrela) e 4.2.3 (Fazenda Santo Antônio).



Foto 4.2.1 - Pluviômetro instalado na Fazenda Boa Vista no município de Umari – CE.



Foto 4.2.2 - Pluviômetro instalado na localidade de Serrote dos Estrela em Sousa-PB.



Foto 4.2.3 - Pluviômetro instalado na Faz. Santo Antonio em Santa Helena – PB.

4.2.2. INSTALAÇÃO DE LISÍMETROS

Os lisímetros, desenvolvidos pela SUDENE na década de 60, são utilizados para a execução de medidas diretas da infiltração. Foram instalados os lisímetros do tipo “Gaveta”, ligeiramente adaptados, conforme pode ser visto nas Figuras 4.2.1 e 4.2.2.

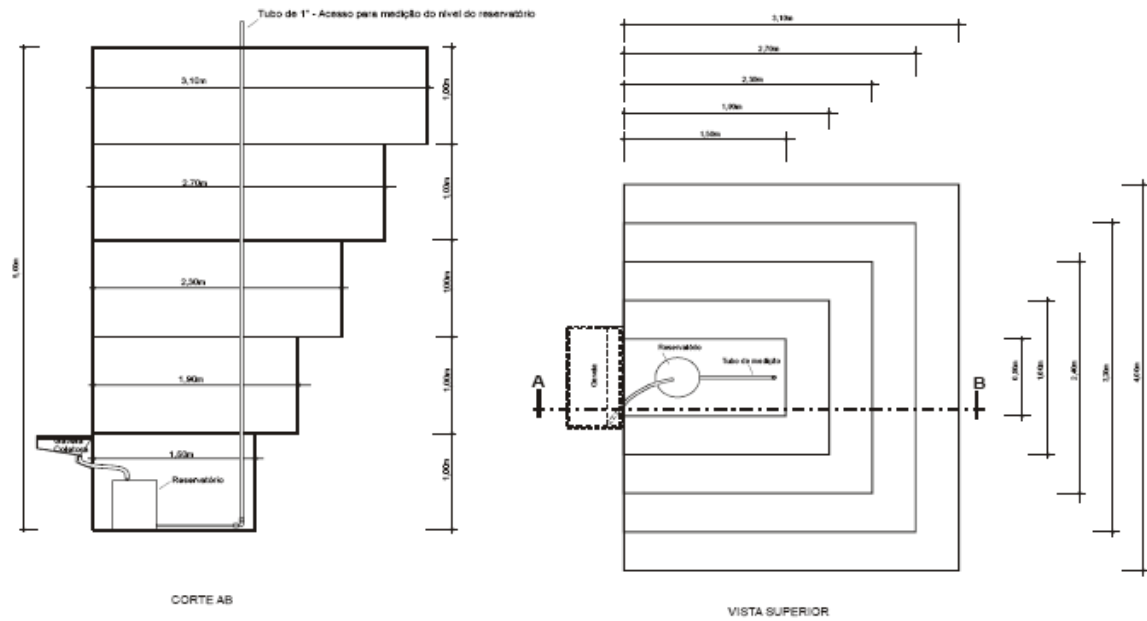


Figura 4.2.1 - Projeto de lisímetro de gaveta – escavação e instalação

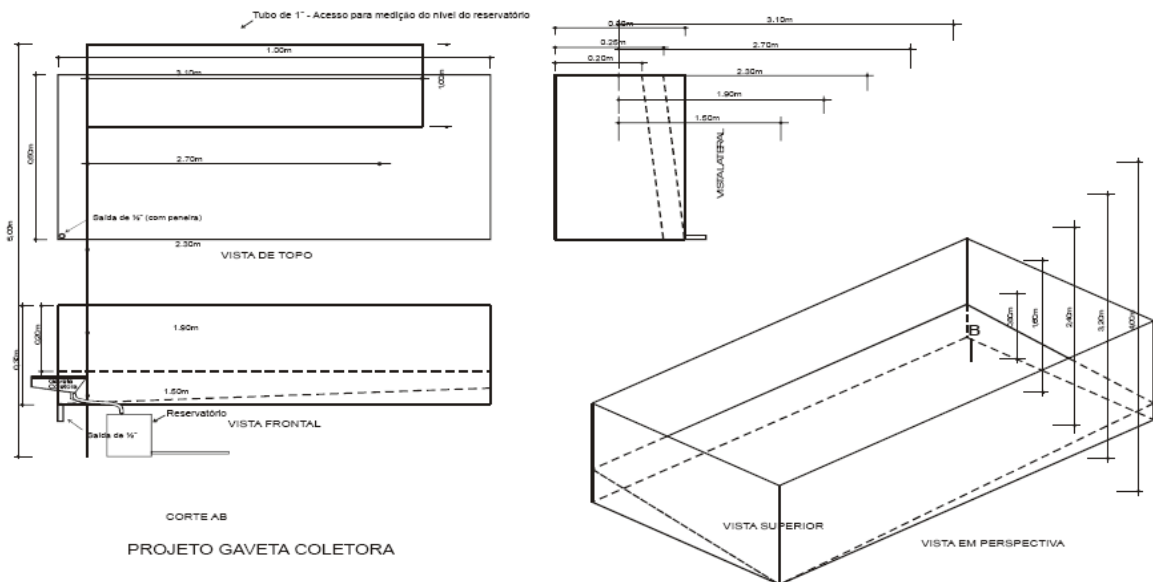


Figura 4.2.2 – Projeto da gaveta coletora

Compõe-se praticamente de duas partes: a superior, que recebe as águas da infiltração, tem a forma de uma gaveta fechada lateralmente de três lados (Foto 4.2.4). Nela é colocado, na sua porção aberta um tubo perfurado revestido com nylon que funciona como filtro para as águas que escoam para o reservatório. Em sua parte inferior é colocado um tubo cilíndrico (Foto 4.2.5) correspondente a 1/5 da superfície da gaveta. Um tubo em “L” (Foto 4.2.6), perfurado, é colado na base deste reservatório e levado à superfície e nele são feitas as medições de infiltração através de uma trena.

A maior dificuldade encontrada para a instalação destes infiltrômetros na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe foi a forte dureza das rochas (Foto 4.2.4) que não permitiu, através de processo manual (picareta e pá), que fosse atingido a profundidade ideal estimada de 2 metros. As Fotos 4.2.5 e 4.2.6 mostram detalhes da escavação do infiltrômetro de Serrote dos Estrela. Até o momento nenhum lisímetro registrou a presença de infiltração das águas das chuvas que ocorreram na região.



Foto 4.2.4 - Colocação da gaveta no lisímetro instalado na Fazenda Serrote dos Estrela.



Foto 4.2.5 - Detalhe do tubo cilíndrico.



Foto 4.2.6 - Tubo de PVC de 1.1/4 utilizado para as medições de infiltração



Foto 4.2.7 - Material (arenitos finos esbranquiçados) retirados da escavação do lisímetro localizado na Fazenda Santo Antônio.



Foto 4.2.8 - Detalhe do lisímetro instalado em Serrote dos Estrela.



Foto 4.2.9 - Detalhe do lisímetro instalado em Serrote dos Estrela.

4.2.3. CONSTRUÇÃO DE PIEZÔMETROS

Com a finalidade de funcionarem como piezômetros em testes de aquífero, foram perfurados três poços tubulares, dois deles no sítio Serrote dos Estrela e o outro na Fazenda Santo Antonio, com as seguintes coordenadas UTM:

- . Serrote dos Estrela 1 – GPS – 9259420 UTM-N/576130 UTM-E
- . Serrote dos Estrela 2 – GPS – 9259444 UTM-N/576136 UTM-E
- . Santo Antonio – GPS – 9254815 UTM-N/551724 UTM-E

O sistema de perfuração utilizado foi o de percussão (foto 4.2.10,). As fichas com os dados de perfuração e as descrições litológicas dos poços, estão apresentadas a seguir (Figs. 4.2.3, 4.2.4 e 4.2.5).



Foto 4.2.10 - Detalhe da perfuratriz percussora. Poço Santo Antônio

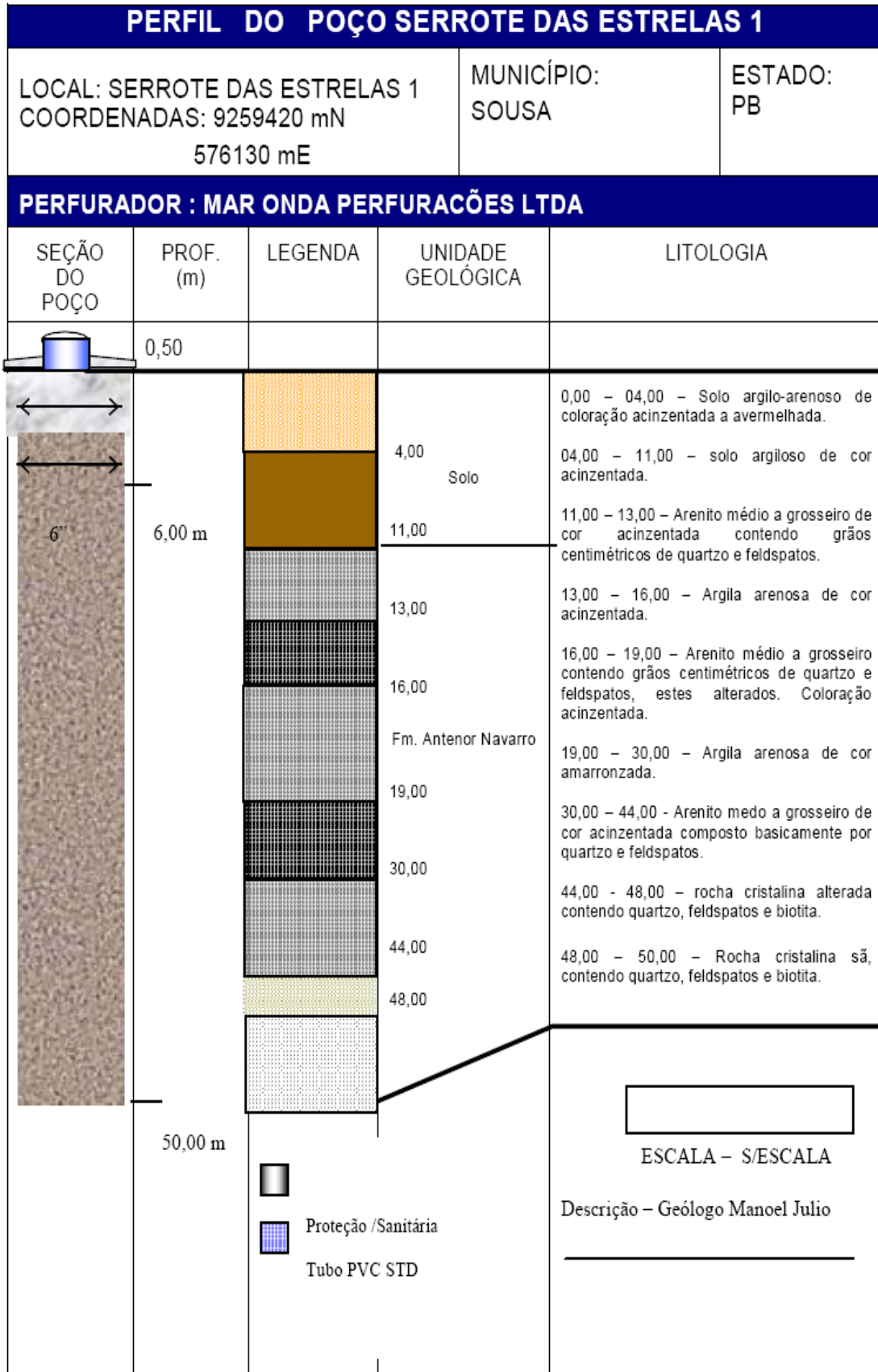


Figura 4.2 3 - Ficha descritiva do poço Serrote dos Estrela 1.

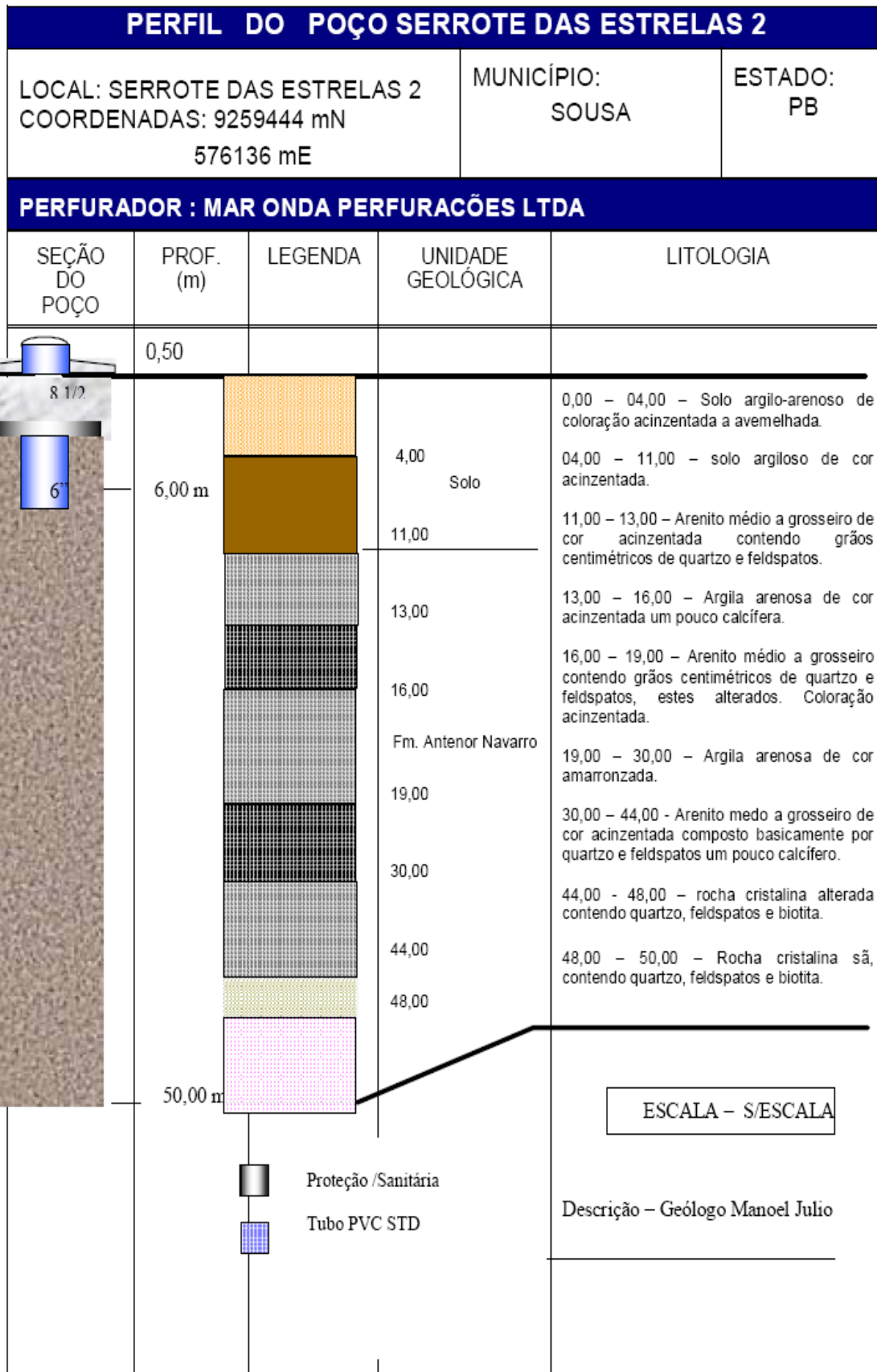


Figura 4.2 4 - Ficha descritiva do poço Serrote dos Estrela 2.

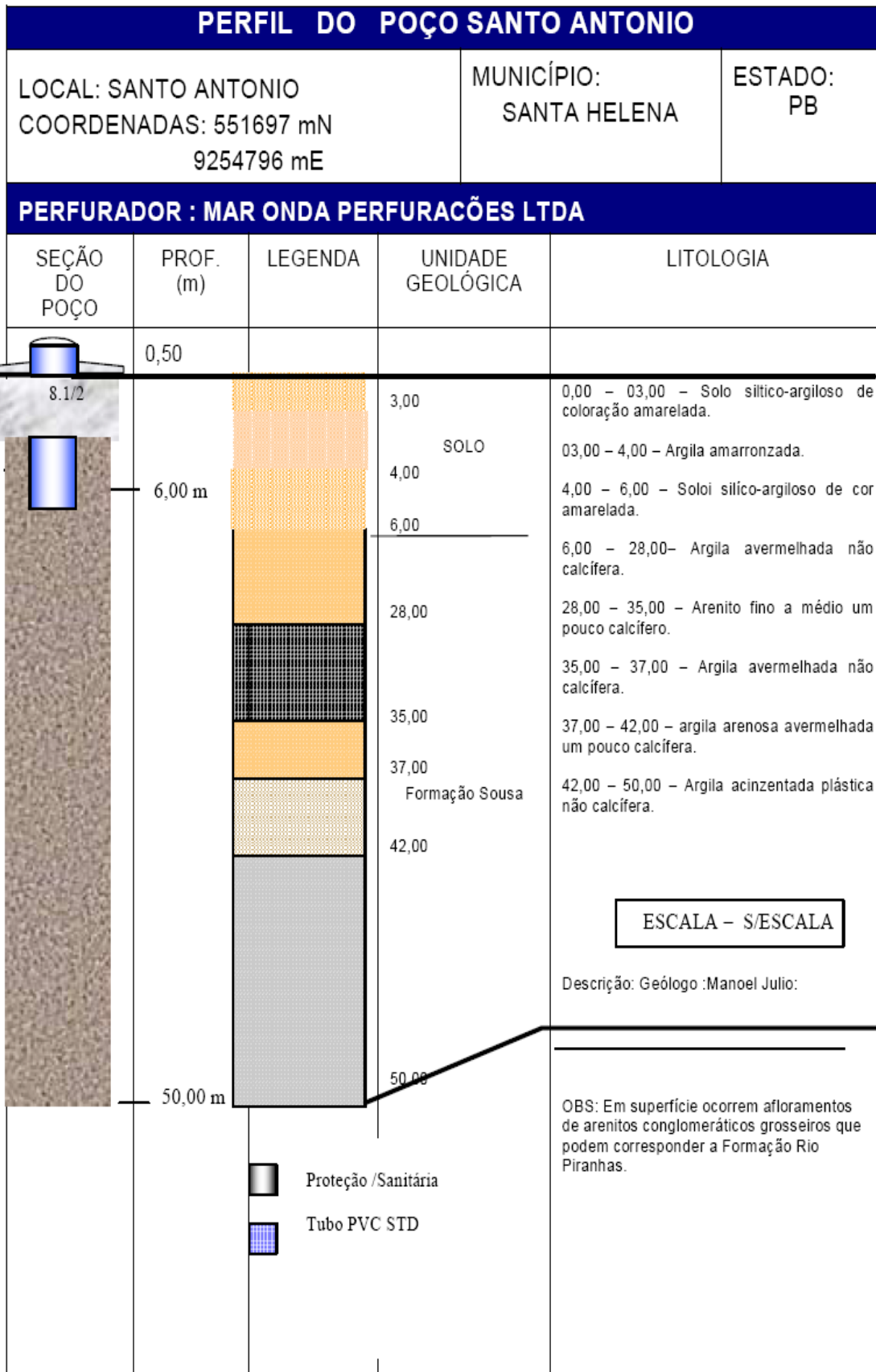


Figura 4.2 5 - Ficha descritiva do poço da Fazenda Santo Antônio.

4.3. TESTES DE AQUIFERO

4.3.1. PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS TESTES

Foram executados três testes de aquíferos na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe. Dois deles no Sítio Serrote dos Estrela, município de Sousa (onde foram construídos dois piezômetros), e o outro na Fazenda Santo Antônio – município de Santa Helena (Tab. 4.3.1).

Tabela 4.3.1 – Localização dos poços e piezômetros utilizados para testes de aquífero.

Dados de Localização				
UTM_E	UTM_N	No. Cadastro	Localidade	Sub-bacia /Município
576130	9259420	Piezômetro 1	Serrote dos Estrela	Sousa/Sousa -PB
576136	9259444	Piezômetro 2	Serrote dos Estrela	Sousa/Sousa -PB
551724	9254815	P 20	Serrote dos Estrela	Sousa/Sousa -PB
551697	9254796	Piezômetro 3	Faz. Santo Antônio	Brejo das Freiras/Santa Helena-PB
551703	9254800	CM 591	Faz. Santo Antônio	Brejo das Freiras/Santa Helena-PB

4.3.2. INTERPRETAÇÃO DOS TESTES – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS

A interpretação dos testes obedeceu à metodologia aplicada por Cooper-Jacob que determina a transmissividade e coeficiente de armazenamento de um aquífero utilizando as medidas (tempo/rebaixamento) realizadas em um ou mais poços piezométricos.

Infelizmente, porém, os valores dos rebaixamentos medidos durante os testes, principalmente aqueles dos piezômetros, mas também, embora em menor escala, os dos poços bombeados, apresentaram oscilações extremas, que não correspondem ao comportamento esperado dos níveis d'água dos aquíferos bombeados. O problema teve origem, provavelmente, em defeitos de funcionamento ou de operação dos medidores de níveis ou de vazão, não detectados em campo.

Em consequência, e conforme se pode ver na Tabela 4.3.2, abaixo, os valores calculados, através dos ajustes das diferentes curvas “Rebaixamento versus Tempo”, apresentam enormes discrepâncias, tanto entre os dois locais de teste (Fazenda Santo Antônio e Serrote dos Estrela), o que ainda se poderia admitir, como também entre dois piezômetros do mesmo poço e no mesmo

teste. As discrepâncias se estendem ainda aos valores dos parâmetros hidráulicos esperados para o tipo de aquífero testado.

Considerando os aspectos acima relatados, os valores dos parâmetros hidráulicos obtidos nos testes não puderam ser plenamente utilizados na modelagem ou em outras avaliações quantitativas do comportamento do sistema aquífero.

Tabela 4.3.2 - Resumo dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos nos testes de aquíferos

TESTE	Vazão de teste (m³/h)	Transmissividade (m²/dia)	Coef. Armazenamento
Serrote dos Estrela	3,2	15,001	3,889E-01
Piezômetro 1	3,2	96,274	2,002E-08
Piezômetro 2	3,2	149,969	6,988E-03
Santo Antônio 1	1,1	0,655	3,700E-01
Piezômetro	1,1	2,804	3,762E-05
Santo Antônio 2	0,94	0,685	5,183E-01
Piezômetro	0,94	1,943	3,860E-05

Tendo em vista que os testes de bombeamento executados não permitiram uma avaliação segura dos parâmetros hidrodinâmicos, através do método de Cooper-Jacob ou de qualquer outro método de análise, a equipe pesquisadora lançou mão de métodos alternativos de cálculo desses parâmetros.

Para se obter alguns valores de transmissividade, foram utilizados dados de teste de produção de 13 poços ([Anexo A4.2](#)), executados pela Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba, CDRM-PB, nas sub-bacias Brejo das Freiras/Triunfo, Sousa e Pombal. durante os últimos 25 anos. Os dados de localização desses poços estão indicados na Tabela 4.3.3.

Tabela 4.3.3 - Localização dos 13 poços nos quais foram executados testes de produção

Dados de Localização					Aqüífero
UTM_E	UTM_N	Nº POCO	Nº Cad	Município	
570883	9279707	01	P79	Uiraúna	Qal/Ks
545042	9262454	02	CM472	Santa Helena	Qal/Ks
540064	9259020	03	CM022	Santa Helena	Qal/Kan
549609	9255705	04	???	Santa Helena	Qal/Kan
566643	9244993	05	DV936	S.J.Rio do Peixe	Qal/Ks
567267	9243387	06	???	S.J.Rio do Peixe	Qal/Ks
576710	9255641	07	DQ968	Sousa	Qal/Ks
584893	9252101	08	???	Sousa	Qal/Ks
582549	9250986	09	???	Sousa	Qal/Ks
597244	9253232	10	CH412	Aparecida	Qal/Ks
625088	9252029	11	CO683	Pombal	Qal/Ks
618020	9249140	12	CH061	Pombal	Qal/Ks
625380	9252788	13	CO682	Pombal	Qal/Ks

Obs.: Qal: Quaternário aluvial; Ks: Cretáceo Sousa; Kan: Cretáceo Antenor Navarro.

A análise dos dados dos testes de produção foi efetuada por Kunzler (2007) com auxílio de um programa escrito em MATLAB® ([Anexo A4.3](#)), a partir de um algoritmo desenvolvido por Bradbury e Rothschild (1985) e modificado por McLin (2005), baseado nos seguintes princípios básicos.

O rebaixamento total, s_T , em um poço de bombeamento compreende dois termos:

$$s_T = s_F + s_W = BQ + CQ^n \quad (4.3.1)$$

onde s_T é o rebaixamento total no poço; s_F o rebaixamento devido à perda de carga na formação aquífera; s_W o rebaixamento devido à perda na entrada do poço; B um coeficiente de perda da formação [T/L²]; C um coeficiente de perda do poço [T²/L⁵], n um expoente que varia entre 1 e 3, e Q é a vazão do poço.

Com $n = 2$ e a eficiência do poço, E , dada pela equação 4.3.2,

$$E = 100(s_F / s_T) , \quad (4.3.2)$$

o coeficiente de perda, C , pode ser reescrito da seguinte maneira:

$$C = \left(\frac{s_T}{Q^2} \right) \left(1 - \frac{E}{100} \right) \quad (4.3.3)$$

O rebaixamento, devido à perda na formação aquífera, é calculado pela aproximação de Jacob como:

$$s_F = BQ = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \left(\frac{2,25Tt}{r_p^2 S} \right) + 2p \right] \quad (4.3.4)$$

sendo T , transmissividade [L^2/T]; S , coeficiente de armazenamento; t , tempo de duração do bombeamento [T]; r_p , raio efetivo do poço [L] e p , fator adimensional que considera a penetração parcial do poço no aquífero, definido por:

$$p = \left(\frac{D-L}{L} \right) \left[\ln \left(\frac{D}{r_w} \right) - G \left\{ \frac{L}{D} \right\} \right], \quad (4.3.5)$$

onde D é a espessura do aquífero [L]; L , o comprimento do filtro do poço [L] e G , uma função da razão de L/D , que é definida por um polinômio (Bradbury e Rothschild, 1985):

$$G = a + b(L/D) + c(L/D)^2 + d(L/D)^3, \quad (4.3.6)$$

em que os valores dos coeficientes são: $a = 2,948$, $b = -7,363$, $c = 11,447$ e $d = -4,675$.

Substituindo 4.3.1 em 4.3.4 resulta a equação abaixo.

$$T = \frac{Q}{4\pi(s_T - s_w)} \left[\ln \left(\frac{2,25Tt}{r_w^2 S} \right) + 2p \right] \quad (4.3.7)$$

A eficiência do poço está incorporada na expressão $s_w = CQ^2$, pois o fator C é definido na equação (4.3.3). O parâmetro T se encontra nos dois lados da equação (4.3.7), então é necessária uma solução iterativa. Um valor inicial de T , o chamado T_{guess} no programa, é

solicitado para o lado direito e um valor calculado, T_{calc} no programa, é obtido para o lado esquerdo da equação (4.3.7), que serve como entrada no próximo ciclo da iteração. O processo de iteração termina quando o critério de tolerância pré-definido é alcançado.

Na execução do programa são solicitados os seguintes dados: vazão (Q), rebaixamento total (s_T), tempo de bombeamento (t), comprimento do filtro do poço (L), coeficiente de armazenamento (S), espessura do aquífero (D) e o coeficiente de perda do poço (C).

Os dois últimos parâmetros são opcionais, sendo que o seu não fornecimento não permite a estimativa de um único valor de T , e sim de uma gama de valores, para diversas eficiências do poço e penetrações do mesmo no aquífero.

Os dados de teste de produção foram analisados para os poços da bacia. Não foi possível determinar um valor único de transmissividade, e sim transmissividades máximas e mínimas, para os locais do teste de produção, por causa da incerteza no conhecimento do comprimento do filtro, L , e da eficiência dos poços, E . Os resultados estão na Tabela 4.3.4.

Tabela 4.3.4 - Transmissividades obtidas através da análise dos testes de produção

No. Poço	Ano do Teste	t (min)	Q (m ³ /h)	s (m)	L (m)	r (m)	S (-)	Q/s (m ³ /h/m)	T max (m ² /d)	T min (m ² /d)
P1	1998	600	3,00	12,87	40	0,1	0,0001	0,233	236,4	7
P2	1994	720	1,24	13,00	30	0,1	0,0001	0,095	95,1	2,7
P3	2004	1440	2,18	33,94	90	0,1	0,0001	0,064	72,7	1,9
P4	2001	360	0,22	8,10	35	0,1	0,0001	0,027	27	0,7
P5	2002	600	4,50	7,97	40	0,1	0,0001	0,565	566,1	17,9
P6	2004	600	0,42	26,67	35	0,1	0,0001	0,016	15,4	0,4
P7	2004	1440	9,00	5,80	40	0,1	0,0001	1,552	1567,1	55,2
P8	1994	600	2,00	17,12	40	0,1	0,0001	0,117	116,4	3,3
P9	1994	480	0,90	18,30	40	0,1	0,0001	0,049	48,8	1,3
P10	2005	600	3,60	17,90	45	0,1	0,0001	0,201	204,3	6
P11	1983	720	5,10	0,51	10	0,1	0,0001	10,000	8133	380
P12	1994	600	5,40	8,42	20	0,1	0,0001	0,641	578,6	20,6
P13	1981	120	2,25	0,42	18	0,1	0,0001	5,357	4705,3	184,8

Cabe, novamente, salientar que os dados de testes de produção não estão completos, e, também, por não ser conhecida a geometria do aquífero, só foi possível a confecção de faixas de transmissividade, em função da penetração do poço em relação à espessura total do aquífero (5% à 25%) e da eficiência do poço (50% à 80%). Também não era conhecido o coeficiente de armazenamento, porém a mudança nos valores deste não altera significativamente os valores obtidos para a transmissividade.

4.4. ELABORAÇÃO DE MAPAS POTENCIOMÉTRICOS

As medições de níveis hidrostáticos, nos poços selecionados para compor a rede de monitoramento, servirão primordialmente para a confecção de mapas potenciométricos, a partir dos quais se poderá obter importantes informações relativas ao comportamento hidráulico do Sistema Rio do Peixe. Vale salientar, neste contexto, o trabalho pioneiro de Albuquerque (1986) (Ver [Anexo A2.1](#)), que elaborou um mapa piezométrico que representa o escoamento subterrâneo da Bacia, à época (Fig. 4.4.1).

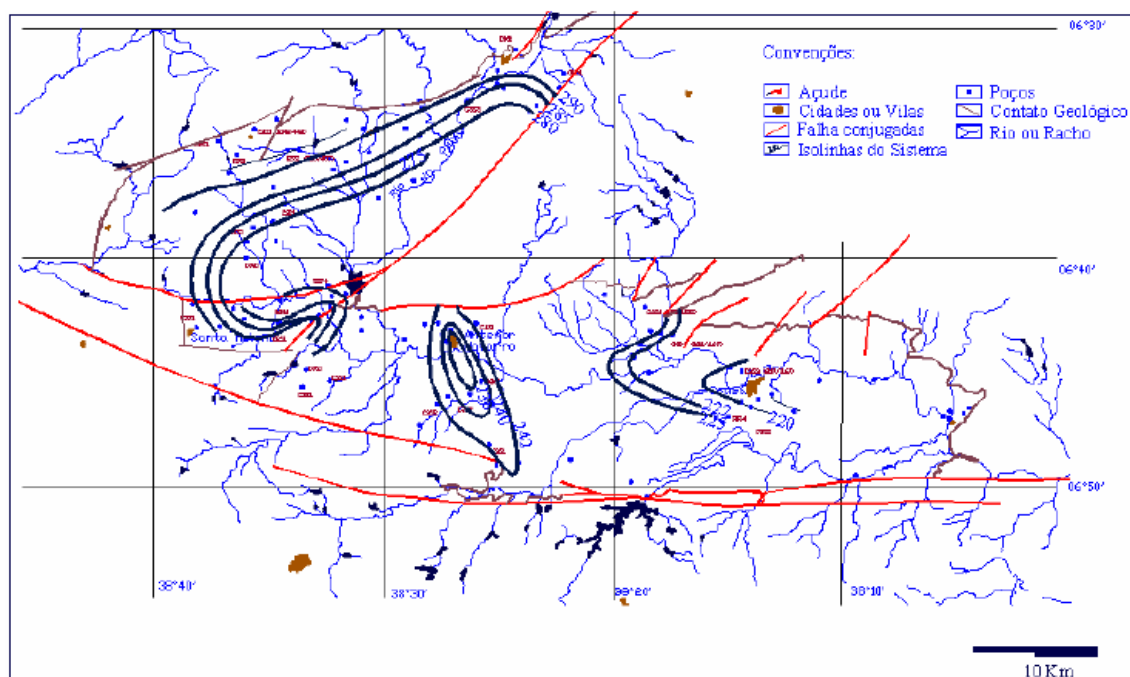


Figura 4.4.1 - Antigo mapa piezométrico da Bacia, por Albuquerque, 1986.

Este mapa mostra áreas com lacunas de isolinhas, o que se deveu à falta de poços nestes locais, quando da elaboração da carta (abril-maio de 1981). Mas, os resultados obtidos foram de uma lógica impressionante em relação a configuração hidrológica, hidrográfica e topográfica da Bacia.

O referido trabalho de Albuquerque representa, ainda nos dias atuais, o que de mais significativo existe sobre a hidrogeologia da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe e, por isso, serve como referência para os resultados encontrados no presente trabalho, que pretende, por exemplo, entre outros objetivos, através de uma rede de observação bem distribuída, preencher as lacunas existentes e traçar mapas mais detalhados.

4.4.1. MONITORAMENTO DOS NÍVEIS DE ÁGUA DOS POÇOS DA REDE

Ao longo do período de desenvolvimento do projeto, foram realizadas, conforme previsto, 7 campanhas de medição de níveis hidrostáticos nos poços da rede. O tempo entre duas campanhas sucessivas ficou em torno de três meses, exceção feita para o período chuvoso do ano de 2006, quando a medição prevista para fevereiro/março precisou ser adiada para maio, por problemas de acesso aos pontos de medição, devido ao excesso de chuvas.

Este mesmo problema, associado a outros, como, por exemplo, o desconhecimento inicial dos caminhos da extensa região a ser percorrida em cada campanha, substituições e ajustes na rede etc., provocou a diferença entre as quantidades de poços observados em cada medição, conforme se vê na Tabela 4.4.1, que mostra os tipos e as respectivas quantidades de poços monitorados em cada campanha. Este número, que cresce das primeiras para as últimas campanhas, chega a 150 poços monitorados no mês de fevereiro de 2007, sendo 33 poços amazonas e 117 poços tubulares.

Todos os poços visitados, com localização, níveis estáticos, cotas e data das medições são mostrados no [Anexo A4.1](#).

Tabela 4.4.1 - Número de poços com medição de nível, entidade responsável e tipo de poço medido

Campanha	Equipe Responsável	Nº de pontos coletados	Poços Amazonas	Poços Tubulares
Agosto 2005	CPRM	71	0	71
Novembro 2005	CPRM	95	23	72
Maio 2006	CPRM/UFCG	88	12	76
Agosto 2006	UFCG	133	22	111
Novembro 2006	UFCG	145	29	116
Fevereiro 2007	UFCG	150	33	117
Maio 2007	UFCG	146	32	114

As Fotos 4.4.1a e b, e 4.4.2a e b, mostram alguns poços, de diferentes tipos e utilizados para fins diversos dentro da bacia (abastecimento público e particular; com bomba e catavento).



Foto 4.4.1a - Poço tubular profundo; b - Poço amazonas da região. Ambos utilizados para o abastecimento de pequenos núcleos e ou propriedades rurais.



Foto 4.4.2a - Poço com catavento, típico da região; b - poço utilizado para abastecimento de Poço José de Moura.

4.4.2. MAPAS POTENCIOMÉTRICOS DOS NÍVEIS MONITORADOS

Os níveis d'água nos poços tubulares da bacia, medidos em 7 campanhas ao longo dos anos de 2005 até 2007 (Tab. 4.4.1 e [Anexo A4.1](#)), foram utilizados para confeccionar os mapas potenciométricos, mostrados nas Figuras 4.4.2 a 4.4.8, abaixo.

Os mapas foram traçados manualmente e com auxílio do programa *SURFER*, a intervalos de carga hidráulica de $\Delta h = 5$ metros. Neles se pode observar que o sentido geral do fluxo subterrâneo é de Oeste para Leste, e que existe em todos os mapas um fluxo lateral de entrada no contorno ao lado montanhoso de Oeste.

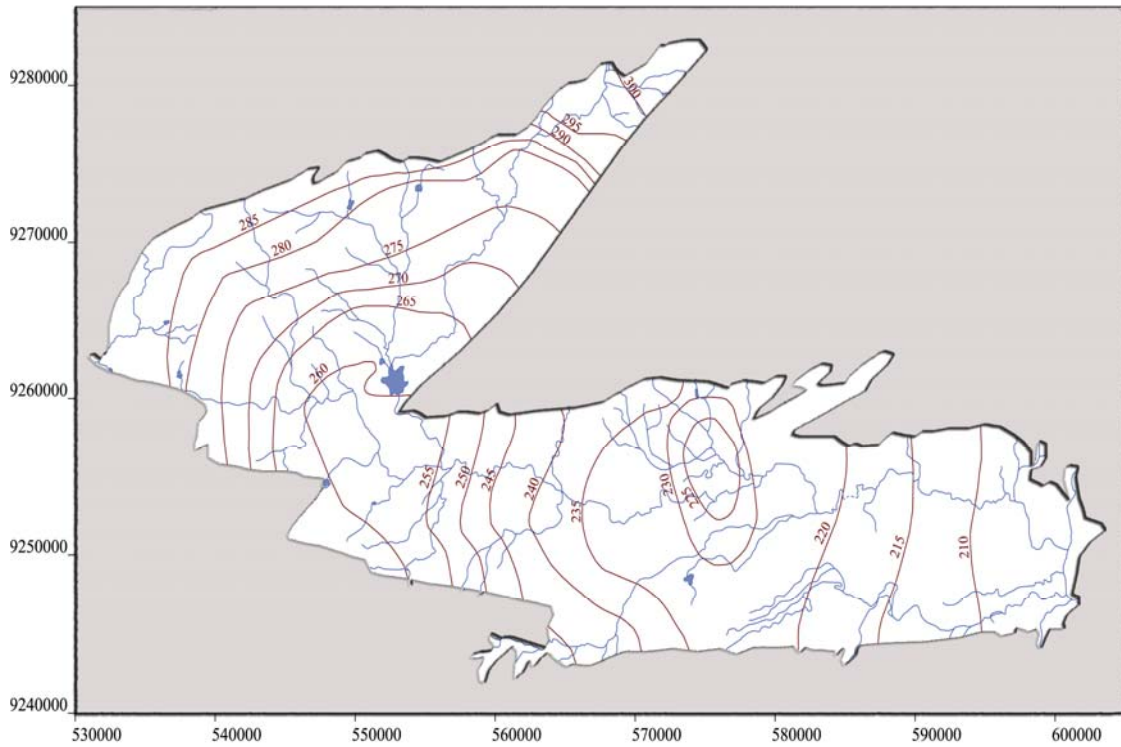


Figura 4.4.2 – Mapa potenciométrico da campanha de agosto/2005 com base de 71 poços tubulares.

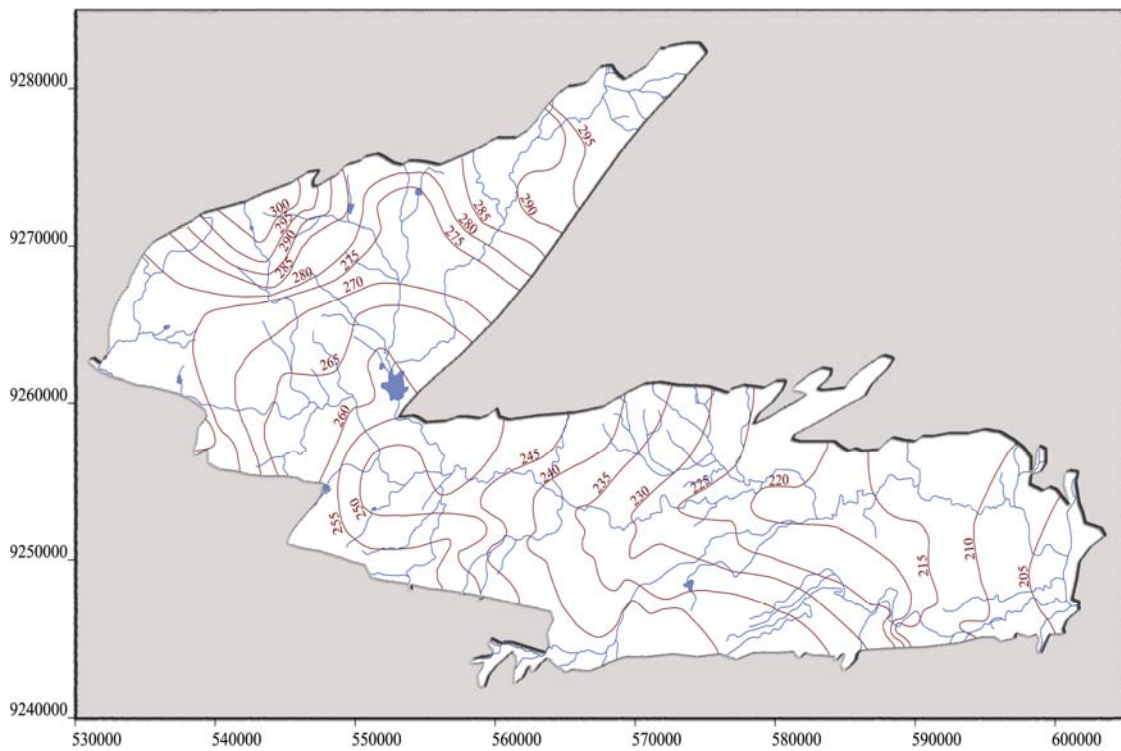


Figura 4.4.3 – Mapa potenciométrico da campanha de novembro/2005 com base de 72 poços tubulares.

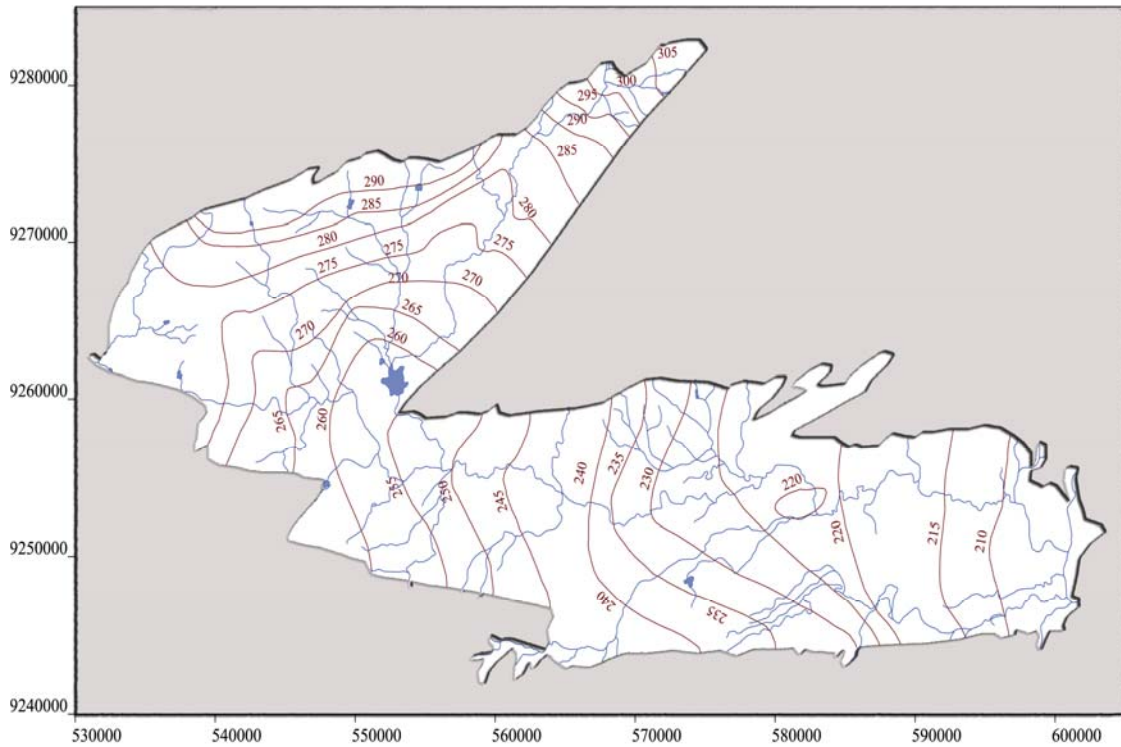


Figura 4.4.4 – Mapa potenciométrico da campanha de maio/2006 com base de 76 poços tubulares.

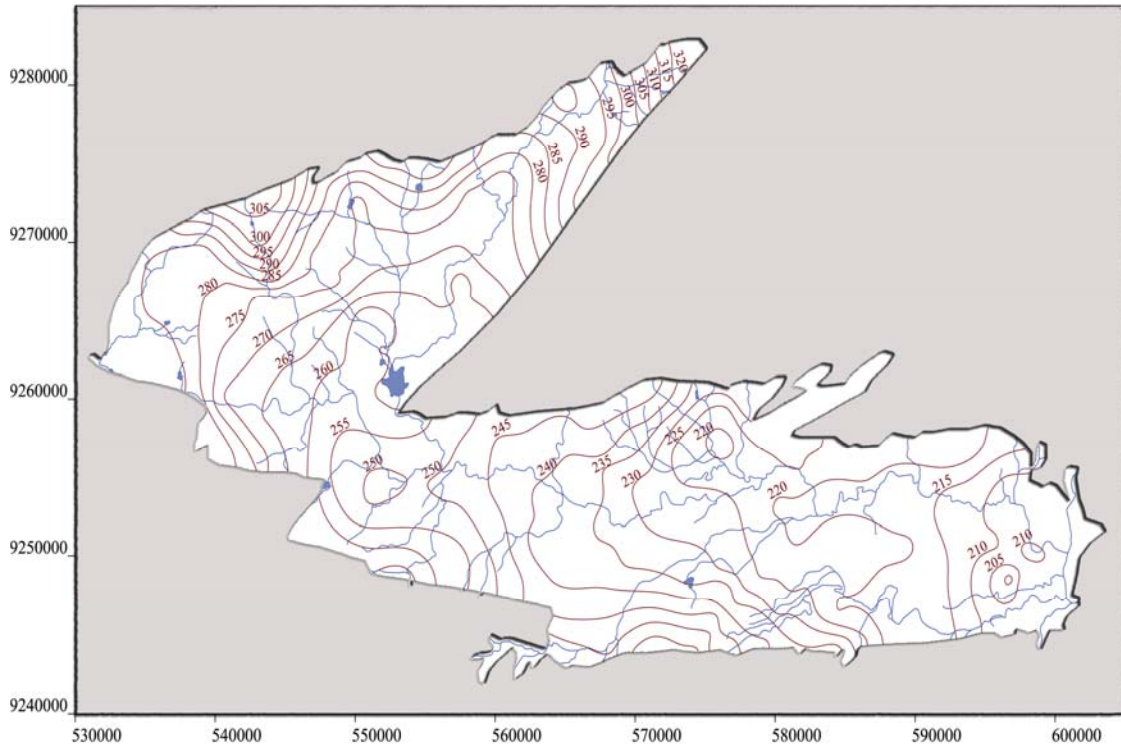


Figura 4.4.5 – Mapa potenciométrico da campanha de agosto/2006 com base de 111 poços tubulares.

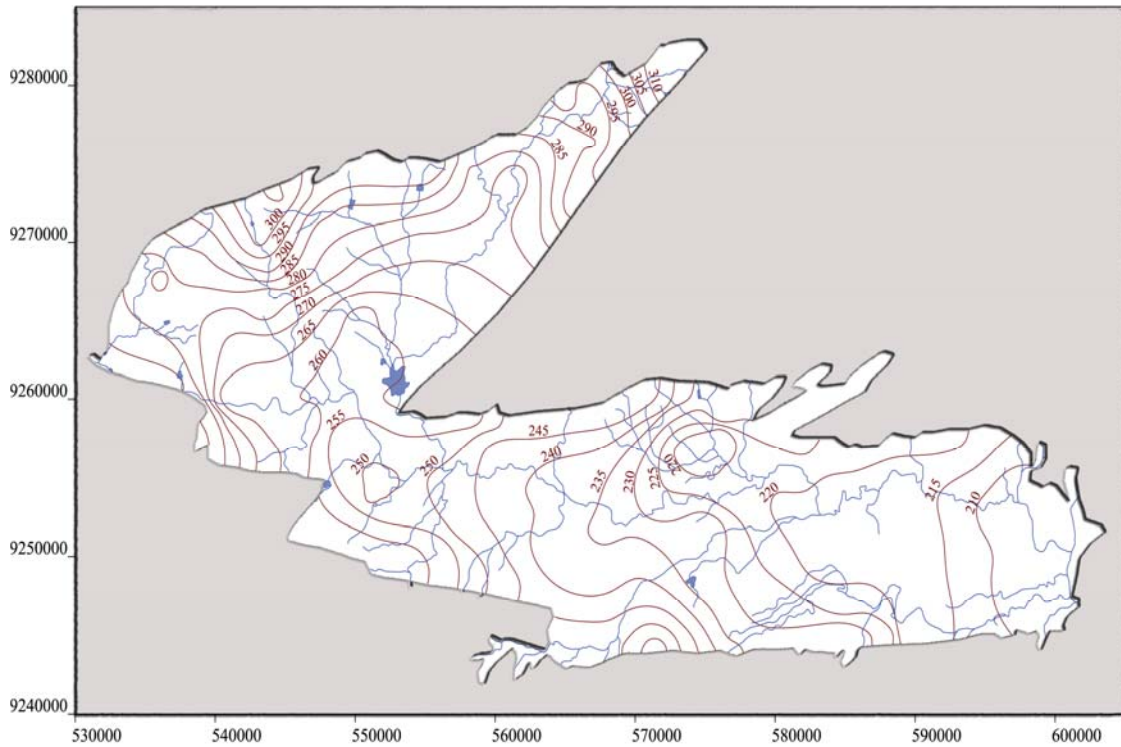


Figura 4.4.6 – Mapa potenciométrico da campanha de novembro/2006 com base de 116 poços tubulares.

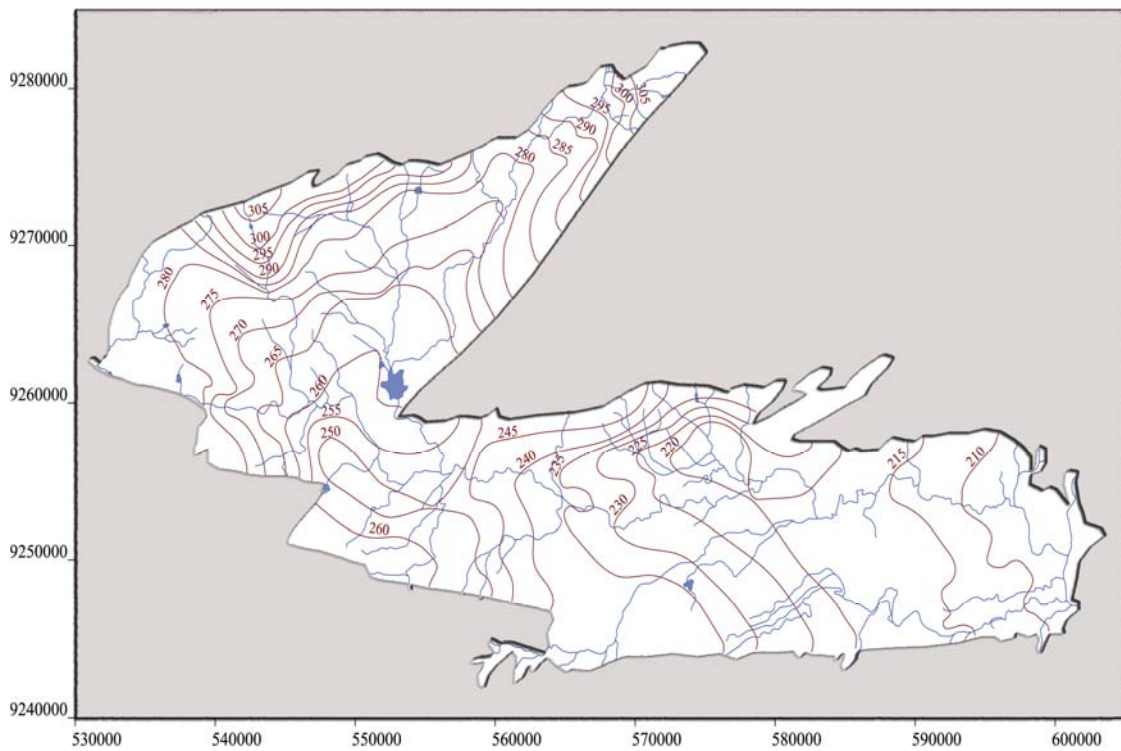


Figura 4.4.7 – Mapa potenciométrico da campanha de fevereiro/2007 com base de 117 poços tubulares.

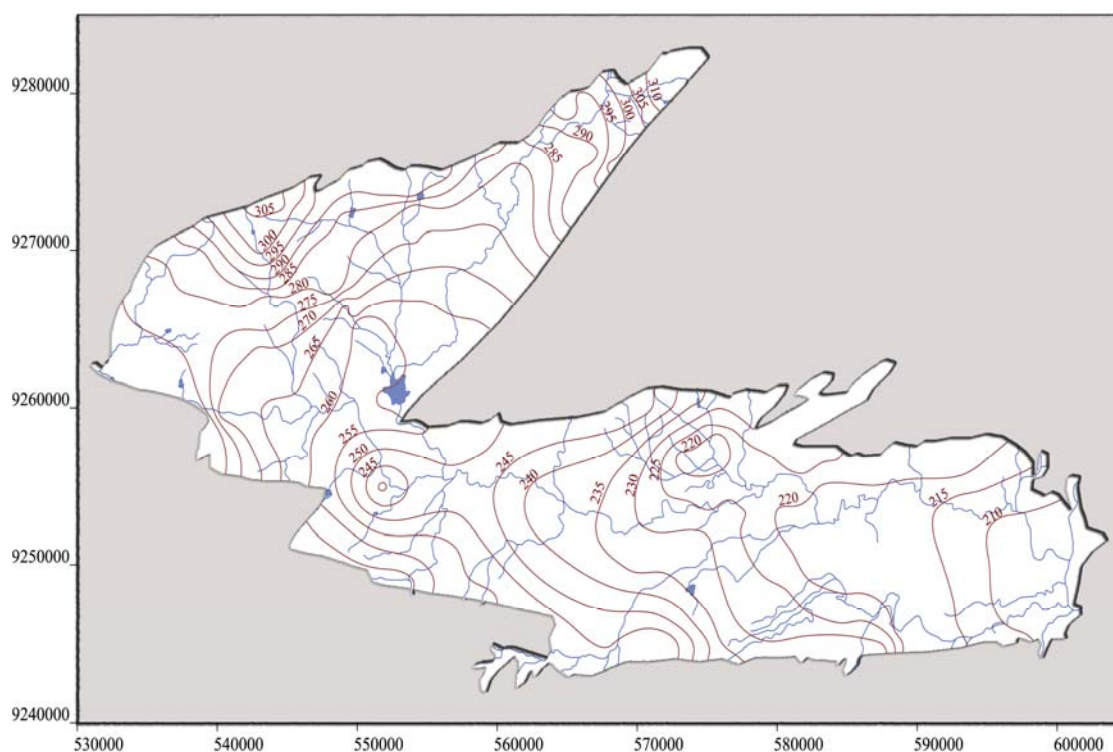


Figura 4.4.8 – Mapa potenciométrico da campanha de maio/junho/2007 com base de 114 poços tubulares.

Em geral, pode-se dizer, ao se observar as posições das isopiezas principais, que os mapas potenciométricos, e, portanto, as redes de fluxo, se alteram pouco durante os dois anos de levantamento no campo.

Mesmo nos períodos de chuva, entre novembro de 2005 a maio de 2006 e novembro de 2006 a maio de 2007, quando normalmente ocorrem as recargas do aquífero, o efeito destas recargas, medido nos poços tubulares da bacia, não é detectável com plena clareza em um exame menos minucioso dos mapas potenciométricos.

As variações entre as linhas potenciométricos nos diversos mapas sofrem também grande influência da seleção dos poços observados nas respectivas campanhas, uma vez que, pelos motivos já expostos, houve variação tanto no número dos poços medidos quanto dos poços selecionados, de campanha para campanha. Apenas 21 poços (vide Tab. 4.6.2 e Fig. 4.6.14) foram medidos continuamente nas 7 campanhas.

4.5. BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico de uma bacia ou região hidrográfica, de um sistema aquífero, no todo ou em parte, ou mesmo de camadas constituintes do solo, tem sido empregado como método ou ferramenta hidrológica tanto para quantificar as fases do ciclo hidrológico no sistema estudado (evapotranspiração ou escoamento, por exemplo), como para estimar os recursos hídricos potencialmente disponíveis (ou não) para o atendimento de diversas demandas (armazenamentos superficiais, idem nas camadas do solo ou recarga subterrânea, por exemplo).

No presente caso de estudo, a determinação da recarga do sistema aquífero se reveste de especial importância, na medida em que esta grandeza representa os recursos hídricos do sistema, que podem ser potencialmente utilizados de forma sustentável.

A quantificação da recarga de águas subterrâneas é um processo estimativo, uma vez que não é passível de ser medido diretamente, e existem normalmente dificuldades no que concerne à validação dos resultados obtidos pela aplicação de qualquer método.

Nas regiões semi-áridas, a evapotranspiração potencial normalmente ultrapassa as taxas médias de precipitação, o que significa que apenas em situações favoráveis a água precipitada é suficiente para a recarga. A recarga dos aquíferos é irregular e a observação e as análises dos processos dinâmicos nos aquíferos são muito limitadas. Estes fatores junto com a variação na topografia, na cobertura vegetal, nos tipos de solo e em outros elementos hidrológicos, dificultam extremamente o monitoramento e a medição do processo de recarga.

Devido a esta complexidade inerente de tratar o problema de recarga, existem vários métodos, com resultados mais ou menos confiáveis, para fazer uma boa estimativa da recarga da água subterrânea.

Para Paralta et. al (2003), estes métodos dividem-se em 2 grupos:

I. Métodos Diretos

- Balanço hídrico (formulação empírica);
- Modelos Físicos (balanço entre águas subterrâneas e superficiais);
- Modelos de circulação da zona vadosa (modelos determinísticos);
- Traçadores (químicos, bacteriológicos, orgânicos e isotópicos).

II. Métodos Indiretos (zona saturada)

- Oscilação Piezométrica;
- Lei Darcy.

Arbeitskreis Grundwasserneubildung (1977) e UNEP/DEWA/UNESCO (2002), classificam mais detalhadamente os atuais métodos de recarga em uso. São eles:

I. Medidas Diretas

II. Balanços Hídricos

III. Métodos Darcianos

IV. Métodos de Traçadores

O Balanço Hídrico foi o método empregado neste trabalho, através de duas abordagens diferentes, para estimativa da taxa de recarga na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe. Foram analisados o método de Thornthwaite & Mather (1955) e o modelo de balanço hídrico seqüencial diário (BALSEQ), desenvolvido por Lobo Ferreira em 1981. Os resultados encontrados, e adiante mostrados, fazem parte, também, da dissertação de mestrado de Brito, 2007.

4.5.1. ELABORAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO PRELIMINAR

Um dos modelos mais conhecidos para o cálculo do balanço hídrico foi proposto por Thornthwaite em 1948, posteriormente modificado por Mather, em 1955, e ficou conhecido como Balanço Hídrico de Thornthwaite & Mather (1955).

Este balanço hídrico, dito climatológico, é uma das várias maneiras de se monitorar a variação do armazenamento de água no solo. Através da contabilização do suprimento natural de água ao solo, pela chuva (P), e da demanda atmosférica, pela evapotranspiração potencial (ETP), e com um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD) apropriada ao estudo em questão, o balanço hídrico fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), do déficit hídrico (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM), podendo ser elaborado desde a escala diária até a mensal (Camargo, 1971).

A Bacia Sedimentar do Rio do Peixe é caracterizada por chuvas irregulares durante os meses chuvosos de janeiro a maio (4 meses), com uma média de 850 mm/ano, alto índice de



evaporação durante os meses secos (temperatura média anual de 26,5 °C) de junho a dezembro (8 meses), com uma média de 1600 mm/ano. Gráficos com as variações médias temporais da precipitação e da evapotranspiração potencial são mostrados na Figura 4.5.1.

A Figura 4.5.2 mostra a bacia do Rio de Peixe, discretizada por polígonos de Thiessen, que refletem as áreas de influência das 11 estações pluviométricas instaladas nessa região. A Tabela 4.5.1 apresenta as respectivas estações, as suas áreas de influências em km² e em percentagens da área total da bacia e as taxas de precipitação média anual nessas áreas.

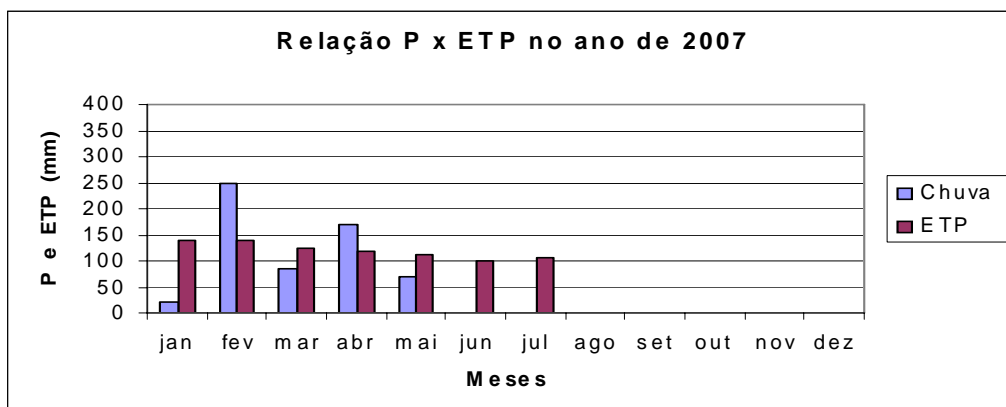
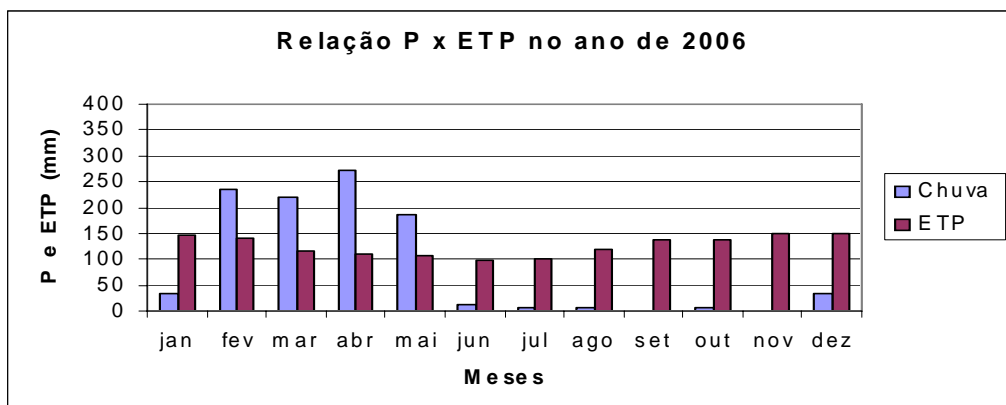
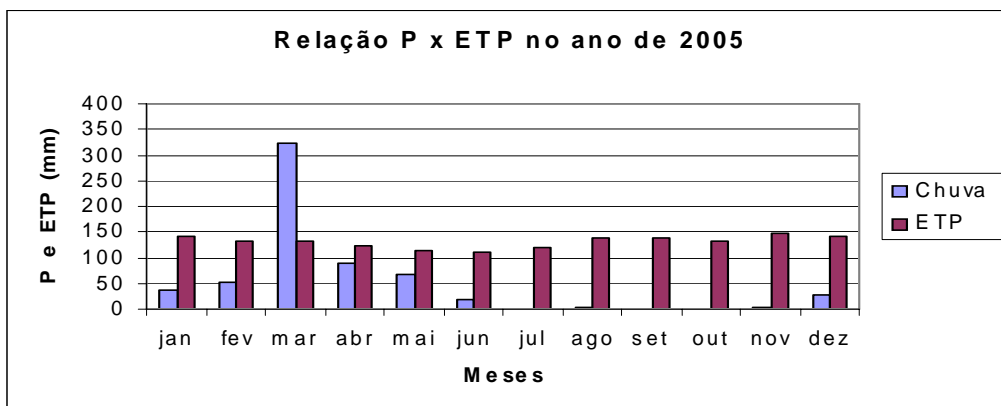
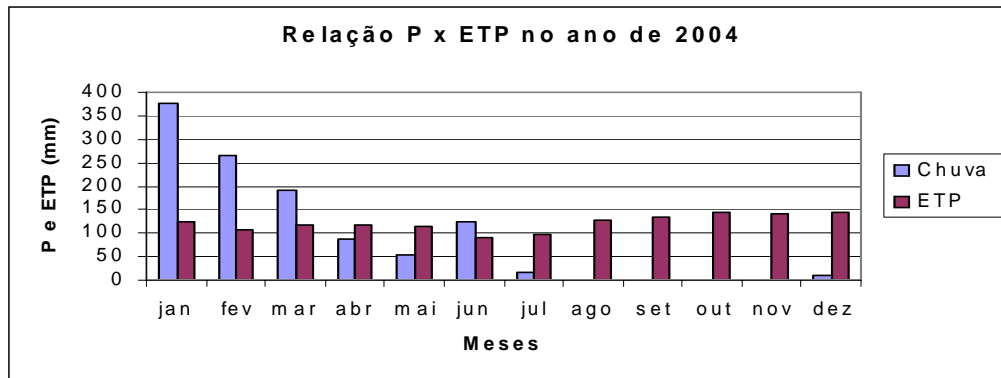


Figura 4.5.1 - Precipitação e evapotranspiração potencial mensal nos anos de 2004 a 2007.

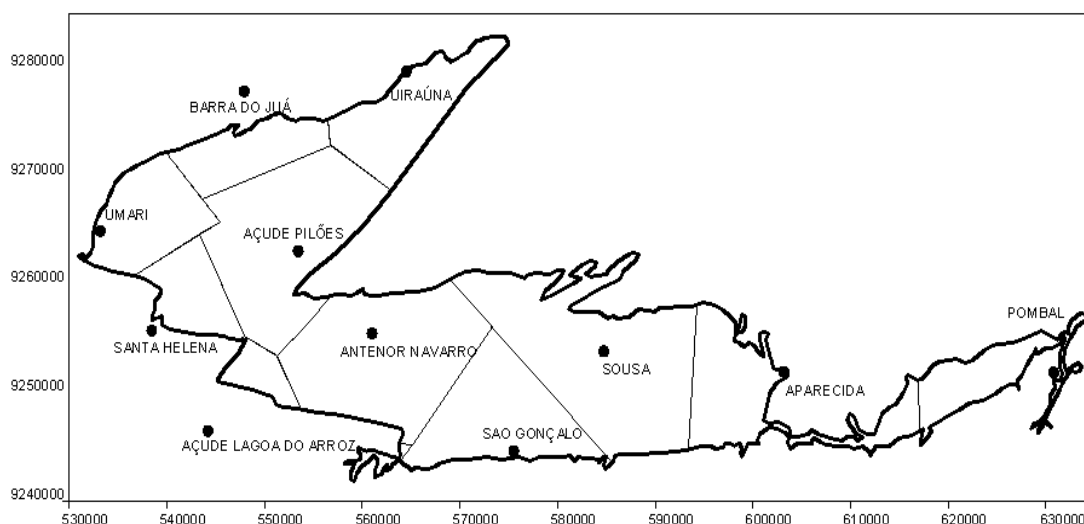


Figura 4.5.2 – Bacia Sedimentar do Rio do Peixe com as 11 estações pluviométricas e suas respectivas áreas de influências.

Tabela 4.5.1 – Precipitação Média Anual (1995-2006) dos Postos Pluviométricos da Região

Estação	Latitude	Longitude	Chuva média anual (mm)	Área (Km ²)	Porcentagem da Área (%)
Açude de Pilões	-6:40:00	-38:31:00	899,62	198,55	15,10%
Açude Lagoa do Arroz	-6:49:00	-38:36:00	900,49	26,37	2,00%
Antenor Navarro	-6:44:07	-38:26:56	916,30	204,97	15,58%
Aparecida	-6:46:00	-38:40:00	729,58	116,90	8,89%
Barra do Juá/Triunfo	-6:32:00	-38:34:00	795,22	68,93	5,24%
Pombal	-6:46:00	-37:49:00	843,48	62,83	4,78%
Santa Helena	-6:34:00	38:42:00	853,57	57,88	4,40%
São Gonçalo	-6:50:00	-38:19:00	955,86	139,07	10,57%
Sousa	-6:45:00	-38:14:00	845,23	250,16	19,02%
Uiraúna	-6:31:00	-38:25:00	764,45	99,76	7,58%
Umari	-6:38:00	-38:42:00	723,18	89,90	6,83%
Área Total = 1.315,42 km²			Precipitação Média Anual = 850,24 mm		

As 11 estações pluviométricas consideradas foram: 1. Umari, 2. Triunfo/Barra do Juá e 3. Santa Helena (Formação Geológica de Antenor Navarro situada na Sub-Bacia Brejo das Freiras); 4. Açude de Pilões e 5. Uiraúna (Formação Geológica de Sousa situada na Sub-Bacia Brejo das Freiras); 6. Açude Lagoa do Arroz e 7a. Antenor Navarro (Formação Geológica de Antenor Navarro situada na Sub-Bacia Sousa), 7b. Antenor Navarro, 8. São Gonçalo, 9a Sousa e 10a. Aparecida (Formação Geológica de Sousa situada na Sub-Bacia Sousa); 9b Sousa (Formação

Geológica de Rio Piranha situada na Sub-Bacia Sousa); 10b Aparecida e 11 Pombal (Formação Geológica de Antenor Navarro e Sousa situadas na Sub-Bacia Pombal).

As três sub-bacias foram subdivididas em suas respectivas áreas de influência de 11 estações pluviométricas, do modo como é indicado na Tabela 4.5.2 e, também, apresentada no mapa dos polígonos na Figura 4.5.2.

Tabela 4.5.2 - Divisão das Sub-Bacias em áreas de influência das estações pluviométricas

SUB - BACIA	ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS
Brejo das Freiras	
<i>Form. Geológica Antenor Navarro</i>	Umari, Triunfo/Barra do Juá e Santa Helena
<i>Form. Geológica Sousa</i>	Açude de Pilões e Uiráuna
Sousa	
<i>Form. Geológica Antenor Navarro</i>	Açude Lagoa do Arroz e Antenor Navarro
<i>Form. Geológica Sousa</i>	Antenor Navarro, São Gonçalo, Sousa e Aparecida
<i>Form. Geológica Rio Piranhas</i>	Sousa
Pombal	
<i>Form. Geológica Antenor Navarro</i>	Aparecida e Pombal
<i>Form. Geológica Sousa</i>	

Para aplicação do Método de Thornthwaite & Mather (1955), foi empregado o programa "BHnorm", elaborado em planilha EXCEL por Rolim et al. (1998).

Os dados utilizados nesta elaboração do balanço hídrico climatológico foram: (1) as temperaturas médias mensais na estação climatológica de S. Gonçalo, localizada na borda da bacia, operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); e (2) as precipitações totais mensais registradas nas 11 estações pluviométricas da bacia, operadas pela Superintendência de Recursos Hídricos da Paraíba (SEMARH) ([Anexo A4.4.](#)).

A evapotranspiração potencial foi determinada com base na temperatura do ar através da equação original de Thornthwaite:

$$ETP = b \cdot T_m^a$$

$$a = 67,5 \cdot 10^{-8} \cdot I^3 - 17,1 \cdot 10^{-6} \cdot I^2 + 0,01791 \cdot I + 0,492$$

$$I = \sum_1^{12} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1,51} \tag{4.5.1}$$

$$b = \frac{N}{12}$$

Onde: b = fator de ajuste do comprimento do dia; ETP = evapotranspiração potencial (mm/mês); T_m = temperatura média mensal (°C); a = uma função do índice de calor I ; N = fotoperíodo, função da latitude e mês (horas).

A variação de armazenamento de água na zona não saturada depende da quantidade inicial da água armazenada (A_i), cujos limites máximo (capacidade de campo, C_c) e mínimo (ponto de murchamento, PM) variam em função do tipo de solo e sua espessura. A água que efetivamente estará disponível dependerá da espessura da camada do solo, determinada pela profundidade das raízes (R_p). Deve-se multiplicar a água disponível (AD), em milímetros, por esta espessura, em metros, para obter a água disponível no solo (CAD). Para aplicação do método de Thornthwaite & Mather, o parâmetro CAD ($CAD = (C_c - PM) \cdot R_p$) foi considerado igual à 100mm como um valor de segurança para a bacia em estudo baseado no intervalo calculado do parâmetro $AGUT$ do modelo BALSEQ (Cap. 4.5.2, deste relatório).

Os cálculos de balanço hídrico através do método de Thornthwaite & Mather resultam em excedente hídrico (EXC) que ocorre nos casos em que a precipitação é maior do que a evapotranspiração potencial, obtido através da equação $EXC = (P - ETP > 0) - ALT$, e déficit hídrico (DEF) que é dado pela diferença entre a evapotranspiração potencial e a evapotranspiração real ($DEF = ETP - ETR$).

Dessa forma foram calculados os valores médios de excedente hídricos (EXC) ou déficit hídricos (DEF) para cada formação geológica com base da fórmula geral:

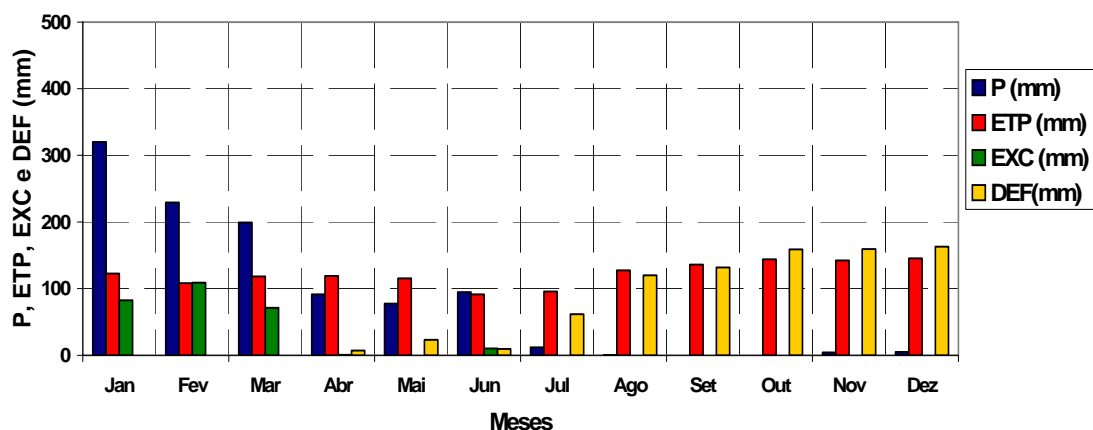
$$\bar{R} = \frac{\sum_i R_i \cdot Area_i}{\sum_i Area_i} \quad (4.5.2)$$

As taxas mensais de excedente e déficit hídricos, calculadas para os anos de 2004 a 2007 estão apresentadas na Tabela 4.5.3 e nas correspondentes Figuras 4.5.3 a 4.5.6.

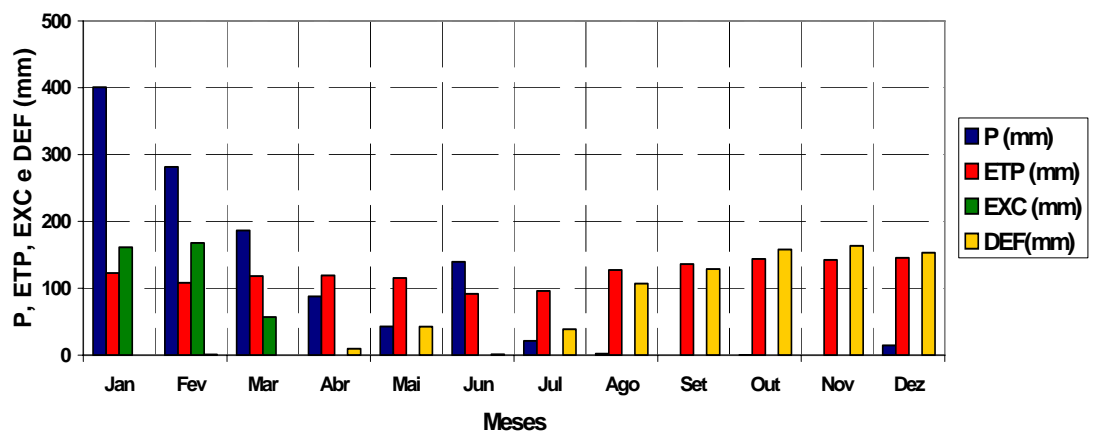
Tabela 4.5.3 – Precipitação, Evapotranspiração Potencial, Excedente Hídrico e Déficit Hídrico mensais das Sub-Bacias nos anos de 2004 até 2007

	Mês	EIP (mm)	Brejo das Freiras			Sousa			Pombal		
			Precipitação (mm)	Excedente Hídrico (mm)	Déficit Hídrico (mm)	Precipitação (mm)	Excedente Hídrico (mm)	Déficit Hídrico (mm)	Precipitação (mm)	Excedente Hídrico (mm)	Déficit Hídrico (mm)
ANO 2004	Jan	122,69	319,90	82,50	0,00	400,87	161,47	0,00	482,80	243,41	0,00
	Fev	108,17	229,36	108,84	0,00	281,57	167,86	-0,82	335,74	228,20	-1,87
	Mar	118,27	199,19	71,31	0,00	186,40	56,90	0,00	190,10	58,53	0,00
	Abr	119,11	91,32	0,70	-7,09	87,76	0,00	-9,50	65,99	0,00	-17,52
	Mai	115,35	77,33	0,00	-23,16	42,84	0,00	-42,60	35,11	0,00	-56,91
	Jun	91,57	94,80	10,28	-9,62	139,56	0,00	-0,99	157,89	0,00	0,00
	Jul	95,82	11,92	0,00	-61,50	21,17	0,00	-38,73	22,51	0,00	-34,11
	Ago	127,34	0,14	0,00	-120,03	2,17	0,00	-107,03	3,57	0,00	-103,02
	Set	136,12	0,00	0,00	-131,67	0,00	0,00	-128,60	0,00	0,00	-127,75
	Out	143,94	0,00	0,00	-158,94	0,11	0,00	-157,98	0,00	0,00	-157,85
	Nov	142,32	4,38	0,00	-159,37	0,00	0,00	-163,58	0,00	0,00	-163,53
	Dez	145,51	4,96	0,00	-162,93	14,59	0,00	-153,28	8,83	0,00	-159,03
Total	1466,22	1033,30	273,63	-834,30	1177,04	386,22	-803,16	1302,54	530,14	-821,58	
ANO 2005	Jan	142,83	45,89	0,00	-116,33	33,58	0,00	-128,66	34,03	0,00	-128,20
	Fev	131,35	60,67	0,00	-94,34	45,34	0,00	-109,69	57,35	0,00	-97,67
	Mar	133,03	229,32	0,11	0,00	396,75	146,59	0,00	232,69	14,18	0,00
	Abr	123,83	121,54	4,87	-10,26	71,54	0,00	-16,78	49,80	0,00	-40,80
	Mai	113,89	77,15	4,72	-22,52	57,29	0,00	-39,31	109,33	0,00	-12,11
	Jun	110,74	34,54	0,00	-53,67	9,50	0,00	-79,86	9,13	0,00	-82,23
	Jul	120,39	0,95	0,00	-101,28	0,16	0,00	-112,50	0,00	0,00	-114,44
	Ago	138,03	1,19	0,00	-138,51	3,35	0,00	-139,74	0,00	0,00	-143,63
	Set	137,17	0,00	0,00	-141,29	0,00	0,00	-142,04	0,00	0,00	-142,21
	Out	133,35	0,00	0,00	-141,53	0,00	0,00	-141,72	0,00	0,00	-141,76
	Nov	148,33	0,00	0,00	-167,59	0,00	0,00	-167,65	67,38	0,00	-100,28
	Dez	142,00	31,16	0,00	-126,47	22,07	0,00	-135,58	67,38	0,00	-90,26
Total	1574,94	602,40	9,70	-1113,80	639,60	146,59	-1213,51	627,11	14,18	-1083,58	
ANO 2006	Jan	146,33	37,95	0,00	-130,46	36,37	0,00	-132,06	5,73	0,00	-162,70
	Fev	139,85	223,07	11,80	0,00	224,02	6,11	-1,29	408,44	173,11	0,00
	Mar	117,47	169,52	36,21	-1,73	263,77	113,33	0,00	156,92	22,61	0,00
	Abr	109,77	215,53	78,40	0,00	322,19	208,38	0,00	194,27	80,46	0,00
	Mai	105,82	200,27	98,34	-2,26	182,91	74,86	-1,42	129,54	17,74	0,00
	Jun	96,98	11,72	0,00	-33,95	11,26	0,00	-30,57	15,65	0,00	-26,89
	Jul	101,68	6,69	0,00	-75,13	5,50	0,00	-75,05	5,57	0,00	-73,09
	Ago	120,52	9,12	0,00	-105,73	6,00	0,00	-108,50	6,50	0,00	-107,25
	Set	137,12	1,45	0,00	-133,77	0,00	0,00	-135,31	0,00	0,00	-135,02
	Out	138,90	17,79	0,00	-132,72	0,48	0,00	-150,02	3,79	0,00	-146,64
	Nov	148,16	0,07	0,00	-166,92	2,56	0,00	-164,49	0,00	0,00	-167,02
	Dez	150,44	61,68	0,00	-117,69	16,42	0,00	-162,96	0,00	0,00	-179,37
Total	1512,99	954,86	224,75	-900,35	1071,48	402,68	-961,67	926,40	293,92	-997,98	
ANO 2007	Jan	140,83	22,29	0,00	133,91	24,53	0,00	131,68	2,10	0,00	154,09
	Fev	138,17	206,25	15,60	0,38	259,17	29,58	0,00	379,70	147,64	0,00
	Mar	125,29	80,72	0,00	31,07	94,21	0,00	9,20	58,30	0,00	22,78
	Abr	119,51	153,89	22,21	14,31	170,55	17,03	0,00	210,30	34,17	0,00
	Mai	111,25	55,51	0,00	39,76	74,17	0,00	9,71	132,30	15,07	0,00
	Jun	101,34	16,87	0,00	65,03	56,38	0,00	23,04	21,00	0,00	26,06
	Jul	105,01	0,00	0,00	99,96	3,26	0,00	80,29	22,50	0,00	61,68
	Ago	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Set	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Out	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Nov	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dez	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	841,40	535,53	37,81	384,42	682,26	46,62	253,92	826,20	196,87	264,61	

Sub - Bacia Brejo das Freiras - Ano 2004



Sub - Bacia Sousa - Ano 2004



Sub - Bacia Pomal - Ano 2004

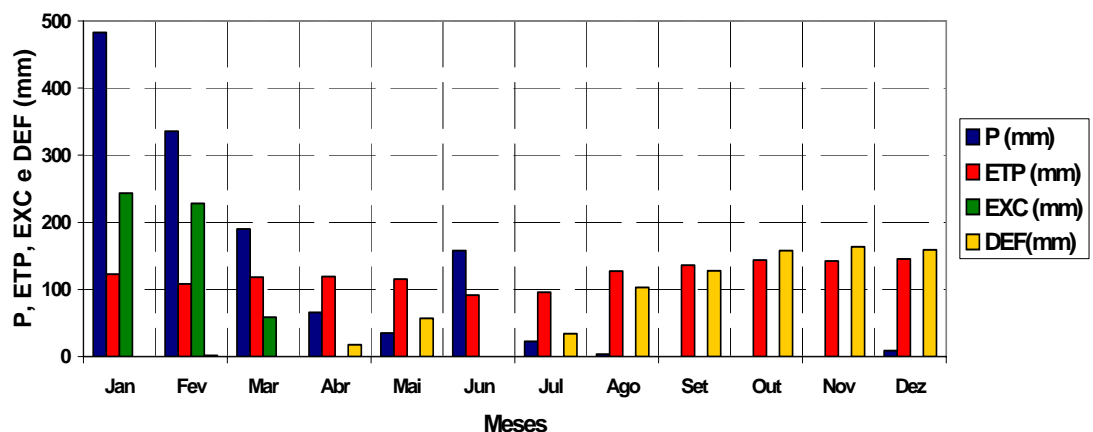
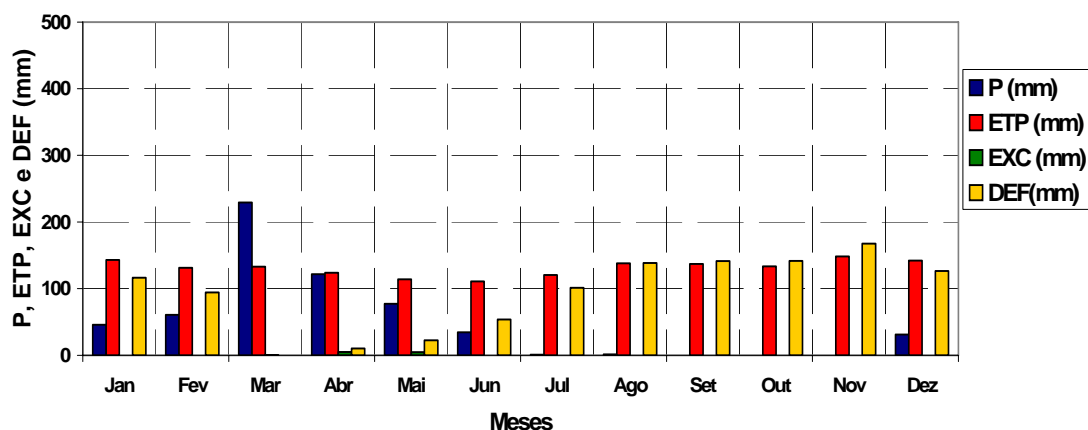
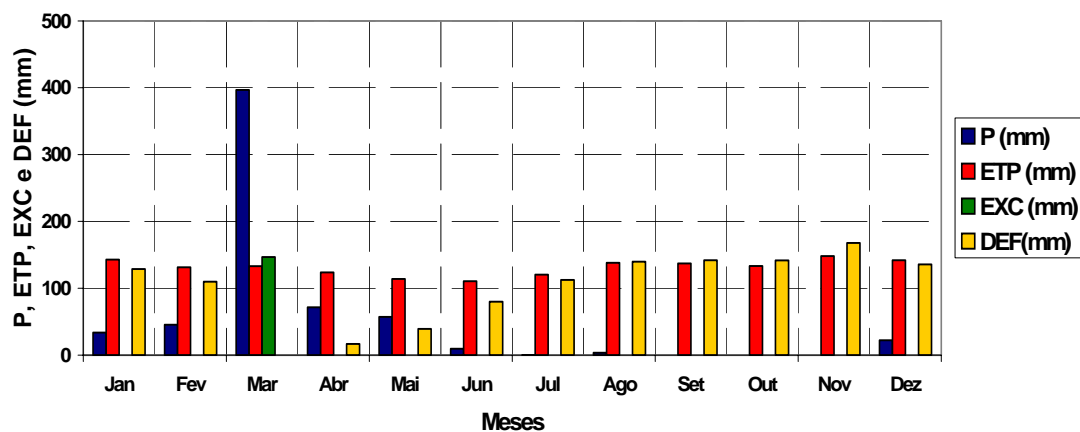


Figura 4.5.3 - Taxas mensais da precipitação, da evapotranspiração potencial, do excedente hídrico e do déficit hídrico nas sub-bacias no ano de 2004.

Sub - Bacia Brejo das Freiras - Ano 2005



Sub - Bacia Sousa - Ano 2005



Sub - Bacia Pomal - Ano 2005

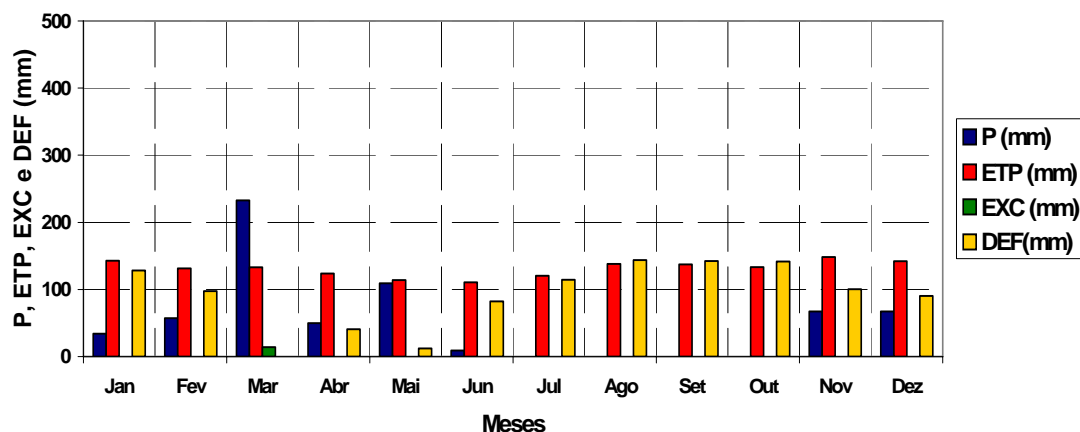
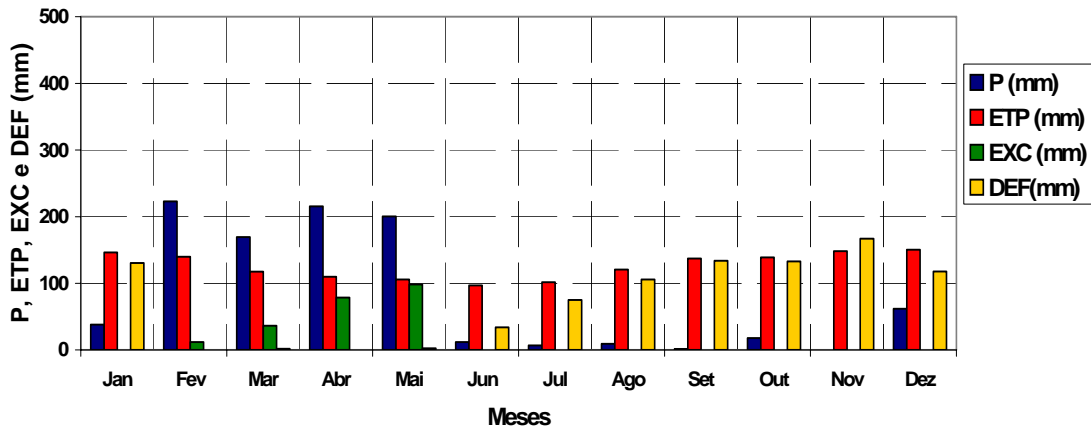
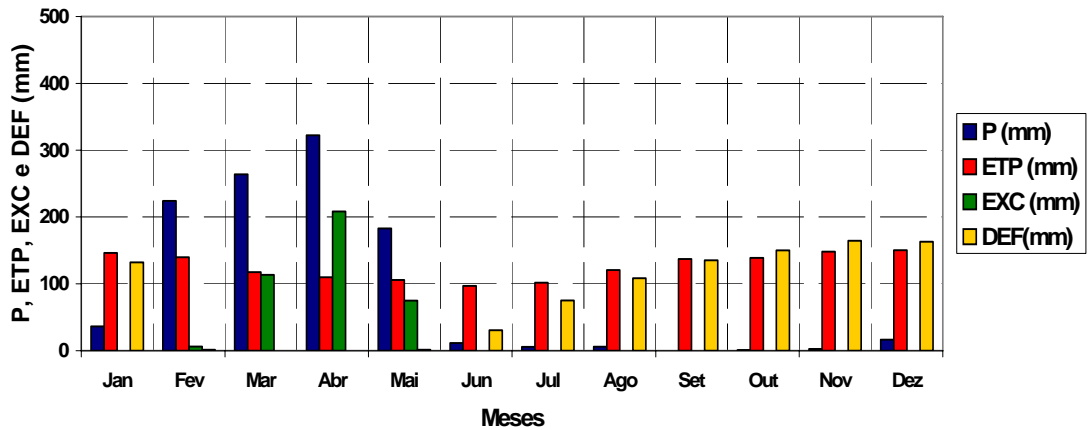


Figura 4.5.4 - Taxas mensais da precipitação, da evapotranspiração potencial, do excedente hídrico e do déficit hídrico nas sub-bacias no ano de 2005.

Sub - Bacia Brejo das Freiras - Ano 2006



Sub - Bacia Sousa - Ano 2006



Sub - Bacia Pombal - Ano 2006

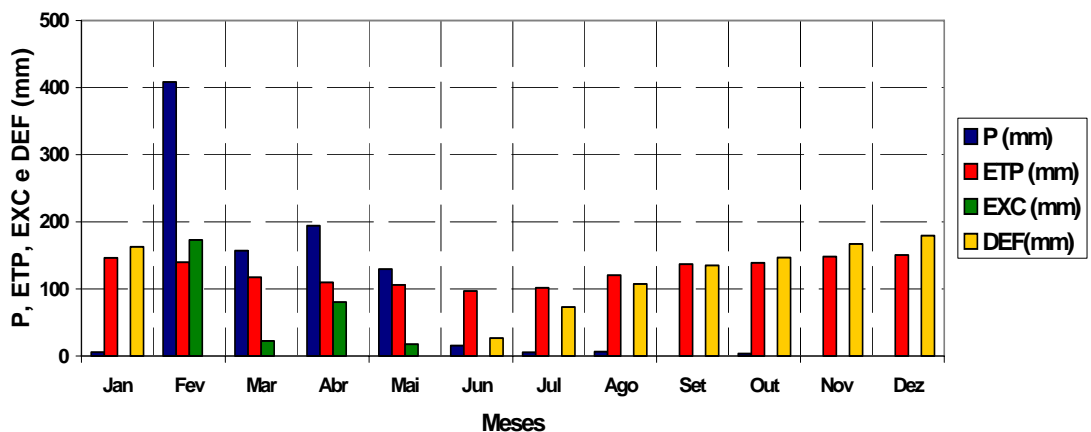
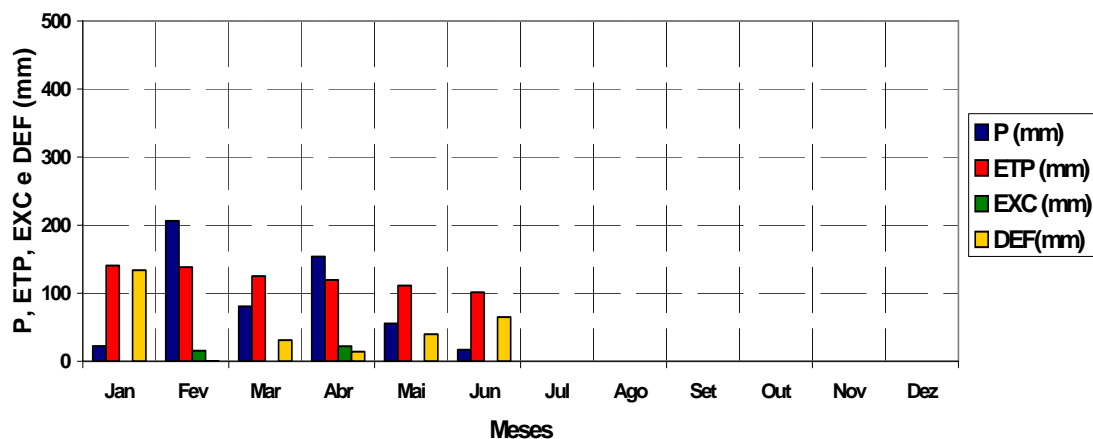
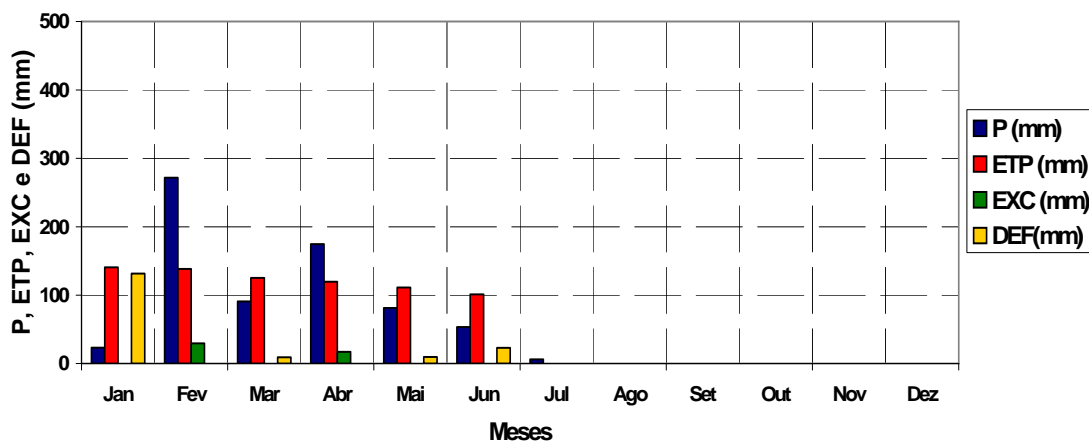


Figura 4.5 5 - Taxas mensais da precipitação, da evapotranspiração potencial, do excedente hídrico e do déficit hídrico nas sub-bacias no ano de 2006.

Sub - Bacia Brejo das Freiras - Ano 2007



Sub - Sousa - Ano 2007



Sub - Pombal- Ano 2007

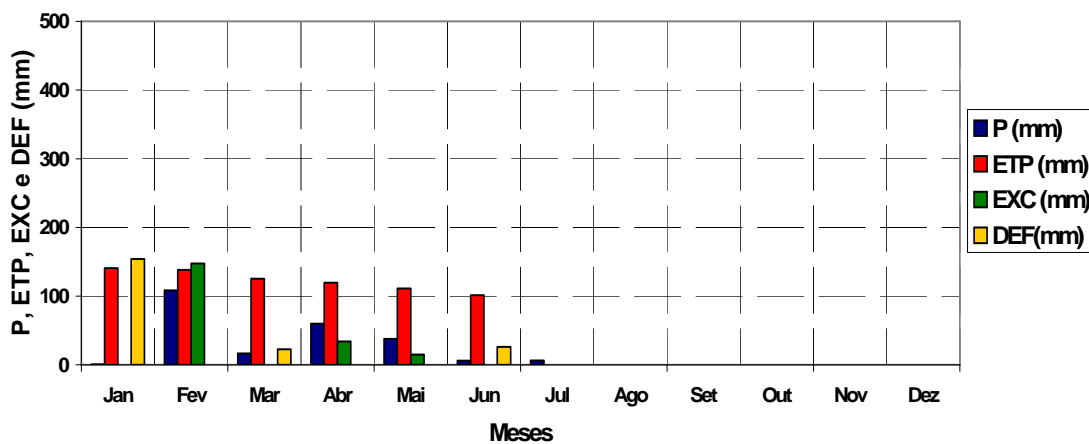


Figura 4.5.6 - Taxas mensais da precipitação, da evapotranspiração potencial, do excedente hídrico e do déficit hídrico nas sub-bacias no ano de 2007.

Os balanços hídricos nos anos de 2004 a 2007, nas 3 sub-bacias, são apresentados na Tabela 4.5.4 e na Figura 4.5.7, que lhe correspondente.

Tabela 4.5.4 – Precipitação, Evapotranspiração Potencial, Excedente Hídrico e Déficit Hídrico médios anuais das Sub-Bacias nos anos de 2004 até 2007

Sub - Bacia	Área (km ²)	ANO 2004				ANO 2005			
		Precipitação (mm)	ETP (mm)	Excedente Hídrico (mm)	Déficit Hídrico (mm)	Precipitação (mm)	ETP (mm)	Excedente Hídrico (mm)	Déficit Hídrico (mm)
Brejo das Freiras	498,28	1033,30	1466,22	273,63	-834,30	602,40	1574,94	9,70	-1113,80
Sousa	727,18	1177,04	1466,22	386,22	-803,16	639,60	1574,94	146,59	-1213,51
Pombal	89,99	1302,54	1466,22	530,14	-821,58	627,11	1574,94	14,18	-1093,58
Valor médio (mm)		1131,18	1466,22	353,42	-816,22	624,65	1574,94	85,68	-1167,54
Sub - Bacia	Área (km ²)	ANO 2006				ANO 2007			
		Precipitação (mm)	ETP (mm)	Excedente Hídrico (mm)	Déficit Hídrico (mm)	Precipitação (mm)	ETP (mm)	Excedente Hídrico (mm)	Déficit Hídrico (mm)
Brejo das Freiras	498,28	954,86	1512,99	224,75	-900,35	535,53	1500,00	37,81	-
Sousa	727,18	1071,48	1512,99	402,68	-961,67	682,26	1500,00	46,62	-
Pombal	89,99	926,40	1512,99	293,92	-997,98	826,20	1500,00	196,87	-
Valor médio (mm)		1017,38	1512,99	327,84	-940,93	636,53	1500,00	53,56	-

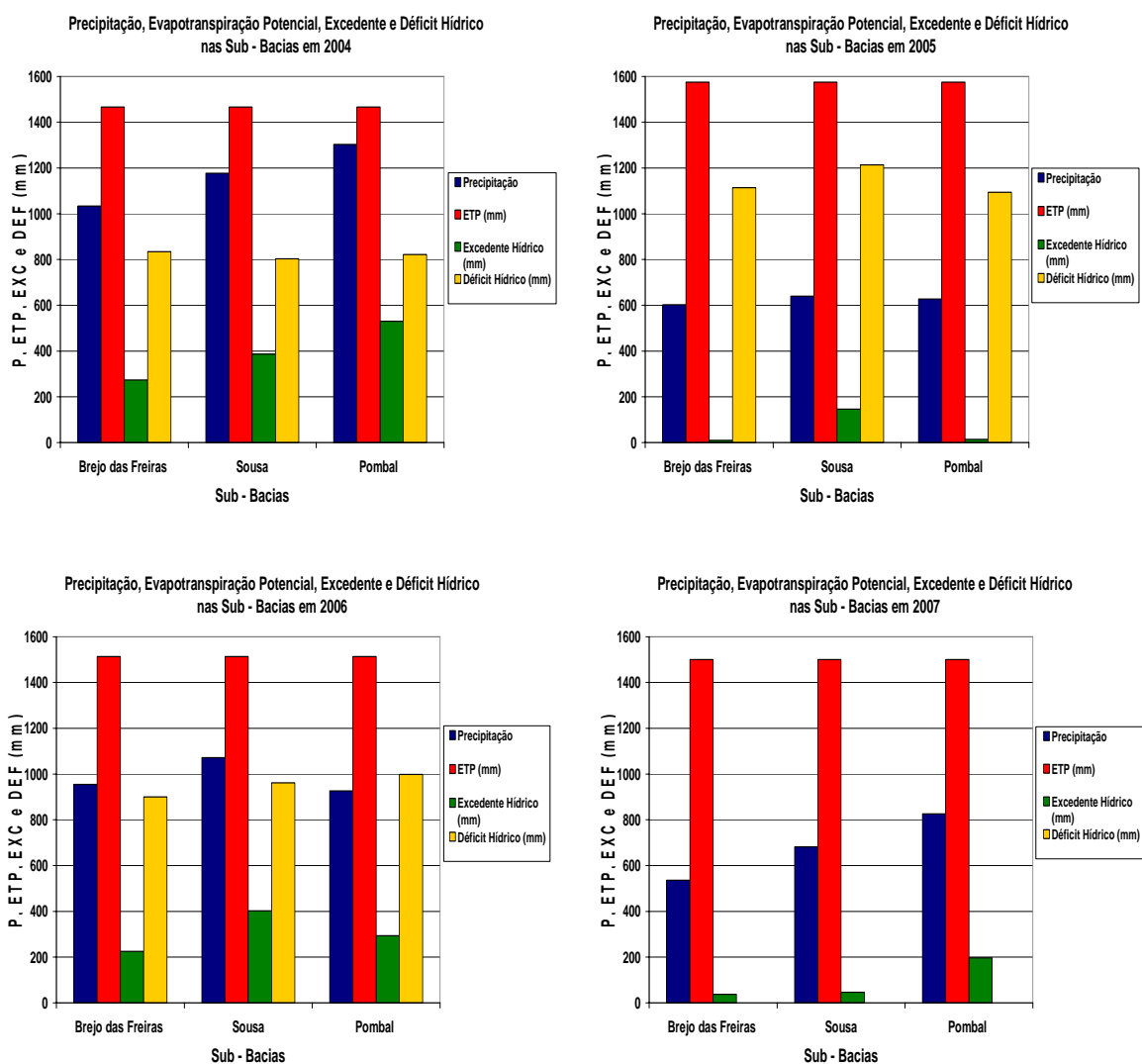


Figura 4.5.7 - As taxas médias anuais em [mm] da precipitação, da evapotranspiração potencial, do excedente hídrico e do déficit hídrico das sub-bacias nos anos de 2004 até 2007.

Como se trata de um balanço mensal, os valores anuais de excedente e de déficits hídricos, mostrados tanto na Tabela 4.5.4 como na Figura 4.5.8, indicam, respectivamente, as somas dos valores dos meses com excedentes hídricos (período chuvoso) e dos meses deficitários (período de estio).

Considera-se que o excedente hídrico, calculado pelo método, representa uma recarga potencial de água subterrânea, isto é, a quantidade de água que poderá chegar à zona saturada e contribuir para a elevação do nível freático, mas também, eventualmente, poderá escoar nas camadas superiores do solo (escoamento subsuperficial ou hipodérmico), retornar à superfície e evaporar-se.

A Tabela 4.5.5, elaborada com base nos valores dos excedentes hídricos na Tabela 4.5.4, apresenta as taxas de recarga potencial anual, isto é a relação entre o excedente hídrico e a precipitação para as diversas sub-bacias e os valores médios anuais da bacia.

Tabela 4.5 5 – Precipitação, Evapotranspiração Potencial, Excedente Hídrico e Déficit Hídrico médios anuais das Sub-Bacias nos anos de 2004 até 2007

Recarga Potencial-Rp (mm)								
Sub - Bacia	ANO 2004		ANO 2005		ANO 2006		ANO 2007	
	Precipitação (mm)	% Rp (mm)	Precipitação (mm)	% Rp (mm)	Precipitação (mm)	% Rp (mm)	Precipitação (mm)	% Rp (mm)
Brejo das Freiras	1033,30	26,48%	602,40	1,61%	954,86	23,54%	535,53	7,06%
Sousa	1177,04	32,81%	639,60	22,92%	1071,48	37,58%	682,26	6,83%
Pombal	1302,54	40,70%	627,11	2,26%	926,40	31,73%	826,20	23,83%
Valor médio (mm)	1131,18	31,24%	624,65	13,72%	1017,38	32,22%	636,53	8,41%

4.5.2. BALANÇO HÍDRICO SEQUÊNCIAL DIÁRIO – O MODELO BALSEQ

O modelo BALSEQ é um modelo numérico de Balanço Hídrico Sequencial Diário, desenvolvido em 1981 por Lobo Ferreira para a estimativa da recarga de águas subterrâneas na Ilha de Porto Santo (Paralta et. al, 2003). Ele foi utilizado, adicionalmente ao modelo de Thornthwaite & Matther, para a caracterização da recarga das águas subterrâneas na bacia do Rio de Peixe, porque incorpora o tipo de solo e o uso de solo da bacia.

O modelo consiste em dividir a água precipitada em cinco componentes: o escoamento direto, a infiltração superficial, a evapotranspiração real, a água retida no solo e a infiltração profunda. (Oliveira *et al.*, 2004).

O modelo BALSEQ permite obter estimativas de infiltração profunda por incremento do tempo considerado no balanço. Pelo processo de escoamento na zona vadosa, os impulsos de infiltração profunda, estimados para cada incremento de tempo, são atenuados pela redistribuição da umidade que poderá ocorrer na zona vadosa, resultando, assim, um valor de infiltração profunda, que não necessariamente reflete o mesmo valor do impulso de recarga (Oliveira, 2004).

Segundo Oliveira (2004), para calcular a recarga utilizando este modelo são necessários (vide o fluxograma da Fig. 4.5.8):

- ✓ Dados diários de precipitação (P);
- ✓ Dados diários de evapotranspiração, ETP ;
- ✓ Valores do fator CN (Curva-Número) do U.S. Soil Conservation Service (SCS), 1972 para determinar o escoamento superficial;
- ✓ Valores do parâmetro $AGUT = (C_c - PM) \cdot R_p$, que significa a quantidade de água disponível para a evapotranspiração, obtido através da capacidade de campo do solo, C_c , do seu ponto de murchamento, PM , e da profundidade das raízes das plantas, R_p ;
- ✓ O valor da quantidade de água retida no solo no primeiro dia do balanço hídrico a ser efetuado, A_i .

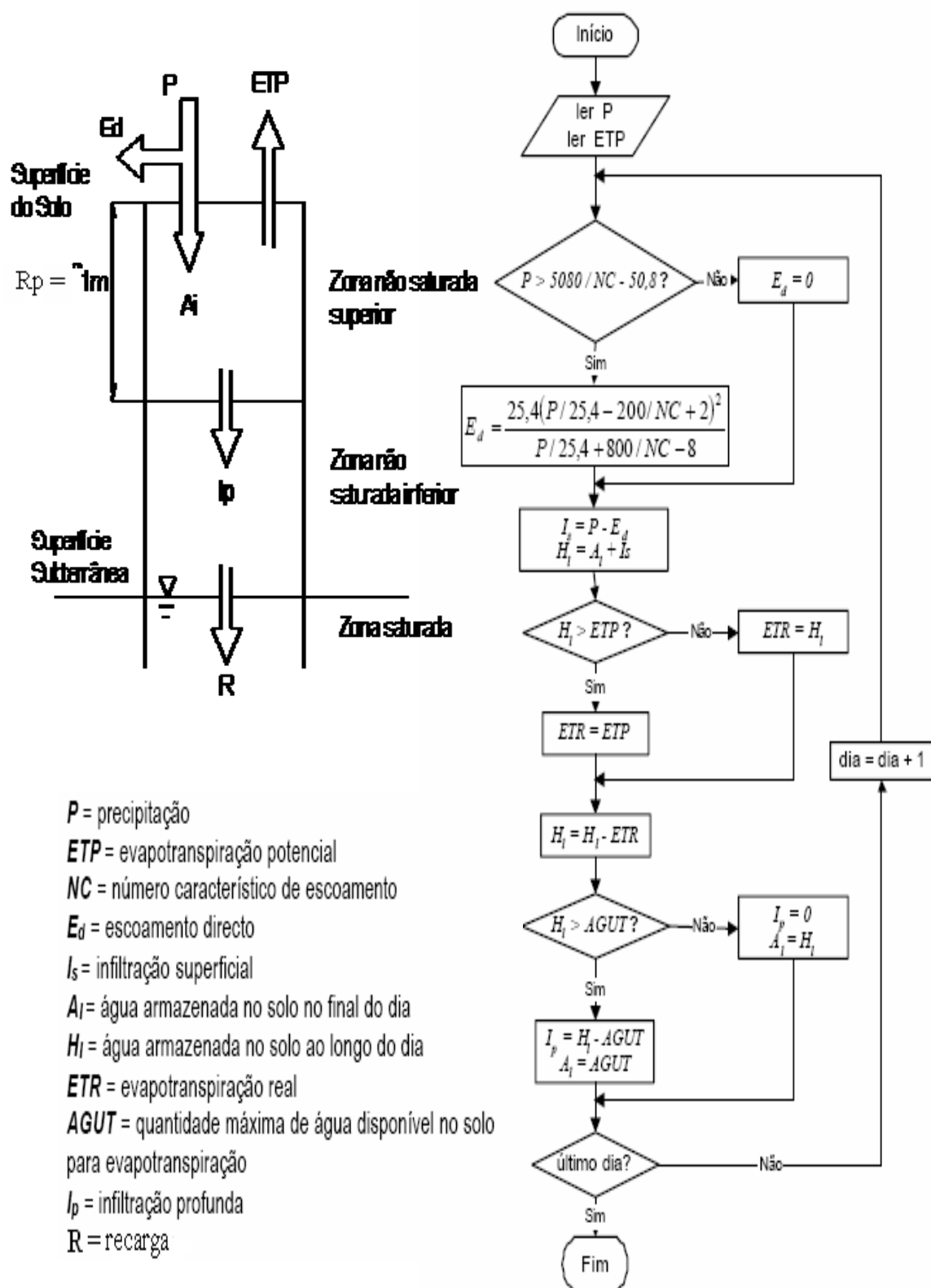


Figura 4.5 8 – Modelo conceitual e fluxograma do modelo numérico BALSEQ (Paralta et al., 2003).

O modelo BALSEQ calcula o escoamento superficial, E_d , com base no número característico de escoamento, CN , e a infiltração profunda, I_p , ou seja, a recarga possível.

O método do Soil Conservation Service (SCS, 1972) define o fator CN , em função do tipo e uso do solo. Os valores de CN variam entre 0 (correspondendo a um solo de permeabilidade vertical infinita, em que toda a água se infiltra no solo) e 100 (que corresponde a uma zona completamente impermeável). Os tipos e usos dos solos são classificados em quatro grupos, com as características abaixo descritas, para os quais são atribuídos valores do fator CN , conforme mostra a Tabela 4.5.6.

Tipo A: Apresentam baixo potencial de escoamento direto e elevadas intensidades de infiltração, mesmo quando completamente umedecidos. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila. Possuem uma elevada transmissividade.

Tipo B: São solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo que o tipo A com textura moderadamente fina e moderadamente grosseira, e medianamente drenados. Apresentam potencial de escoamento direto abaixo da média e intensidades de infiltração moderadas, quando completamente umedecidos. Possuem uma transmissividade média e permeabilidade superior à média.

Tipo C: Possuem potencial de escoamento direto acima da média e baixa intensidade de infiltração, quando completamente umedecidos. Contém porcentagem considerável de argila e pouco profundo, solos com camadas impermeáveis subjacentes e solos com textura moderadamente fina. Estes solos possuem uma transmissividade baixa.

Tipo D: Apresentam um potencial de escoamento direto elevado e intensidades de infiltração muito baixas quando completamente umedecidos. Incluem essencialmente solos argilosos expansíveis, solos com o nível freático permanentemente próximo da superfície e solos com substratos impermeáveis a pouca profundidade. Estes solos possuem uma transmissividade muito baixa.

A identificação desses tipos de solos, conforme sua composição, está indicada na Figura 4.5.9.

Tabela 4.5.6 – Valores do fator CN para bacias rurais (Tucci, 1993).

Uso do solo	Superfície	A	B	C	D
Solo lavrado	com sulcos retíneos em fileiras retas	77	86	91	94
		70	80	87	90
Plantações regulares	em curvas de nível	67	77	83	87
	terraceado em níveis	64	76	84	88
	em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	em curvas de nível	62	74	82	85
	terraceado em níveis	60	71	79	82
	em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	em curvas de nível	60	72	81	84
	terraceado em níveis	57	70	78	89
	pobres	68	79	86	89
	normais	49	69	79	94
Pastagens	boas	39	61	74	80
	pobres em curvas de nível	47	67	81	88
	normais em curvas de nível	25	59	75	83
Campos permanentes	boas em curvas de nível	6	35	70	79
	normais	30	58	71	78
	esparsas de baixa transpiração	45	66	77	83
	normais densas de alta transpiração	36	60	73	79
Chácaras estradas de terra	normais	25	55	70	77
	más	56	75	86	91
	de superfície dura	72	82	87	89
Florestas	normais	74	84	90	92
	muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	esparsas	46	68	78	84
	densas, de alta transpiração	26	52	62	69
	normais	36	60	70	76

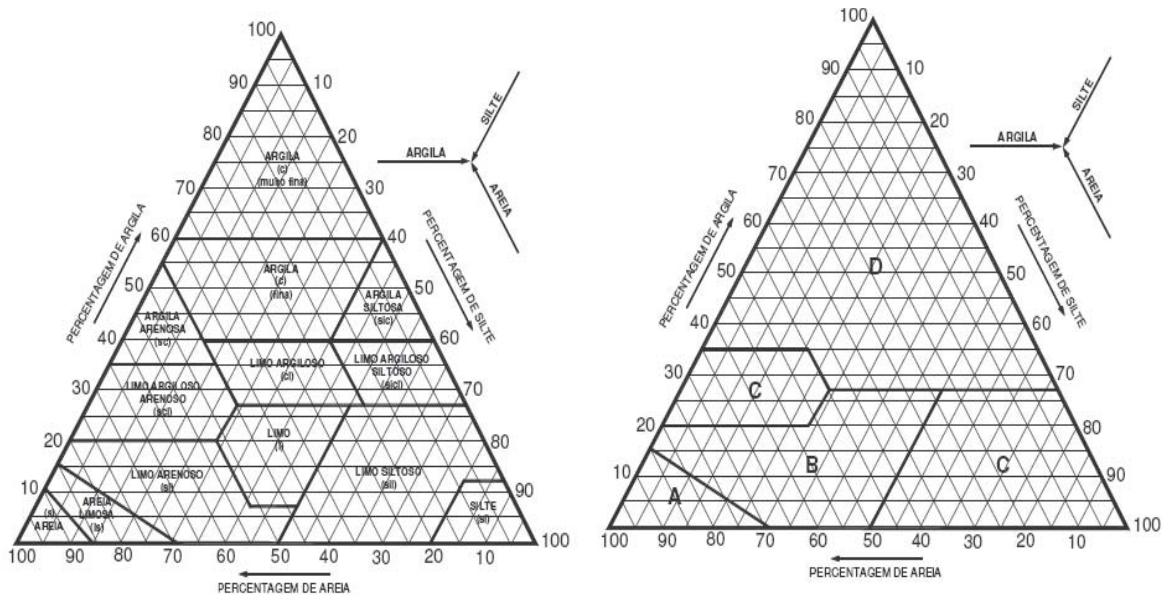


Figura 4.5.9 – Caracterização do tipo de solo devido ao teor de argila, silte e areia (Lança, 2007).

Verifica-se que, quanto mais denso é o cultivo, menor é sua condição hidrológica para a infiltração e menor é o valor do CN que representa o escoamento.

Os valores dos CN na Tabela 4.5.6 são relativos às condições médias de umidade antecedente. Analisa-se cada dia em função da chuva caída durante os cinco dias anteriores e assim, atribui à condição apresentada na Tabela 4.5.7.

CN_I – corresponde à curva número para a condição I de umidade, situação em que os solos estão secos;

CN_{II} – corresponde à curva número para a condição II de umidade, ou seja, situação média em que os solos correspondem à umidade da capacidade de campo;

CN_{III} - corresponde à curva número para a condição III de umidade, situação em que os solos estão saturados.

Tabela 4.5.7 - Condições antecedentes de umidade do solo. (Tucci, 1993)

Condição	Precipitação ocorrida durante os últimos cinco dias (mm)	
	Período úmido: janeiro – maio	Período seco: junho – dezembro
I	$P < 36$ mm	$P < 13$ mm
II	$36 \text{ mm} < P < 53$ mm	$13 \text{ mm} < P < 28$ mm
III	$P > 53$ mm	$P > 28$ mm

As fórmulas (4.5.3) e (4.5.4) apresentam correções aos valores tabelados para situações diferentes da média em função das condições apresentadas na tabela anterior (Tab. 4.5.7).

$$CN_I = \frac{4,2 \cdot CN_{II}}{10 - 0,058 \cdot CN_{II}} \quad (4.5.3)$$

$$CN_{III} = \frac{23 \cdot CN_{II}}{10 + 0,13 \cdot CN_{II}} \quad (4.5.4)$$

Após criteriosa análise dos solos e seus tipos de uso ocorrentes na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, no intuito de enquadrá-los nos grupos do Método do SCS, acima descrito, chegou-se à classificação apresentada na Tabela 4.5.8, que considera também cada formação geológica presente na área de estudo. Nesta análise foi considerada, em conformidade com o referido método, a parte superficial do terreno e sua maior ou menor capacidade de infiltração, que depende da classe e densidade da vegetação e da forma e tipo das culturas realizadas.

Tabela 4.5.8 – Caracterização dos solos na área de estudo, segundo o Método do SCS (1972)

Formação Geológica	Tipo de Solo	Solo
Aluviões	A	Areia não consolidada
Rio Piranhas	C	Arenito
Souza	D	Folhelho
Antenor Navarro	C	Arenito

O programa BALSEQ escrito em MATLAB[®] (Brito, 2007; vide [Anexo A4.5](#)), como se pode ver no fluxograma (Fig 4.5.8), solicita as taxas diárias de precipitação e evapotranspiração potencial. A simulação foi feita para estimar a taxas de recarga das três sub-bacias (Sub-Bacia Brejo das Freiras, Sub-Bacia Sousa e Sub-Bacia Pombal). Inicialmente, foram simulados dois cenários de recarga: (1) as três sub-bacias sem considerar a existência dos aluviões e (2) as três sub-bacias com os respectivos aluviões. A adoção desses dois cenários teve como objetivo verificar a influência da presença da formação aluvial superficial sobre o processo de recarga, tendo em vista que o sistema aquífero da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe é composto de vários níveis, separados entre si, e a recarga nas formações aluviais pode ficar restrita a esse nível, não alcançando zonas aquíferos mais profundas.

A Figura 4.5.10 apresenta o mapa geológico e a Figura 4.5.11 apresenta as classes capacidade de uso das terras na bacia. Com base nessas informações, fornecidas pelo Plano Nacional de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (PERH), de 2006, foi possível a sobreposição dos mapas obtendo-se, assim, as informações necessárias para identificação do valor do fator *CN*. Os mapas resultantes foram utilizados como mapas-base para o cálculo da recarga (Fig. 4.5.12, sem aluviões e Fig. 4.5.13, com aluviões).

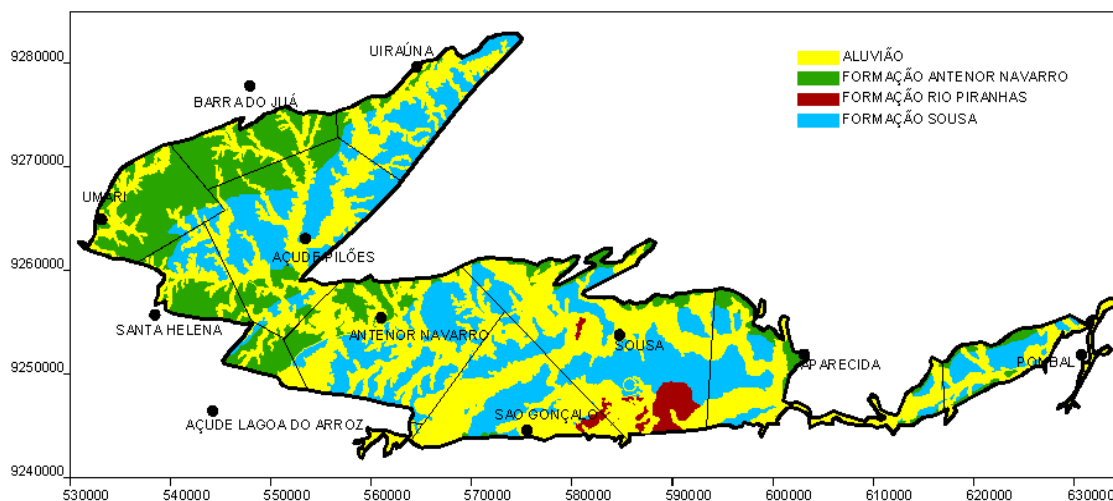
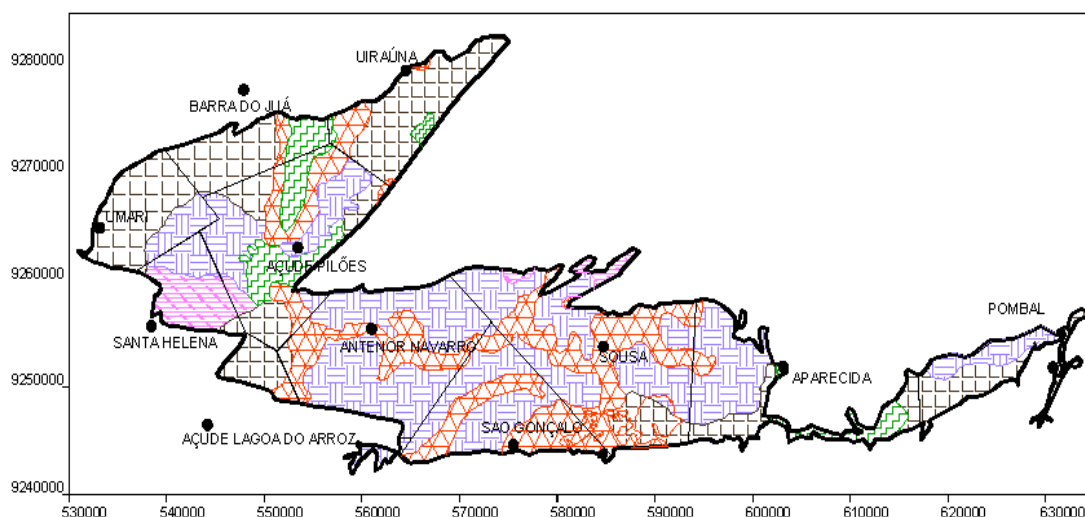


Figura 4.5.10 - Caracterização litológica (tipo do solo) da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe (Fonte: CPRM/UFCG, 2005).








CARACTERÍSTICAS DA CLASSE DE CAPACIDADE DE USO	
	Uso 2: Terras próprias para culturas permanentes, principalmente pastagem ou reflorestamento.
	Uso 3: Terras regulares, que podem ser cultivadas sem risco de erosão desde que sejam empregadas as práticas agrônômicas de terraço ou plantio em faixas.
	Uso 4: Terras não cultivadas com severas limitações para culturas permanentes e reflorestamento.
	Uso 5: Terras íngremes mais susceptíveis a erosão, próprias para o cultivos contínuos e que se prestam mais para lavoura esporádica.
	Uso 6: Terras com pedregosidade, severamente erodida, arenosas e encharcadas, próprias para o abrigo de fauna silvestre e preservação da flora natural.

Figura 4.5.11 – Caracterização da classe do uso de solo da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe (Fonte: PERH, 2006).

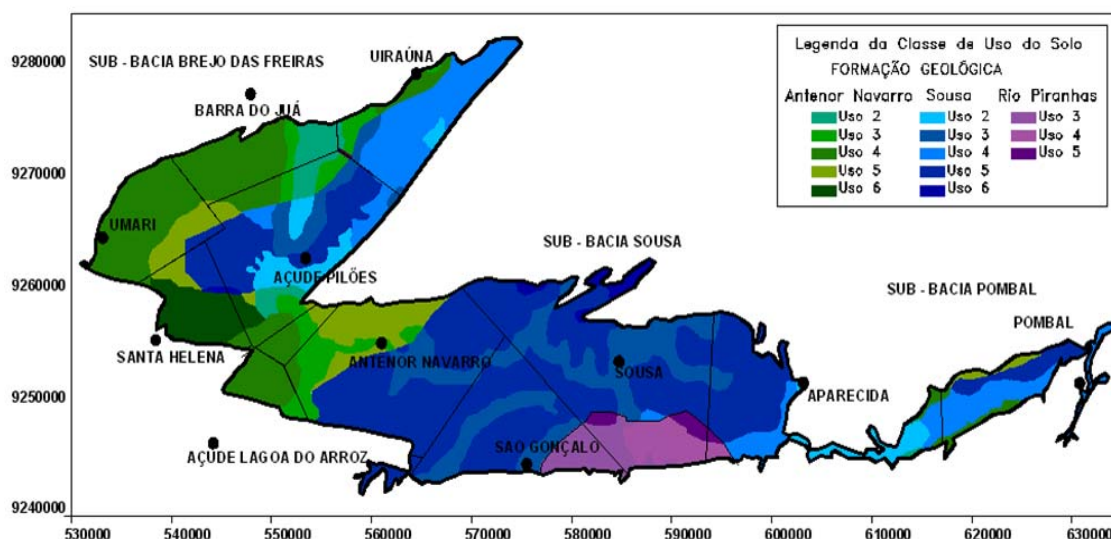


Figura 4.5.12 – Mapa-base sem considerar os aluviões, com o polígono de Thiessen.

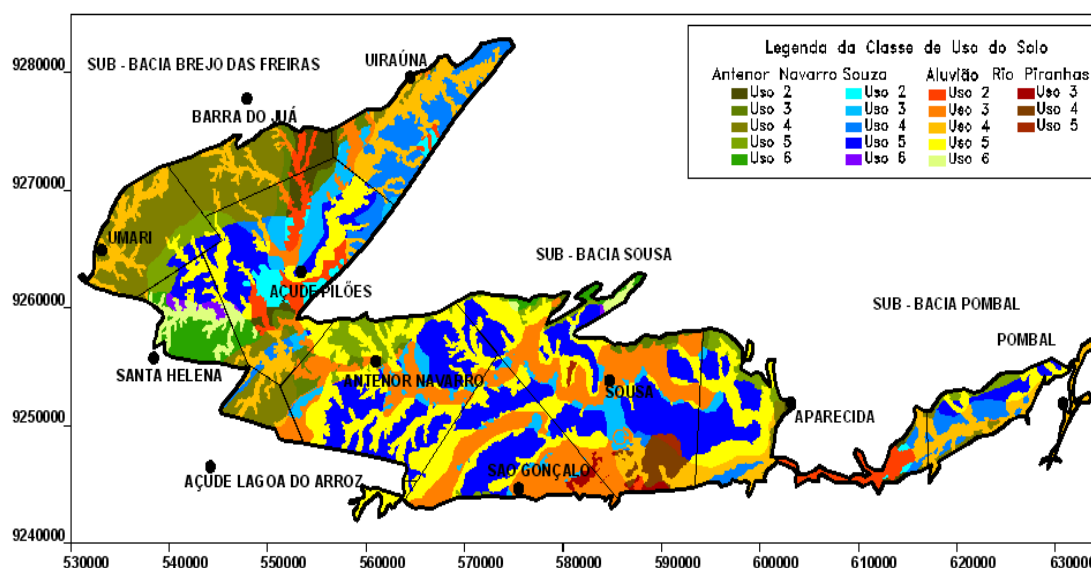


Figura 4.5.13 - Mapa base com os aluviões e o polígono de Thiessen.

A partir dos mapas (Figs. 4.5.12 e 4.5.13) foram calculadas as respectivas áreas de influência das 11 estações pluviométricas instaladas nas três sub-bacias, uma vez sem considerar os aluviões (Tab 4.5.9) e, outra vez considerando-se os aluviões (Tab. 4.5.10).

Tabela 4.5.9 – Áreas dos polígonos das estações pluviométricas instaladas nas três Sub-Bacias sem considerar os aluviões (Fig. 4.5.13)

Estações Pluviométricas	ÁREAS (Km²)							Total (km²)
	BF-AN	BF-SS	SO-AN	SO-RP	SO-SS	PO-AN	PO-SS	
Umari	86,00	3,90	-	-	-	-	-	89,90
Triunfo/Barra do Juá	68,93	-	-	-	-	-	-	68,93
Santa Helena	46,29	11,59	-	-	-	-	-	57,88
Açude de Pilões	58,57	123,04	16,72	-	-	-	-	198,33
Uiraúna	19,38	80,37	-	-	-	-	-	99,76
Açude Lagoa do Arroz	0,20	-	26,17	-	-	-	-	26,37
Antenor Navarro	-	-	66,89	-	138,08	-	-	204,97
São Gonçalo	-	-	-	20,36	118,71	-	-	139,07
Sousa	-	-	-	47,73	202,43	-	-	250,16
Aparecida	-	-	-	4,56	85,62	4,81	21,82	116,82
Pombal	-	-	-	-	-	12,88	50,37	63,26
Área Total (Km²)	279,37	218,91	109,78	72,65	544,85	17,69	72,19	1315,45
%A	21,24%	16,64%	8,35%	5,52%	41,42%	1,35%	5,49%	100,00%

Onde: BF = Sub-bacia Brejo das Freiras; SO = Sub-bacia Sousa; PO = Sub-bacia Pombal
AN = Form. Geológica Antenor Navarro; SS = Form. Geológica Sousa e RP = Form. Geológica Rio Piranhas

Tabela 4.5.10 – Áreas dos polígonos das estações pluviométricas instaladas nas três Sub-Bacias considerando os aluviões (Fig. 4.5.14)

Estações Pluviométricas	ÁREAS (Km²)										Total (km²)
	BF-AL	BF-AN	BF-SS	SO-AL	SO-AN	SO-RP	SO-SS	PO-AL	PO-AN	PO-SS	
Umari	20,33	63,55	6,02	-	-	-	-	-	-	-	89,90
Triunfo/Barra do Juá	12,29	56,64	-	-	-	-	-	-	-	-	68,93
Santa Helena	15,80	28,32	13,77	-	-	-	-	-	-	-	57,88
Açude de Pilões	57,53	45,14	78,49	9,34	3,69	-	4,16	-	-	-	198,33
Uiraúna	39,15	7,70	52,91	-	-	-	-	-	-	-	99,76
Açude Lagoa do Arroz	0,20	-	-	7,86	16,24	-	2,07	-	-	-	26,37
Antenor Navarro	-	-	-	84,51	34,32	-	86,14	-	-	-	204,97
São Gonçalo	-	-	-	82,03	1,2200134	3,301765	52,512	-	-	-	139,07
Sousa	-	-	-	108,02	21,63	23,9	96,62	-	-	-	250,17
Aparecida	-	-	-	39,31	16,70	-	35,87	18,82	1,58	4,52	116,81
Pombal	-	-	-	-	-	-	-	28,97	10,14	24,15	63,26
Área Total (Km²)	145,29	201,35	151,18	331,07	93,80	27,20	277,37	47,79	11,72	28,67	1315,45
%A	11,05%	15,31%	11,49%	25,17%	7,13%	2,07%	21,09%	3,63%	0,89%	2,18%	100,00%

Onde: BF = Sub-bacia Brejo das Freiras; SO = Sub-bacia Sousa; PO = Sub-bacia Pombal
AL = Aluvião; AN = Form. Geológica Antenor Navarro; SS = Form. Geológica Sousa e RP = Form. Geológica Rio Piranhas

Em virtude da ausência de dados registrados para a estação de Aparecida, no ano de 2007, sua área foi dividida entre as estações próximas. A área de Sousa passou a ter 338,13 km² e a de Pombal, 92,11 km².

Utilizando-se a Tabela 4.5.7, dos valores de *CN*, e os mapas de uso e tipo de solo (Figs. 4.5.10 e 4.5.11) foram obtidos os respectivos valores de *CN* para as áreas de influência de cada estação pluviométrica.

Cada área tem seu valor *CN* específico, que varia de acordo com a chuva dos últimos cinco dias (*CN I*, *CN II* ou *CN III*), calculado por meio das equações 4.5.3 e 4.5.4. A Tabela

4.5.11 apresenta os valores de *CN II* utilizados no modelo BALSEQ para o cálculo do escoamento superficial, E_d (vide fluxograma na Fig.4.5.8).

Tabela 4.5.11 – Valores do *CN II* para as áreas de influência dos pluviômetros

Estações Pluviométricas	Cenário 1 - Sem aluvião		Cenário 2 - Com aluvião	
	Valor do fator CN			
	2004 à 2006	2007	2004 à 2006	2007
Umari	83,38	83,38	75,85	75,85
Triunfo/Barra do Juá	81,61	81,61	76,47	76,47
Santa Helena	87,78	87,78	80,93	80,93
Açude de Pilões	87,45	87,45	80,07	80,07
Uiraúna	86,73	86,73	72,63	72,63
Açude Lagoa do Arroz	81,42	81,42	73,86	73,86
Antenor Navarro	91,13	91,13	78,11	78,11
São Gonçalo	90,22	90,22	79,38	79,38
Sousa	89,56	90,20	80,51	80,97
Aparecida	90,28	-	78,29	-
Pombal	89,08	87,77	73,16	70,98

O parâmetro *AGUT* (Tab. 4.5.12) foi estabelecido com base em comunicações pessoais de pesquisadores da Unidade acadêmica de Engenharia Agrícola da UFCG, que forneceram as estimativas de valores de capacidade de campo, C_c , e de ponto de murchamento, PM , distribuídos na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe. A partir das características do tipo de solo foram considerados os seguintes valores das profundidade das raízes, R_p : para os aluviões, 600 mm, para Antenor Navarro e Rio Piranhas, 800 mm e para Sousa, 1000 mm.

Tabela 4.5.12 - Valores da capacidade de campo, C_c , do ponto de murchamento, PM , da profundidade de raiz, R_p e de *AGUT* para as diversas Formações Geológicas.

Geologia	Tipo de Solo	CC (%)	PM (%)	Rp(mm)	AGUT (mm)
Aluvião	A	32,78 a 33,62	19,41 a 21,72	600	70 a 85
Antenor Navarro	C	16,98	8,11	800	71
Rio Piranhas	C	17,31 a 25,1	10,03 a 13,18	800	85 a 96
Sousa	D	16,75 a 21,66	6,6 a 8,31	1000	80 a 110

A partir destas informações, calcula-se os valores de *AGUT* específicos em função da geologia da área de estudo como mostra a Tabela 4.5.13.

Tabela 4.5.13 - Parâmetro AGUT em função da geologia da área de estudo

Geologia	AGUT (mm)
Aluvião	85
Antenor Navarro	120
Rio Piranhas	120
Sousa	150

Para cada posto pluviométrico foi encontrado um valor médio do parâmetro AGUT através da ponderação da área e da geologia (Tab. 4.5.14). Em virtude da falta de dados para o posto pluviométrico de Aparecida no ano de 2007, ocorre um aumento das áreas de influência dos postos de Sousa e Pombal, passando o valor de AGUT para 116,69mm e 110,47mm, respectivamente.

Tabela 4.5.14 - Parâmetro AGUT para cada estação pluviométrica

Posto Pluviométrico	AGUT Médio (mm)
Umari	114,09
Barra do Juá	113,76
Santa Helena	117,59
Açude de Pilões	120,70
Uirauna	122,17
Açude Lagoa do Arroz	111,66
Antenor Navarro	118,18
São Gonçalo	110,68
Sousa	116,47
Aparecida	112,95
Pombal	115,43

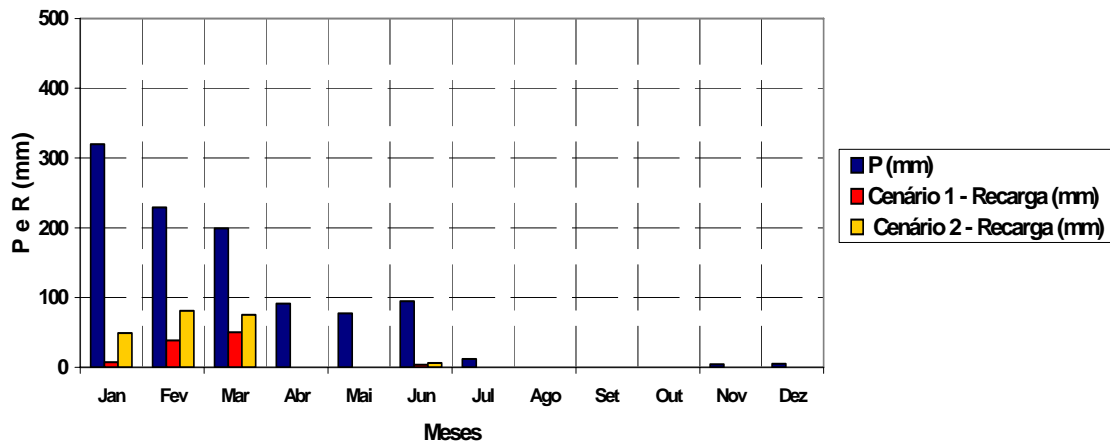
O modelo BALSEQ forneceu as recargas das sub-bacias da bacia do Rio de Peixe nos anos de 2004 a 2007 para o cenário 1 e o cenário 2, as quais estão apresentadas na Tabela 4.5.15 e nas correspondentes Figuras 4.5.14 a 4.5.17.

Como se pode ver nas Figuras 4.5.14 a 4.5.17, as taxas de precipitação mensais e anuais apresentam-se irregularmente distribuídas no tempo e no espaço. Como consequência, o mesmo comportamento irregular ocorre nas taxas de recarga.

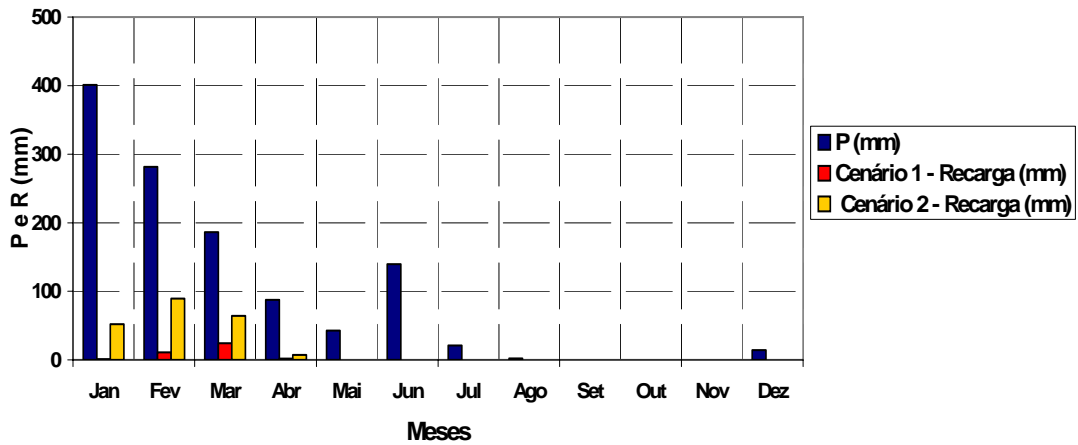
Tabela 4.5.15 - Recarga Médias Mensais [mm] nas Sub-Bacias nos anos de 2004 a 2007 obtidas pelo modelo BALSEQ

ANO	Mês	Brejo das Freiras			Souza			Pombal		
		Precipitação (mm)	Cenário 1	Cenário 2	Precipitação (mm)	Cenário 1	Cenário 2	Precipitação (mm)	Cenário 1	Cenário 2
		Recarga (mm)	Recarga (mm)	Recarga (mm)	Recarga (mm)	Recarga (mm)	Recarga (mm)	Recarga (mm)	Recarga (mm)	Recarga (mm)
ANO 2004	Jan	319,90	7,19	49,15	400,87	1,24	52,09	482,80	0,00	94,13
	Fev	229,36	38,37	81,20	281,57	10,91	89,49	335,74	21,44	123,65
	Mar	199,19	50,20	75,13	186,40	24,55	64,42	190,10	31,69	66,00
	Abr	91,32	0,00	0,00	87,76	1,77	7,42	65,99	0,00	0,00
	Mai	77,33	0,00	0,00	42,84	0,00	0,00	35,11	0,00	0,00
	Jun	94,80	3,60	6,11	139,56	0,00	0,00	157,89	0,00	0,00
	Jul	11,92	0,00	0,00	21,17	0,00	0,00	22,51	0,00	0,00
	Agô	0,14	0,00	0,00	2,17	0,00	0,00	3,57	0,00	0,00
	Set	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Out	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nov	4,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dez	4,96	0,00	0,00	14,59	0,00	0,00	8,83	0,00	0,00
Total	1033,30	99,37	211,60	1177,04	38,48	213,42	1302,54	53,13	283,78	
ANO 2005	Jan	45,89	0,00	0,00	33,58	0,00	0,00	34,03	0,00	0,00
	Fev	60,67	0,00	0,00	45,34	0,00	0,00	57,35	0,00	0,00
	Mar	229,32	0,35	11,09	396,75	2,40	65,00	232,69	0,00	32,62
	Abr	121,54	3,80	22,52	71,54	0,25	7,49	49,80	0,00	0,00
	Mai	77,15	5,32	5,46	57,29	0,00	0,00	109,33	0,00	5,60
	Jun	34,54	0,00	0,00	9,50	0,00	0,00	9,13	0,00	0,00
	Jul	0,95	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Agô	1,19	0,00	0,00	3,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Set	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Out	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nov	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	67,38	0,00	0,00
	Dez	31,16	0,00	0,00	22,07	0,00	0,00	67,38	0,00	0,00
Total	602,40	9,47	39,08	639,60	2,65	72,50	627,11	0,00	38,22	
ANO 2006	Jan	37,95	0,00	0,00	36,37	0,00	0,00	5,73	0,00	0,00
	Fev	223,07	0,00	0,02	224,02	0,18	1,53	408,44	0,00	43,83
	Mar	169,52	0,05	34,54	263,77	4,41	67,33	156,92	0,00	41,56
	Abr	215,53	33,88	72,04	322,19	26,30	143,26	194,27	14,31	93,73
	Mai	200,27	55,77	82,11	182,91	46,69	84,57	129,54	39,45	57,72
	Jun	11,72	0,00	0,00	11,26	0,00	0,00	15,65	0,00	0,00
	Jul	6,69	0,00	0,00	5,50	0,00	0,00	5,57	0,00	0,00
	Agô	9,12	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	6,50	0,00	0,00
	Set	1,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Out	17,79	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00	3,79	0,00	0,00
	Nov	0,07	0,00	0,00	2,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dez	61,68	0,00	0,00	16,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	954,86	89,69	188,71	1071,48	77,59	236,70	926,40	53,75	236,84	
ANO 2007	Jan	22,29	0,00	0,00	24,53	0,00	0,00	2,10	0,00	0,00
	Fev	206,25	0,00	2,95	259,17	0,00	0,00	379,70	0,00	35,65
	Mar	80,72	0,00	8,92	94,21	0,42	10,54	58,30	0,00	11,99
	Abr	153,89	0,00	7,34	170,55	0,00	0,00	210,30	0,00	3,98
	Mai	55,51	0,00	0,00	74,17	0,00	1,36	132,30	0,00	18,67
	Jun	16,87	0,00	0,00	56,38	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00
	Jul	0,00	0,00	0,00	3,26	0,00	0,00	22,50	0,00	0,00
	Agô	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Set	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Out	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Nov	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dez	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	535,53	0,00	19,22	682,26	0,42	11,91	826,20	0,00	70,28	

Sub - Bacia Brejo das Freiras - Ano 2004



Sub - Bacia Sousa - Ano 2004



Sub - Bacia Pombal - Ano 2004

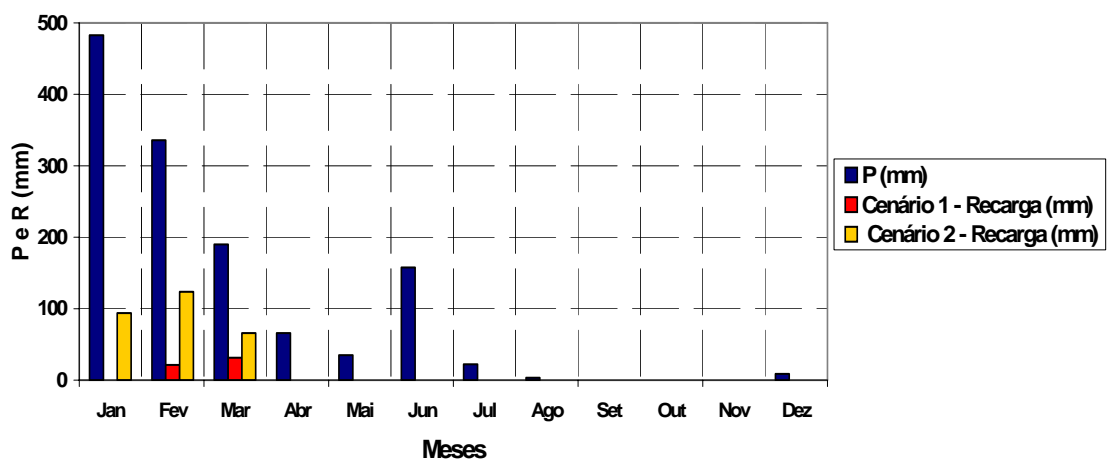
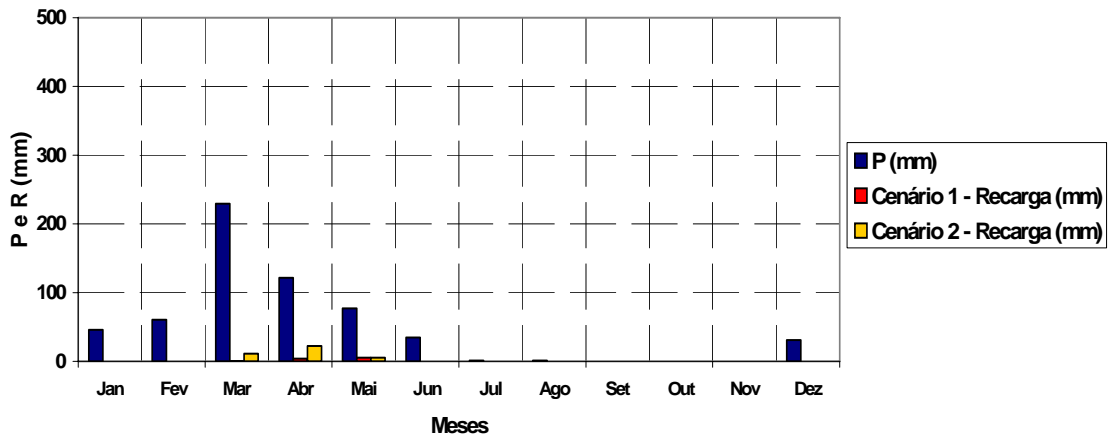
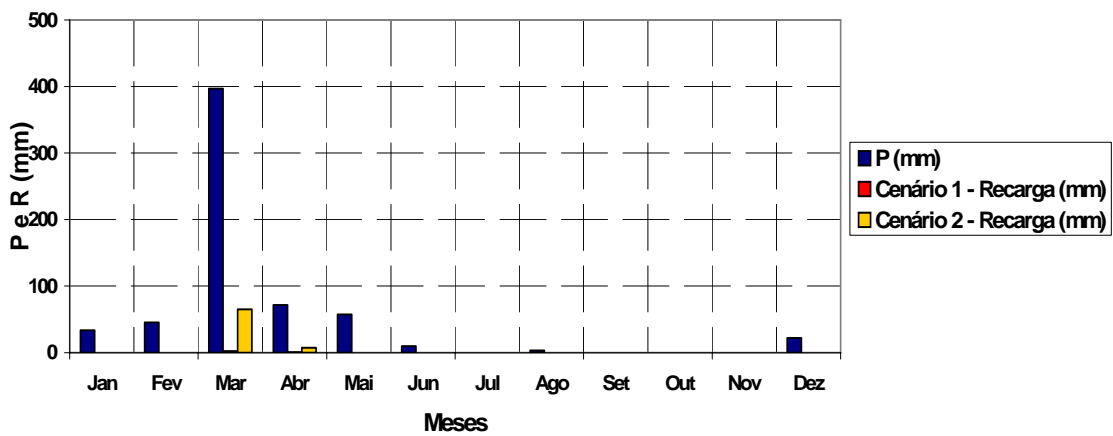


Figura 4.5.14 - Taxas mensais da precipitação e da recarga do cenário 1 e do cenário 2 nas três sub-bacias no ano de 2004.

Sub - Bacia Brejo das Freiras - Ano 2005



Sub - Bacia Sousa - Ano 2005



Sub - Bacia Pombal - Ano 2005

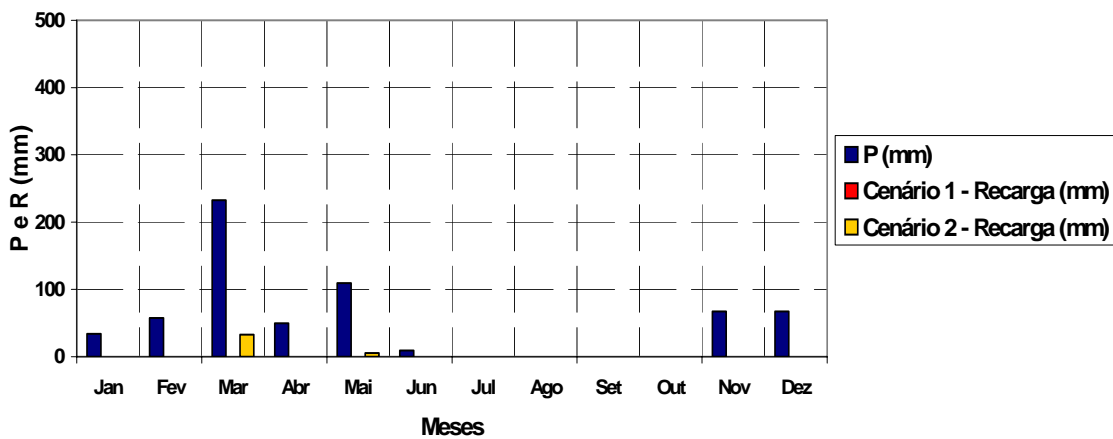
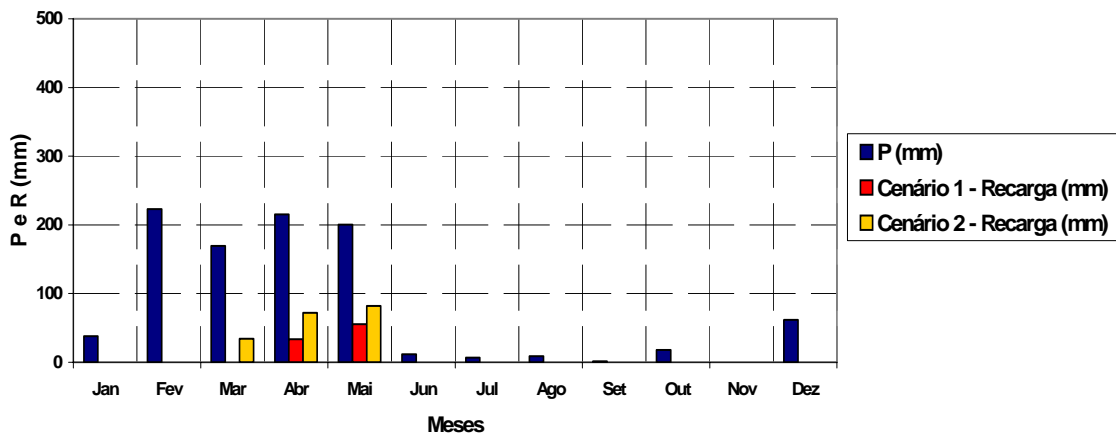
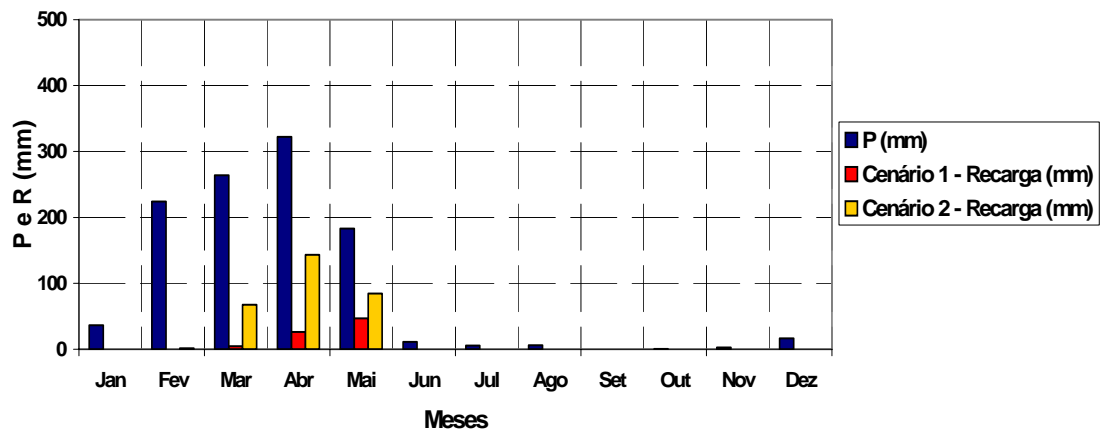


Figura 4.5.15 - Taxas mensais da precipitação e da recarga do cenário 1 e cenário 2 das sub-bacias no ano de 2005.

Sub - Bacia Brejo das Freiras - Ano 2006



Sub - Bacia Sousa - Ano 2006



Sub - Bacia Pombal - Ano 2006

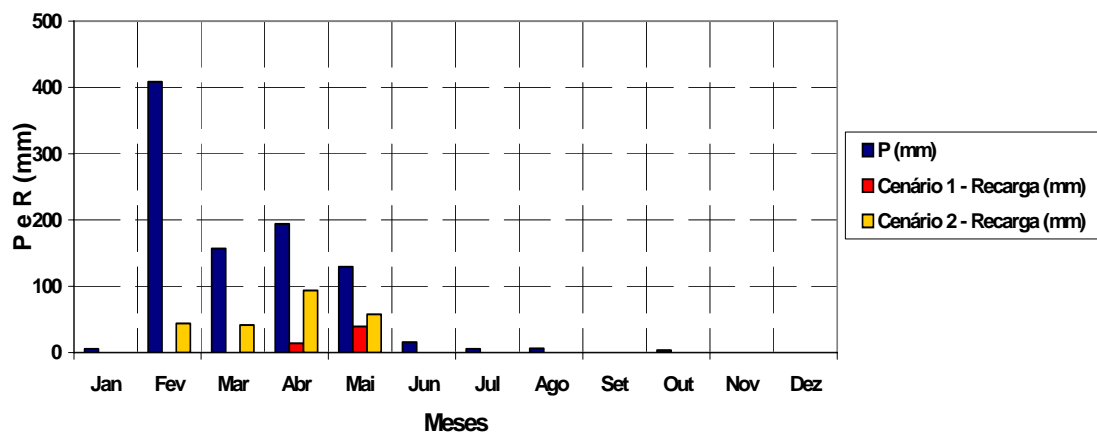
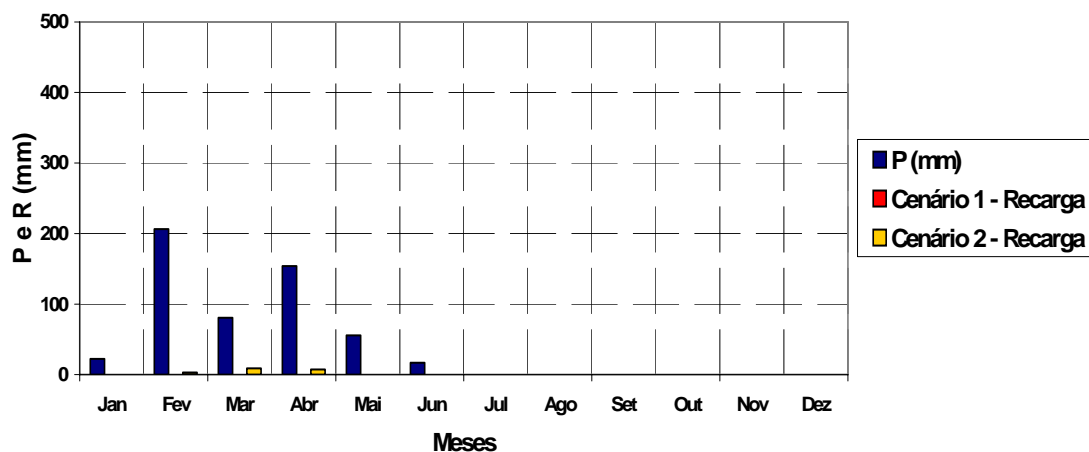
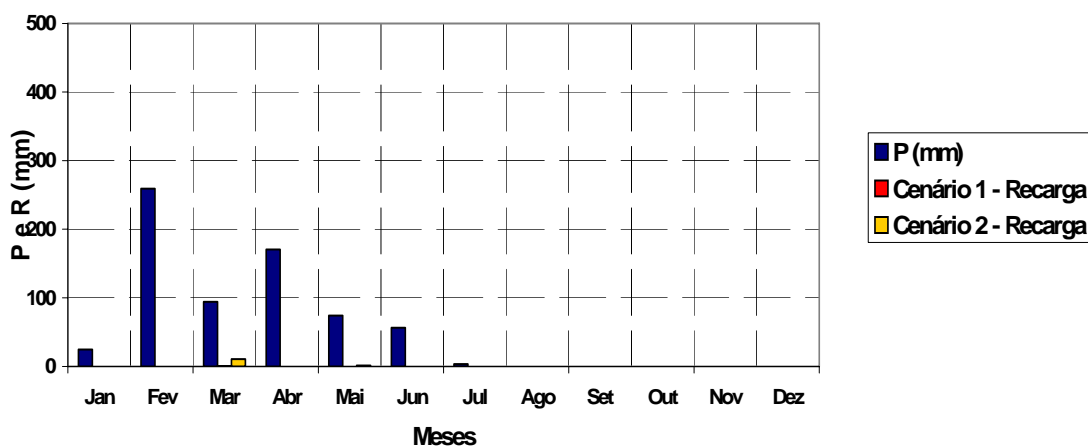


Figura 4.5.16 - Taxas mensais da precipitação e da recarga do cenário 1 e cenário 2 das sub-bacias no ano de 2006.

Sub - Bacia Brejo das Freiras - Ano 2007



Sub - Bacia Sousa - Ano 2007



Sub - Bacia Pomal - Ano 2007

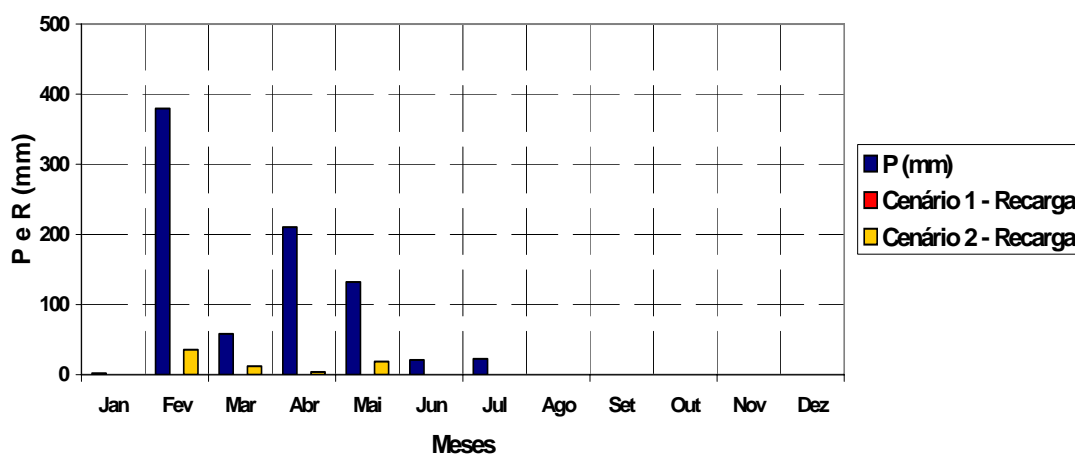


Figura 4.5.17 - Taxas mensais da precipitação e da recarga do cenário 1 e cenário 2 das sub-bacias no ano de 2007.

A Tabela 4.5.16 e a correspondente Figura 4.5.18 apresentam as taxas de recarga nas sub-bacias nos anos 2004 a 2007, para os dois cenários considerados. A recarga média em toda a bacia nos mesmos anos pode ser encontrada na citada Tabela 4.5.16 .

Observa-se que a recarga do cenário 2, que inclui a cobertura aluvial (cerca de 40 % da área total das formações geológicas) é significativamente mais alta que a recarga do cenário 1, sem os aluviões. O valor médio do fator *CN* encontrado para o aluvião é mais baixo que aqueles das outras formações geológicas, ou seja, na superfície aluvial o escoamento superficial é menor e, portanto, a taxa de infiltração é maior.

Tabela 4.5.16 - Taxas de recarga anuais (2004-2007) das Sub-Bacias e médias na bacia para cenário 1 e cenário 2

Sub - Bacia	Área (km ²)	ANO 2004			ANO 2005		
		Precipitação (mm)	Cenário 1 Recarga (mm)	Cenário 2 Recarga (mm)	Precipitação (mm)	Cenário 1 Recarga (mm)	Cenário 2 Recarga (mm)
Brejo das Freiras	498,28	1033,30	99,37	211,60	602,40	9,47	39,08
Sousa	727,18	1177,04	38,48	213,42	639,60	2,65	72,50
Pombal	89,99	1302,54	53,13	283,78	627,11	0,00	38,22
Valor médio (mm)		1131,18	62,55	217,54	624,65	5,05	57,49
Taxa de Recarga (%)		-	5,53%	19,23%	-	0,81%	9,20%
Sub - Bacia	Área (km ²)	ANO 2006			ANO 2007		
		Precipitação (mm)	Cenário 1 Recarga (mm)	Cenário 2 Recarga (mm)	Precipitação (mm)	Cenário 1 Recarga (mm)	Cenário 2 Recarga (mm)
Brejo das Freiras	498,28	954,86	89,69	188,71	535,53	0,00	19,22
Sousa	727,18	1071,48	77,59	296,70	682,26	0,42	11,91
Pombal	89,99	926,40	53,75	236,84	826,20	0,00	70,28
Valor médio (mm)		1017,38	80,54	251,70	636,53	0,24	18,67
Taxa de Recarga (%)		-	7,92%	24,74%	-	0,04%	2,93%

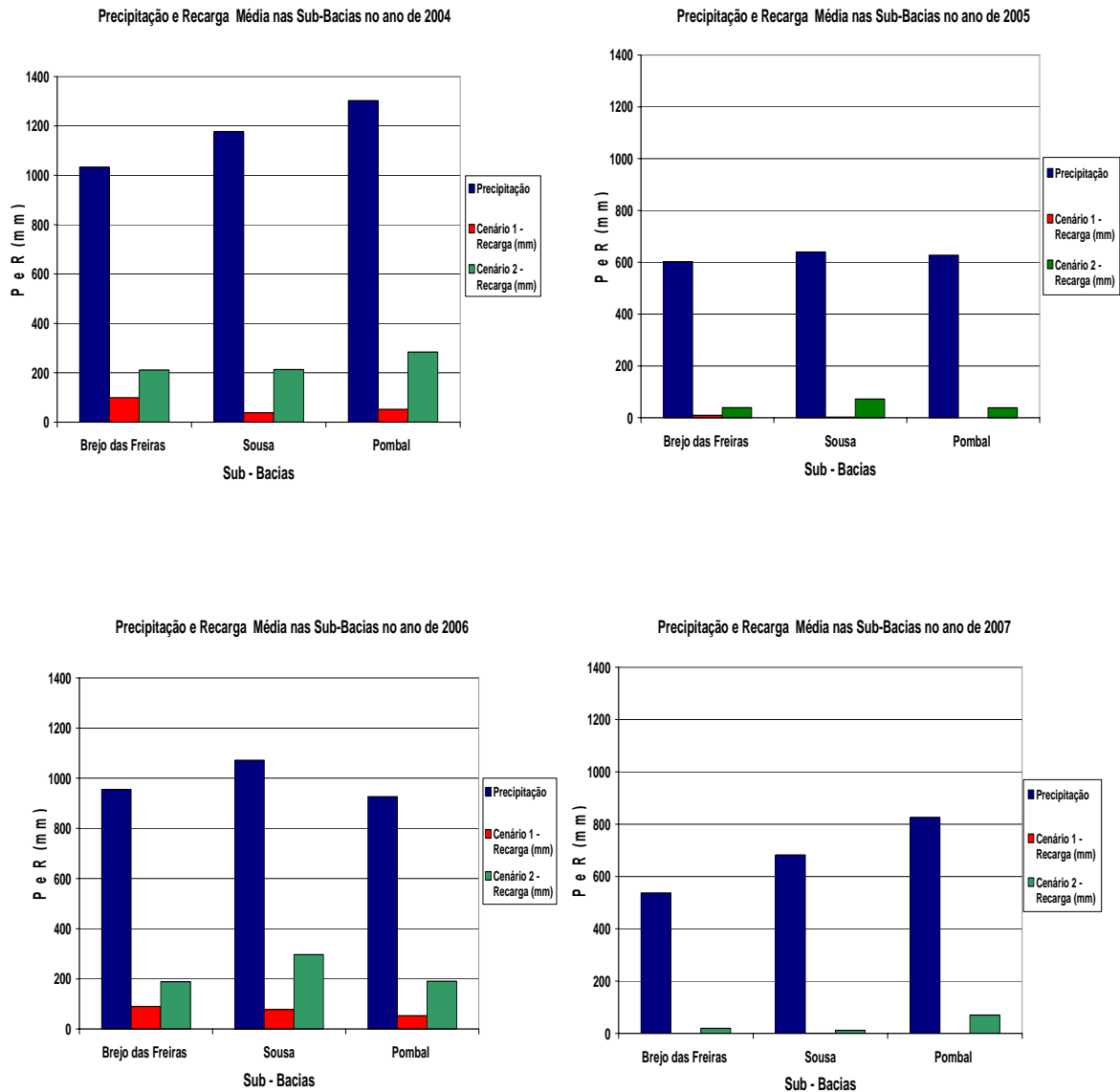


Figura 4.5.18 - Taxas de recarga anuais (2004-2007) das Sub-Bacias para cenário 1 e cenário 2.

4.5.3. COMENTÁRIOS

O método clássico de Thonhwaite & Mather calcula excedentes e déficits hídricos usando apenas dados climatológicos, como a taxa medida de precipitação e a temperatura, para fazer um balanço hídrico da área em estudo, definindo uma recarga potencial de água subterrânea, enquanto o modelo BALSEQ calcula a infiltração profunda, em função dos parâmetros de tipo e uso de solo, empregando o método do Soil Conservation Service (1972) para o cálculo do escoamento superficial e um balanço hídrico na zona radicular. Ignorando o efeito da redistribuição da umidade na zona não saturada, esta infiltração profunda calculada representa a

recarga efetiva de água subterrânea. Assim, o modelo BALSEQ é capaz de fornecer valores de recarga mais realísticos, em comparação com os demais modelos simples de balanço hídrico.

O método de Thornthwaite & Mather (1955) fornece apenas o valor-limite para a recarga e não a recarga real. O seu valor é mais qualitativo e, portanto mais apropriado para delimitações hidro-climatológicas de regiões. Diferentemente, o método BALSEQ permite, em princípio, determinar a recarga real num certo local da bacia, em função do tipo de solo e uso do solo. Contudo, para isso, faz-se necessário, além de conhecer parâmetros da zona radicular, confeccionar mapas de solo, vegetação e uso de solo, o que significa um maior volume de informações necessárias para sua utilização.

Comparando os dois cenários simulados, as taxas medias de recarga em toda a bacia, nos anos de 2004 à 2007 (Tab.4.5.16) foram, para o cenário 1 (sem cobertura aluvial), de 5,53%, 0,81%, 7,92% e 0,04% da taxa de precipitação, respectivamente. No cenário 2, as taxas de recarga foram 19,23%, 9,20%, 24,74% e 2,93%. Considerando as incertezas, ainda reinantes, sobre a geologia e as dimensões do sistema aquífero, amplamente discutidas no capítulo 3 deste relatório, os valores referidos acima podem ser considerados como limites inferiores e superiores da estimativa das taxas de recarga nos anos considerados.

Analisando as recargas durante o período de 4 anos, observa-se que apesar de 2004 ter uma precipitação maior que 2006, a taxa de recarga do ano 2006 foi superior àquela do ano de 2004. Este fato ocorre em virtude da distribuição espacial da precipitação, dependendo da intensidade da chuva, variando em função do tipo de solo, podendo assim, ocorrer a combinação de intensidades de chuvas maiores em áreas de recarga mais propícias.

Concluindo, pode-se dizer que ambos os métodos aplicados para a estimativa de recarga padecem de um alto grau de incerteza. Contudo, trata-se de uma limitação inerente a todos os métodos de recarga conhecidos, por causa da enorme complexidade hidrológica da zona não-saturada associada à falta de registros confiáveis de dados de campo em quantidade suficiente.

4.6. ELABORAÇÃO DE MODELOS DE FLUXO

Os modelos computacionais de simulação de fluxo e de transporte de massa são as ferramentas mais avançadas de que se dispõe atualmente para a avaliação e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, por permitirem, não só a quantificação das recargas, reservas e descargas naturais dos sistemas aquíferos simulados, como também a previsão de suas reações às intervenções antrópicas, que ocorrem em geral na forma de exploração através de poços e barramentos ou de poluição através do lançamento de resíduos das atividades urbanas ou industriais.

Neste capítulo do presente relatório são apresentadas as etapas de desenvolvimento e os resultados da aplicação de um modelo da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, desde a elaboração do modelo conceitual, passando pela construção do modelo numérico e calibragem dos seus parâmetros hidrodinâmicos e culminando pela avaliação da recarga do sistema aquífero.

4.6.1. MODELO CONCEITUAL

O modelo conceitual do sistema aquífero da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe foi elaborado com base nas informações existentes nos trabalhos anteriores realizados na área (Françolin, 1992, Albuquerque 1984, Lima Filho, 1991, ver Cap. 2) e também nos dados coletados em campo nas campanhas feitas pelas equipes da CPRM e UFCG durante o período de maio de 2005 até junho 2007.

A Figura 4.6.1 mostra uma das configurações geológicas propostas para a bacia (ver Cap. 3). Apesar das posições sobrepostas das formações Antenor Navarro, Souza, Rio Piranhas e Aluviões, algumas constituindo aquíferos e uma, a formação Souza, funcionando também como aquífero, o modelo conceitual, partindo do princípio da interligação hidrodinâmica entre as diversas camadas sedimentares, adotou uma única camada aquífera, abrangendo a espessura total da bacia. Portanto, os parâmetros hidráulicos desse modelo seriam equivalentes ao das diversas camadas e não sofrem variação vertical.

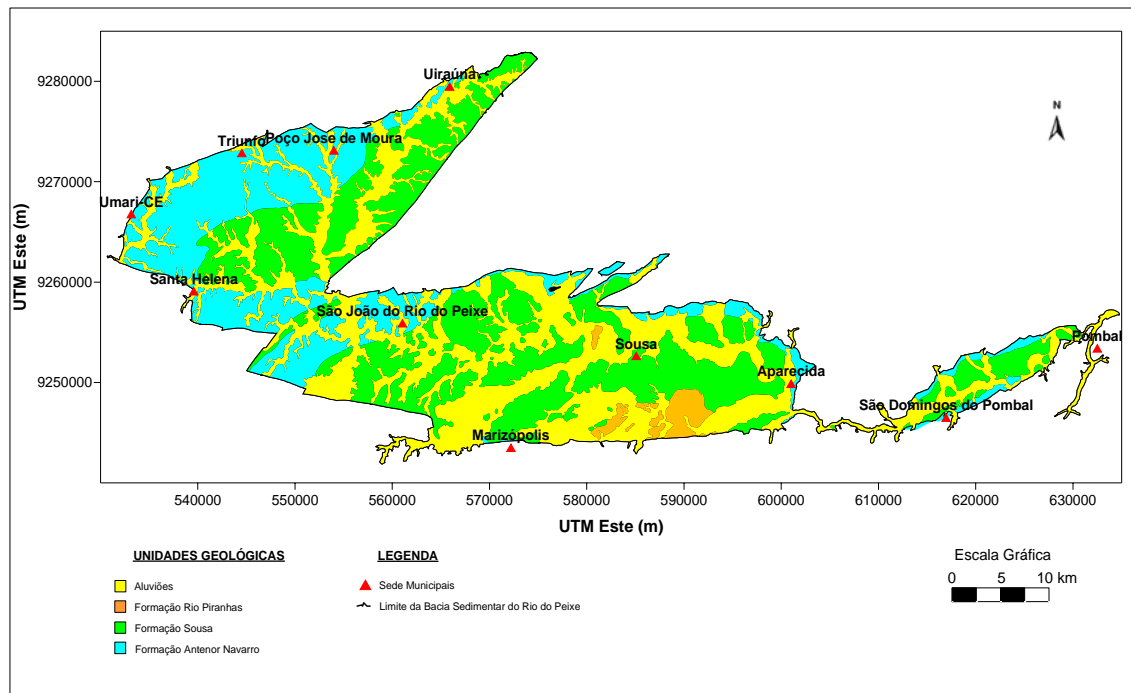


Figura 4.6.1 - Mapa das formações geológicas e os limites da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe

A simplificação dos diversos sistemas aquíferos em uma única camada deve-se a fatores como: a falta de conhecimento sobre a geometria vertical das formações; falta de estudos dos parâmetros hidrogeológicos entre as formações; maior complexidade do modelo com maior número de parâmetros a se determinar por calibração e, conseqüentemente, aumento da incerteza dos resultados.

Esta estrutura conceitual adotada, de um aquífero único freático, apresenta, portanto, a vantagem da simplicidade e da economia de dados e cálculos no correspondente modelo numérico bidimensional, em comparação com um sistema de múltiplos aquíferos, que exigiria dados detalhados de espessuras de camadas (indisponíveis) bem como uma modelagem numérica tridimensional.

Cabe ressaltar que, originalmente se tentou utilizar o modelo tridimensional, com a disposição em camadas de acordo com o sistema proposto por Françolin (1992), porém pelos motivos já citados, além de ter sido verificada uma difícil convergência do modelo, este foi abandonado.

A área escolhida para ser modelada foi a totalidade da bacia sedimentar, excluída, mais tarde, a sub-bacia de Pombal por causa da uma conexão estreita com a bacia principal. Os rios da bacia, de regime intermitente, mostrados na Figura 4.6.2, também foram considerados no modelo.

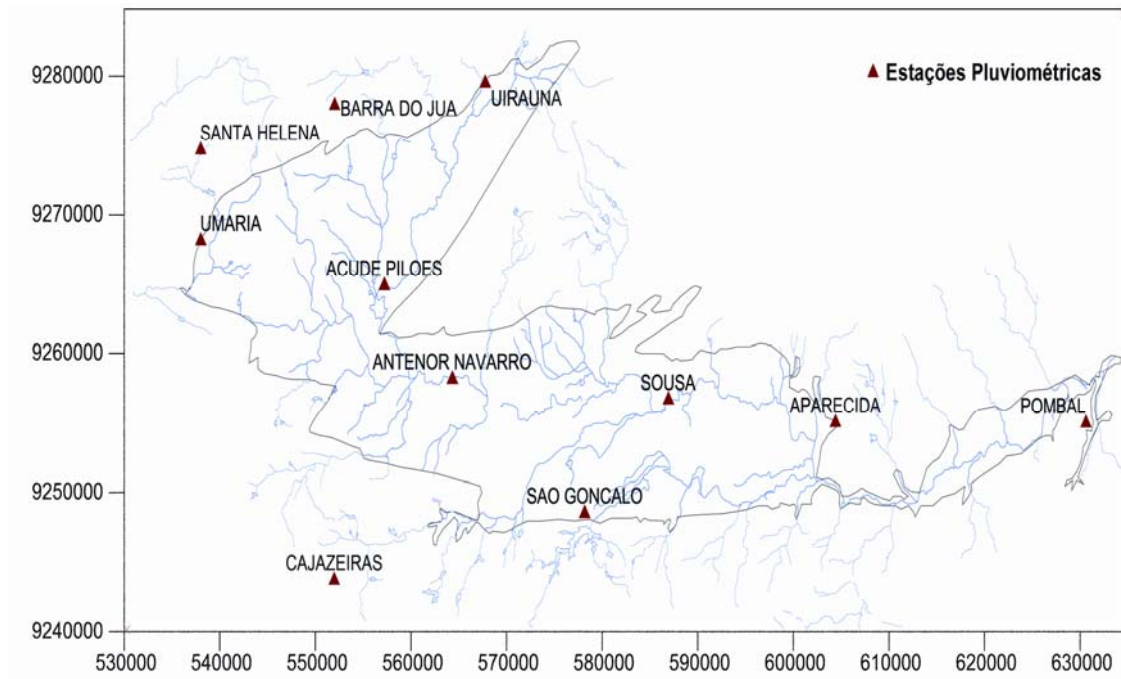


Figura 4.6.2 - Hidrografia da região e estações pluviométricas instaladas.

Não foi feito, em campo, um levantamento completo de topografia da superfície (ver Cap. 2) e tampouco foi possível determinar, em campo, a topografia da base da camada sedimentar através sondagens mecânicas e geofísicas, por causa da grande profundidade do embasamento cristalino (idem). A topografia da superfície e as cotas da altitude topográfica dos poços foram conseguidas através de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), com pontos coletados em uma malha de 90 x 90 metros.

As Figuras 4.6.3 e 4.6.4 mostram os dados topográficos da área, a primeira, conforme acima explicado, extraída de imagens *SRTM*; e a segunda, extraída do trabalho de Françaolin (1992), com grande grau de incerteza.

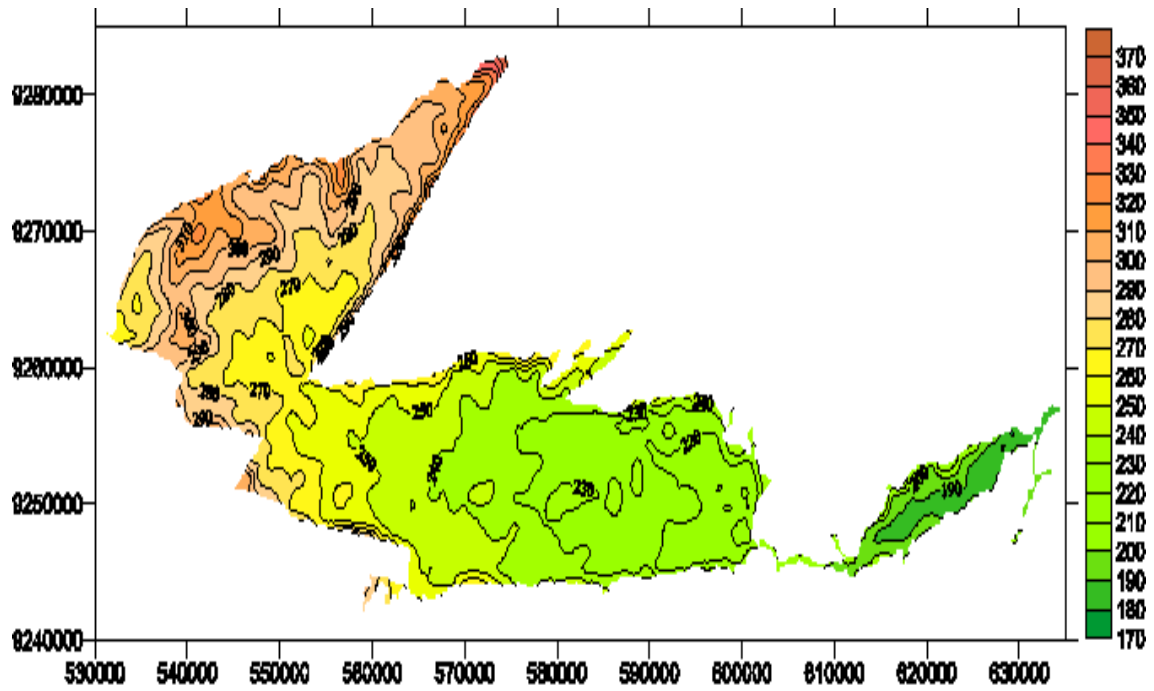


Figura 4.6.3 - Topografia em metros acima do nível gerada a partir de imagens SRTM.

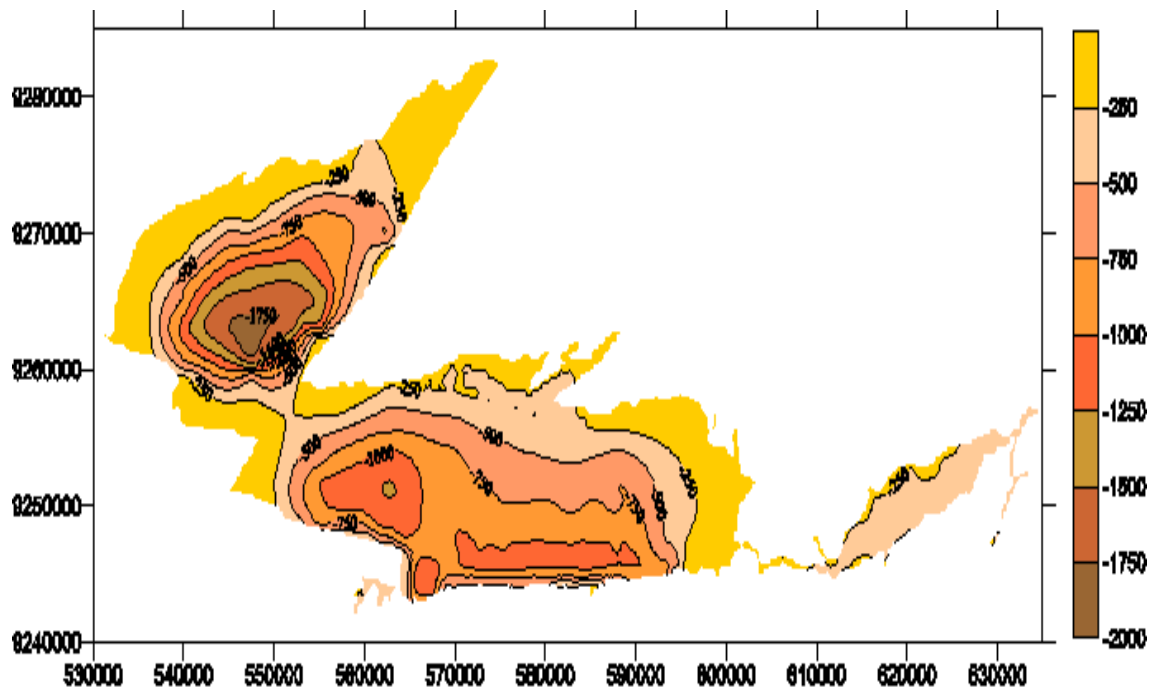


Figura 4.6.4 - Topografia da base do modelo em metros acima do nível de mar gerada a partir da análise dos dados gravimétricos (Françolin, 1992).

A Figura 4.6.5 apresenta a distribuição mensal das taxas médias de precipitação da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe entre janeiro de 2005 e setembro de 2006.

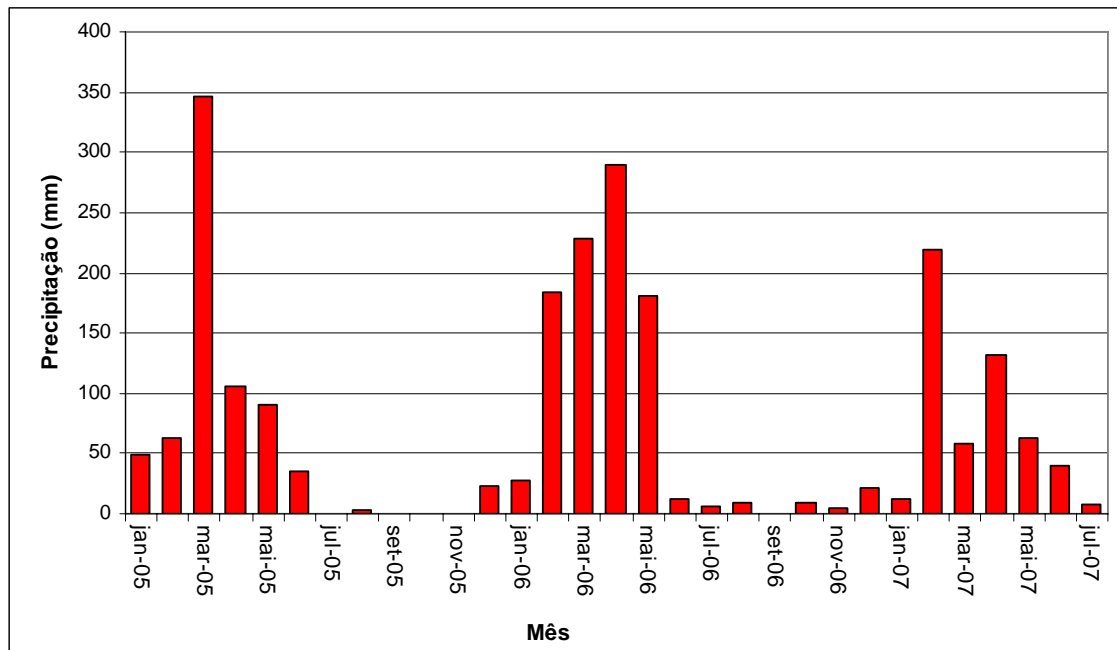


Figura 4.6.5 - Histograma de chuvas na bacia do Rio de Peixe entre janeiro de 2005 e julho de 2007.

Quanto aos níveis potenciométricos, a serem utilizados para a calibração e verificação do modelo, estes foram coletados em um total de 7 (sete) campanhas realizadas pelas equipes da CPRM e da UFCG ([Anexo A4.1](#)).

O total de poços que tiveram seus níveis estáticos coletados chegou a 163, sendo 127 tubulares e 36 amazonas. Os poços amazonas foram desconsiderados para a modelagem. Todos os poços utilizados com localização, níveis estáticos, cotas e data das medições são mostrados no [Anexo A4.1](#) – Cap. 4.

4.6.2. MODELO NUMÉRICO COMPUTACIONAL

Neste estudo foi assumido um aquífero bi-dimensional, não-confinado, isotrópico e não-homogêneo, ou seja, a direção vertical não foi considerada. A equação geral de fluxo subterrâneo é formulada pela combinação da equação de balanço hídrico com a lei de Darcy. A partir disso, a equação de fluxo é expressa para este tipo de aquífero como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + R = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{com } T = K(h-b) \quad (4.6.1)$$

onde h = carga hidráulica [m], T = transmissividade [m^2/s], K = condutividade hidráulica [m/s], R = fonte/sumidouro que representa recarga e descarga [m^3/s], S_y = coeficiente de armazenamento ou porosidade efetiva, b = elevação do embasamento [m] e t = tempo [s].

Para resolver a equação de fluxo é preciso conhecer as condições de contorno compreendendo os três tipos seguintes:

1. $h = h_1$ carga hidráulica especificada no contorno do domínio (condição de Dirichlet)
2. $-T \cdot \vec{\nabla} h \cdot \vec{n} = q_1$ fluxo especificado no contorno (condição de Neumann)
3. $-T \cdot \vec{\nabla} h \cdot \vec{n} = \tau(h' - h)$ fluxo dependendo da carga hidráulica (condição de Cauchy)

onde T = transmissividade, h_1 = carga hidráulica especificada no aquífero, h' = carga hidráulica especificada no aquífero superior e/ou inferior ou o nível de água no manancial superficial, q_1 = fluxo especificado, τ = condutância [m^2/s] e n = vetor unitário ortogonal ao contorno.

A equação diferencial parcial (Eq. (4.6.1)) pode ser representada pela aproximação de Diferenças Finitas. Por isso, o domínio do modelo é discretizado por uma malha formada por retângulos da dimensão Δx e Δy e seu contorno é definido com as respectivas condições de contorno.

O método de diferenças finitas é utilizado para resolver a equação diferencial de fluxo pelo programa *MODFLOW* desenvolvido no *United States Geological Survey (USGS)* por McDonald e Harbaugh (1988). A solução do modelo é a solução de um sistema das equações lineares que é feita geralmente por vários diferentes procedimentos iterativos ou diretos oferecidos pelo próprio *MODFLOW*, até que seja encontrada a convergência na solução.

Para a realização da modelagem de fluxo da área foi utilizado o programa *PMWIN*, ou *Processing Modflow for Windows* (Chiang e Kinzelbach, 2003), o qual é um pré e pós-processador do *MODFLOW*, (McDonald e Harbaugh, 1988). O programa *MODFLOW - PMWIN* utiliza o método de diferenças finitas para a resolução da equação de fluxo subterrâneo tridimensional e é caracterizado por uma variedade de sub-rotinas que calculam as características do sistema tais como: recarga (*Recharge*), drenos e rios (*Drain e River*), evapotranspiração (*Evapotranspiration*) e poços (*Well*), entre outros.

As calibrações dos parâmetros do modelo no regime estacionário (condutividades hidráulicas) e regime não estacionário (coeficiente de armazenamento e recarga) foram feitas através do programa *PEST (Parameter Estimation)* (Doherty et al, 1994), o qual vem incorporado ao *PMWIN*. O *PEST* estima automaticamente os parâmetros utilizando o método dos mínimos quadrados. Para o cálculo do balanço hídrico no modelo total e as respectivas sub-regiões selecionadas foi utilizado o programa *WATER BUDGET* também incorporado ao *PMWIN*.

Esquematização do Modelo

O tamanho da malha selecionado estendeu-se 107.000 m (107 km) em direção Norte-Sul e 45.000 m (45 km) em direção Oeste-Leste. A malha foi discretizada, horizontalmente, de forma regular, com as células possuindo dimensão de 500 m x 500 m em todo o domínio do modelo, ou seja, 90 linhas e 214 colunas em total.

No plano vertical o modelo foi dividido apenas em uma camada, ou uma única unidade hidroestratigráfica. A discretização da malha é apresentada na Figura 4.6.6.

As condições de contorno utilizadas neste modelo são do tipo externas e internas. As condições externas definem os limites da bacia, que podem apresentar fluxo especificado, carga hidráulica especificada e fluxo dependente da carga hidráulica. As condições internas, especialmente o fluxo dependente da carga hidráulica, definem a hidrografia, poços, recarga e reservatórios entre outras características internas da área.

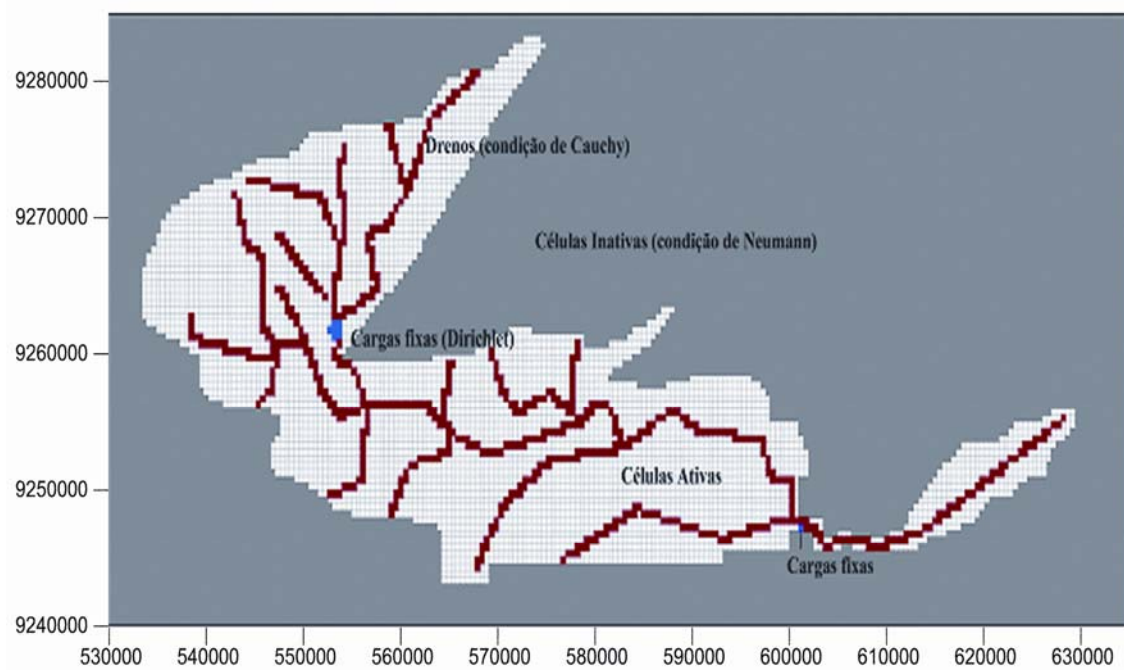


Figura 4.6.6 - Malha e condições de contorno utilizadas no modelo.

Neste estudo, as condições de contorno, identificadas e adotadas para a modelagem foram as seguintes.

Condições externas: todas as células externas à bacia sedimentar são do tipo fluxo especificado, ou condição de Neumann, neste caso igual a zero, pois ao redor de toda a bacia há o afloramento do cristalino, implicando assim na inexistência de fluxo nestas células contíguas a bacia. Assim todas as células que circundam o modelo são inativas.

Condições internas: a hidrografia foi representada pelo pacote *Drain* do *MODFLOW*. Este pacote é indicado para a representação de rios intermitentes, como no caso de regiões semi-áridas. A taxa de fluxo para o dreno é calculada segundo a expressão $Q = C_d(h - d)$, onde Q é o fluxo (L^3T^{-1}), C_d é a condutância hidráulica equivalente do dreno (L^2T^{-1}), h é a carga hidráulica na célula do dreno (L) e d a elevação do dreno (L). Esta é a condição do tipo fluxo dependente da carga hidráulica, ou condição de Cauchy.

Próximo à divisa das sub-bacias de Brejo das Freiras e Sousa o Rio do Peixe é represado pelo açude Pilões, o maior reservatório localizado no interior da bacia sedimentar. O açude de pilões foi representado pela condição de contorno de carga hidráulica especificada, ou condição

de Dirichlet. As variações sazonais de nível não são consideradas aqui com esta condição de contorno.

Outro local com a condição de potencial de carga especificada, ou condição de Dirichlet, é a saída da sub-bacia Sousa para a sub-bacia Pombal, próximo a cidade de Aparecida.

As retiradas de poços não foram consideradas no modelo estacionário, pois, apesar da existência de cerca de 160 poços ativos ao longo da área de estudo estes estão localizados quase sempre em pequenas propriedades rurais e apresentam retiradas muito pequenas, conforme constatado em visitas aos locais.

4.6.3. CALIBRAÇÃO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS

A calibração do modelo foi realizada tanto no regime estacionária quanto no regime transitório (não-estacionário). A metodologia utilizada para a calibração do modelo está esquematizada no fluxograma mostrado na Figura 4.6.7.

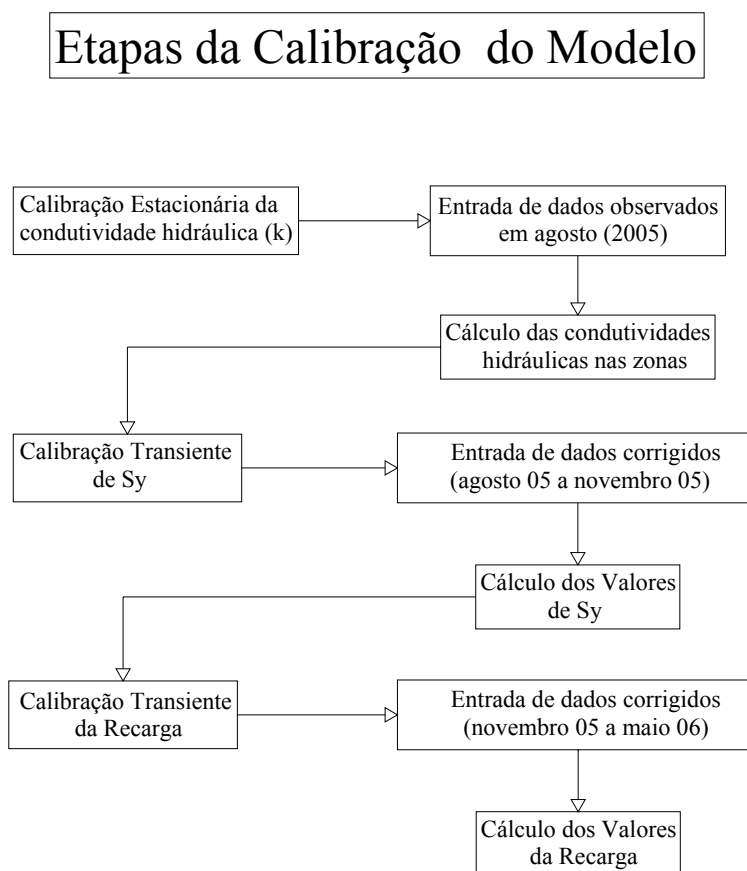


Figura 4.6.7 – Fluxograma das etapas seguidas na calibragem do modelo.

Calibração no Regime Estacionário

O primeiro mapa potenciométrico, que foi utilizado para a calibração das condutividades hidráulicas, foi confeccionado com base em níveis d'água de 71 poços tubulares, medidos na primeira campanha em agosto de 2005 (Fig. 4.6.8).

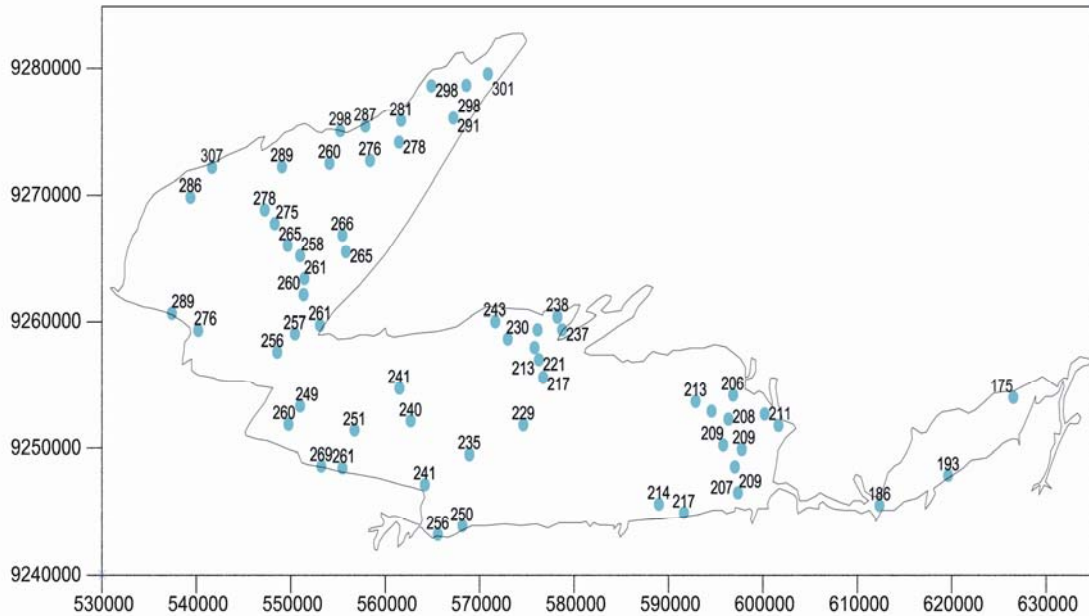


Figura 4.6.8 - Localização dos poços de observação no mês de agosto de 2005 com as respectivas elevações das cargas hidráulicas em metros acima do nível de mar.

O respectivo mapa potenciométrico (Fig. 4.6.9) mostra um fluxo de água subterrânea na direção geral de Oeste para Leste com várias entradas ao lado montanhoso de Oeste que mostra um maior gradiente hidráulico que o na planície da sub-bacia Sousa. Entre UTM (Oeste-Leste) 570.000 e 590.000 há uma grande incerteza na potenciometria hidráulica por falta de poços não descobertos e/ou não existentes.

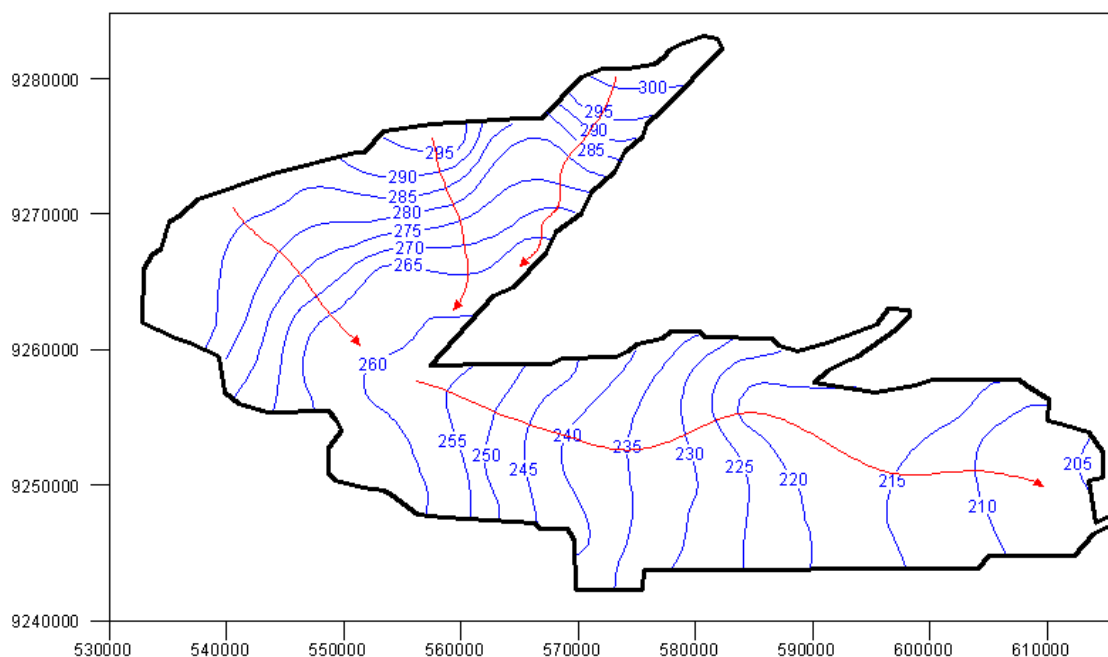


Figura 4.6.9 - Mapa potenciométrico observado com as linhas de fluxo (cor vermelha) para o mês de agosto de 2005.

O mapa potenciométrico observado (Fig. 4.6.9) foi confeccionado através do método de *Kriging* do próprio programa *PMWIN*.

O zoneamento do campo de condutividade hidráulica foi feito com o mapa geológico da bacia (CPRM-UFCG, 2005). Foram selecionadas cinco zonas que representam as formações geológicas nas respectivas sub-bacias do Rio do Peixe (Fig. 4.6.10). Apenas a sub-bacia Pombal não foi considerada, pois não havia suficientes dados de carga hidráulica. Foi admitido que, para cada formação geológica, que, consta no mapa citado acima, a condutividade seria homogênea e assim estas áreas não foram subdivididas, sendo calibrado, portanto um único valor de *K* para cada formação em cada uma dessas áreas.

A técnica de calibração utilizada consiste de ajustar os valores de condutividade hidráulica com o auxílio do programa de estimação automático de parâmetros, *PEST* (Doherty et al, 1994), de maneira que as diferenças entre os valores das cargas hidráulicas calculadas e cargas hidráulicas observados nos locais dos poços com medição satisfazem a condição do método de

$$\text{mínimo quadrado } \sum_i^n |h_i^{calc} - h_i^{obs}|^2 = \text{Mínimo.}$$

Os valores da condutividade hidráulica calibrada, K [m/dia], para cada zona são apresentados na Tabela 4.6.1 e a Figura 4.6.11 mostra o mapa potenciométrico calibrado para o mês de agosto de 2005. O digrama na Figura 4.6.12 visualiza a qualidade de calibração mostrando a comparação direta das cargas hidráulicas calculadas, h_i^{calc} , versus cargas hidráulicas observadas, h_i^{obs} .

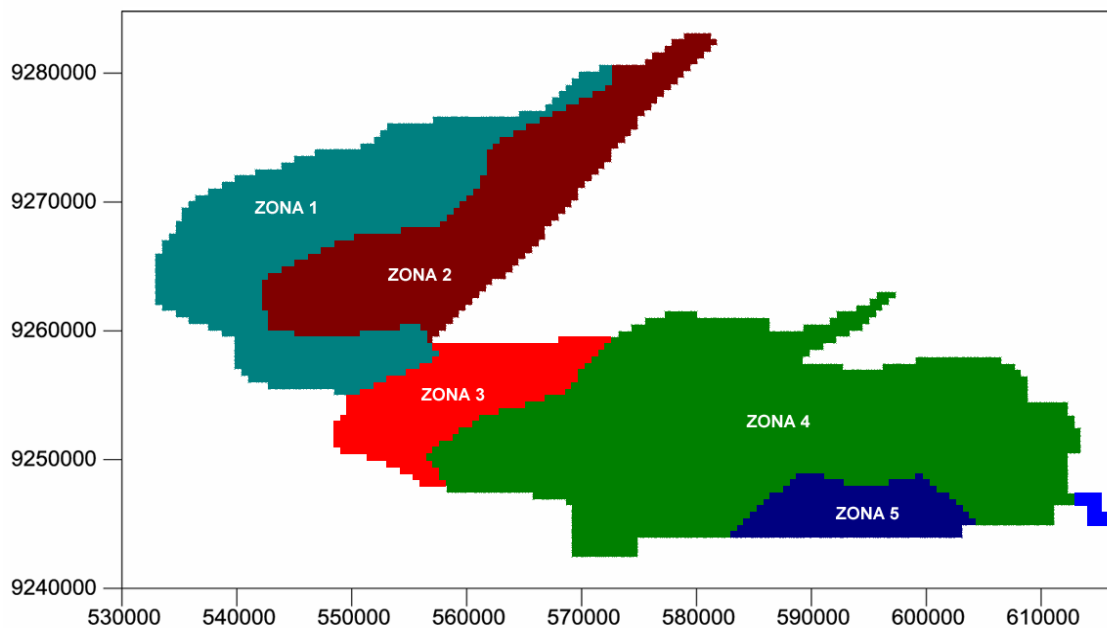


Figura 4.6.10 - Mapa do zoneamento da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe com as respectivas condutividades hidráulicas calibradas.

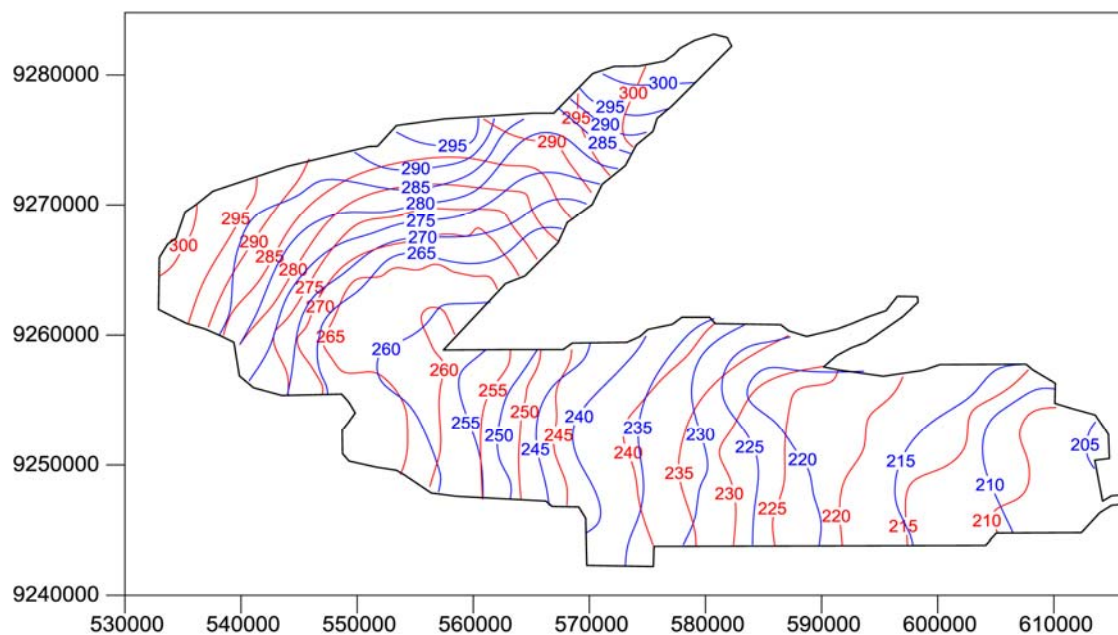


Figura 4.6.11 - Mapa potenciométrico observado (isolinhas azuis) e calibrado (isolinhas vermelhas) para o mês de agosto de 2005 (sem a sub-bacia Pombal).

Tabela 4.6.1 - Valores da condutividade hidráulica calibrada

Sub-bacia	Formação	Zona	K (m/dia)
Brejo das Freiras	Antenor Navarro.	1	0,767
Brejo das Freiras	Sousa	2	0,478
Sousa	Antenor Navarro	3	0,280
Sousa	Sousa	4	0,420
Sousa	Rio Piranhas	5	1,340

Comparação entre Valores Observados e Calculados

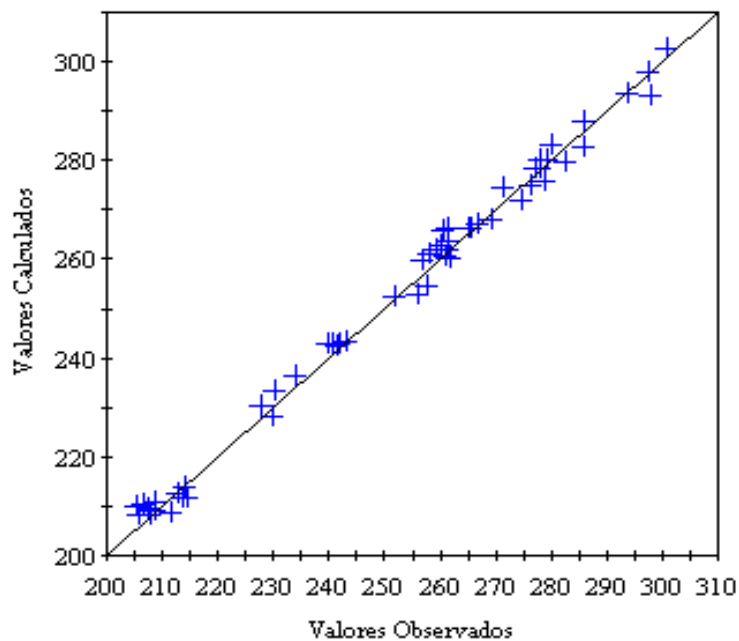


Figura 4.6.12 - Diagrama de dispersão (*Scatterdiagram*) entre cargas hidráulicas calculadas versus cargas hidráulicas observadas (agosto 2005) após da calibração estacionária das condutividades hidráulicas.

A Figura 4.6.13 mostra a distribuição da espessura da zona não saturada e foi confeccionada pela diferença do mapa topográfico (Fig. 4.6.3) e o mapa potenciométrico calibrado (Fig. 4.6.11).

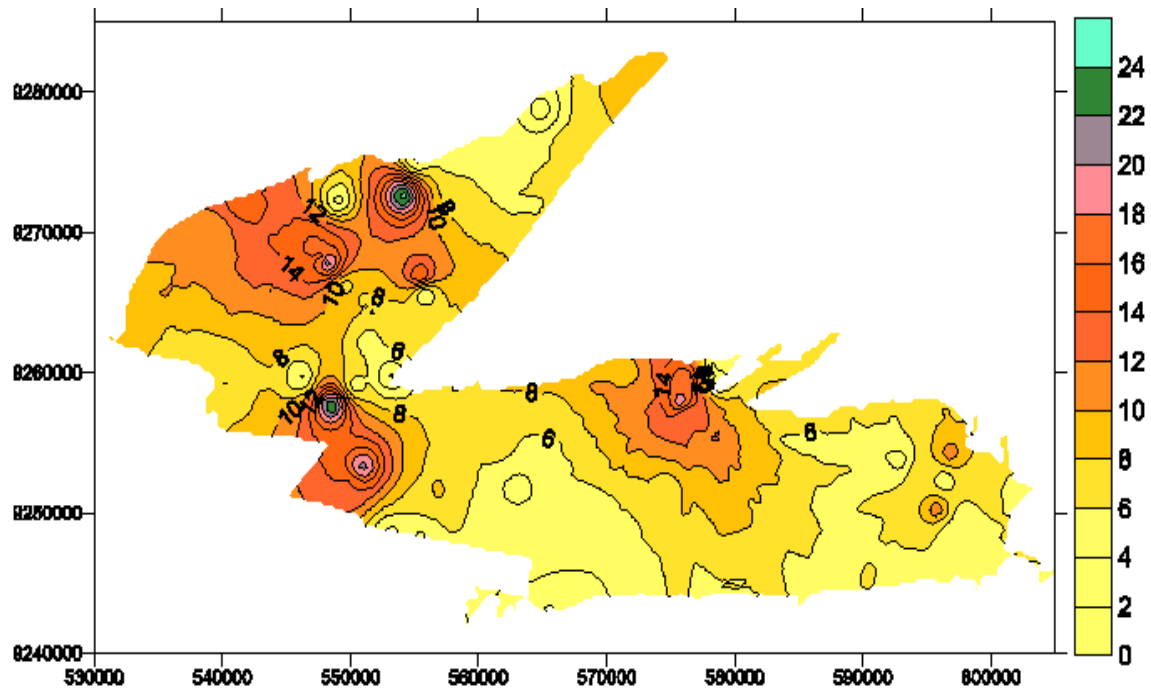


Figura 4.6.13 - Espessura da zona não-saturada (mm) da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

Calibração no Regime Transitório ou Não-Estacionário

Se a variação do nível de água, a partir da medição contínua em poços selecionados durante o período de chuva, for conhecida, como também a porosidade efetiva, S_y do aquífero, é possível uma estimativa de recarga nos locais dos respectivos poços de observação.

Para isso, foram feitas duas calibrações subseqüentes. A primeira determinou os parâmetros S_y em cada zona da bacia utilizando o mesmo zoneamento da calibração da condutividade hidráulica (Fig. 4.6.10); e a segunda tentou calibrar a recarga nestas respectivas zonas, incorporando os parâmetros de armazenamento calibrados.

O armazenamento ou porosidade efetiva, S_y , foi calibrado no período não-chuvoso e, portanto sem recargas, utilizando a variação do nível de água entre as duas medições de nível estático em poços selecionados feitas em agosto e novembro de 2005, enquanto a calibração da recarga, R , utilizou a variação do nível de água entre as duas medições de nível estático feitas em novembro de 2005 e maio de 2005, no período chuvoso, no qual ocorreu provavelmente a maior taxa de recarga.

A calibração dos coeficientes de armazenamento e a das taxas de recarga para as respectivas zonas da bacia foi também realizada com auxílio do programa *PEST*.

A Tabela 4.6.2 mostra os locais dos 21 poços utilizados como dados na calibração transitória, cujos níveis de água foram medidos repetidamente em todas as 7 campanhas de campo realizadas durante o período de maio de 2005 até junho 2007.

Tabela 4.6.2 - 21 poços utilizados na verificação do modelo e nos quais foram medidos níveis nas 7 campanhas

Poço	Latitude	Longitude	Sub-bacia	Formação	Zona
CD324	9275209	555213	Brejo das Freiras	Antenor Navarro	1
CM710	9268385	547566	Brejo das Freiras	Antenor Navarro	1
CN808	9267846	548280	Brejo das Freiras	Antenor Navarro	1
CD983	9266905	555448	Brejo das Freiras	Sousa	2
CD989	9265598	555824	Brejo das Freiras	Sousa	2
P33	9259686	546157	Brejo das Freiras	Antenor Navarro	1
CM689	9263421	551446	Brejo das Freiras	Sousa	2
CM720	9265563	550024	Brejo das Freiras	Sousa	2
CM719	9265264	550972	Brejo das Freiras	Sousa	2
CM673	9262184	551331	Brejo das Freiras	Sousa	2
CM056	9257623	548543	Brejo das Freiras	Antenor Navarro	1
P01	9259076	550440	Brejo das Freiras	Antenor Navarro	1
CM586	9253333	550961	Sousa	Antenor Navarro	3
DW952	9254747	561497	Sousa	Antenor Navarro	3
DV924	9247127	564197	Sousa	Sousa	4
CN797	9252128	562685	Sousa	Sousa	4
DR012	9245362	590399	Sousa	Rio Piranhas	5
CH404	9250237	595800	Sousa	Sousa	4
P48	9252298	596323	Sousa	Sousa	4
CG935	9246474	597321	Sousa	Sousa	4
P47	9249920	597735	Sousa	Sousa	4

A Figura 4.6.14 mostra os gráficos das flutuações de níveis de água nesses poços, confeccionados com os dados que tiveram seus níveis estáticos medidos nas 7 campanhas. Nessa figura, observamos que a maioria dos poços segue um padrão de comportamento em que os níveis freáticos rebaixam-se no período seco, entre agosto à novembro de 2005, e aumentam no período chuvoso, entre novembro de 2005 a maio de 2006. O primeiro período (agosto a novembro de 2005) foi utilizado para a calibração de coeficientes de armazenamento e o segundo período (novembro de 2005 a maio de 2006) para a primeira calibração de recarga. O período entre novembro de 2006 a maio de 2007 não foi muito chuvoso (vide o histograma de chuvas na Fig.4.6.5) e, por isso, a segunda calibração da recarga forneceu baixos valores de taxa de recarga.

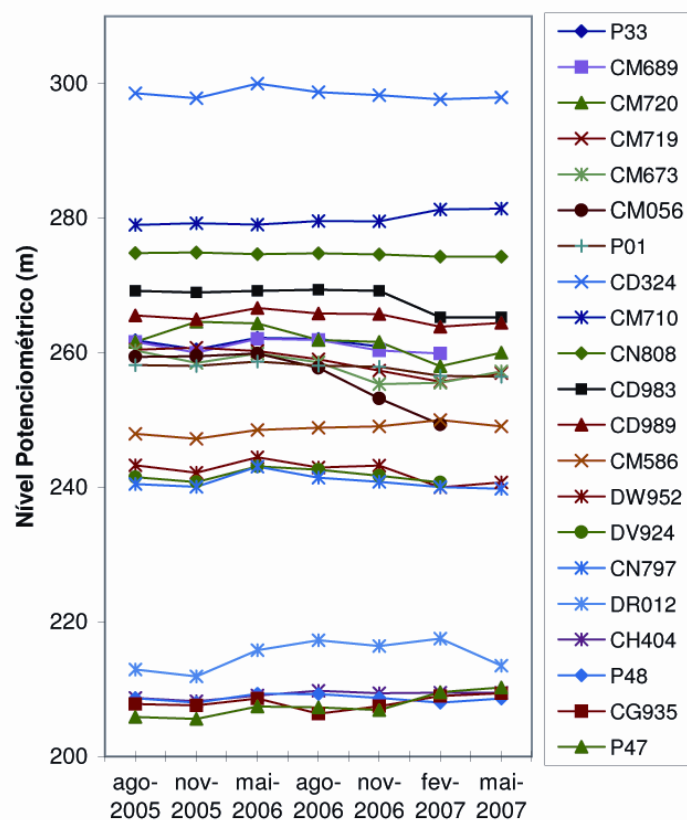


Figura 4.6.14 - Variação dos níveis potenciométricos observados em 21 poços nas 7 campanhas com todas as medições.

A Tabela 4.6.3 apresenta os valores do coeficiente de armazenamento (porosidade efetiva) calibrado, S_y , para cada zona, a Tabela 4.6.4 os valores da primeira recarga calibrada, R , e Tabela 4.6.5 os valores da segunda recarga calibrada.

Tabela 4.6.3 - Valores do coeficiente de armazenamento (porosidade efetiva) calibrado

Sub-bacia	Formação	Zona	S_y
Brejo das Freiras	Antenor Navarro	1	$4,54 \cdot 10^{-2}$
Brejo das Freiras	Sousa	2	$3,67 \cdot 10^{-4}$
Sousa	Antenor Navarro	3	$2,94 \cdot 10^{-2}$
Sousa	Sousa	4	$2,94 \cdot 10^{-3}$
Sousa	Rio Piranhas	5	$1,51 \cdot 10^{-4}$

Tabela 4.6.4 - Valores da recarga calibrada para o período entre os meses de novembro de 2005 e maio de 2006

Sub-bacia	Formação	Zona	Recarga (m/dia)	Recarga (mm/dia)
Brejo das Freiras	Antenor Navarro	1	$6,58 \cdot 10^{-4}$	0,658
Brejo das Freiras	Sousa	2	$1,19 \cdot 10^{-4}$	0,119
Sousa	Antenor Navarro	3	$1,34 \cdot 10^{-4}$	0,134
Sousa	Sousa	4	$1,82 \cdot 10^{-4}$	0,182
Sousa	Rio Piranhas	5	$3,16 \cdot 10^{-4}$	0,316

Tabela 4.6.5 - Valores da recarga calibrada para o período entre os meses de novembro de 2006 e maio de 2007

Sub-bacia	Formação	Zona	Recarga (m/dia)	Recarga (mm/dia)
Brejo das Freiras	Antenor Navarro	1	$4,28 \cdot 10^{-4}$	0,428
Brejo das Freiras	Sousa	2	$1,01 \cdot 10^{-4}$	0,101
Sousa	Antenor Navarro	3	$1,27 \cdot 10^{-4}$	0,127
Sousa	Sousa	4	$1,40 \cdot 10^{-4}$	0,140
Sousa	Rio Piranhas	5	$2,27 \cdot 10^{-4}$	0,227

As duas tabelas a seguir (Tabs. 4.6.6 e 4.6.7) mostram as recargas recalculadas em volume de água em milhões de m³/ano e em altura ou lâmina de recarga em mm/ano, com base nos valores das duas recargas calibradas e apresentadas nas Tabelas 4.6.4 e 4.6.5.

A recarga média anual é em torno de 50 mm ($64,0 \cdot 10^6$ m³) no ano chuvoso de 2005/2006 e apenas 36 mm ($45,8 \cdot 10^6$ m³) no ano menos chuvoso de 2006/2007.

Tabela 4.6.6 - Valores recalculados da recarga calibrada para o período entre os meses de novembro de 2005 e maio de 2006

Sub-Bacia	Formação	Área das Sub-Bacias (km ²)	Volume da Recarga (10 ⁶ m ³ /ano)	Lâmina de Recarga (mm/ano)
Brejo das Freiras	Antenor Navarro	285,5	33,80	118
	Sousa	236,0	5,06	21
Sousa	Antenor Navarro	112,5	2,71	24
	Sousa	563,0	18,40	33
	Rio Piranhas	69,5	3,95	57
		Total = 1266,5	Total = 63,9	Média = 50,5

Tabela 4.6.7 - Valores recalculados da recarga calibrada para o período entre os meses de novembro de 2006 e maio de 2007

Sub-Bacia	Formação	Área das Sub-Bacias (km ²)	Volume da Recarga (10 ⁶ m ³ /ano)	Lâmina de Recarga (mm/ano)
Brejo das Freiras	Antenor Navarro	285,5	22,00	77
	Sousa	236,0	4,30	18
Sousa	Antenor Navarro	112,5	2,58	23
	Sousa	563,0	14,08	25
	Rio Piranhas	69,5	2,83	41
		Total = 1266,5	Total = 45,8	Média = 36,1

Verificação do Modelo

A verificação da calibração do modelo foi feita com uma simulação em regime transitório para os meses de agosto de 2005 até maio/junho de 2007. Para esta simulação foram utilizados 19 poços com medições contínuas nas 7 campanhas apresentados na Tabela 4.6.2 e na Figura 4.6.14. A simulação de 630 dias de duração foi feita com o modelo calibrado utilizando 04 períodos com passos de tempo de 1 dia:

1. Período (Agosto – Novembro de 2005: sem recarga
2. Período (Dezembro – Maio de 2006: com primeira recarga calibrada
3. Período (Junho – Novembro de 2006: sem recarga
4. Período(Dezembro – Maio/Junho de 2007: com a segunda recarga calibrada

A Tabela 4.6.8 apresenta o resultado dessa simulação em termos de níveis calculados e observados e a Figura 4.6.15 mostra o respectivo diagrama de dispersão.

Tabela 4.6.8 - Comparação de níveis das cargas hidráulicas calculadas versus observadas em todas as 07 campanhas de coleta pela modelagem em regime transitório de 630 dias duração

	ago/05		nov/06		mai/06		ago/06		nov/06		fev/07		mai/07	
	Obs	Calc	Obs	Calc	Obs	Calc	Obs	Calc	Obs	Calc	Obs	Calc	Obs	Calc
CM710	280.8	274.4	281.0	274.0	280.8	274.8	281.3	274.3	281.3	273.9	281.4	274.2	281.3	274.3
CN808	274.6	272.7	274.7	272.3	274.4	273.1	274.6	272.6	274.4	272.3	274.3	272.5	274.3	272.7
CD983	265.6	268.2	265.4	268.1	265.6	268.7	265.7	268.1	265.6	268.1	265.3	268.3	265.3	268.3
CD989	264.7	266.3	264.1	266.2	265.8	266.7	265.0	266.2	264.9	266.2	263.9	266.4	264.4	266.4
CM720	260.0	265.6	263.0	265.4	262.8	265.9	260.3	265.5	260.0	265.4	258.0	265.6	260.0	265.6
CM719	258.5	264.8	258.8	264.6	258.3	265.2	257.0	264.7	255.3	264.6	255.7	264.8	257.0	264.9
CM689	260.7	262.0	259.1	261.9	261.1	262.4	261.0	261.9	259.4	261.9	259.9	262.1	x	262.1
CM673	259.5	261.3	257.7	261.2	259.0	261.9	257.7	261.2	254.5	261.2	255.5	261.4	257.2	261.5
P33	260.6	260.7	259.3	260.7	261.0	260.9	260.9	260.7	259.7	260.7	x	260.7	x	260.7
P01	256.6	261.4	256.6	261.0	257.2	261.7	256.6	261.2	256.4	260.9	256.6	261.2	256.5	261.3
CM056	256.0	263.8	256.1	263.2	256.5	264.3	254.4	263.6	249.8	263.1	249.3	263.4	x	263.7
DW952	240.6	244.9	239.5	244.7	241.8	245.2	240.3	244.8	240.6	244.6	240.0	244.9	240.7	245.1
P48	208.3	209.4	207.7	208.9	209.0	210.0	209.0	209.0	208.4	208.8	208.0	209.6	208.6	209.8
CN797	240.4	243.1	240.0	242.9	243.0	243.2	241.3	243.0	240.7	242.7	240.1	243.2	239.8	243.2
CH404	209.0	211.0	208.5	210.0	209.4	212.3	210.0	210.4	209.7	209.7	209.5	211.3	209.5	211.9
P47	208.9	208.3	208.6	207.7	210.5	209.1	210.4	207.9	209.9	207.6	209.6	208.5	210.3	208.8
DV924	241.0	242.7	240.3	241.1	242.6	244.3	242.1	242.0	241.2	240.7	240.7	242.5	x	243.7
CG935	208.5	208.1	208.3	208.0	209.3	208.3	207.0	208.0	208.2	208.0	209.0	208.2	209.4	208.2
DR012	214.6	212.6	213.6	212.5	217.5	213.0	219.0	212.6	218.1	212.5	217.5	213.0	213.5	213.0

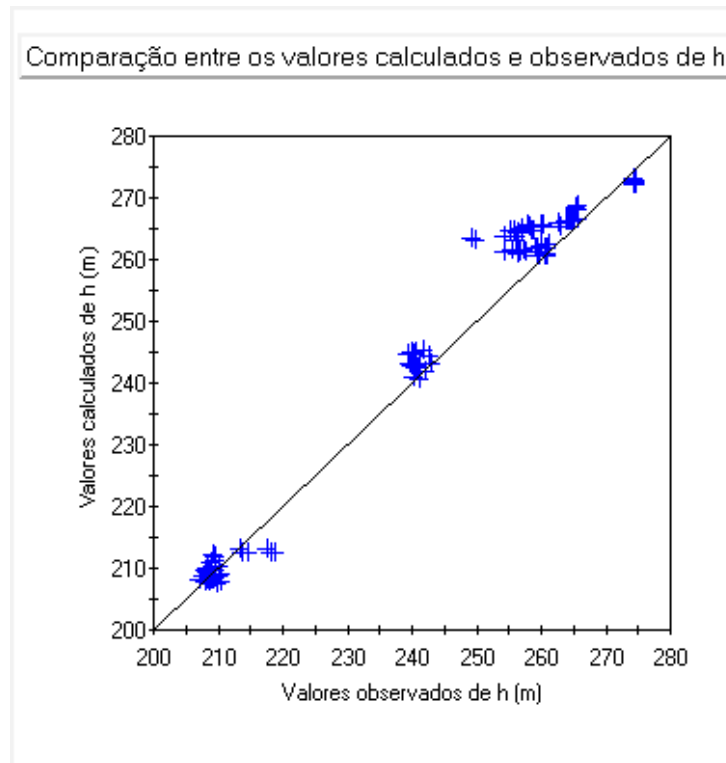


Figura 4.6.15 - Diagrama de dispersão (*Scatterdiagram*) entre cargas hidráulicas calculadas versus cargas hidráulicas observadas após da simulação transitória de 630 dias de duração.

4.6.4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO

Os valores de condutividades hidráulicas calibradas mostrados na Tabela 4.6.1 indicam que a formação Antenor Navarro da sub-bacia de Brejo das Freiras possui uma condutividade hidráulica duas vezes maior que a da formação de Sousa, a qual é principalmente composta por folhelhos. No entanto, a formação Antenor Navarro da sub-bacia Sousa (justamente a região que é suspeita de, na verdade, fazer parte da formação Sousa) mostra uma condutividade 3 vezes menor que o valor do Antenor Navaro da sub-bacia Brejo das Freiras.

A maior condutividade hidráulica da bacia (duas vezes maior que a formação Antenor Navarro) possui a formação Rio Piranhas composta por arenito e que é geologicamente mais jovem que a formação de Sousa e Antenor Navarro. Como se pode admitir, a calibração ainda é passível de melhorias, porém estas implicariam em se conceber um modelo conceitual mais próximo da situação de campo e se obter um aumento quali-quantitativo dos dados para a calibração.

A calibração do coeficiente de armazenamento foi feita com os níveis das medições feitas em agosto e novembro de 2005, durante a época seca. Esta calibração, em teoria, seria melhor se houvesse mais poços com medição contínua, para o ajuste pelo *PEST*. A técnica de calibração, porém, foi executada corretamente, dentro das possibilidades. Os valores do coeficiente de armazenamento calibrado apresentados na Tabela 4.6.3 não mostram claramente uma relação com a litologia, apenas que a formação de Antenor Navarro possui um coeficiente de armazenamento ou porosidade efetiva 10 até 100 vezes maior que do da formação Sousa. Relativamente pequeno é o coeficiente da formação Rio Piranhas.

O processo de calibração da recarga foi realizado com dados de nível coletados na época da chuva, entre novembro de 2005 e maio de 2006 e, a segunda vez, entre novembro de 2006 e maio/junho de 2007, distribuídos em todas as zonas de calibração.

Assim, considerando-se que as calibrações dos valores de condutividade hidráulica e de coeficiente de armazenamento chegaram a valores representativos do comportamento hidrodinâmico da bacia, a calibração da recarga também chegou a valores plausíveis, pois havia quantidade suficiente de dados para o ajuste. A recarga média nos anos 2005-2006 atingiu um valor de 50,5 mm, equivalente a 5% da precipitação média total (1018 mm) e a recarga média nos anos 2006 – 2007 chegou a um valor de 36,1 mm ou 6% da precipitação média total (595 mm).

As taxas de recarga apresentadas nas Tabelas 4.6.4 e 4.6.5 mostram claramente uma recarga significativa maior nas áreas da formação de arenito Antenor Navarro, da sub-bacia Brejo das Freiras (zona 1) que nas áreas das zonas 2, 3, 4 e 5. A zona 5 de arenito da sub-bacia Rio de Piranhas, recebe a metade da recarga da zona 1 mas ainda 2 vezes maior que a das zonas de folhos 2, 3 e 4).

Uma comparação direta com a estimativa de recarga na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, realizada através de modelo de BALSEQ e atrás apresentada, mostra, para o cenário 1 daquele estudo que as taxas de recarga atingem valores médios um pouco mais altos (80,5 mm) para o ano chuvoso de 2006 e mais baixo (0,24 mm) para o ano menos chuvoso de 2007, mas com a mesma tendência para cada área da formação geológica.

A etapa da verificação do modelo mostra a eficácia e estabilidade do modelo para simulações transitórias, visto que os erros nos períodos de observação que se sucederam a partir de agosto de 2005 não aumentavam significativamente e não surgiu nenhuma discrepância nos dados.

Concluindo, é possível afirmar que o modelo apresenta uma boa confiabilidade para a simulação do aquífero.

4.7. AVALIAÇÃO DOS RECURSOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DA BACIA.

Os recursos de água subterrânea de uma bacia sedimentar são compostos de dois segmentos: o potencial ou potencialidades e as reservas.

4.7.1. AS POTENCIALIDADES

Define-se potencialidade ou, simplesmente, potencial como a vazão média do escoamento subterrâneo de longo período que sai à rede hidrográfica sobreposta aos sistemas aquíferos (vazão de base), acrescida do fluxo subterrâneo que atinge o oceano, no caso de sistemas costeiros. Esta saída contempla, também, a filtração vertical ascendente originada pela carga de pressão de aquíferos semi-confinados sotopostos. Desnecessário será dizer que este escoamento deve estar isento de intervenção humana, isto é, de captações por poços ou barramentos subterrâneos ou, mesmo, superficiais.

Este potencial é, também, denominado de reserva reguladora. As reservas reguladoras são, em sistemas aquíferos complexos, aquelas situadas acima da média dos níveis hidrostáticos mínimos de uma série de longo período, tendo por limite superior, a média, também de longo período, dos níveis hidrostáticos máximos, medidos em superfícies hidrostáticas regionais. Estas superfícies resultam de todas as trocas realizadas entre os aquíferos componentes do sistema; no caso do sistema Rio do Peixe, entre os aquíferos Antenor Navarro, Souza, Rio Piranhas e Aluvial. O volume resultante destas trocas escoam para a superfície e sai na rede hidrográfica

sobrejacente. Correspondem, portanto, à vazão de base medida em postos fluviométricos porventura instalados na rede hidrográfica. Para se saber a contribuição de cada unidade aquífera ter-se-ia que dispor de postos estrategicamente localizados em pontos onde se identificasse o término da influência de cada unidade ou conjunto de unidades (subsistema aquífero). Infelizmente, não se dispõe dessas séries de medidas históricas que, para serem representativas, devem ter longo período de observação.

Resta, portanto, o caminho da modelagem numérica como forma de obtenção de valores de recarga de água subterrânea como indicativos pontuais da potencialidade. O modelo elaborado nestas pesquisas, ainda de caráter preliminar, conforme se discorreu neste trabalho, estimou a recarga no período de novembro de 2005 a maio de 2006 em cerca de 64.000.000 m³ e no período de novembro de 2006 a maio de 2007 em cerca de 46.000.000 m³.

4.7.2. AS RESERVAS

Além do potencial, os aquíferos são portadores de um outro contingente de recursos hídricos que, ao contrário do potencial, não é, em sua totalidade, anualmente renovável. É a reserva de água subterrânea. Ela se acha acumulada nos espaços vazios entre os grãos dos minerais formadores das rochas ou em outro tipo de porosidade, situando-se, hidroestratigraficamente, abaixo do potencial. A reserva forma um volume que, embora interaja com o potencial, se mantém constante através dos tempos. Formada em tempos geológicos pretéritos, ela não apresenta idade cronológica coincidente com a idade das formações que a contêm, porque, por sua interação com o potencial, é rejuvenescida com a recarga e circulação do potencial em seu interior.

São dois os tipos de reservas (Albuquerque e Rego, 1999): a intersticial ou intergranular e a reserva sob pressão.

A reserva intersticial é significativa no comportamento hidrostático dos aquíferos livres, podendo, em parte, ser explorada por poços, na dependência dos reflexos desta exploração no comportamento do regime hidrológico do sistema hidrográfico a ele associado ou conectado e, por extensão, na preservação de ecossistemas hídricos. A reserva sob pressão tem uma ação

importante nos aquíferos confinados, podendo ser explorada dentro dos mesmos limites impostos pela relação água subterrânea-água superficial, desde que, pela dimensão da carga hidráulica, participe do potencial dos recursos hídricos subterrâneos.

Em outras palavras, a exploração de reservas está condicionada pelos reflexos que esta exploração causa no potencial de água subterrânea, que pode ser exaurido em caso de se ultrapassarem os limites, de modo a afetar o meio ambiente.

Costuma-se, ainda, classificar as reservas em permanentes ou seculares e reguladoras ou renováveis.

As permanentes não dependeriam ou não variariam com a recarga e as reguladoras, ao contrário, sofreriam o efeito da parcela das precipitações atmosféricas convertida em infiltração efetiva. No caso de aquíferos confinados ou semi-confinados, as reservas permanentes permanecem armazenadas, independentemente da vazão do escoamento natural. As reservas permanentes correspondem, neste caso, às reservas intersticiais de aquíferos confinados ou semi-confinados, anteriormente definidas, também denominadas de volume de saturação. No caso de aquíferos livres, estas reservas são aquelas localizadas na sua zona de saturação, abaixo da profundidade média, de longo período, do nível hidrostático mínimo, registrado em poços de observação.

Na realidade, não existe reservas permanentes, se o conceito permanente se refere ao tempo. Se fossem permanentes, as águas subterrâneas de aquíferos teriam as mesmas datas de suas formações, o que, efetivamente, não acontece. Por isso, as águas subterrâneas são, sempre, mais jovens que as formações que as contêm. Agora, elas devem ser permanentes, mas no sentido de que, em princípio, nunca devem ser mobilizadas, a não ser que medidas compensadoras devam ser tomadas, como, por exemplo, a recarga artificial adicional.

Intersticiais ou sob-pressão as reservas são dadas pelo produto área x espessura x porosidade efetiva (caso de aquíferos livres) ou coeficiente de armazenamento (caso de aquíferos confinados).

A falta de dados sobre as espessuras, bem como dos parâmetros hidráulicos citados, dos diversos aquíferos ocorrentes na bacia impede uma estimativa das reservas acumuladas nos mesmos.

Em verdade, estes cálculos não são imprescindíveis à gestão sustentada de recursos hídricos, já que em princípio, as reservas não devem ser transformadas em disponibilidades, sob pena de, assim procedendo, acarretar problemas geotécnicos (subsistência de terrenos), ambientais (extinção de freatófitas, por exemplo), hidrológicos (secar ou tornar rios perenes ou intermitentes em efêmeros) e hidrogeológicos (compactação de aquíferos, reduzindo parâmetros hidráulicos dos mesmos). A exploração de reservas está condicionada à eventuais problemas críticos, de ordem socioeconômica e a medidas compensatórias como a construção de poços de recarga artificial.

4.7.3. AS DISPONIBILIDADES

Todas estas condições, anteriormente abordadas, nos levam à conclusão de que, ao fim de tudo, os recursos exploráveis de água subterrânea, também denominados de disponibilidades máximas (Albuquerque e Rego, 1999), restringem-se, conforme registrado anteriormente, a uma parcela do potencial. Esta parcela pode ser captada diretamente dos subsistemas livres e/ou confinados (ou semi-confinados), ou, indiretamente, das reservas sob pressão de subsistemas confinados ou semi-confinados, nunca, em princípio, se devendo penetrar nas reservas intersticiais destes últimos subsistemas, pois são águas que participam da estrutura dos terrenos que as contém e explorá-las acarretará efeitos danosos aos subsistemas, à rede hidrográfica sobreposta (redução da sua vazão de base) e ao meio ambiente (extinção de biomas, etc.). A disponibilidade é, portanto, uma parcela do potencial, não se devendo contar, em princípio e nos casos gerais, com a exploração, mesmo de pequenas parcelas das reservas intersticiais de aquíferos confinados. Em relação aos aquíferos livres, a parcela das reservas intersticiais denominadas de reservas reguladoras, situada entre os níveis máximos e mínimos médios pode ser explorada, desde que sejam anualmente, em média, repostas. Em outras palavras, que participem do ciclo hidrológico, constituindo o potencial de água subterrânea anualmente renovável.

Alguns autores defendem a adoção de "um limite econômico de exploração para cada aquífero, anterior ao seu limite físico, imposto pela profundidade do nível potenciométrico, que determinaria sua disponibilidade e sua sustentabilidade", considerando-se, atualmente, que o limite da descarga explorável de um sistema aquífero é determinado pelos componentes de fluxo

subterrâneo incorporados pelo seu próprio desenvolvimento. Sendo assim, a disponibilidade física seria definida pela recarga natural do sistema (influxos) e pelo aumento da própria recarga (incremento dos influxos), diminuição da descarga natural (redução dos defluxos) e remoção de uma parcela da água armazenada. Dentro deste contexto, na quase totalidade dos aquíferos confinados, pode-se visualizar que esse limite físico seria bastante elevado.

Aqui reside o grande equívoco sobre disponibilidades de águas subterrâneas sob a ótica do limite econômico. A transformação de uma parcela armazenada em aquíferos confinados em descarga explorável é, em princípio, totalmente desaconselhada, seja em escala de poço, seja de aquífero. Na escala de poço, os textos contidos em livros didáticos determinam como limite de rebaixamento máximo, conforme exposto anteriormente (e, conseqüentemente, como descarga máxima explorável), a profundidade da base da camada ou formação confinante ou semi-confinante. Isto é para evitar que se explorem as águas armazenadas no interior do aquífero. À escala de aquífero, esta condição limite é necessária, mas não é suficiente para estabelecer os limites físicos que definem a sua explorabilidade. Estes limites estão relacionados com a conexão hidráulica que existe, não somente com outras unidades aquíferas superpostas ou sotopostas ao aquífero explorado de que fala, mas, e principalmente, com os recursos hídricos fluviais, com os quais os aquíferos confinados, direta ou indiretamente, estão, hidraulicamente, conectados, conforme foi explicado neste texto e suas ilustrações. Tendo em mente esta situação, os rebaixamentos da carga piezométrica (vale dizer, da sua descarga explorável) estão sujeitos a outros limites, impostos por estas conexões, que têm, em uma análise mais acurada, a ver com a sustentabilidade do meio ambiente, mais intimamente com a vida vegetal e, por extensão, com as demais formas de vida do planeta (aquíferos confinados têm carga de pressão que os tornam alimentadores de aquíferos superpostos, inclusive, participando da potencialidade de freáticos e de cursos d'água. Portanto, os limites físicos são os que relacionam os aquíferos confinados ou livres com os recursos hídricos superficiais e com o meio ambiente. Assim, as cargas que podem ser consumidas deverão ser, sempre, inferiores àquelas ditadas por limites econômicos. O limite estabelecido pelo custo de produção de um aquífero será, assim sempre maior que o limite físico, desde que este tenha sido determinado corretamente. As sustentabilidades do recurso natural água e do meio ambiente a eles relacionados assim o exigem. A degradação e a exaustão dos recursos naturais sempre teve, tem e terá a ver com a visão econômico-financeira do problema da "mais valia". Um exemplo (existem muitos outros no mundo) é o que aconteceu na exploração do "High Plain Aquífer", também conhecido como Ogallala Aquífer, nos Estados Unidos:

enquanto o custo de produção compensou, aprofundou-se o rebaixamento para manter as vazões demandadas. Resultado: exaustão do aquífero, alteração no regime hidrológico de rios (alguns secaram), terrenos cederam, até que, quando o custo não mais compensava, abandonaram a exploração do aquífero. Portanto, deve-se ter em mente que os recursos naturais renováveis devem ser vistos, em termos administrativos e exploratórios, como recursos ambientais, antes de uma conotação econômico-financeira. Por traz do economicismo ou, pior, do financeirismo, existe um recurso natural que, como tal, deve ser administrado. Até se pode admitir, em casos especialíssimos, mas de forma eventual, ultrapassar um pouco este limite (imperativos de ordem humana e social), mas, nunca, de forma duradoura.

Portanto, a parcela do potencial que pode ser explorada é aquela que resta após atendimento da demanda ecológica natural. Esta sobra está relacionada com a vazão de base da rede hidrográfica sobreposta ao sistema aquífero, pois é ela a responsável pela continuidade da vida dos biomas. A parte da vazão de base comprometida com esta demanda ecológica natural é, no mínimo, equivalente à média das vazões mínimas de cursos d'água perenes, capaz de assegurar a continuidade do regime da rede hidrográfica e, por conseguinte, da vida vegetal e animal dela dependente. Evidentemente, a exploração excessiva de qualquer unidade ou subsistema do sistema aquífero poderá acarretar conseqüências desastrosas aos recursos hídricos subterrâneos, superficiais e ao meio ambiente. Neste sentido, as disponibilidades poderiam, em uma primeira aproximação, serem admitidas a cerca de 50 a 60% do potencial.

Como uma aproximação bastante grosseira, poderíamos lançar mão dos valores das recargas de dois anos, calculadas neste estudo. Assim, o potencial corresponderia à média dois valores (64 e 46 milhões de m³), isto é, 55.000.000 m³ e a disponibilidade entre 27,5 e 33 milhões de m³.

5. CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E DE VULNERABILIDADE

5.1. ESTUDOS HIDROGEOQUÍMICOS

Os parâmetros analisados foram os mais freqüentes para avaliar a qualidade da água, incluindo variáveis fundamentais para definir se essas águas são aptas para consumo humano e outras importantes para uso da água na irrigação: pH, condutividade elétrica (CE), sólidos dissolvidos totais (STD), cátions – Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ e ânions – Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, HCO_3^- , $\text{CO}_3^{=}$, entre outros, dureza, alcalinidade, série nitrogenada, fósforo total e ferro. Os parâmetros bacteriológicos foram coliformes totais e *Escherichia coli*, usando-se o método de substrato definido ou método cromogênico (MUG-COLILERT/IDEXX). Os procedimentos analíticos foram os adotados pela APHA (1998).

5.1.1. DEFINIÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO DA REDE DE QUALIDADE DAS ÁGUAS E COLETA DE AMOSTRAS

Foram coletadas amostras d'água de 112 poços distribuídos nas três formações geológicas e nos aluviões que constituem a bacia sedimentar, para análise dos parâmetros físicos e químicos de qualidade da água. O total de amostras analisadas foi de 112. Para isso, foram feitas 6 campanhas de coleta de amostras entre os meses de agosto e novembro de 2005, maio, agosto e novembro de 2006 e fevereiro de 2007, abrangendo épocas de secas e de chuvas.

Os critérios aplicados para a escolha dos poços foram: sua distribuição nas diferentes formações aquíferas inseridas na bacia; o tipo de poço (amazonas e tubular) e a sua proximidade com fontes potencialmente poluidoras (atividades antrópicas na bacia de drenagem).

As amostras de água para análises físicos e químicos foram coletadas em frascos plásticos atóxicos perfeitamente limpos e encaminhados ao Laboratório de Salinidade da Universidade

Federal de Campina Grande (UFCG)/Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, para análises. As amostras para análises microbiológicas foram coletadas em frascos de vidro neutros estéreis (2 horas em estufa a 170°C), cor caramelo e boca larga, protegida com papel de alumínio.

O mapa da Figura 5.1.1 mostra a distribuição espacial dos poços amostrados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe ao longo de todo o período de estudo (agosto de 2005 a fevereiro de 2007). Observa-se que os mesmos se distribuem em toda a extensão da bacia, nas diferentes formações geológicas.

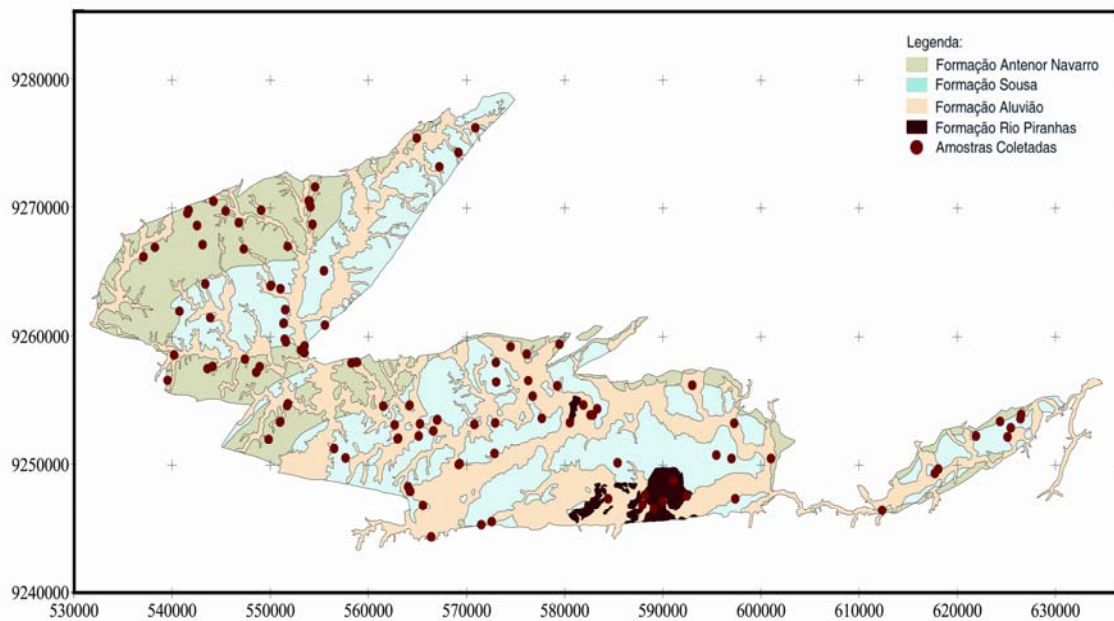


Figura 5.1. 1 - Distribuição espacial dos poços amostrados no período de agosto 2005 a fevereiro 2007 nas diferentes formações geológicas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

5.1.2. ANÁLISE DE AMOSTRAS FÍSICO-QUÍMICAS, BACTERIOLÓGICAS

A análise dos dados considerou estudos de distribuição espacial e de variação temporal da qualidade da água da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe. Os dados foram checados e das 112 amostras observou-se duas provenientes do mesmo poço na mesma coleta, sendo então uma delas excluída, ficando então, para a avaliação final, uma rede constituída de 111 poços diferentes.

Em um primeiro momento, os dados de qualidade das águas dos poços amostrados foram submetidos a uma análise global, utilizando-se todos os resultados levantados no período de

estudo, com a finalidade de se obter informações gerais sobre a qualidade das águas. Posteriormente foi feita a segregação dos dados por época de coleta das amostras, de seca e de chuva. Esse estudo permitiu comparar a variação da qualidade nas diferentes épocas, sob influência das águas de recarga dos aquíferos.

A análise dos resultados obedeceu ao seguinte roteiro:

- 1) elaboração de mapa com a distribuição dos poços amostrados (ArcView);
- 2) análise estatística básica (média, desvio padrão, mediana, valores máximos e mínimos);
- 3) análise de agrupamento (SPSS 14.0 for Windows, PEREIRA, 1999), objetivando identificar as águas de poços de qualidade semelhante e verificar uma possível relação entre a qualidade e a composição litológica do aquífero na qual o poço está inserido;
- 4) análises de variância ANOVA fator único, seguida pelo método gráfico GT2 de Hochberg's, de comparação múltipla das médias (Sokal & Rohlf, 1981), para definir os parâmetros de qualidade mais relevantes na diferenciação dos agrupamentos formados (ANOVA fator único);
- 5) construção do diagrama de Piper para as 111 amostras, para avaliar a composição e distribuição de íons;
- 6) elaboração de mapas temáticos usando-se o utilitário ArcView, com a distribuição dos agrupamentos sobre o mapa geológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, utilizando-se códigos de símbolos e de cores, para evidenciar a distribuição dos poços com águas de diferentes qualidades nas quatro formações geológicas;
- 7) cálculo da RAS (Razão da Adsorção de Sódio) usando-se os resultados de sódio, cálcio e magnésio e, junto com os valores de condutividade elétrica, foram usados para aplicar a classificação de Riverside (USSL), para avaliar os riscos de salinidade e de sodicidade;
- 8) análises bacteriológicas (coliformes totais e *Escherichia coli*) de amostras de água de 20 poços, coletadas em três campanhas, executadas em épocas de estiagens e de chuvas;
- 9) análise comparativa dos resultados bacteriológicos e físicos e químicos com os valores máximos permissíveis (VMP) da Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde para qualidade da

água de consumo humano e com os descritos na Resolução nº 357/2005 do CONAMA, que classifica as águas do território nacional segundo seus usos.

5.1.3. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E ELABORAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS

Análise geral da qualidade e distribuição espacial da água subterrânea de 111 poços da Bacia Sedimentar de Rio do Peixe.

Os resultados da análise de estatística básica da qualidade da água do conjunto de 111 amostras coletadas em períodos secos e chuvosos (6 campanhas) são apresentados na Tabela 5.1.1. Os parâmetros que apresentaram maior desvio padrão foram condutividade elétrica (CE), sódio (Na^+), cloreto (Cl^-), sólidos dissolvidos totais (SDT), bicarbonato, alcalinidade de bicarbonato, alcalinidade total, dureza, cálcio (Ca^{++}), magnésio (Mg^{++}) e sulfato. Esses parâmetros foram os que discriminaram grupos de poços de qualidade diferentes.

Tabela 5.1. 1 - Estatística básica dos dados de qualidade física e química de amostras de água de 111 poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe – PB, coletadas no período de agosto 2005 a fevereiro 2007

Parâmetros físicos e químicos	Desvio				
	Média	Mediana	padrão	Mínimo	Máximo
pH	8,40	8,41	0,36	7,50	9,12
CE ($\mu\text{S/cm}$)	964,34	840,00	527,94	156,19	3072,00
Ca^{++} (mg/L)	29,88	24,00	27,45	3,50	196,40
Mg^{++} (mg/L)	17,36	12,72	16,12	1,44	115,98
Na^+ (mg/L)	188,27	156,40	139,37	29,44	782,69
K^+ (mg/L)	3,70	2,34	3,00	0,78	13,65
Cloreto (mg/L)	128,74	77,99	151,56	14,01	978,42
Sulfato (mg/L)	52,55	35,52	58,51	1,44	308,64
Bicarbonato (mg CaCO_3 /L)	296,24	281,21	121,44	54,90	857,36
Carbonato (mg CaCO_3 /L)	39,30	36,00	22,66	0,00	142,20
Ferro (mg/L)	0,34	0,23	0,34	0,07	2,14
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	2,24	1,80	2,10	0,70	18,70
Alcalin. Carbonato (mg CaCO_3 /L)	67,10	59,00	46,50	0,00	377,50
Alcalin. Bicarbonato (mg CaCO_3 /L)	250,06	232,60	99,40	63,50	702,75
Alcalin. Total (mg CaCO_3 /L)	319,03	310,00	131,60	83,50	1007,00
Dureza (mg CaCO_3 /L)	146,87	118,75	124,72	15,62	785,00
Sólidos Dissolv. Totais (mg/L)	623,20	537,00	345,56	133,00	2118,00
Amônia (mg/L)	0,52	0,44	0,68	0,06	6,87
Nitritos (mg/L)	0,04	0,02	0,11	0,00	1,06
Nitratos (mg/L)	0,49	0,14	1,08	0,00	9,04

Os resultados mostram águas de pH entre levemente básico e extremamente básico (pH 9,12), mediamente duras e duras, bicarbonatadas e ricas em sódio, de condutividade elétrica entre média e alta. As formas de nitrogênio (amônia, nitrito e nitrato) acusaram concentrações baixas (sem diferenças estatísticas significativas $\alpha = 0,05$) e não foram limitantes para consumo humano exceto em um poço com teor elevado de amônia livre que supera o padrão de potabilidade (Portaria 518/2004-MS) e que representa risco à saúde. Também apenas uma amostra teve concentração elevada de nitrato, próxima ao valor limite para consumo humano (<10mg/L). Em várias amostras houve altos valores de ferro, ultrapassando o padrão de aceitação, de 0,3 mg/l, segundo a mesma portaria em vigência.

O diagrama de Piper, apresentado a seguir na Figura 5.1.2, mostra a distribuição dos íons predominantes no total dos poços, distribuídos nas quatro formações geológicas. Este diagrama é usado para classificar e comparar distintos grupos qualidade de águas em relação aos íons predominantes.

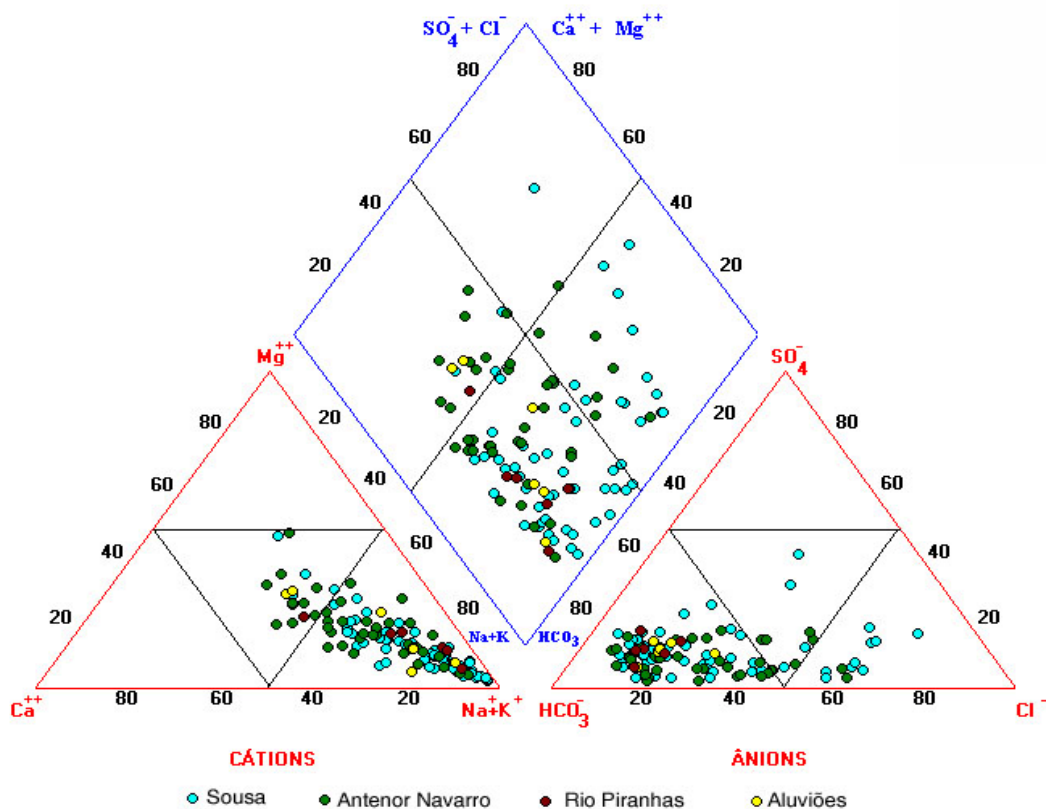
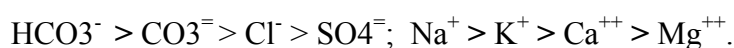


Figura 5.1. 2 - Diagrama de Piper. Íons predominantes nas águas subterrâneas das quatro formações geológicas da Bacia Sedimentar de São João do Rio do Peixe- PB.

A Figura 5.1.3 apresenta a distribuição espacial por formação geológica, da composição iônica predominante nas águas dos poços amostrados, representando em cores diferentes cada uma das quatro formações da bacia.

Observa-se que estas águas são, em sua grande maioria, Bicarbonatadas (85,6%), Sódicas (94,6%) e Bicarbonatadas Sódicas (81,1%), não havendo grande distinção dessas características por formação geológica. Poucos poços apresentaram águas com teores significativos de magnésio e também poucas amostras tiveram altos teores de sulfatos. As primeiras se concentraram na sub-bacia de Brejo das Freiras e as segundas, no norte da formação Sousa.

Portanto, a composição iônica global das águas subterrâneas estudadas pode ser assim resumida:



A seguir foi feita a análise de agrupamento (SPSS 14.0) que objetivou identificar as amostras de água de qualidade semelhante e analisar uma possível relação entre essa qualidade e a formação geológica na qual o poço está localizado. Para essa análise foram utilizados os valores da mediana para as seis campanhas de monitoramento para todos os parâmetros de qualidade (20 parâmetros - Tabela 5.1.1). Como resultado obteve-se um dendrograma, com 14 agrupamentos.

O critério aplicado para a escolha dos agrupamentos foi baseado no menor grau de liberdade que apresentasse consistência no resultado. Assim, houve 14 diferentes grupos de poços com qualidade semelhante. Tais grupos foram: G1 com 31 poços, representando 27,93% do total dos poços amostrado, G2 com 45 poços - 40,54%, G3 com 12 poços - 10,81%, G4 com 10 poços - 9,0%, G5 com 3 poços - 2,7% e G6 com 2 poços - 1,8%. Os outros oito grupos ficaram com apenas um poço cada um. Os percentuais apresentados evidenciam que os maiores grupos foram G1, G2, G3 e G4, que somam 88,28% dos poços amostrados, e, por tanto, esses conjuntos de poços representam as diferentes qualidades de água subterrânea predominantes na bacia sob estudo.

A análise ANOVA-GT2 fator único segundo Hochberg's, de comparação múltipla das médias, foi aplicada para saber se havia diferenças significativas entre os atributos de qualidade dos poços agrupados em cada conjunto, considerando o valor do F crítico, para o nível de

significância de 0,05. Os resultados da ANOVA são apresentados no [Anexo A5.1](#) e a representação GT2 é mostrada a seguir. A representação GT2 permite visualizar mais facilmente as amplitudes das variações. Foram considerados, para construção desses gráficos, aqueles parâmetros que, por ANOVA, foram discriminatórios dos agrupamentos de qualidade das águas dos poços amostrados. Estes foram nove parâmetros: pH, condutividade elétrica, cálcio, magnésio, sódio, cloreto, sulfato, bicarbonato e carbonato, e se caracterizaram, na sua maioria, por apresentar valores crescentes entre os grupos, desde G1 até G6. Os restantes parâmetros não foram discriminatórios de um grupo específico de qualidade.

As restrições de uso das águas dos 6 principais agrupamentos foram aumentando desde G1 até G6.

G1 apresentou as águas de melhor qualidade (menor pH, menor concentração iônica) e sem restrições de uso para consumo humano em relação à caracterização física e química e de nenhuma a média restrição para irrigação.

G5 reúne os poços com águas de maior pH, elevados valores de sódio e as mais alcalinas, ricas em bicarbonatos e carbonatos.

G6 ficou claramente diferenciado pelas maiores concentrações de 6 dos 9 parâmetros mais importantes estudados, com destaque para CE, SDT, cloretos, sódio, cálcio e os maiores valores de sulfato, magnésio e dureza. Portanto, são águas com as maiores restrições de uso.

As concentrações dos parâmetros amônia, nitrato e oxigênio consumido não foram característicos de nenhum grupo e de nenhuma formação aquífera (exceto potássio em alguns poços de Antenor Navarro). Pelo contrario, esse comportamento indica que esses parâmetros contribuem com a heterogênea distribuição da qualidade da água subterrânea nas diferentes formações aquíferas.

Na maioria dos agrupamentos de qualidade, exceto G5 e G6, alcalinidade de bicarbonato e dureza não foram diferenciais, isto é, se mantiveram, na maioria dos poços em faixas de concentrações aproximadas, evidenciando a distribuição aleatória da qualidade dessas águas. Como foi mostrado no diagrama de Piper, as águas desta bacia sedimentar se caracterizam por ser alcalinas, bicarbonatadas e sódicas.

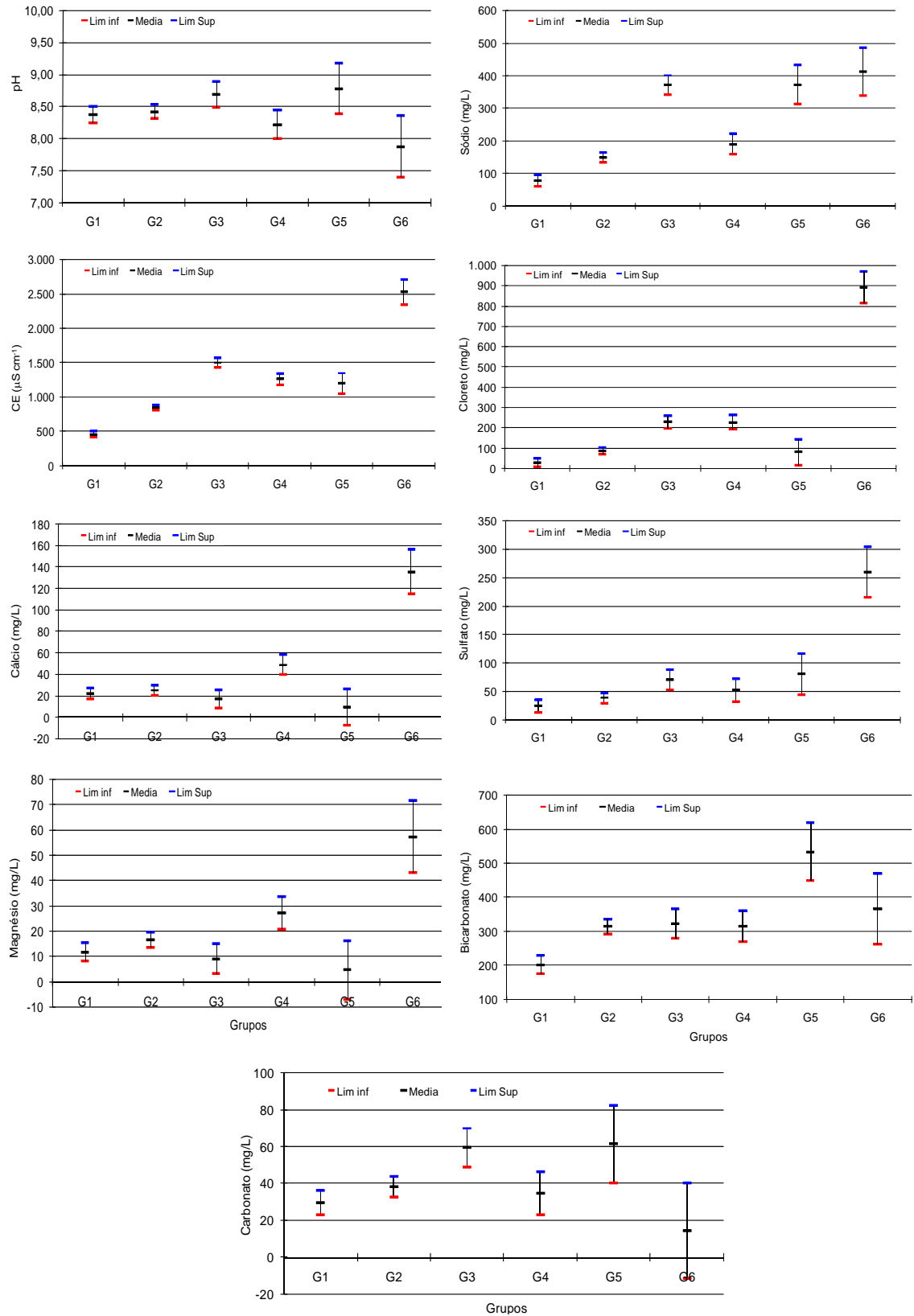


Figura 5.1.3 - Gráficos GT2 (fator único) para os 6 maiores agrupamentos da qualidade da água de 111 poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, em amostras coletadas entre agosto 2005 e fevereiro 2007

Essas características qualitativas das águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe podem estar associadas ao ambiente de sedimentação que sofreu variação espacial e temporal, em função da movimentação tectônica da bacia, desde a sua origem. Estes ambientes eram, ora aluviais, ora lacustres, ora lagunais, estes devido às penetrações episódicas das águas marinhas, através das falhas que ligavam a Bacia Sedimentar do Rio do Peixe com a Bacia do Rio Apodí ao Norte (Lima Filho, 1991).

Os resultados da análise de agrupamento foram plotados sobre o mapa geológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, utilizando-se códigos de símbolos e de cores para indicar os grupos de qualidade e as formações geológicas (Figuras 5.1.4 e 5.1.5). Neste mapa, evidencia-se que as amostras de água dos diferentes agrupamentos correspondem a poços distribuídos em toda a bacia, sem uma clara identificação entre grupo de qualidade e formação geológica. Em linhas gerais, a análise geral das 111 amostras mostra que:

- 1) As águas subterrâneas desta bacia são alcalinas, bicarbonatadas e ricas em sódio, mediantemente duras e duras.
- 2) Diferenciam-se na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe 14 grupos de qualidade de água subterrânea, sendo seis desses grupos os mais representativos da qualidade predominante.
- 3) Esses seis grupos qualitativos se caracterizaram pelas limitações ou restrições crescentes de uso de G1 a G6, pelo aumento das concentrações da maioria dos parâmetros, destacando-se íons, com aumentos significativos de CE, SDT, sódio, dureza e sulfato. Estes parâmetros foram os principais componentes da qualidade da água que diferenciaram os seis principais agrupamentos
- 4) A maioria dos seis principais grupos de qualidade d'água dos poços se distribuem nas quatro formações geológicas da bacia.
- 5) G1 se diferenciou dos grupos restantes pelas menores concentrações de todos os parâmetros, portanto, podem se considerar que são as águas de melhor qualidade dentre as 111 amostras de água analisadas. Este conjunto de amostras foi predominante na formação Antenor Navarro, distribuído principalmente na sub-bacia de Brejo das Freiras.

6) G2 se diferenciou do grupo anterior, pela salinidade mais elevada e principalmente pela alta alcalinidade de bicarbonato. A distribuição espacial deste grupo foi predominante na formação Sousa nas sub-bacias de Brejo das Freiras e de Sousa

7) G3 teve distribuição espacial predominante na formação Sousa

8) G4 apresentou salinidade mais elevada que os outros e os parâmetros CE, sódio e bicarbonatos foram os diferenciais deste agrupamento. Embora houve predominância de poços com esta qualidade na formação Sousa, sub-bacia de Sousa, houve também algumas amostras distribuídas na formação Antenor Navarro da sub-bacia de Brejo das Freiras.

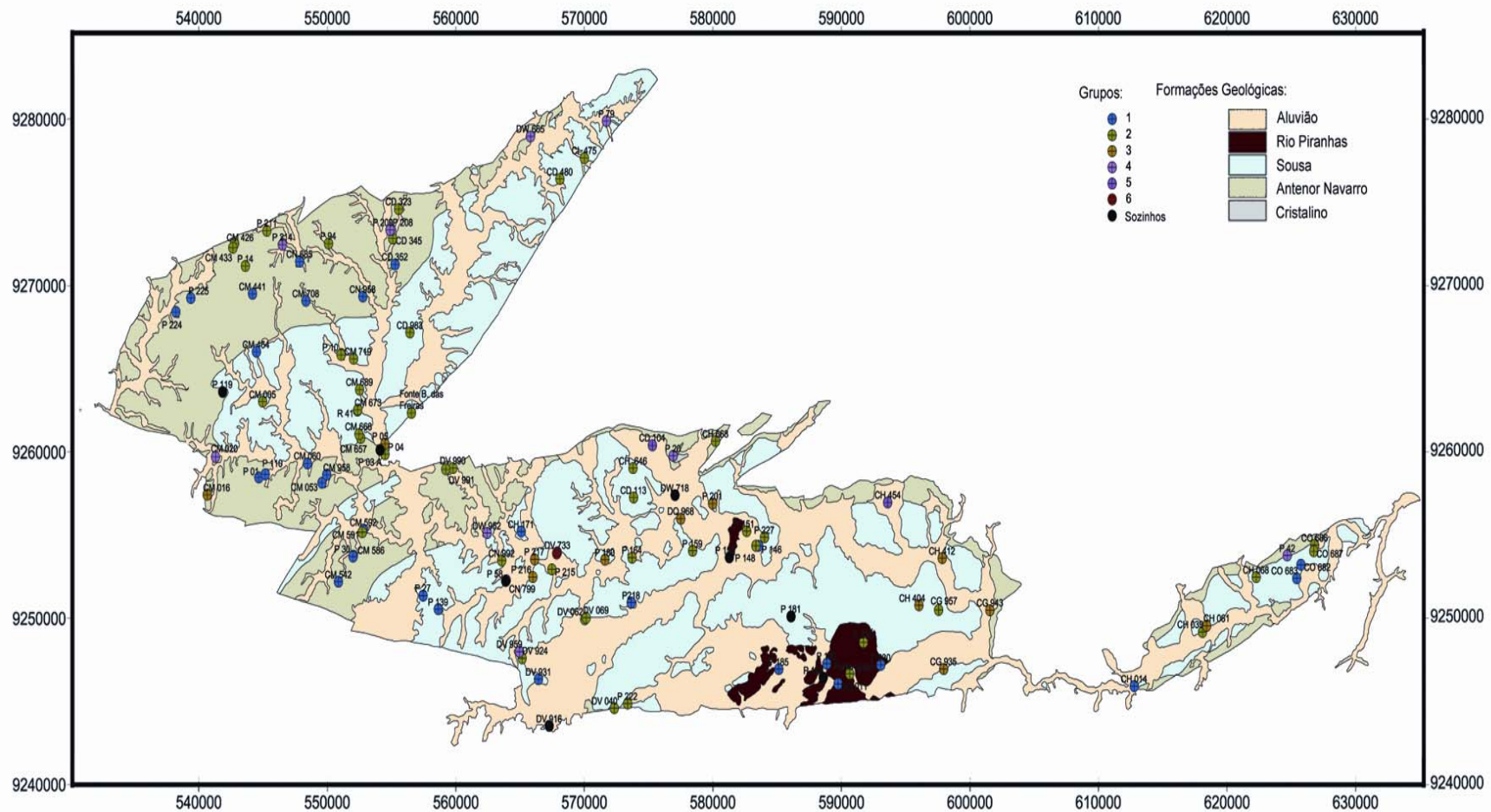
9) G5 teve distribuição espacial predominante na formação Sousa

10) G6 agrupou as amostras de pior qualidade em relação a CE, SDT, sódio, dureza e principalmente sulfato. Este agrupamento se concentrou na formação de Sousa e sub-bacia de Souza

A Tabela 5.1.2 mostra a frequência de ocorrência desses grupos nas diferentes formações geológicas, verifica-se que os grupos G1 e G4 ocorrem predominantemente na formação Antenor Navarro, enquanto os grupos G2, G3, G4, G5 e os grupos individuais de amostras predominam sobre a formação Sousa, entretanto, isso não implica ausência nas demais formações, identificando a heterogeneidade qualitativa na bacia estudada.

Tabela 5.1. 2 - Ocorrência dos diversos grupos por formação geológica e sua predominância

Grupo de qualidade (Nº de amostras)	Número de amostras				Frequência de ocorrência (%)				Predominância
	Formações				Formações				
	Antenor Navarro	Sousa	Rio Piranhas	Aluvião	Antenor Navarro	Sousa	Rio Piranhas	Aluvião	
G1 (31)	16	11	3	1	14,4	9,9	2,7	0,9	Antenor Navarro
G2 (45)	14	26	2	3	12,6	23,4	1,8	2,7	Sousa
G3 (12)	1	11	0	0	0,9	9,9	0,0	0,0	Sousa
G4 (10)	7	3	0	0	6,3	2,7	0,0	0,0	Antenor Navarro
G5 (3)	0	3	0	0	0,0	2,7	0,0	0,0	Sousa
G6 (2)	0	2	0	0	0,0	1,8	0,0	0,0	Sousa
G _{sozinho} (8)	2	5	1	0	1,8	4,5	0,9	0,0	Sousa



Figur
a 5.1. 4 - Distribuição dos agrupamentos dos poços segundo a qualidade de suas águas (111 amostras), na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe – PB, no período de agosto 2005 a fevereiro de 2007.

O agrupamento G6, com dois poços, se distribuem próximo da região norte da sub-bacia de Sousa, formando parte de uma zona bem definida de águas de extrema salinidade e que envolve os poços tubulares, vizinhos do campo petrolífero (distante aproximadamente 3 km). Entretanto, vários desses poços não formaram parte do agrupamento G6, por terem salinidade ainda mais elevadas, assim como concentrações de sulfatos mais altas. Um outro poço tubular localizado próximo no aquífero Sousa, apresenta também alta concentração de sulfato. Portanto, essa composição salina e iônica está influenciada pela presença de petróleo na área. Uma inquietude válida em relação à qualidade dessas águas subterrâneas é a possível presença de metais pesados e de derivados de petróleo nas águas dessa região, que poderiam ter contaminado o aquífero. Também, pode-se esperar que com a exploração do petróleo, a qualidade tenda a piorar, na medida em que a exploração de poços pode interceptar reservas de petróleo, principalmente se o aquífero for confinado, onde o raio de influência do poço d'água pode atingir alguns quilômetros.

Os riscos de salinização e de sodicidade foram estudados para as 111 amostras. Para isso, a distribuição das águas segundo sua qualidade para irrigação avaliando-se o perigo de sódio e de salinização dos solos foi feita usando-se a classificação de Riverside, USSL. Previamente calcularam-se a RAS - Riscos de Sódio, usando-se os dados das concentrações de sódio, cálcio e magnésio dessas amostras, coletadas entre agosto de 2005 até fevereiro 2007, com auxílio do Software Qualigraf (FUNCEME, 2007).

Na Figura 5.1.6 se apresenta o diagrama de Riverside-USSL e a distribuição, nesse diagrama, dos poços amostrados, em função do Risco de Sódio (RAS) versus a condutividade elétrica, fornecendo o risco de salinidade dos solos quando irrigados com águas com diferentes valores desses parâmetros.

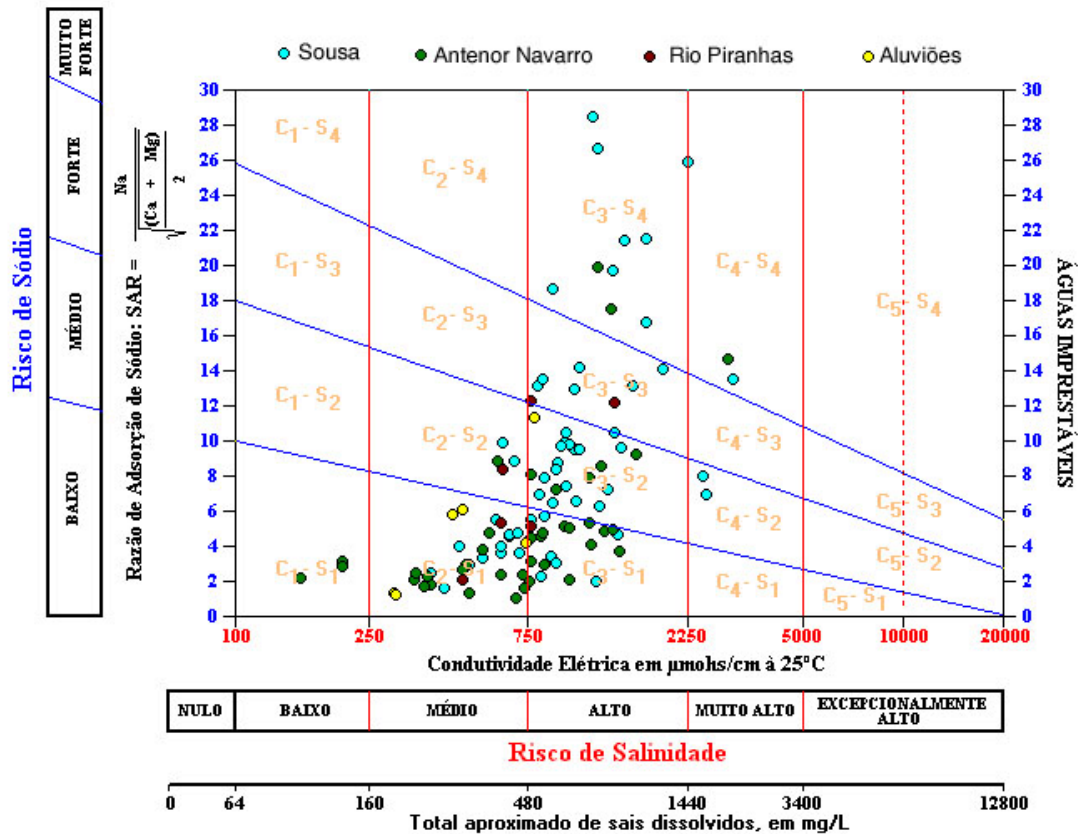


Figura 5.1. 6 - Distribuição dos 111 poços amostrados no Diagrama de Riverside - USLL, indicando o risco de salinidade e o risco de sódio de suas águas, se usadas para irrigação.

A maioria das águas subterrâneas da bacia sedimentar sob estudo segundo sua qualidade para irrigação apresentou risco de salinidade dos solos entre médio e alto e risco de sódio entre baixo e médio, predominando as classificações C₃-S₁ até C₃-S₄. Amostras de água com riscos de sódio forte e muito forte e riscos de salinidade entre alto e muito alto (C₄-S₁ até C₄-S₄) foram relativamente escassas, cerca de 18%, e deles, 13,5% de poços estão localizados na formação Sousa. As classes C₁-S₁ (baixo risco de sódio e de salinidade) se concentraram na formação Antenor Navarro (apenas três poços) e as classes C₂-S₁ e C₂-S₂ (baixo risco de sódio e médio de salinidade) foram observadas nas águas dos poços dos aluviões, de Antenor Navarro e algumas na formação Sousa.

A Tabela 5.1.3 mostra a frequência de ocorrência nas diferentes formações geológicas das classes de água segundo Riverside (USLL), as águas mais apropriada para a irrigação ocorrem em algumas zonas, com maior predominância sobre a formação Antenor Navarro aflorante na sub-bacia de Brejo das Freiras, porém, também há ocorrências nas

demais formações, a exemplo da classe C₂-S₁ com 16 ocorrências na formação Antenor Navarro, 12 na Sousa, 2 na Rio Piranhas e 3 no aluvião. Águas com forte risco de salinidade e sodicidade (C₃-S₄) também ocorrem na formação Antenor Navarro, onde das 14 amostras pertencentes a essa classe, 12 ocorreram nesta.

Tabela 5.1.3 - Ocorrência dos diversos grupos por formação geológica e sua predominância

Classes de qualidade (Nº de amostras)	Número de amostras				Frequência de ocorrência (%)				Predominância
	Formações				Formações				
	Antenor Navarro	Sousa	Rio Piranhas	Aluvião	Antenor Navarro	Sousa	Rio Piranhas	Aluvião	
C ₁ -S ₁ (3)	3	0	0	0	2,7	0,0	0,0	0,0	Antenor Navarro
C ₂ -S ₁ (33)	16	12	2	3	14,4	10,8	1,8	2,7	Antenor Navarro
C ₂ -S ₂ (4)	1	2	1	0	0,9	1,8	0,9	0,0	Sousa
C ₃ -S ₁ (22)	13	8	1	0	11,7	7,2	0,9	0,0	Antenor Navarro
C ₃ -S ₂ (22)	5	16	0	1	4,5	14,4	0,0	0,9	Sousa
C ₃ -S ₃ (9)	0	5	2	2	0,0	4,5	1,8	1,8	Sousa
C ₃ -S ₄ (14)	12	2	0	0	10,8	1,8	0,0	0,0	Antenor Navarro
C ₄ -S ₂ (2)	0	2	0	0	0,0	1,8	0,0	0,0	Sousa
C ₄ -S ₄ (2)	1	1	0	0	0,9	0,9	0,0	0,0	Antenor Navarro/Sousa

Os resultados obtidos mostram menores riscos de sódio e maiores de salinização, o qual está de acordo com a literatura especializada (Molle e Cadier, 1992), que cita, para o nordeste, em relação ao uso das águas subterrâneas e superficiais na irrigação, menor perigo de sodificação dos solos do que riscos de salinização.

As classes mais frequentes, C₃-S₁ e C₃-S₂, com alto perigo de salinização do solo, porém com baixo e médio risco de sódio, se distribuíram em toda a Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, embora com valores menores de salinidade nos poços localizados nas bordas da sub-bacia de Brejo das Freiras, onde a formação aquífera Antenor Navarro ocorre em superfície, em particular, nas proximidades de Uiraúna e de Triunfo. Pode-se explicar essa distribuição da qualidade da água à luz do escoamento das águas subterrâneas nesta sub-bacia que se faz das zonas de recargas desse aquífero, com as partículas de sais migrando para a zona saturada do solo e daí para os exutórios da bacia. Os resultados obtidos coincidem com os de Albuquerque (1986) e com os de Lima *et al.* (2004), que citam que, embora a classe C₃-S₁ se distribua na maior parte da bacia, é em torno dessas duas cidades que ocorrem águas C₃-S₂, de alta salinidade e mediamente sódicas. Outras áreas de concentração das variedades C₃-S₁ e C₃-S₂ se observam nas proximidades da cidade de Santa Helena e do Açude Pilões, havendo nesta última, um poço de qualidade C₃-S₃ (altos riscos de sódio e de salinidade). Este açude está localizado no contato entre a formação

Sousa e o Cristalino e nas suas proximidades os poços devem captar o aquífero Sousa. Entre os agrupamentos citados ao redor das três cidades e do açude, se observam poços dispersos com qualidade C₁-S₁ e C₂-S₁.

A Figura 5.1.7 apresenta a distribuição da qualidade das águas para irrigação no mapa da bacia sob estudo, onde também foram sinalizadas algumas das ações antropogênicas que poderiam impactar os mananciais.

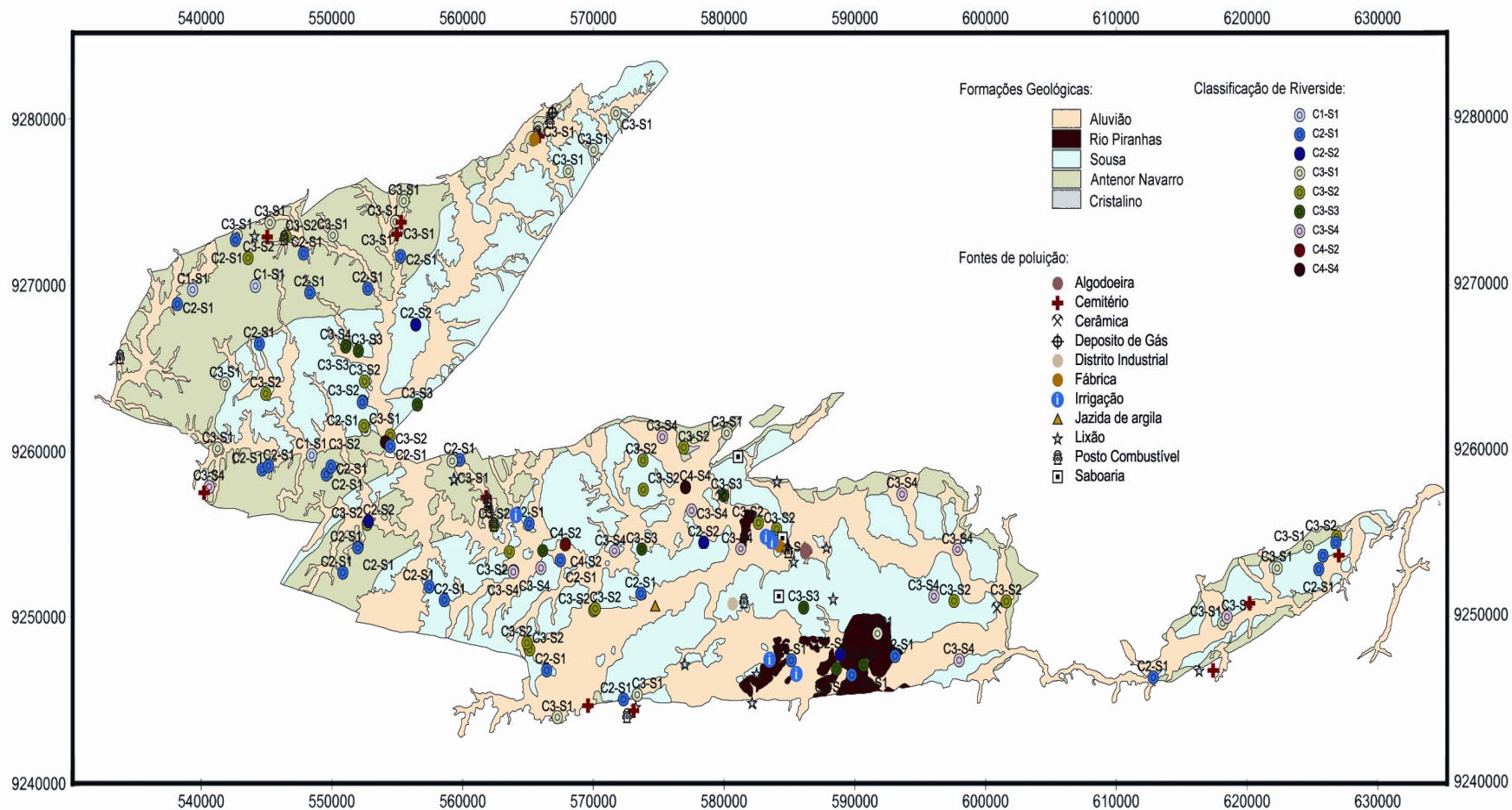


Figura 5.1. 7 - Mapa com a distribuição das classes d'água para irrigação segundo Riverside (USLL) e das atividades antropogênicas sobre a Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

Nas Figuras 5.1.8 e 5.1.9 tem-se a regionalização espacial das concentrações de parâmetros selecionados de qualidade na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe que confirma o observado nas análises anteriores.

O pH foi básico na maior parte da bacia, com valores levemente básicos sobre a formação Antenor Navarro.

A condutividade elétrica se manteve elevada e crescente em direção à parte norte da sub-bacia de Sousa, onde se concentra a zona petrolífera. Os SDT seguem a mesma tendência, assim como os teores de sulfato.

Seguindo a mesma distribuição espacial da condutividade elétrica e do SDT, o sódio e o cloreto são mais elevados na sub-bacia de Sousa e menores na sub-bacia Triunfo-Brejo das Freiras, exceto em duas áreas localizadas próximo das falhas de cisalhamento que limitam esta sub-bacia, sobre o Alto de Santa Helena. Essa distribuição iônica não se coaduna com as características de salinidade das águas subterrâneas contidas na formação Antenor Navarro, e sim com aquelas da formação Sousa, corroborando alterações na geologia da bacia, propostas por Albuquerque neste mesmo relatório.

A distribuição espacial da dureza parece estar associada à do íon magnésio, principalmente os núcleos, onde os valores mais altos são os mesmos e estão situados na sub-bacia de Sousa. Porém, esta distribuição na sub-bacia de Triunfo-Brejo das Freiras parece não guardar as suas relações com as litologias das formações Sousa e Antenor Navarro, distribuindo-se, ao menos angularmente, aos contatos entre estas formações.

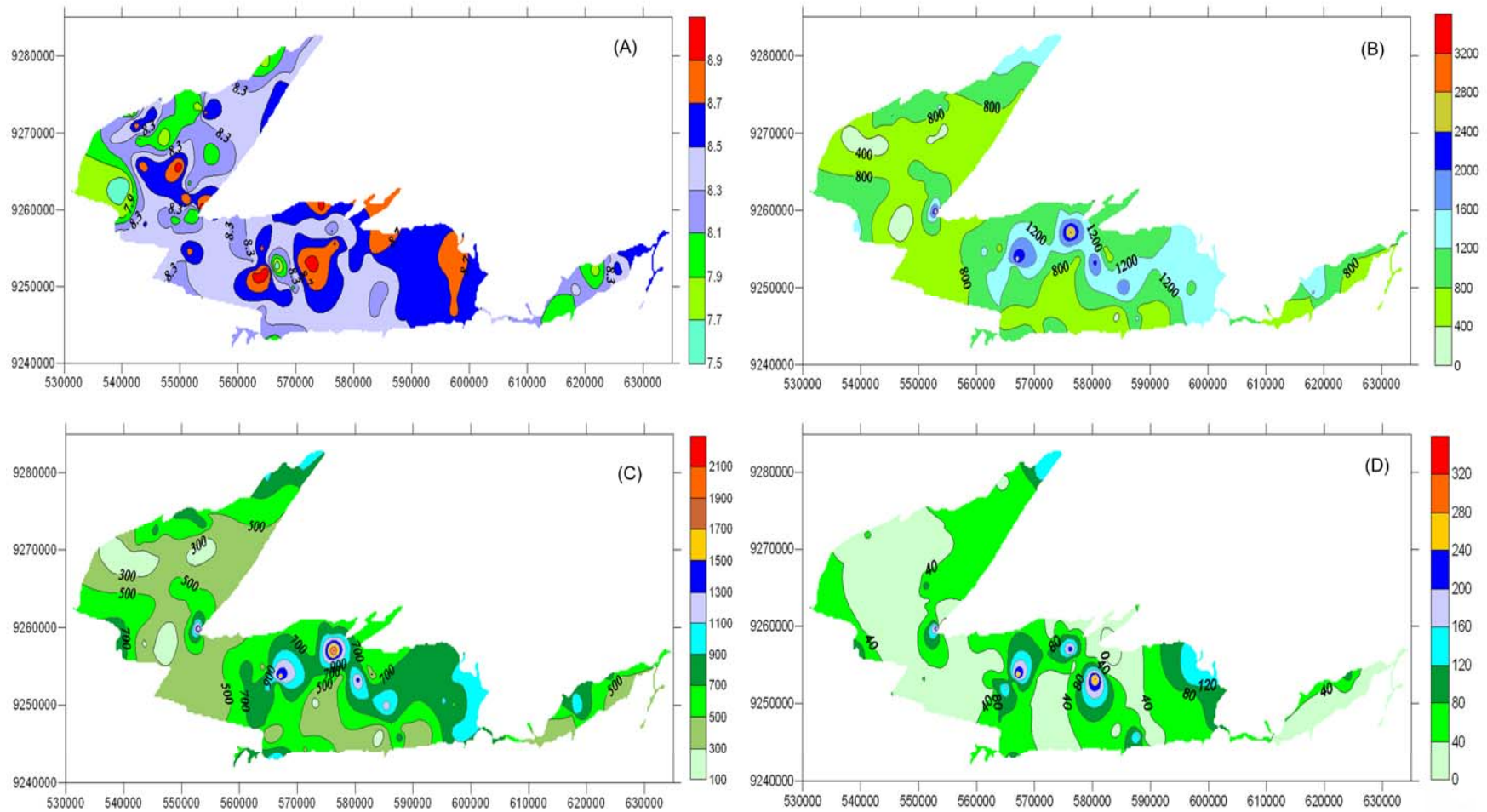


Figura 5.1. 8 - Mapas da distribuição espacial na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe dos parâmetros: (A) pH; (B) Condutividade Elétrica (µS/cm); (C) SDT (mg/L) e (D) Sulfato (mg/L).

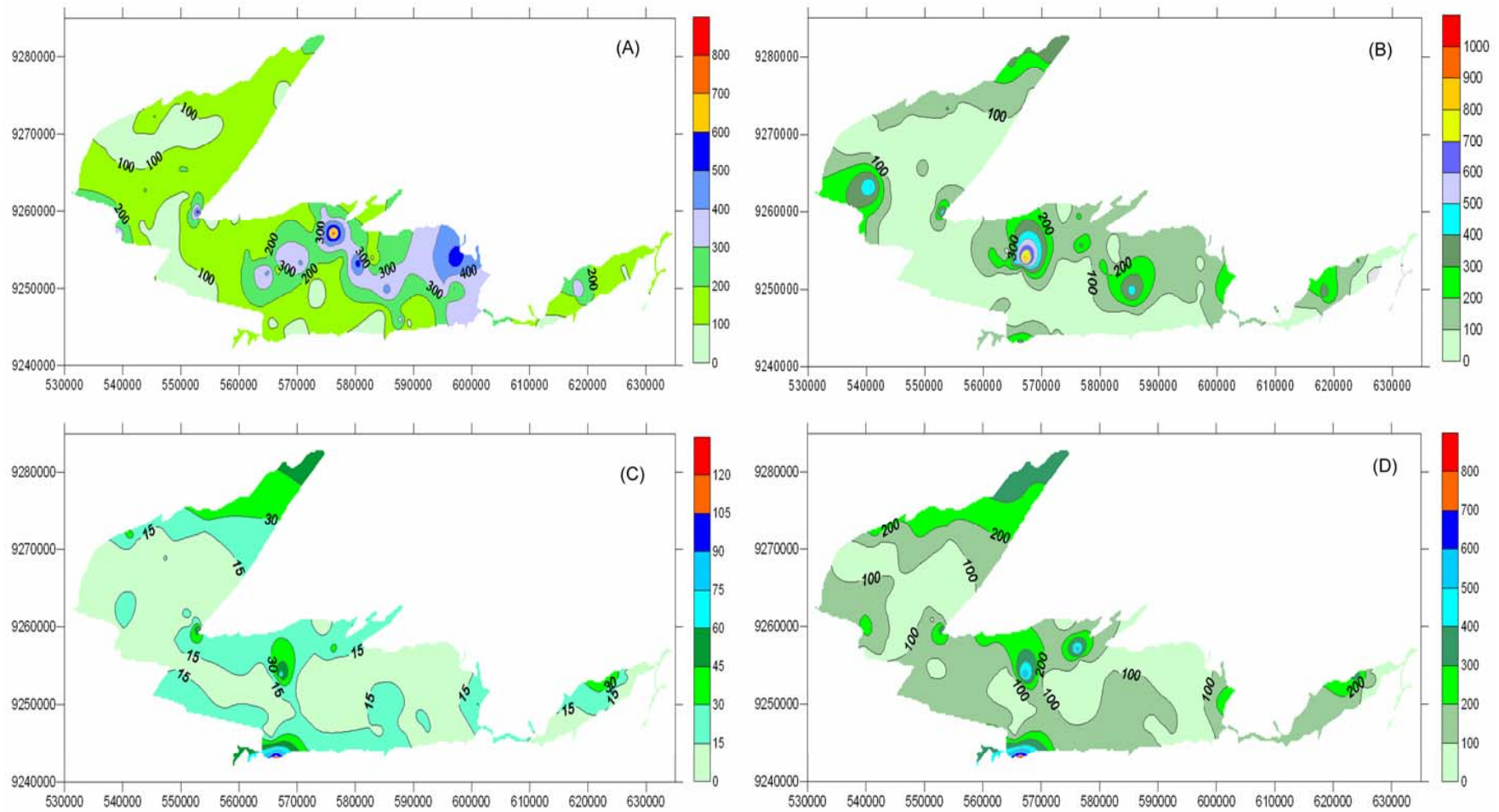


Figura 5.1. 9 - Mapas da distribuição espacial na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe dos parâmetros: (A) Sódio (mg/L); (B) Cloreto (mg/L); (C) Magnésio (mg/L) e (D) Dureza (mg/L).

A qualidade sanitária das águas sob estudo foi avaliada num total de 95 amostras, pertencentes a 37 poços, e coletadas em três campanhas realizadas em agosto e novembro de 2006 (período seco) e em fevereiro de 2007 (período chuvoso) . Foram quantificados coliformes totais e *E.coli*. A Tabela 5.1.4 mostra os resultados obtidos.

Tabela 5.1. 4 - Estatística básica das concentrações de *E.coli*/100mL em 95 amostras de água de poços

Media	Mediana	Desvio Padrão	Valor Mínimo	Valor Máximo
503	61	807	<1	> 2.500

Verifica-se que houve contaminação com material fecal, evidenciada pela presença de *E.coli* nessas águas. Os parâmetros de tendência central, média e mediana, indicaram alta variabilidade dos resultados individuais. De fato, o valor médio foi elevado e bem distante da mediana, e o desvio padrão foi superior à média. Os valores mínimos foram inferiores a 1 *E.coli*/100mL em algumas amostras e atingiram mais de 2.419 *E.coli*/100mL em outras. Esse valor de 2.419 *E.coli*/100mL é o limite que pode ser detectado com o método usado, e na amostra sem diluição.

Os resultados de todas as amostras foram organizados em ordem crescente de contaminação e agrupados por faixa de concentração de coliformes (Tab. 5.1.5).

Tabela 5.1. 5 - Número e porcentagem de amostras por faixa de concentração de *E.coli*/100mL

Faixa de variação (<i>E.coli</i> /100mL)	Numero de Amostras	Frequência (%)
<1	17	17,9
1 < 100	35	36,8
100 < 200	4	4,2
200 < 1000	23	24,2
1.000 < 2.419	5	5,3
> 2.419	11	11,6
Total	95	100%

Apenas 17 amostras reuniram condições sanitárias de portabilidade. Predominaram concentrações de *E.coli* na faixa 1 < 100 UFC/100 ml, seguidos da faixa 200 < 1.000 e >2.500 UFC/100 ml. Um total de 43 amostras apresentou mais de 100 coliformes fecais e 16 mais de 1.000 *E.coli*/100mL.

A seguir, se apresenta o mapa da Figura 5.1.10 com a distribuição espacial da qualidade sanitária dos 37 poços amostrados, considerando as faixas de concentração de *E.coli*, acima consideradas. Os dados utilizados correspondem aos valores medianos das concentrações de *E.coli* das três campanhas.

Considerando que a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde estabelece ausência de *E.coli* nas águas de consumo humano, assim, como pode ser visto na Figura 5.1.10, a maioria dessas águas é inadequada para essa finalidade. Dessa forma, embora a caracterização física e química das águas subterrâneas estudadas não apresentou limitações para consumo humano na maioria dos poços, a contaminação fecal limita de forma extrema sua utilização para beber, sendo necessária a desinfecção prévia ao consumo. De forma semelhante, a ausência de contaminação é condição básica para as águas destinadas à higiene pessoal (“usos mais exigentes”, na citada legislação). Entretanto, considerando a realidade do abastecimento de água das populações do semi-árido nordestino, que usam para beber e gasto em higiene familiar águas sem tratamento (seja de poços, de açudes ou de carro-pipa), é praticamente impossível evitar o contato humano com águas contaminadas.

Como exercício na busca de uma referência “aceitável” para uso em higiene pessoal nas condições supracitadas, pode-se considerar como exemplo a legislação brasileira referente à balneabilidade (Resolução CONAMA 257/2000) e usar as concentrações limites de bactérias para esta categoria. Essa resolução estabelece a faixa entre 250 a 1.000 *E.coli* (ou coliformes termotolerantes)/100 ml como águas próprias para uso em recreação de contato primário (natação) e como impróprias acima desse valor máximo. Ainda, águas com 250 *E.coli* /100 ml são consideradas de qualidade excelente para balneabilidade, sendo muito boas as que contêm 500 *E.coli* /100mL e apenas satisfatórias as que contêm valores próximos de 1.000NMP/100ml.

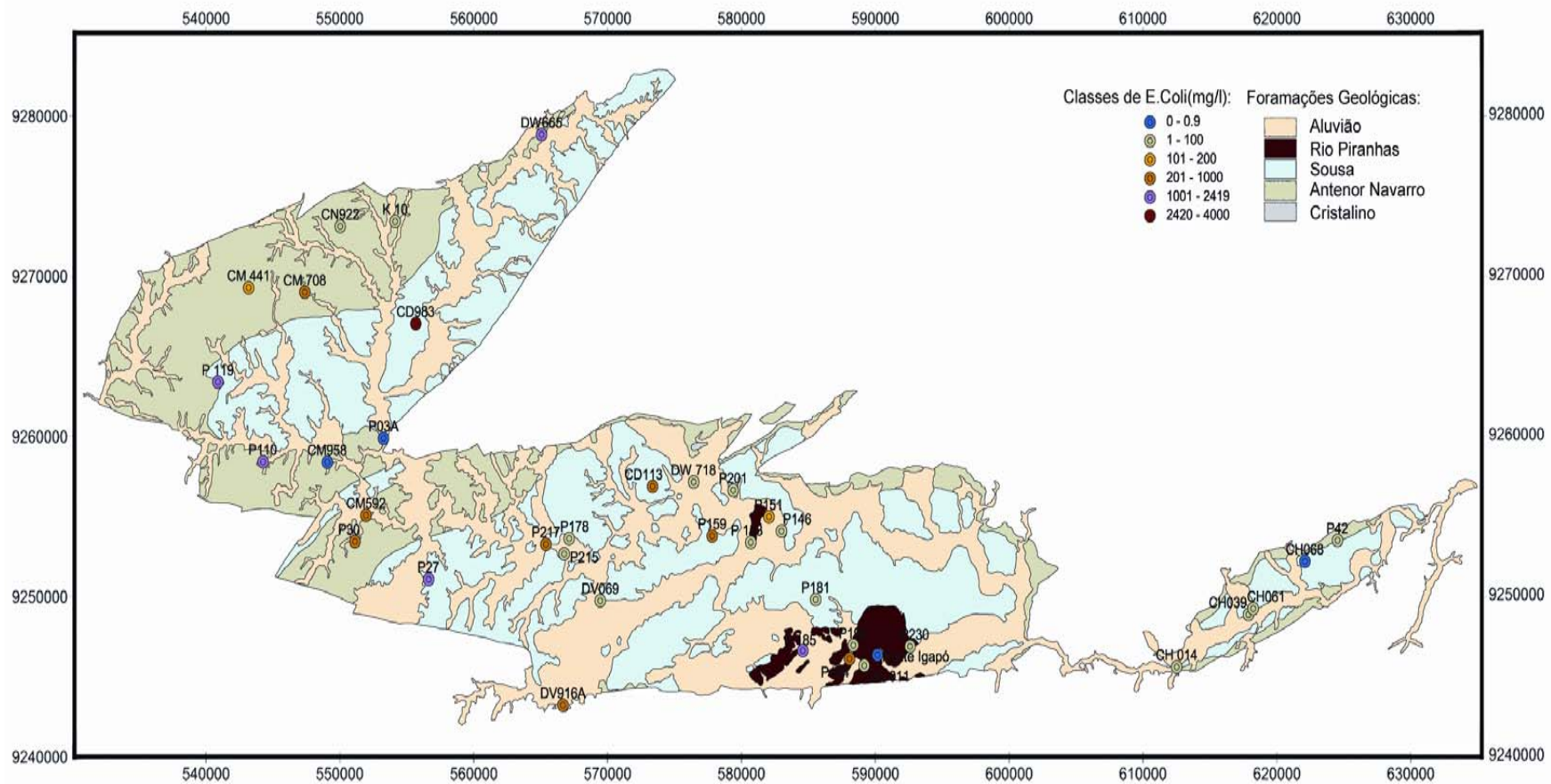


Figura 5.1. 10 - Mapa da distribuição espacial da qualidade sanitária de 37 poços amostrados em três campanhas (agosto e novembro de 2006 e fevereiro 2007) na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

Águas com *E.coli* ou de coliformes termotolerantes em concentrações superiores a 1.000 NMP/100ml não podem ser usadas para irrigação irrestrita (Resolução CONAMA 357/2005), ou seja, de verduras e frutas que serão consumidas cruas, sem retirada da casca ou película que as recobre. Portanto, numerosos poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe não podem ser usados para este tipo de irrigação e sim para árvores frutíferos com frutos altos sem contato com o solo, para cultivos de cerealíferas e de forrageiras, para cultivos diversos destinados à produção industrial e com uso mecanizado de semeadura e de coleta.

Outra indicação importante da Resolução 357/2005 refere-se ao valor limitante de *E.coli* ou de coliformes termotolerantes para dessedentação animal: acima de 4.000 NMP/100ml não são apropriadas para essa finalidade, sob riscos de serem águas contaminadas com altos teores de organismos patogênicos de veiculação hídrica.

Considerando as faixas de valores restritivos da concentração de *E.coli* (único indicador de contaminação fecal aceito internacionalmente) para diferentes atividades e usos, o conjunto de amostras agrupado acima foi organizado nas seguintes seis categorias:

- 1) $< 1 E.coli/100ml$ de água: sem restrição de uso;
- 2) $1 \leq E.coli/100ml < 100$: não aceitável para beber, “aceitável para higiene pessoal”, excelente para balneabilidade, excelente para irrigação irrestrita;
- 3) $100 \leq E.coli/100ml < 200$: não aceitável para beber, “com restrições de aceitabilidade para higiene pessoal” e excelente para balneabilidade, excelente para irrigação irrestrita;
- 4) $200 \leq E.coli/100ml < 1.000$: não aceitável para beber, “não aceitável para higiene pessoal”, muito boa (até $< 50 E.coli/100ml$) e boa (> 500 e $< 1.000 E.coli/100ml$) para balneabilidade, adequada para irrigação irrestrita;
- 5) $1.000 \leq E.coli/100ml < 2.419/100ml$: não aceitável para beber, “não aceitável para higiene pessoal”, não satisfatória para balneabilidade, não aceitável para irrigação irrestrita;
- 6) $> 2.419/100ml$: perigo de alta contaminação com microrganismos patogênicos.
Valores $\geq 4.000 E.coli /100ml$: não aceitável para consumo animal.

Do total de 95 amostras analisadas para qualidade sanitária, 60 correspondem a 20 poços que foram amostrados repetidamente nas três campanhas (ou nas três épocas – duas de seca e uma de chuva).

A Tabela 5.1.6 apresenta os resultados medianos das três campanhas de monitoramento para os parâmetros de coliformes totais e *E.coli* nos 20 poços amostrados na bacia, frisando que poços importantes, como o da Fonte Igapó, principal distribuidora local de água comercializada para o consumo humano apresentou padrões aceitáveis para esse fim. Porém, poços como o DV916A que atende populações do meio rural apresentou concentrações de *E.coli* inaceitáveis para os diversos usos, desde beber, irrigação e outros.

Tabela 5.1. 6 – Valores de coliformes totais (CT) e *E.coli* por 100ml de amostra

<i>Código do Poço</i>	<i>CT</i>	<i>E.Coli</i>
	<i>NMP/100ml</i>	<i>NMP/100ml</i>
DV069	686,7	1,0
P146	2500,0	1,0
P230	209,8	31,6
P42	2500,0	112,6
DV916A	2500,0	211,7
CH061	2500,0	307,6
P159	2500,0	313,0
CD983	488,4	325,5
P151	2500,0	325,5
CH039	43,5	381,1
P201	2500,0	387,3
CM592	2500,0	552,0
P178	1986,3	579,4
CD113	1046,2	920,8
CN992	>2500	>2500
DW665	>2500	>2500
P110	>2500	>2500
P27	>2500	>2500
Fonte Igapó	42,2	<1
P03A	<1	<1

Com esse universo amostral foi feito um estudo comparativo da distribuição das concentrações de *E.coli* e de coliformes totais entre as épocas de seca e de chuva. Este estudo é apresentado na segunda parte deste relatório.

Variação temporal e espacial da qualidade das águas subterrâneas da Bacia Sedimentar de Rio do Peixe (épocas de seca e de chuvas)

Época de seca: agosto-novembro de 2005

O estudo da variação temporal da qualidade das águas subterrâneas por época de seca e de chuva permitiu analisar as variações dos parâmetros qualitativos das águas subterrâneas sob diferentes condições ambientais. Do total de 111 poços, 45 foram amostrados e analisados para estudos da qualidade física e química da água nas duas épocas de seca (agosto-novembro de 2005, agosto-novembro de 2006) e 21 nas duas épocas de chuvas (maio 2006, fevereiro de 2007).

Tabela 5.1. 7 - Estatística Básica dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, para o período seco do ano de 2005 (agosto – novembro /05) para 45 amostras

Parâmetros	Média	Mediana	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
<i>pH</i>	8,60	8,64	0,36	7,71	9,24
<i>CE (μS/cm)</i>	1126,23	930,00	653,67	43,50	2860,00
<i>Ca (mg/l)</i>	30,64	25,20	35,80	5,00	225,00
<i>Mg (mg/l)</i>	20,43	14,40	25,86	2,76	169,44
<i>Sódio (mg/l)</i>	232,98	181,47	190,66	29,44	1026,26
<i>Potássio(mg/l)</i>	4,46	3,51	3,26	0,19	13,65
<i>Cloreto (mg/l)</i>	165,29	115,21	150,14	13,12	604,42
<i>Sulfato (mg/l)</i>	96,04	36,96	227,77	1,92	1476,48
<i>Bicarbonato (mg/l)</i>	312,52	280,60	184,62	82,35	1116,30
<i>Carbonato (mg/l)</i>	38,82	36,00	28,81	0,00	145,80
<i>Ferro (mg/l)</i>	0,63	0,39	0,60	0,07	2,37
<i>Oxig. Cons. (mg/l)</i>	3,04	2,30	2,98	0,70	19,50
<i>AlCACO₃ (mgCaCO₃/l)</i>	61,24	59,00	43,25	0,00	243,00
<i>AlHCO₃ (mgCaCO₃/l)</i>	256,61	230,00	152,72	67,50	915,00
<i>ALTotal (mgCaCO₃/l)</i>	321,90	301,50	189,45	83,50	1065,00
<i>Dureza (mgCaCO₃/l)</i>	160,23	126,25	172,68	28,75	973,12
<i>SDT (mg/l)</i>	771,25	614,40	491,47	142,00	2784,00
<i>Amonia (mg/l)</i>	1,29	0,28	6,22	0,04	42,00
<i>Nitritos (mg/l)</i>	0,03	0,01	0,04	0,00	0,22
<i>Nitratos (mg/l)</i>	2,23	0,18	11,18	0,00	75,00

Os resultados dos valores médios das 45 amostras indicam, para a primeira estação seca, características qualitativas semelhantes para seis dos 20 parâmetros com aquelas observadas nas análises das 111 amostras de água da bacia para todo o período. Os parâmetros que menos variaram em relação aos valores médios e medianos dos 111 poços foram: pH, carbonatos, oxigênio consumido, alcalinidade de carbonatos, de bicarbonatos e total. Foram levemente superiores neste período seco, em relação à média e mediana de

todo o período, CE, SDT, Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^- , dureza, amônia, nitrito e nitrato. Portanto, na seca de agosto – novembro de 2005 as águas foram de pior qualidade em relação aos valores médios e mediano observado na análise global, ao longo de todo o período de estudo (agosto 2005 a fevereiro 2007) nas águas dos poços desta bacia. A deterioração da qualidade se deve à concentração de íons ao longo da estiagem, pela diminuição do nível estático da água, o qual tornou as águas subterrâneas mais salinas e de maior CE e mais alcalinas e duras e, portanto, mais limitada para usos diversos, entre eles a irrigação.

O comportamento observado acima, de concentração das espécies química na época de estiagens, se repetiu na segunda época seca. Os diagramas de Piper, elaborados para cada uma das épocas de seca e de chuva, mostram a distribuição iônica sob as influências das variações climáticas, evidenciando as flutuações temporais da qualidade das águas dos poços. Destaca-se que essas variações qualitativas apresentaram maiores ou menores flutuações em cada uma das épocas climáticas estudadas ao longo do período de amostragem.

Esse diagrama, aplicado para a primeira época seca é apresentado na Figura 5.1.11, evidencia a composição iônica dos 45 poços amostrados no verão de 2005 e a distribuição dessa qualidade segundo as formações geológicas da bacia. A qualidade predominante foi de águas bicarbonatadas e sódicas, seguidas de algumas águas cloretadas sódicas e escassas sulfatadas, distribuídas nas quatro formações geológicas, com a maior diversidade na formação Sousa. As formações Antenor Navarro e os aluviões tiveram as águas de melhores qualidades dentro desse grupo (águas menos sódicas, menos cloretadas e menos duras, entre outros atributos de qualidade e por tanto de menor CE) nesta época seca.

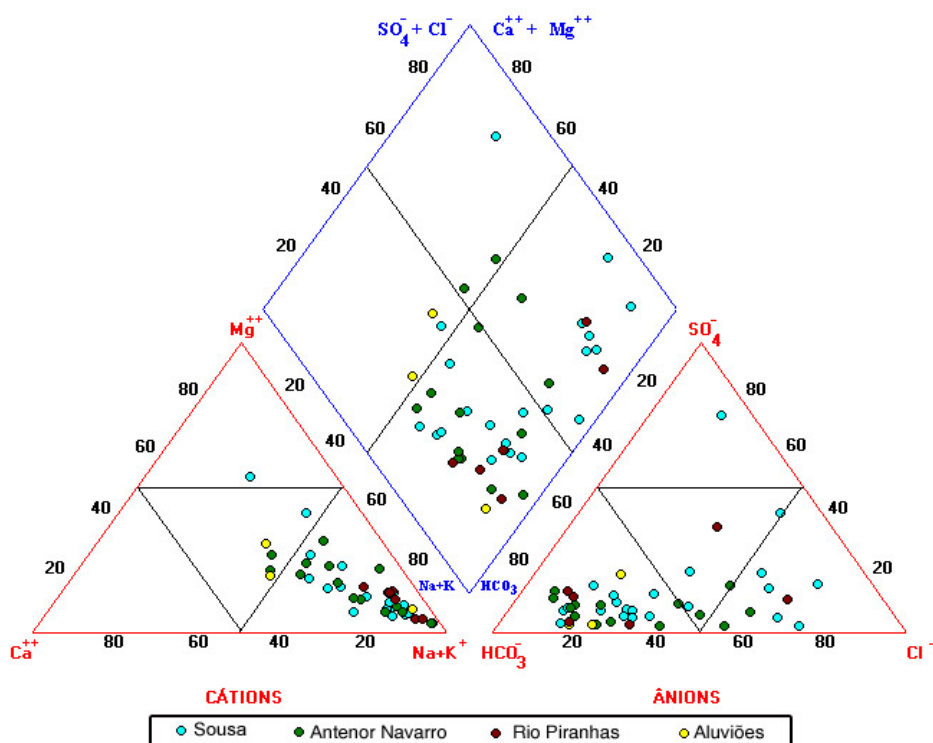


Figura 5.1. 11 - Diagrama de Piper. Íons predominantes nas águas subterrâneas de 45 poços na primeira época de seca (agosto-novembro/2005), distribuídos nas quatro formações geológicas da Bacia Sedimentar de São João do Rio do Peixe-PB.

A análise de agrupamento mostrou seis grupos de poços com águas de qualidades diferentes e que predominaram na bacia, de forma semelhante que aqueles observados na análises geral dos 111 poços.

Na Tabela 5.1.8 tem-se o número de poços em cada agrupamento, segundo características qualitativas semelhantes nesta época foram: 23 poços em G1; 5 em G2; 4 em G3; 2 em G4; 5 em G5; 2 em G6 e 4 formaram grupos individuais de amostra. A análise é análoga à anterior, com ocorrências do mesmo agrupamento nas diversas formações, com alguma predominância sobre as demais, exceto os G4 e G6, que ocorrem exclusivamente na formação Sousa, os demais abrangem praticamente toda a bacia.

Tabela 5.1. 8 - Ocorrência dos diversos grupos na estação seca de 2005 por formação geológica e sua predominância

Grupo de qualidade (Nº de amostras)	Número de amostras				Frequência de ocorrência (%)				Predominância
	Formações				Formações				
	Antenor Navarro	Sousa	Rio Piranhas	Aluvião	Antenor Navarro	Sousa	Rio Piranhas	Aluvião	
G1 (23)	8	10	4	1	17,8	22,2	8,9	2,2	Sousa
G2 (5)	2	1	0	2	4,4	2,2	0,0	4,4	Antenor Navarro
G3 (4)	0	4	0	0	0,0	8,9	0,0	0,0	Sousa
G4 (2)	0	1	1	0	0,0	2,2	2,2	0,0	Antenor Navarro/Sousa
G5 (5)	2	2	0	1	4,4	4,4	0,0	2,2	Antenor Navarro/Sousa
G6 (2)	0	2	0	0	0,0	4,4	0,0	0,0	Sousa
G _{sozinho} (4)	1	2	0	1	2,2	4,4	0,0	2,2	Sousa

As diferenças qualitativas principais com a análises dos 111 poços residem nas concentrações mais altas dos íons principais, que caracterizam os 6 conjuntos de poços. As variáveis qualitativas que diferenciaram esses agrupamentos neste período seco foram as mesmas dos agrupamentos com todas as amostras: CE, Na⁺, Cl⁻, SO₄⁼, SDT. Não foram discriminantes carbonatos e bicarbonatos, alcalinidade de bicarbonatos, carbonatos e total (exceto para G4). Nitrito contribuiu significativamente, com altos valores na seca, na diferenciação do grupo G6. Este grupo teve os maiores valores de CE, SDT, sódio, nitrito e sulfato, entre outros atributos qualitativos, de forma semelhante ao visualizado na análise geral.

Os resultados da ANOVA são apresentados no [Anexo A5.2](#) e a representação GT2 é mostrada a seguir nas Figuras 5.1.12 e 5.1.13. Os gráficos GT-2 mostram as flutuações quantitativas dos parâmetros de qualidade dos principais agrupamentos

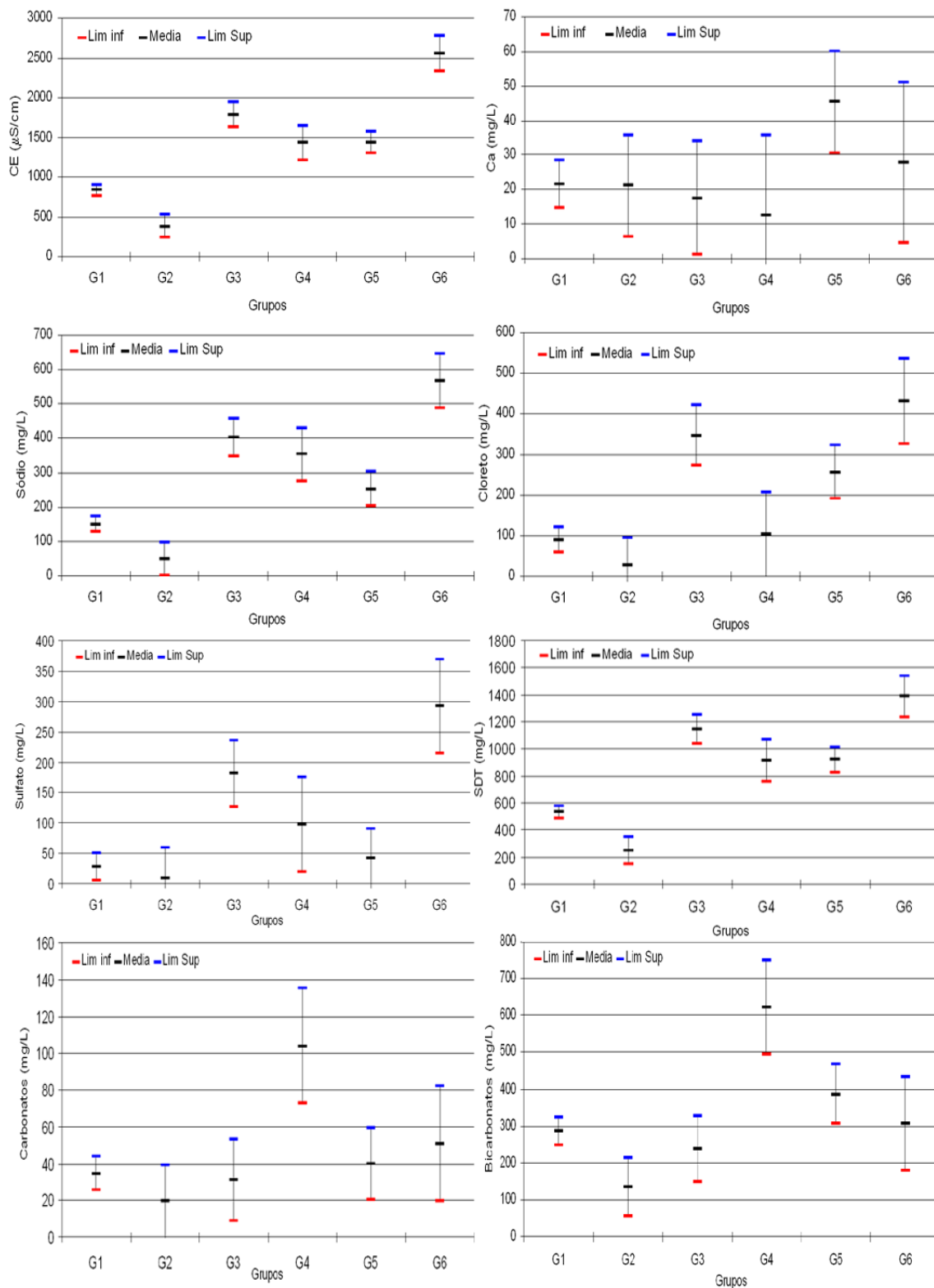


Figura 5.1. 12 - Gráficos GT2 (fator único) para os 6 maiores agrupamentos da qualidade da água de 45 poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, em amostras coletadas em agosto a novembro de 2005, época de seca.

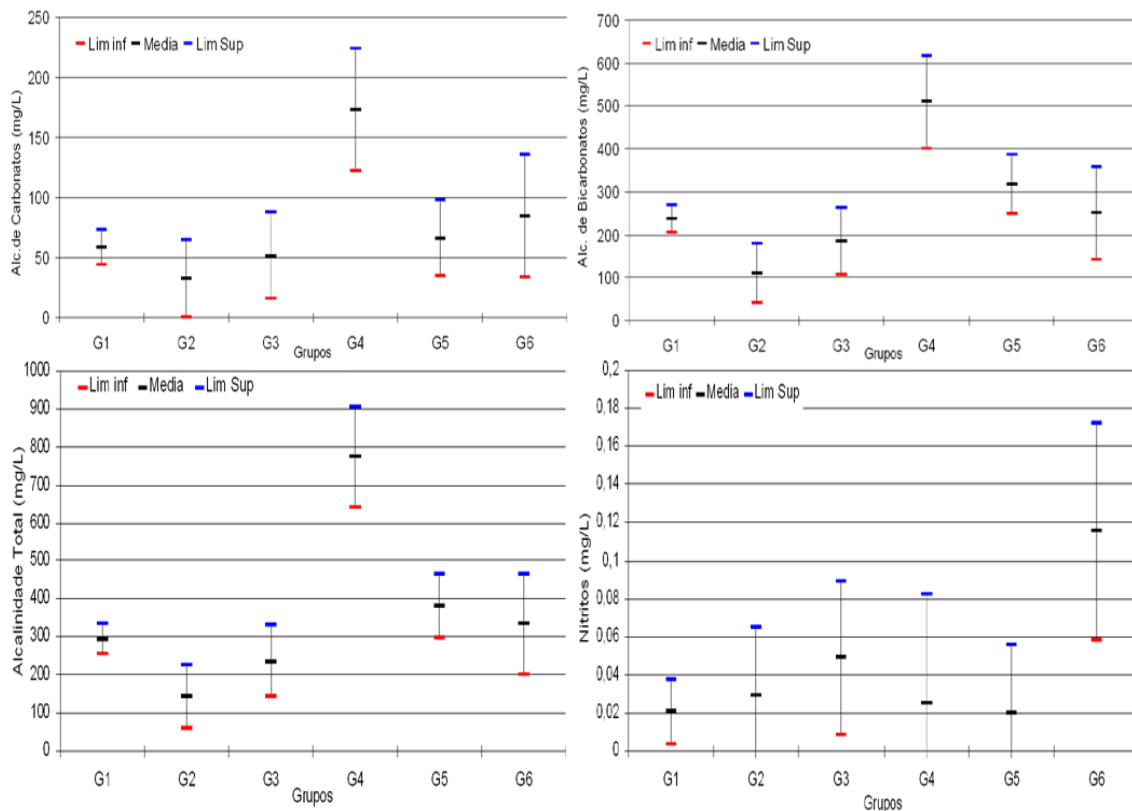


Figura 5.1. 13 - Gráficos GT2 (fator único) para os 6 maiores agrupamentos da qualidade da água de 45 poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, em amostras coletadas em agosto a novembro de 2005, época de seca.

Os gráficos Box-plot mostram, de forma mais detalhada, as flutuações dos parâmetros. Observa-se que em toda a bacia, os parâmetros que tiveram comportamento (flutuações) semelhante com a primeira época seca estudada foram: pH, Ca, ferro, oxigênio consumido, amônia, nitratos. Magnésio também teve distribuição bastante homogênea, exceto em G-4 e G-5, onde apresentou elevadas concentrações, sendo um atributo qualitativo que diferenciou essas águas; outros parâmetros com distribuição semelhante foram carbonatos, alcalinidade total e de carbonato e de bicarbonato exceto em G-4, onde tiveram os mais altos valores, assim como dureza e nitrito, entre outros, em G-6 (Figuras 5.1.14 a 5.1.16).

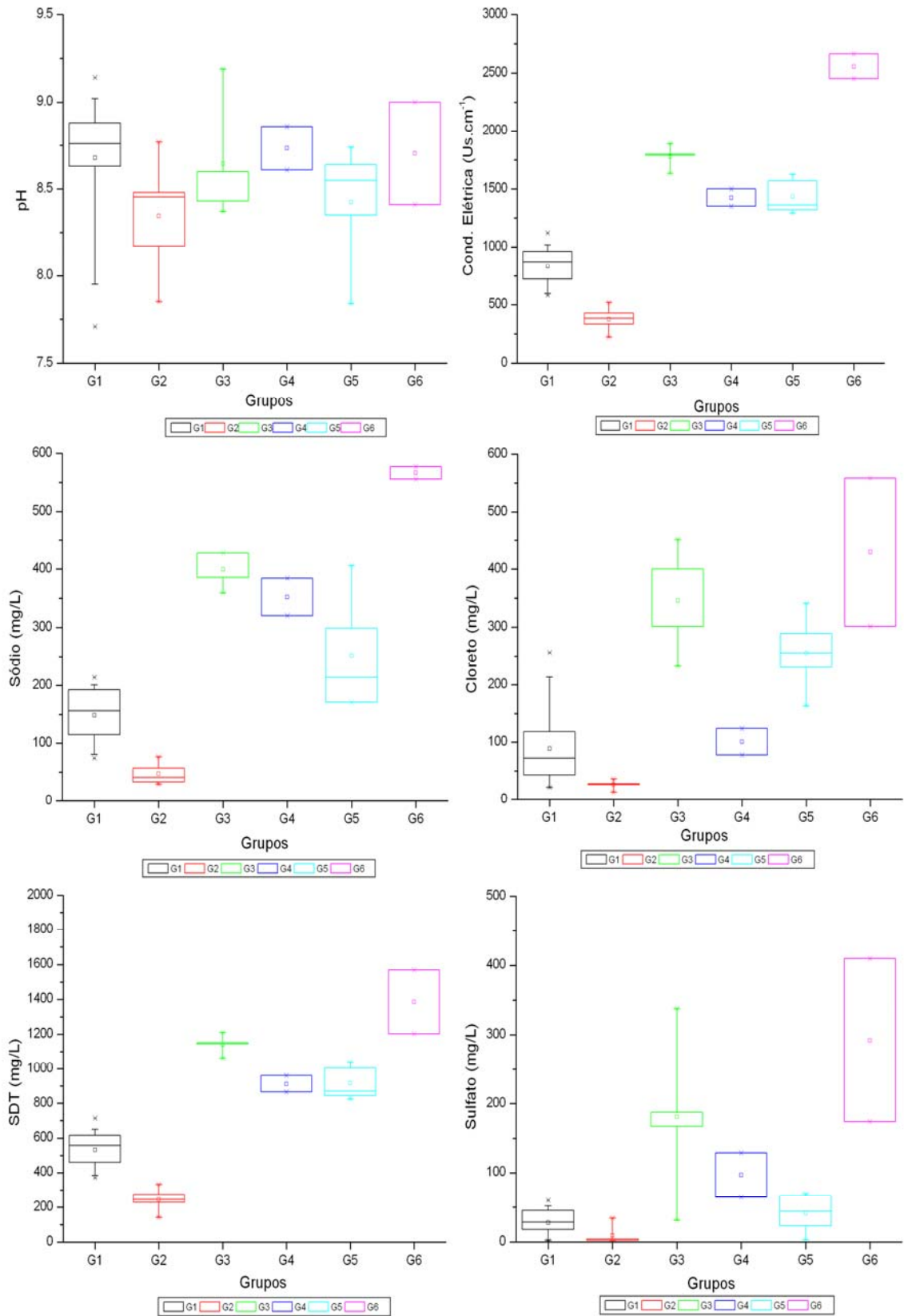


Figura 5.1. 14 - Gráficos Box- plot apresentam de forma mais detalhada, as flutuações dos parâmetros na estação seca de 2005.

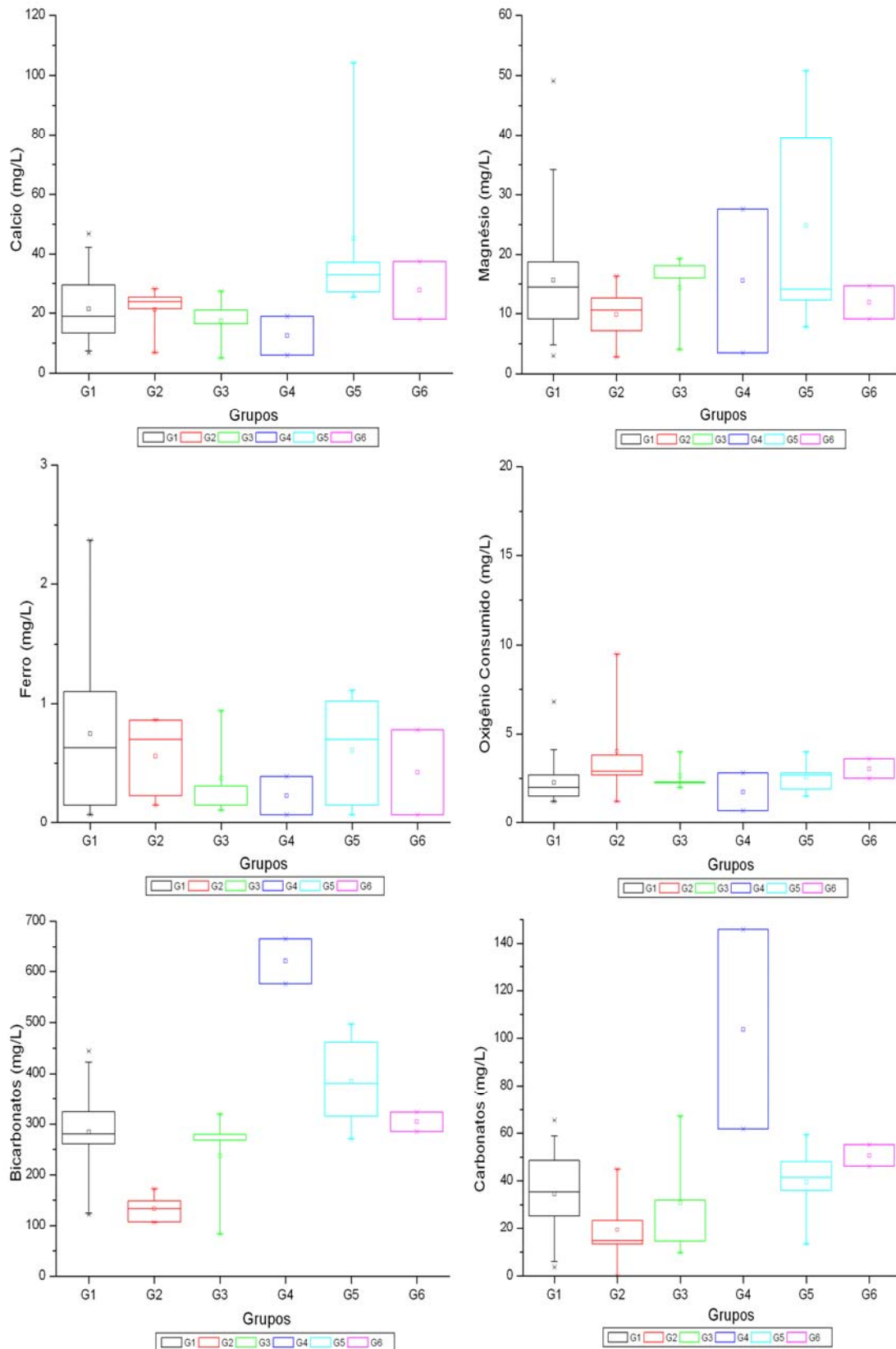


Figura 5.1. 15 - Gráficos Box- plot apresentam de forma mais detalhada as flutuações dos parâmetros na estação seca de 2005.

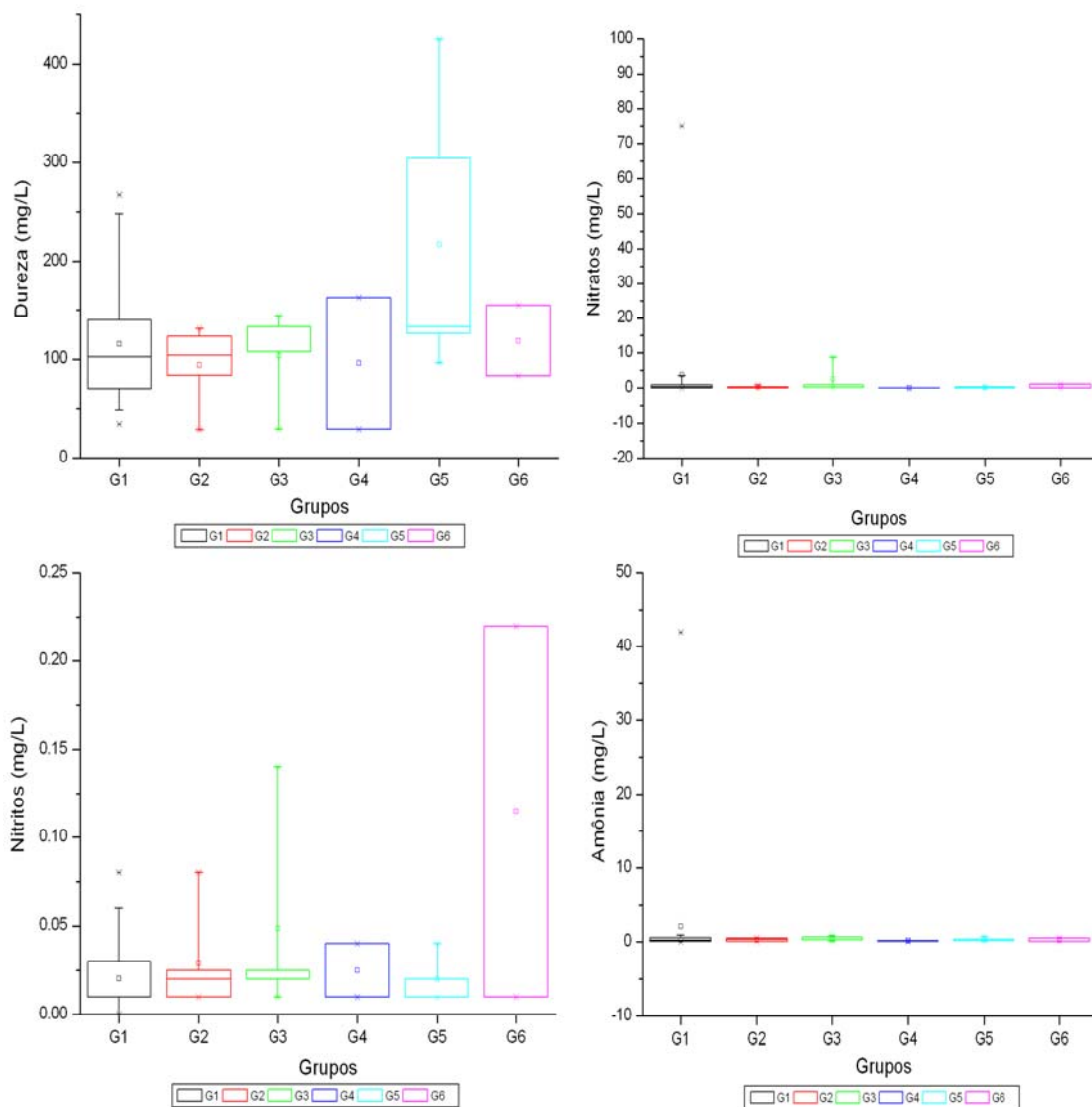


Figura 5.1. 16 - Gráficos Box- plot apresentam de forma mais detalhada as flutuações dos parâmetros na estação seca de 2005.

O diagrama de Riverside, a seguir, evidência as classes das águas para irrigação durante o período seco de 2005. No geral, as qualidades foram às mesmas já observadas nos 111 poços, com distribuição espacial (Figura 5.1.17)

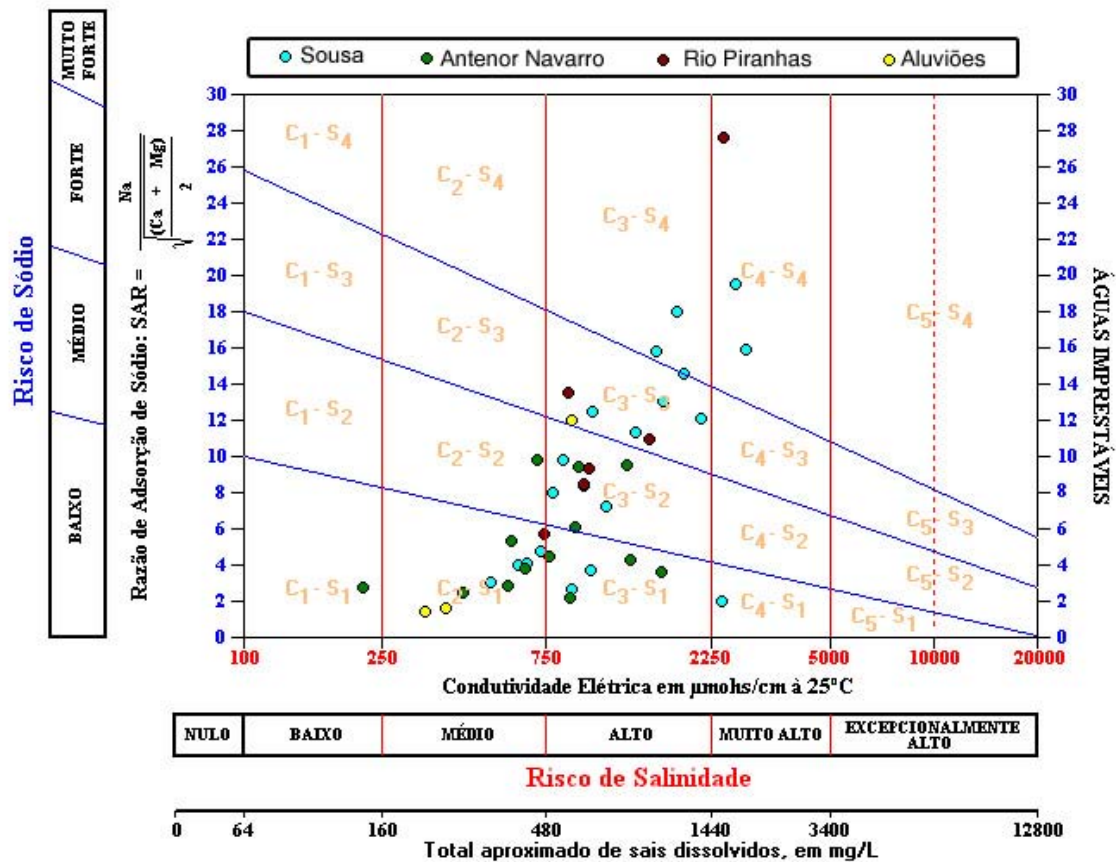


Figura 5.1. 17 - Distribuição dos 45 poços amostrados na seca de 2005, no Diagrama de Riverside - USLL, indicando o risco de salinidade e o risco de sódio de suas águas.

Época de seca, de agosto a novembro de 2006

Na Tabela 5.1.9 se apresentam os resultados da estatística básica para o período seco de agosto-novembro de 2006.

Comparando os valores médios das variáveis qualitativas de ambos os períodos secos, no se observam grandes diferenças entre eles, embora houve, na segunda época seca, pequeno decréscimo de CE, devido aos menores teores de Mg^{++} , Ca^{++} , Na^{+} , K^{+} e cloretos nesse período. As concentrações de ferro também foram menores nesta segunda época seca em relação à primeira. Aumentaram levemente sulfato, alcalinidade de carbonato e amônio. As diferentes contrações desses íons nos diferentes poços foram determinantes de grupos de poços com águas de melhor qualidade (menores concentrações iônicas) nesta época.

Tabela 5.1. 9 - Estatística Básica dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, para o período seco do ano de 2006 (agosto – novembro /06) para 45 amostras

Parâmetros	Média	Mediana	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
<i>pH</i>	8,39	8,34	0,44	7,54	9,39
<i>CE (μS/cm)</i>	1011,39	810,00	675,94	202,00	3126,50
<i>Ca (mg/l)</i>	32,24	23,90	30,56	2,80	146,10
<i>Mg (mg/l)</i>	18,51	12,30	20,63	1,20	115,98
<i>Sódio (mg/l)</i>	213,18	147,89	178,92	25,07	867,33
<i>Potássio(mg/l)</i>	4,96	2,73	9,37	0,39	62,21
<i>Cloreto (mg/l)</i>	137,11	85,08	153,37	12,76	800,86
<i>Sulfato (mg/l)</i>	61,52	46,08	58,06	12,96	227,52
<i>Bicarbonato (mg/l)</i>	305,29	278,77	155,74	20,13	880,23
<i>Carbonato (mg/l)</i>	43,90	39,00	31,99	0,00	188,70
<i>Ferro (mg/l)</i>	0,39	0,23	0,47	0,07	3,11
<i>Oxig. Cons. (mg/l)</i>	2,27	1,60	2,59	0,70	16,40
<i>AlCACO₃ (mgCaCO₃/l)</i>	70,53	65,00	52,76	0,00	314,50
<i>AlHCO₃ (mgCaCO₃/l)</i>	251,16	228,50	121,56	16,50	721,50
<i>ALTtotal (mgCaCO₃/l)</i>	323,53	300,75	142,66	105,50	920,50
<i>Dureza (mgCaCO₃/l)</i>	183,24	116,56	172,49	27,19	785,00
<i>SDT (mg/l)</i>	657,46	498,50	436,27	129,00	2000,50
<i>Amonia (mg/l)</i>	0,95	0,73	0,54	0,00	3,18
<i>Nitritos (mg/l)</i>	0,10	0,02	0,25	0,01	1,12
<i>Nitratos (mg/l)</i>	0,91	0,20	2,09	0,00	9,74

O diagrama de Piper, com a distribuição iônica nas águas dos 45 poços para este segundo período seco (Figura 5.1.18), mostra, quando comparado com o da primeira época seca, menores concentrações de cálcio e de magnésio assim como de sulfato e cloretos. Os poços de melhor qualidade na segunda seca se localizam na formação Antenor Navarro e Rio Piranhas e alguns na formação Sousa. Antenor Navarro é zona de recarga do aquífero.

Em ambas as épocas secas verificam-se as características de águas duras, bicarbonatadas e sódicas, embora com menores concentrações na segunda época seca.

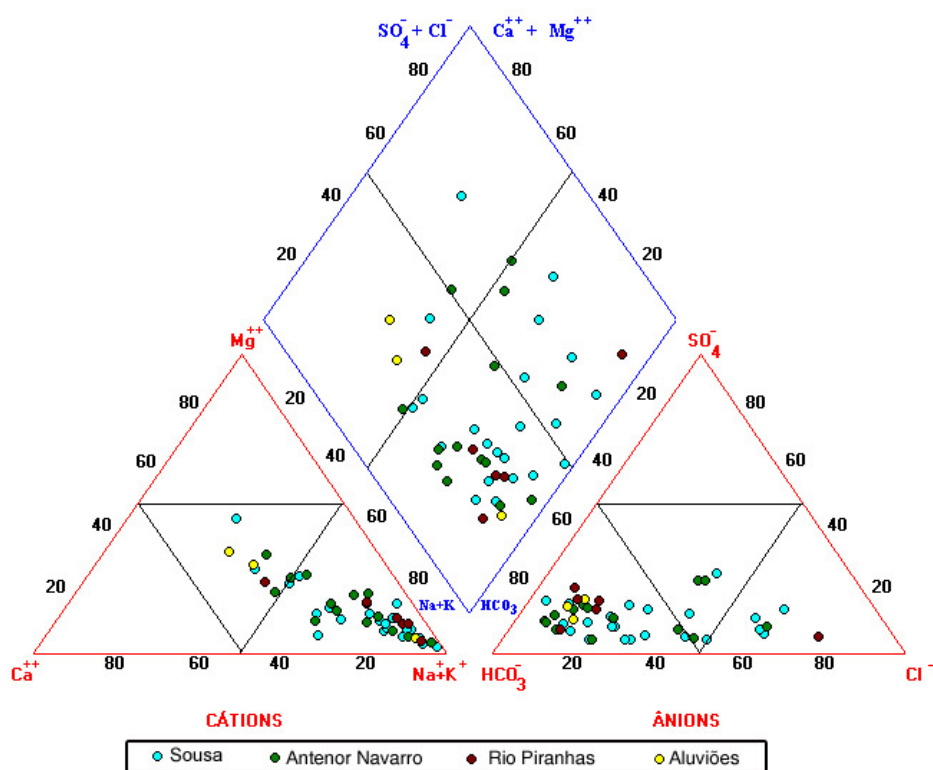


Figura 5.1. 18 - Diagrama de Piper. Íons predominantes nas águas subterrâneas de 45 poços na segunda época seca (agosto-novembro/2006) distribuídos nas quatro formações geológicas da Bacia Sedimentar de São João do Rio do Peixe. PB.

A análise de agrupamento evidenciou apenas 4 grupos principais de poços de qualidade semelhante, ou seja, que na segunda época seca a qualidade foi mais homogênea nesta bacia. Alcalinidade total, alcalinidade de carbonatos e de bicarbonatos e dureza apresentaram concentrações dentro dos limites já observados nas águas desta bacia, evidenciando suas características de águas duras, bicarbonatadas e sódicas.

Na Tabela 5.1.10 tem-se o número de poços em cada agrupamento, segundo características qualitativas semelhantes nesta época foram: 19 poços em G1; 11 em G2; 2 em G3; 5 em G4 e 8 formaram grupos individuais de amostra. A análise é análoga à anterior, com ocorrências do mesmo agrupamento nas diversas formações, com alguma predominância sobre as demais: G1 foi predominante em Antenor Navarro, junto com G2, confirmando que essa formação reúne poços de melhor qualidade de água. Os resultados da ANOVA são apresentados no [Anexo A5.3](#) e os gráficos GT-2 da Figura 5.1.19 mostram o comportamento dos parâmetros que discriminaram os 4 grupos principais de qualidade

na segunda época seca estudada. Pode-se verificar que em geral, houve menores concentrações dos íons do que na estação seca anterior.

Tabela 5.1. 10 - Ocorrência dos diversos grupos na estação seca de 2006 por formação geológica e sua predominância

Grupo de qualidade (Nº de amostras)	Número de amostras				Frequência de ocorrência (%)				Predominância
	Formações				Formações				
	Antenor Navarro	Sousa	Rio Piranhas	Aluvião	Antenor Navarro	Sousa	Rio Piranhas	Aluvião	
G1 (19)	8	5	4	2	17,8	11,1	8,9	4,4	Antenor Navarro
G2 (11)	2	8	0	1	4,4	17,8	0,0	2,2	Antenor Navarro
G3 (2)	1	1	0	0	2,2	2,2	0,0	0,0	Antenor Navarro/Sousa
G4 (5)	1	3	0	1	2,2	6,7	0,0	2,2	Sousa
G _{sozinho} (8)	1	6	1	0	2,2	13,3	2,2	0,0	Sousa

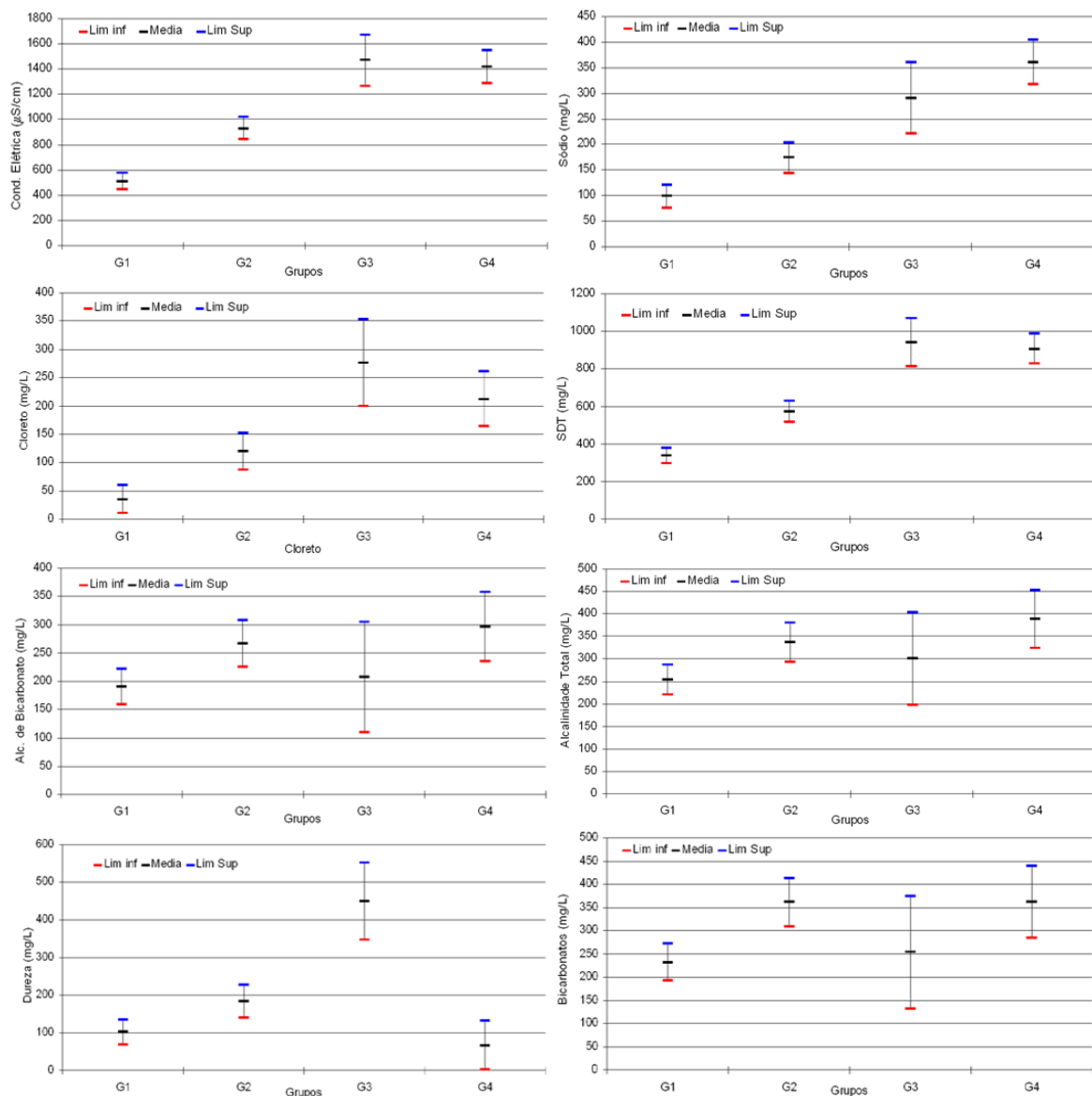


Figura 5.1. 19 - Gráficos GT2 (fator único) para os 4 maiores agrupamentos da qualidade da água de 45 poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, em amostras coletadas em agosto a novembro de 2006, época de seca.

Observam-se concentrações crescentes de CE, sódio e cloreto desde G-1 a G-4, sendo este último o grupo das águas de pior qualidade física e química e predominante na formação Sousa.. As variações das concentrações de cada parâmetro qualitativo são apresentadas nos gráficos Box - plot, a seguir:

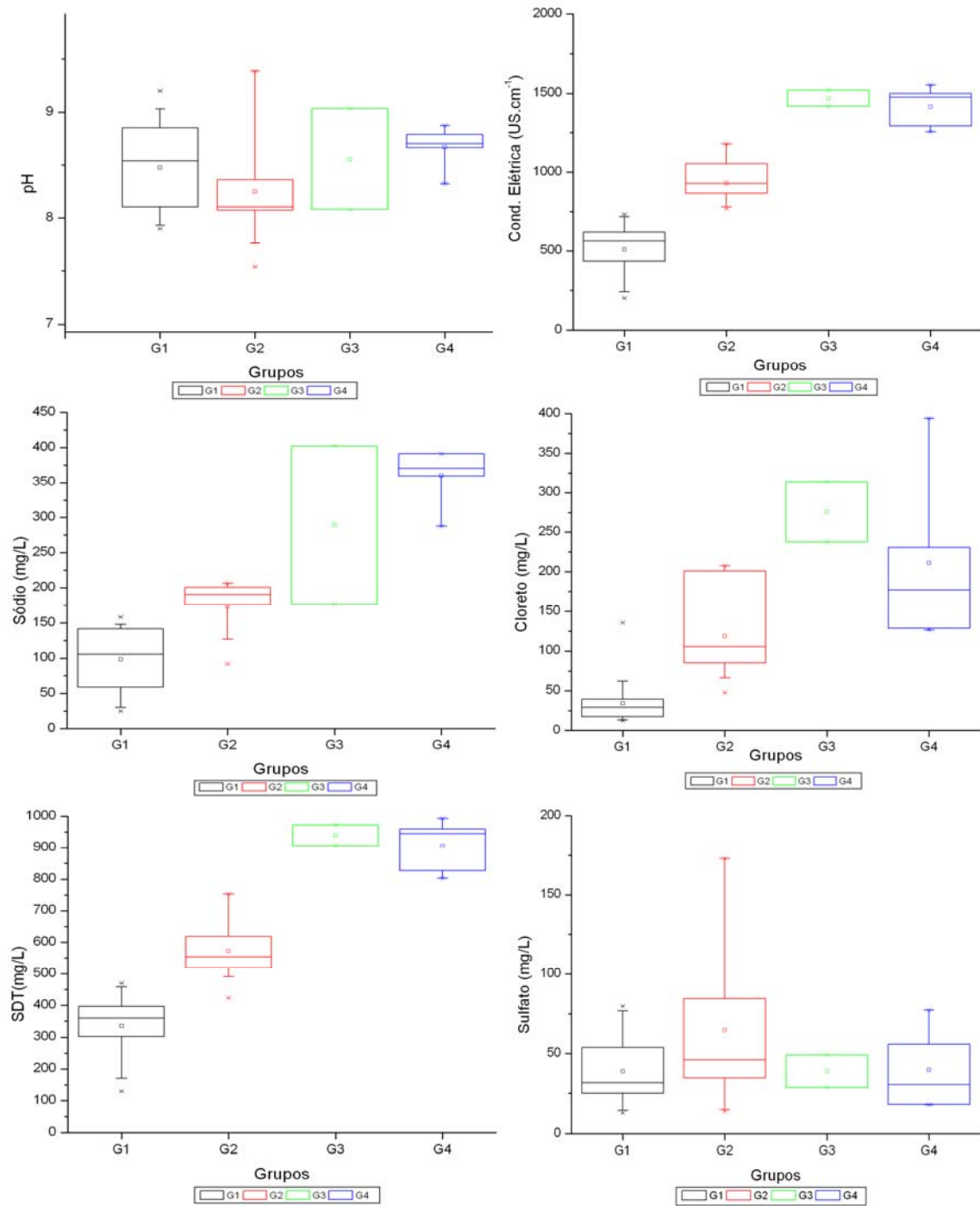


Figura 5.1. 20 - Gráficos Blox-pot 4 com as variações das concentrações de cada parâmetro qualitativo de agosto a novembro de 2006, época de seca.

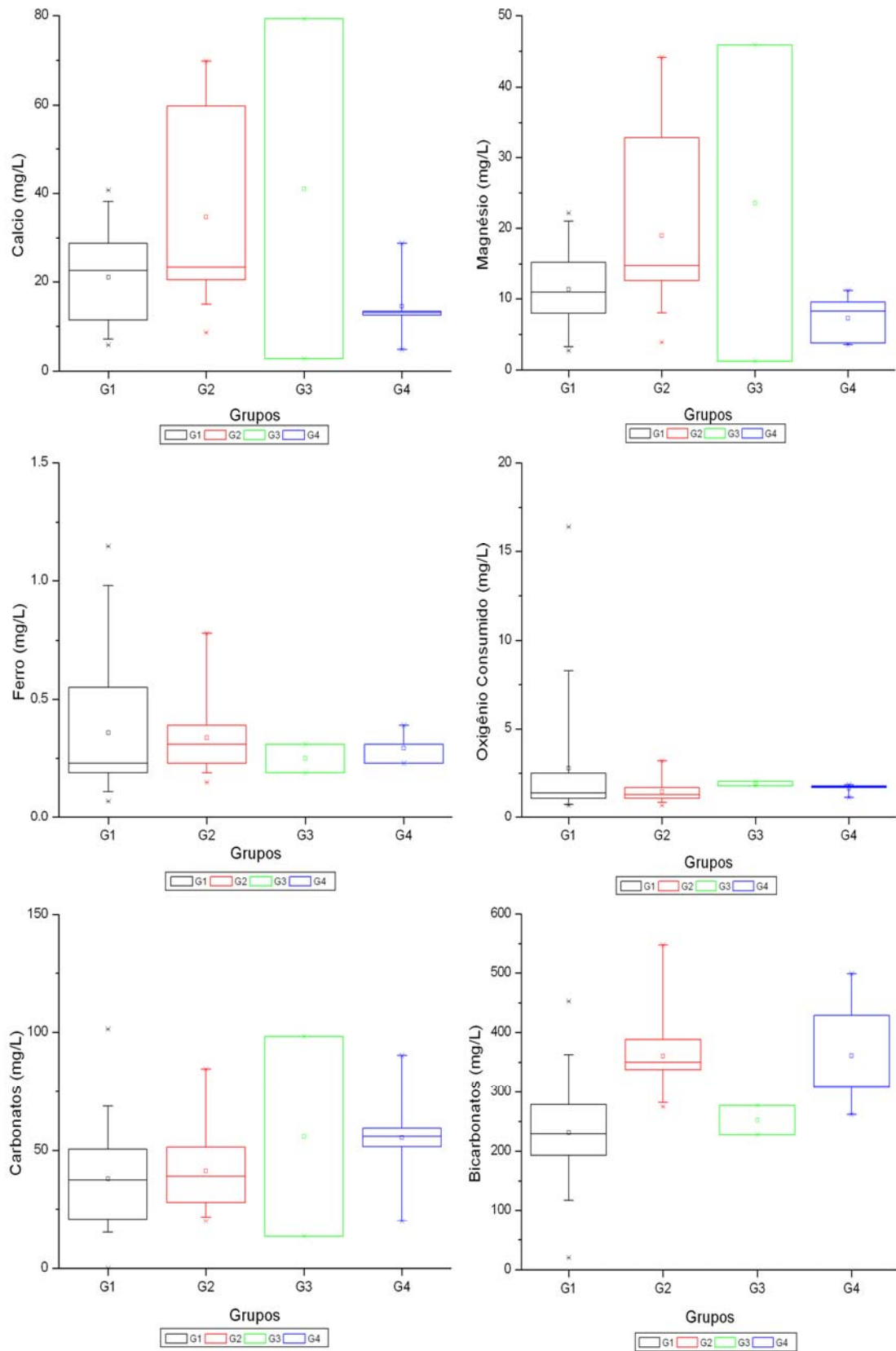


Figura 5.1. 21 - Gráficos Blox-pot 4 com as variações das concentrações de cada parâmetro qualitativo de agosto a novembro de 2006, época de seca.

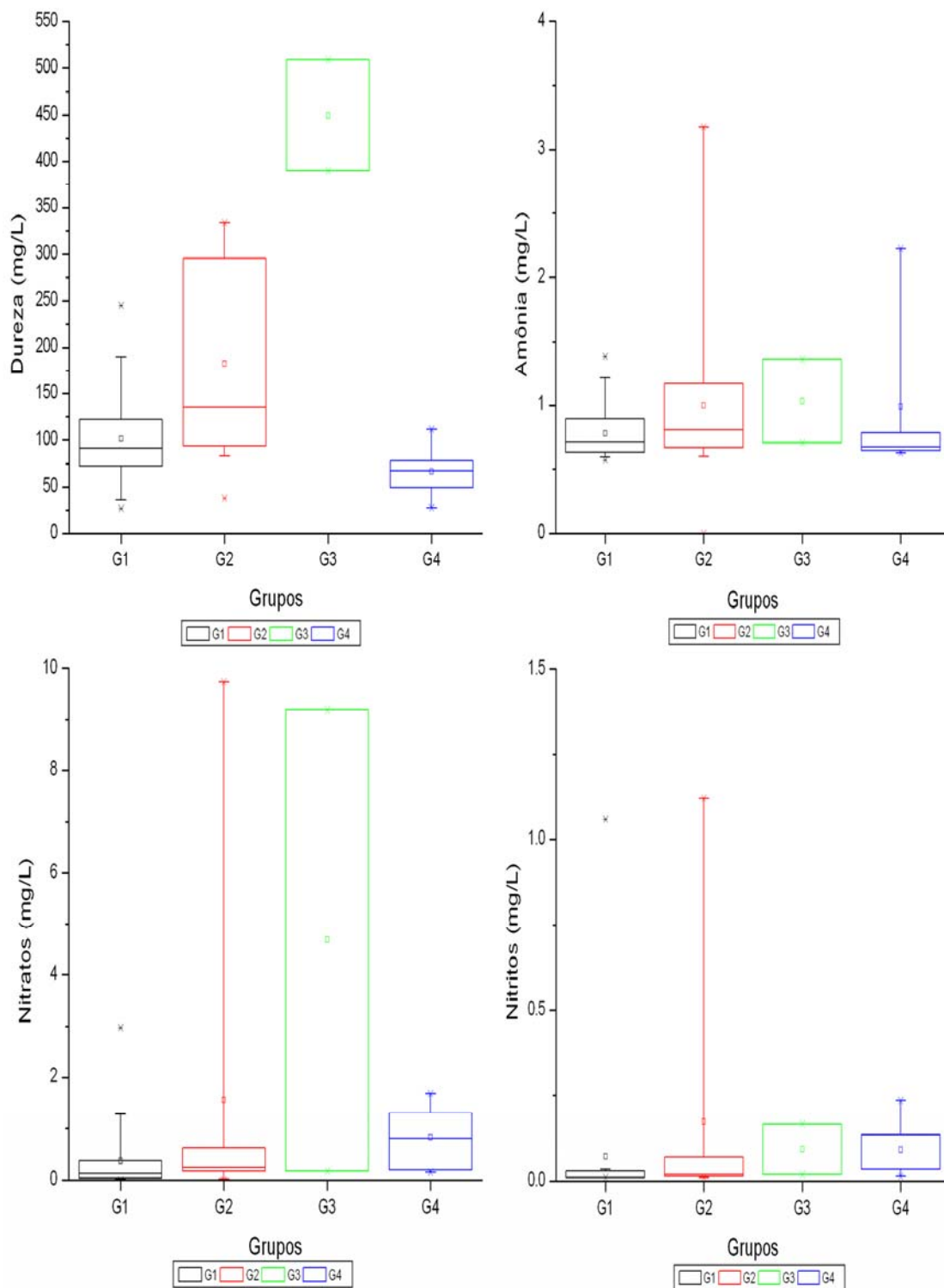


Figura 5.1. 22 -Gráficos Blox-pot 4 com as variações das concentrações de cada parâmetro qualitativo de agosto a novembro de 2006, época de seca

A classificação dessas águas para seu uso em irrigação é apresentada a na Figura 5.1.23.

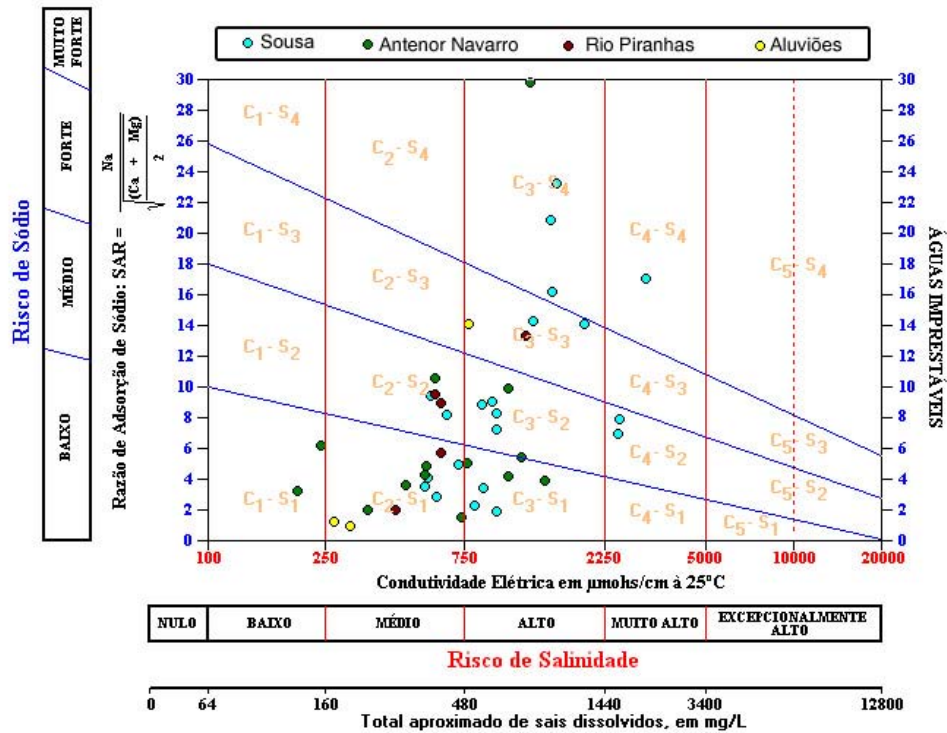


Figura 5.1. 23 - Distribuição dos 45 poços amostrados no período seco de 2006, no Diagrama de Riverside - USLL, indicando o risco de salinidade e o risco de sódio de suas águas, se for usadas para irrigação.

Comparando a qualidade das águas de irrigação nos dois períodos secos, observa-se que houve, no segundo período seco, maior número de amostras de água com qualidade C₂ e, em menor número, os de qualidade C₄.

Época de chuva, mês de maio de 2006.

Os resultados da estatística básica para esta época de chuvas (mês de maio de 2006), são apresentados na Tabela 5.1.11.

Tabela 5.1. 11 - Estatística Básica dos parâmetros de qualidade de 21 amostras de águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, para o período de chuva do mês de maio de 2006

Parâmetros	Média	Mediana	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
<i>pH</i>	8,45	8,55	0,35	7,65	8,91
<i>CE ($\mu S/cm$)</i>	1129,29	1114,00	829,96	264,00	3711,00
<i>Ca (mg/l)</i>	37,74	22,40	54,34	4,20	260,00
<i>Mg (mg/l)</i>	14,39	11,40	9,54	1,92	35,64
<i>Sódio (mg/l)</i>	253,99	188,14	237,11	29,44	1057,77
<i>Potássio(mg/l)</i>	12,90	2,73	43,15	0,39	200,85
<i>Cloreto (mg/l)</i>	154,03	112,37	139,28	8,86	479,28
<i>Sulfato (mg/l)</i>	114,26	35,04	286,83	4,80	1348,80
<i>Bicarbonato (mg/l)</i>	285,82	298,90	111,24	103,70	489,22
<i>Carbonato (mg/l)</i>	33,71	30,00	18,27	10,20	65,40
<i>Ferro (mg/l)</i>	0,31	0,15	0,38	0,07	1,42
<i>Oxig. Cons. (mg/l)</i>	2,11	1,80	1,43	1,00	7,50
<i>AlCaCO₃ (mgCaCO₃/l)</i>	56,19	50,00	30,46	17,00	109,00
<i>AlHCO₃ (mgCaCO₃/l)</i>	243,81	246,50	93,51	85,00	401,00
<i>ALTotal (mgCaCO₃/l)</i>	290,48	292,50	112,86	102,00	510,00
<i>Dureza (mgCaCO₃/l)</i>	150,49	109,37	165,86	18,75	798,75
<i>SDT (mg/l)</i>	722,24	712,00	531,27	168,00	2375,00
<i>Amonia (mg/l)</i>	0,79	0,80	0,39	0,00	1,47
<i>Nitritos (mg/l)</i>	0,04	0,02	0,10	0,00	0,46
<i>Nitratos (mg/l)</i>	0,53	0,09	1,34	0,00	6,24

As chuvas de maio de 2006 provocaram leves melhorias qualitativas da água subterrânea da bacia em relação à qualidade determinada na época seca anterior (agosto-novembro 2005), com pequena diminuição, por diluição, das concentrações da maioria dos sais e os parâmetros associados, como SDT. Diminuíram, com a chuva, sódio, cloreto, carbonato e bicarbonato, alcalinidade total, de carbonato e de bicarbonato, amônia e nitrito.

O diagrama de Piper mostra a distribuição iônica na primeira época de chuva pesquisada.

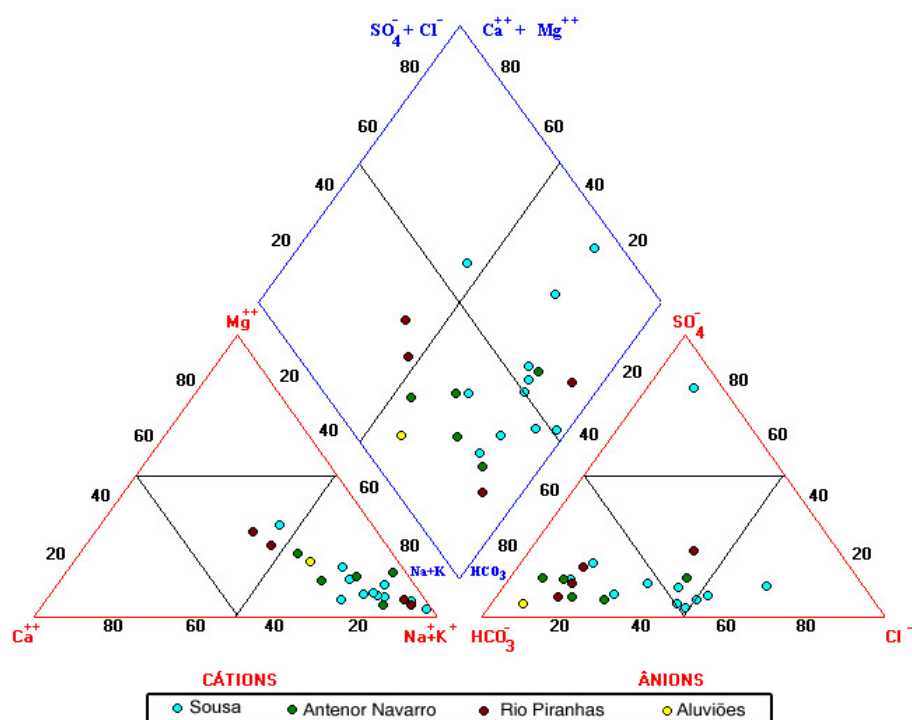


Figura 5.1. 24 - Íons predominantes nas águas subterrâneas de 21 poços na primeira época de chuva (maio 2006) distribuídos nas quatro formações geológicas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe-PB.

A diluição provocada pelas águas percoladas durante o processo de recarga do aquífero melhorou a qualidade da maioria dos poços, com destaque para os localizados na formação Antenor Navarro, de formação arenítica e potencial zona de recarga deste aquífero, seguido por alguns poços situados na formação Rio Piranha.

A classificação dessas águas para irrigação, segundo Riverside (Figura 5.1.19), mostra a predominância de águas C₂-S₁ e C₃-S₍₂₋₄₎ e uma C₄-S₄.

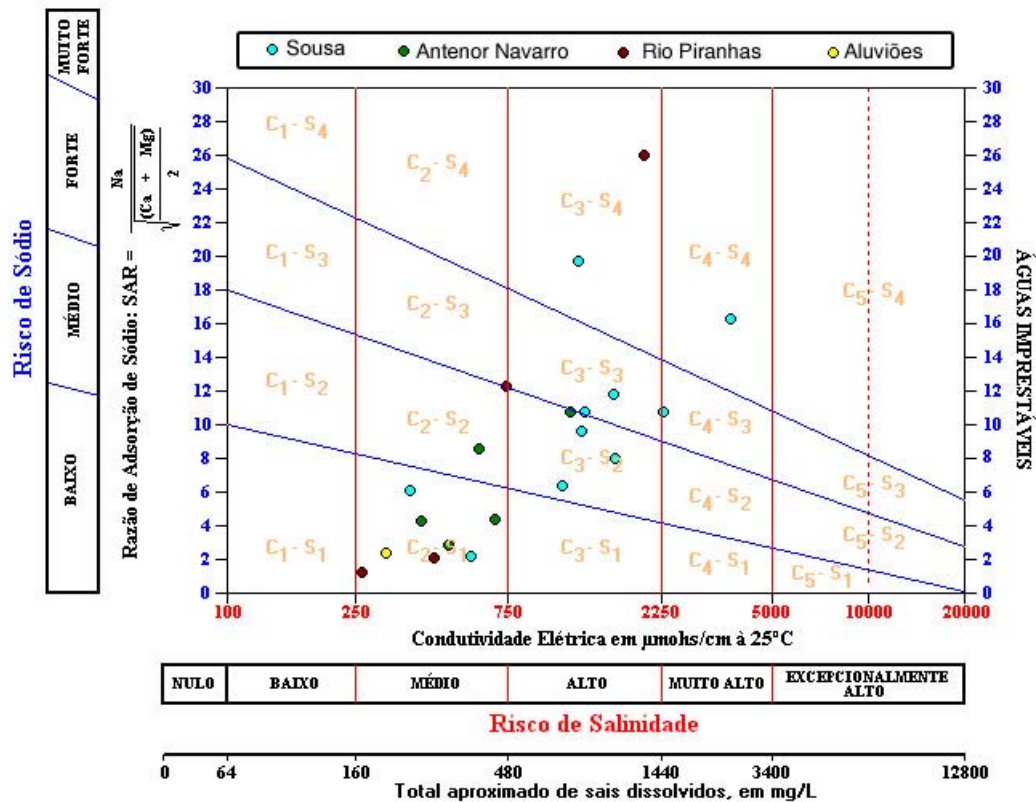


Figura 5.1. 25 - Distribuição dos 21 poços amostrados no período de chuva de 2006, no Diagrama de Riverside - USLL, indicando o risco de salinidade e o risco de sódio de suas águas.

Época de chuva, mês de fevereiro de 2007

A análise dos valores médios e medianos dos parâmetros qualitativos das águas subterrâneas no segundo período de chuvas (fevereiro 2007) mostra pH neutro, a diferença dos períodos anteriores, onde predominaram condições básicas, assim como CE e SDT inferiores aos valores da época seca de 2006 e, ainda, inferiores aos da época de chuva desse mesmo ano, assim como concentrações menores de íons (sódio, potássio, cloretos, carbonatos, entre outros).

Tabela 5.1. 12 - Estatística Básica dos parâmetros de qualidade dos 21 amostras de águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, para o período de chuva - fevereiro de 2007

Parâmetros	Média	Mediana	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
<i>pH</i>	7,95	7,95	0,43	6,97	8,86
<i>CE (µS/cm)</i>	1027,52	890,00	658,32	300,00	3310,00
<i>Ca (mg/l)</i>	31,62	19,40	40,31	3,00	196,40
<i>Mg (mg/l)</i>	15,10	12,60	9,86	2,76	45,36
<i>Sódio (mg/l)</i>	229,32	185,84	185,78	33,58	782,69
<i>Potássio(mg/l)</i>	3,64	1,95	3,50	1,17	12,87
<i>Cloreto (mg/l)</i>	94,66	95,71	55,61	33,67	224,04
<i>Sulfato (mg/l)</i>	73,25	55,73	91,62	4,75	420,76
<i>Bicarbonato (mg/l)</i>	295,62	281,21	113,13	110,41	517,89
<i>Carbonato (mg/l)</i>	53,90	53,40	26,70	13,20	114,60
<i>Ferro (mg/l)</i>	0,16	0,07	0,19	0,07	0,78
<i>Oxig. Cons. (mg/l)</i>	4,00	1,70	6,18	1,10	26,20
<i>AlCaCO₃ (mgCaCO₃/l)</i>	96,19	92,00	44,38	28,00	191,00
<i>AlHCO₃ (mgCaCO₃/l)</i>	248,64	241,00	93,42	90,50	424,50
<i>ALTotal (mgCaCO₃/l)</i>	349,36	363,50	118,01	122,00	561,50
<i>Dureza (mgCaCO₃/l)</i>	139,34	102,50	118,20	37,50	581,87
<i>SDT (mg/l)</i>	657,46	569,00	421,42	192,00	2118,00
<i>Amonia (mg/l)</i>	0,24	0,08	0,41	0,05	1,88
<i>Nitritos (mg/l)</i>	0,02	0,02	0,02	0,00	0,07
<i>Nitratos (mg/l)</i>	0,86	0,31	2,06	0,00	9,66

O diagrama de Piper evidencia a distribuição iônica nas águas dos poços amostrados e a formação geológica à qual os mesmos pertencem. Pode-se observar que a distribuição dos poços se aproxima à distribuição da época chuvosa anterior, embora nesta segunda época de chuvas as concentrações iônicas são menores. Comparado às duas épocas de chuvas, esta última apresentou as águas de melhores qualidades.

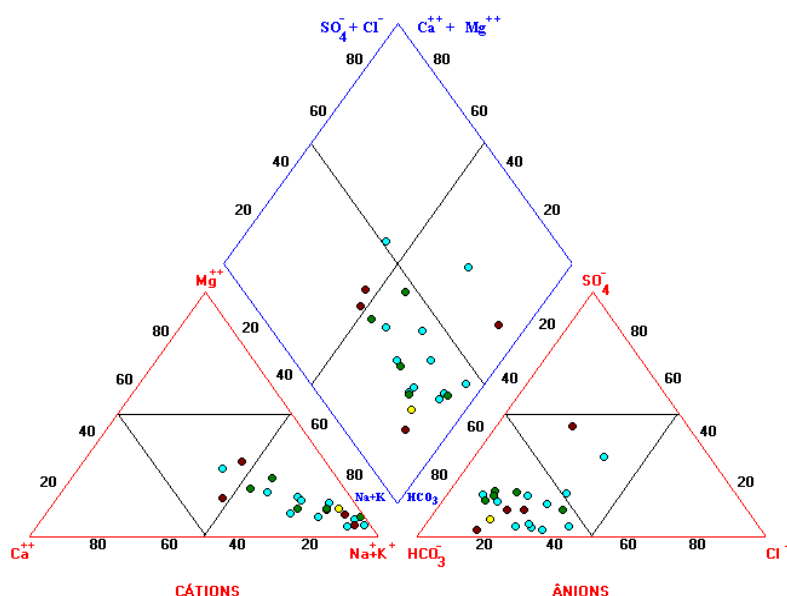


Figura 5.1. 26 - Íons predominantes nas águas subterrâneas de 21 poços na segunda época de chuva (fevereiro 2007) distribuídos nas quatro formações geológicas da Bacia Sedimentar de São João do Rio do Peixe -PB.

A classificação de Riverside (Figura 5.1.27), mostra águas C₂-S₁ e C₃-S (1-4), e uma C₄-S₄.

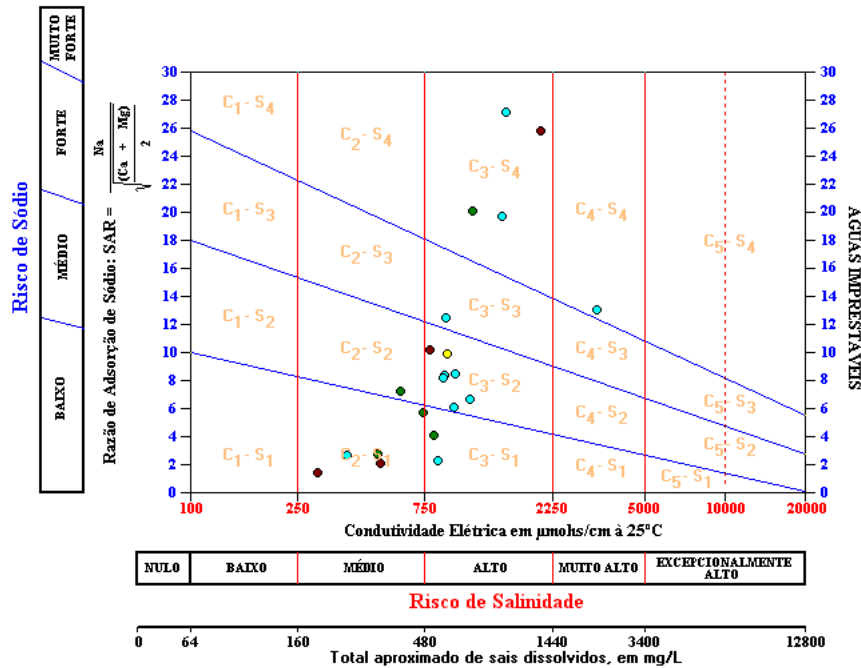


Figura 5.1. 27 - Distribuição dos 21 poços amostrados no período seco de 207, no Diagrama de Riverside - USLL, indicando o risco de salinidade e o risco de sódio de suas águas.

Conclui-se que nas épocas de chuvas, a qualidade da água subterrânea desta bacia experimenta melhoria, sob impacto das águas de recarga do aquífero que dilui as espécies químicas e torna a água menos dura e alcalina e levemente menos sódica e menos cálcica. Também diminuíram potássio, magnésio e cloretos.

Qualidade sanitária da água de poços em épocas de seca e de chuva

Este estudo foi feito num universo de 20 poços amostrados em três épocas (em agosto de 2006, novembro de 2006, fevereiro de 2007) e nos quais se quantificaram coliformes totais e coliformes termotolerantes.

A maioria das amostras de água subterrânea apresentou contaminação fecal, a qual foi mais elevada logo após as chuvas (agosto de 2006) nos poços tubulares e nos tipo amazonas, quando 4 (20%) amostras apresentaram > 1.000NMP *E.coli*/100ml). Após 4

meses secos, em novembro de 2006, apenas 2 (10%) das amostras tiveram esse nível de contaminação, sugerindo que o avanço da estação seca influenciou na redução destas bactérias indicadoras de contaminação fecal.

Considerando o total de poços analisados, de agosto a novembro 2006, houve, nesse período de 4 meses, redução das concentrações de *E.coli* em 13 (65%) dos 20 estudados e em 11 (55%) houve decréscimo das concentrações de coliformes totais (Tabelas 5.1.13).

Na mesma época acima considerada houve rebaixamento médio relativo do nível estático de aproximadamente 93 cm (Pinheiro *et. al*, 2007). Portanto, pode-se associar a diminuição do nível da água subterrânea com a diminuição das concentrações das bactérias estudadas. Um modelo que pode explicar esse decréscimo se relaciona com a concentração das espécies químicas: em consequência da perda de água com o avanço da época seca, se concentram os sais a aumentam CE e SDT, Sódio, Cálcio e outros íons, gerando um ambiente de mais alta salinidade que poderia estar afetando às bactérias coliformes, causando sua morte.

Tabela 5.1. 13 - Concentração de coliformes totais e *E.coli* em poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe - PB, ao longo das três campanhas de monitoramento

Código do Poço	agosto de 2006		novembro de 2006		fevereiro de 2007	
	CT	<i>E.Coli</i>	CT	<i>E.Coli</i>	CT	<i>E.Coli</i>
	NMP/100ml	NMP/100ml	NMP/100ml	NMP/100ml	NMP/100ml	NMP/100ml
DV069	686,7	1	11	1	68,9	25,3
P146	>2500	1	>2500	13,2	>2419,2	29,5
P230	>209,8	31,6	27,5	6,3	307,6	110
P42	>2500	112,6	186	71,4	980,4	220,9
DV916A	>2500	211,7	>2500	727	>2419,2	>2419,2
CH061	>2500	307,6	29,2	15,8	1	1
P159	>2500	313	>2500	60,5	>2419,2	1553,07
CD983	488,4	325,5	>2500	>2500	>2419,2	>2419,2
P151	>2500	325,5	>2500	178,9	2419,17	26,9
CH039	>381,1	43,5	61,6	<1	143,9	<1
P201	>2500	387,3	>2500	44,3	1119,85	81,6
CM592	>2500	552	1732,87	980,4	1203,31	816,4
P178	1986,28	579,4	3	<1	125,9	5,2
CD113	1046,24	920,8	1413,6	547,5	1732,87	488,4
CN992	>2500	>2500	48,7	23,1	33,1	5,2
DW665	>2500	>2500	187,2	52	>2419,2	2419,17
P110	>2500	>2500	>2500	365,4	>2419,2	1203,31
P27	>2500	>2500	1732,87	1203,31	1986,28	30,9
Fonte Igapó	42,2	<1	9,5	7,3	<1	<1
P03A	<1	<1	<1	<1	365,4	<1

Na segunda época de chuvas, fevereiro de 2007 aumentou as concentrações de coliformes fecais em 9 (45%) dos poços desta bacia e em 7 (35%) os coliformes totais.

Em nenhuma das três épocas foi observada associação direta entre as concentrações de coliformes totais e *E.coli*. Os segundos são de origem fecal enquanto os primeiros têm origem fecal e ambiental. Ambos devem ter atingido os poços com as águas de recarga dos aquíferos nas épocas de chuvas, quando se observou aumento de suas concentrações. As diferenças de comportamento observadas entre essas bactérias, em particular seu maior ou menor grau de sobrevivência nas águas subterrâneas, se associa com sua maior ou menor resistência às condições ambientais geradas nos aquíferos nas épocas de seca e de chuva. As bactérias denominadas “coliformes totais” constituem um grupo bastante heterogêneo de bastonetes Gram negativos que pertencem a diferentes gêneros (*Citrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Escherichia*, entre outros), com diferentes características adaptativas.

A Figura 5.1.28 apresenta a distribuição, por faixa de concentração, de coliformes totais e a Figura 5.1.29, a de *E.coli*.

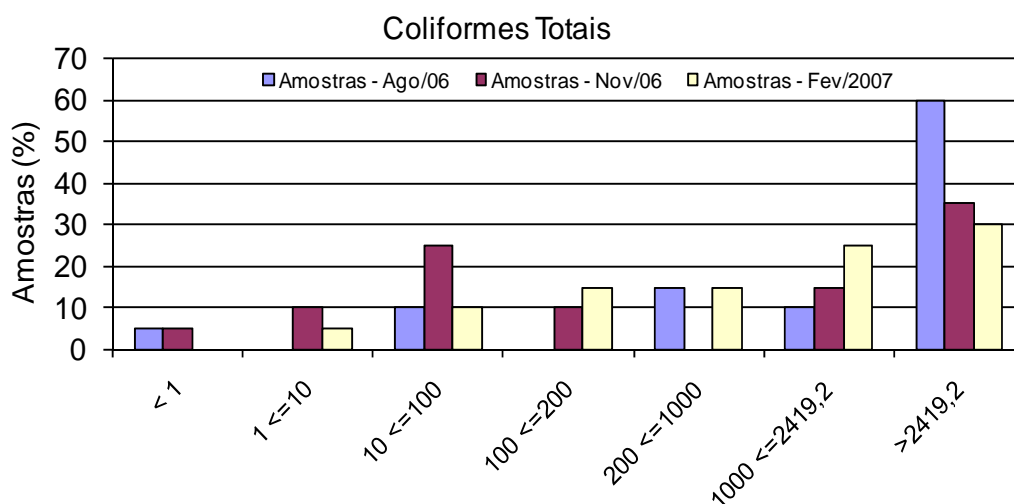


Figura 5.1. 28 - Distribuição, por faixa de concentração, de coliformes totais em águas de poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe (agosto e novembro de 2006 e fevereiro de 2007).

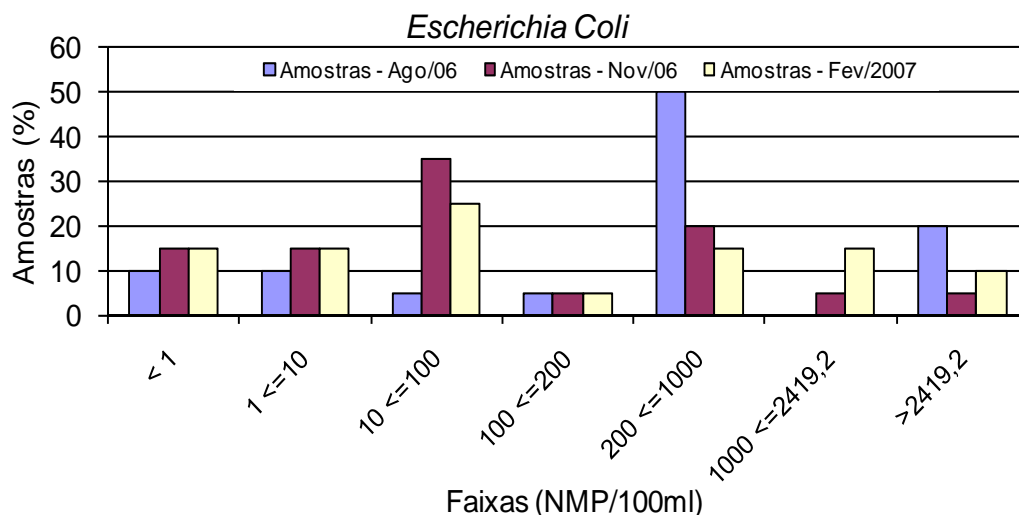


Figura 5.1. 29 - Distribuição, por faixa de concentração, de *E.coli* em águas de poços da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe (agosto e novembro de 2006 e fevereiro de 2007).

As maiores contaminações ocorreram logo após das chuvas (agosto 2006) e durante as chuvas (fevereiro 2007), predominando amostras com 200 a ≥ 1.000 *E.coli*/100mL.

Conclui-se que as alterações qualitativas observadas ao longo do ciclo hidrológico em poços amazonas e tubulares se caracterizaram na época de chuva, pela tendência de decréscimo da condutividade elétrica e do pH e aumento da contaminação bacteriana, na maioria dos poços, sob influencia das águas de recarga. Estas diluem as espécies químicas da água subterrânea e transportam bactérias indicadoras de contaminação fecal. Em relação a este parâmetro, o avanço da estação seca contribui com o seu decréscimo, tanto em poços tipo amazonas como tubulares, porém, contribui para o aumento das espécies químicas, elevando a CE e os sais. Essas maiores concentrações de sais e as alterações das condições físicas e químicas em geral que experimenta o aquífero na estação seca contribuiriam com o decréscimo microbiano.

5.2. ESTUDO DE VULNERABILIDADE E RISCOS DE CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS

Define-se como *vulnerabilidade de um aquífero*, o maior ou menor grau de disponibilidade que o mesmo apresenta de sofrer uma contaminação.

O denominado *risco potencial de contaminação das águas subterrâneas* deve-se à interação entre dois fatores que se consideram fundamentais: o primeiro refere-se a *carga contaminante* lançada no solo como resultado das atividades antrópicas e o segundo, a *vulnerabilidade natural do aquífero* de ser afetado por esta carga contaminante (Foster & Hirata, 1987).

A carga contaminante é caracterizada em função de sua *classe, intensidade, modo de disposição no terreno e duração*, enquanto que a vulnerabilidade do sistema aquífero depende da *litologia e estrutura hidrogeológica do terreno*. Portanto, a carga contaminante pode ser controlada ou modificada, o que não acontece com a vulnerabilidade do aquífero.

Na região da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe existem vários tipos de carga contaminante em geral de média a baixa intensidade correspondendo a rejeitos sólidos e líquidos das indústrias, os postos de combustíveis, os lixões sobre camadas sedimentares, os esgotos e fossas, os cemitérios, e defensivos agrícolas utilizados nos diversos projetos de irrigação existentes na área.

Por outro lado, a disposição geológica, a condutividade hidráulica dos aquíferos, a profundidade do aquífero, o tipo de solo, o relevo, a natureza da zona não saturada, dentre outros, são elementos que influem na vulnerabilidade do sistema aquífero.

A caracterização dessa vulnerabilidade e a localização das cargas contaminantes se constituem elementos fundamentais para a caracterização de problemas de contaminação das águas subterrâneas como é demonstrado a seguir.

5.2.1 AVALIAÇÃO E MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE NATURAL

Para definição da vulnerabilidade natural dos aquíferos foi seguida a metodologia de índice GOD adotada por Foster & Hirata (1987) que define as diversas classes de vulnerabilidade, tomando como base os três parâmetros seguintes:

- ✓ **G** - Ocorrência da água subterrânea (*Groundwater occurrence*) – se o aquífero é confinado, semi-confinado ou não confinado, etc.
- ✓ **O** - Classificação geral do aquífero (*Overall aquifer class*)
- ✓ **D** - Profundidade ao topo do aquífero (*Depth to groundwater table*)

O índice GOD é calculado multiplicando-se este três parâmetros, os quais são avaliados conforme demonstrado a seguir:

a) Cálculo do Índice G – Tipo de aquífero

Parâmetro G	Índice
Nenhum	0,0
Confinado artesiano	0,1
Confinado	0,2
Semi-confinado	0,3
Semi-confinado (coberto)	0,5
Não confinado	1,0

b) Cálculo do Índice O – Litologia

Parâmetro O	Índice
<i>Rochas não consolidadas:</i>	
Solos residuais	0,4
Aluviões siltsos	0,5
Areia eólicas	0,6
Areias e cascalheiras aluvionares e fluviais	0,7
Cascalheiras coluvionares	0,8
<i>Rochas consolidadas (rochas porosas):</i>	
Argilitos e xistos	0,5
Siltitos	0,6
Tufos vulcânicos	0,6
Arenitos	0,7
Calcários e Calcarenitos	0,9
<i>Rochas consolidadas (rochas densas):</i>	
Formações ígneas/metamórficas	0,6
Lavas vulcânicas recentes	0,8
Outros calcários	1,0

c) Cálculo do Índice D - Profundidade do Nível Estático ou do Topo do Aquífero

Parâmetro D	Índice
> 100 m	0,4
50 – 100 m	0,5
20 – 50 m	0,6
10 – 20 m	0,7
5 – 10 m	0,8
2 – 5 m	0,9
< 2 m	1,0

d) Cálculo do Índice GOD – Classe de Vulnerabilidade

Índice GOD	Classes de Vulnerabilidade
0,7 – 1,0	Extrema
0,5 – 0,7	Alta
0,3 – 0,5	Moderada
0,1 – 0,3	Baixa
0,0 – 0,1	Desprezível

O valor máximo (1) do índice representa a máxima vulnerabilidade. O valor mínimo é de 0,016 quando existir um aquífero, ou de 0 quando não existir.

No quadro a seguir é mostrado o diagrama com toda a metodologia GOD.

Metodologia na aplicação dos Parâmetros GOD para a Bacia Sedimentar do Rio do Peixe:

1. Aquífero Aluvionar (Qal)

- ✓ - Área de ocorrência de aluviões (Qal)

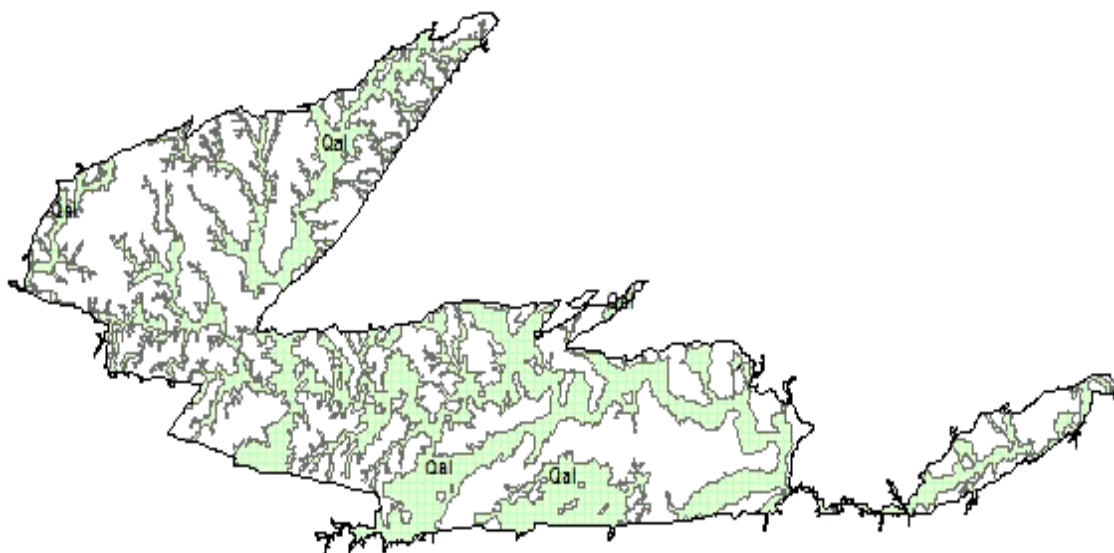


Figura 5.2. 1 – Área de ocorrência das aluviões. Índice G = 1,00

a) Índice G = 1,00 - Tipo de Aquífero Livre

b) Índice O = 0,8 – Tipo de litologia

Representam solos correspondentes as aluviões que em geral, na área de ocorrência na bacia do rio Peixe, possuem baixo potencial de escoamento direto e elevadas intensidades de infiltração, mesmo quando completamente umedecidos. São solos arenosos profundos a pouco profundos, contendo pouco silte e argila. Possuem uma elevada transmissividade, constituindo aquíferos livres.

c) Índice D = 0,90 - Profundidade do Nível Estático ou do Topo do Aquífero

Nesse caso, considerou-se o valor médio da profundidade do nível estático medido nos poços amazonas monitorados na etapa de campo do mês de fevereiro de 2007, que correspondeu a 4,1 metros.

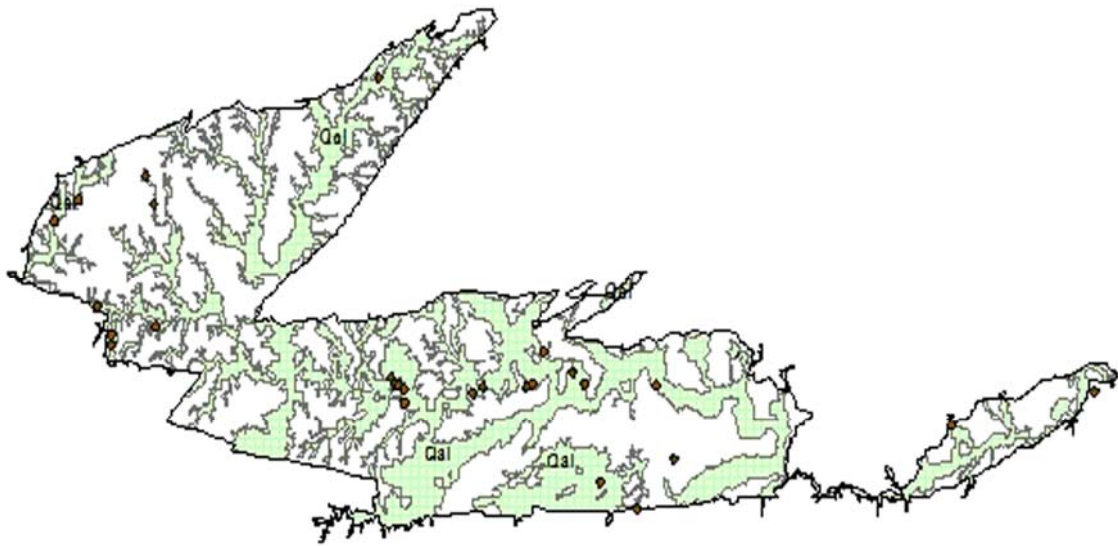


Figura 5.2. 2 – Poços amazonas monitorados em todas as etapas de campo.

d) Índice GOD para o aquífero aluvionar – 0,72 (Vulnerabilidade Alta a Extrema).

2) Aquífero rio Piranhas (Krp)

✓ - Área de ocorrência do Aquífero rio Piranhas

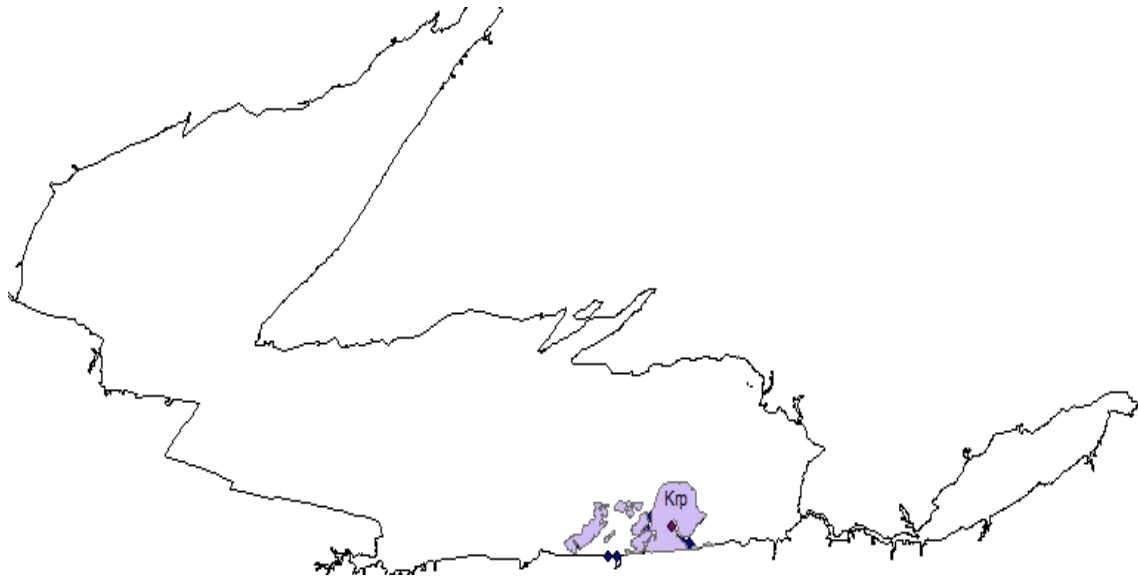


Figura 5.2. 3 – Área de ocorrência do Aquífero Rio Piranhas e distribuição dos poços.

a) **Índice G = 1,0** - Tipo de Aquífero - Livre

b) **Índice O = 0,7** - Tipo de litologia

Correspondem predominantemente a arenitos grosseiros a conglomeráticos, feldspáticos e líticos, mal selecionados, com coloração cinza claro a marrom avermelhado, possuindo intercalações de arenitos médios a finos e siltitos.

c) **Índice D= 0,9** - Profundidade do Nível Estático ou do Topo do Aquífero

Nesse caso, considerou-se o valor médio da profundidade do nível estático medido nos poços tubulares monitorados na etapa de campo do mês de maio de 2006, que correspondeu a 3,42 metros.

d) **Índice GOD para o aquífero Rio Piranhas – 0,63 (Vulnerabilidade Alta).**

3) Aquífero Sousa (Ks)

✓ - Área de ocorrência do Aquífero Sousa

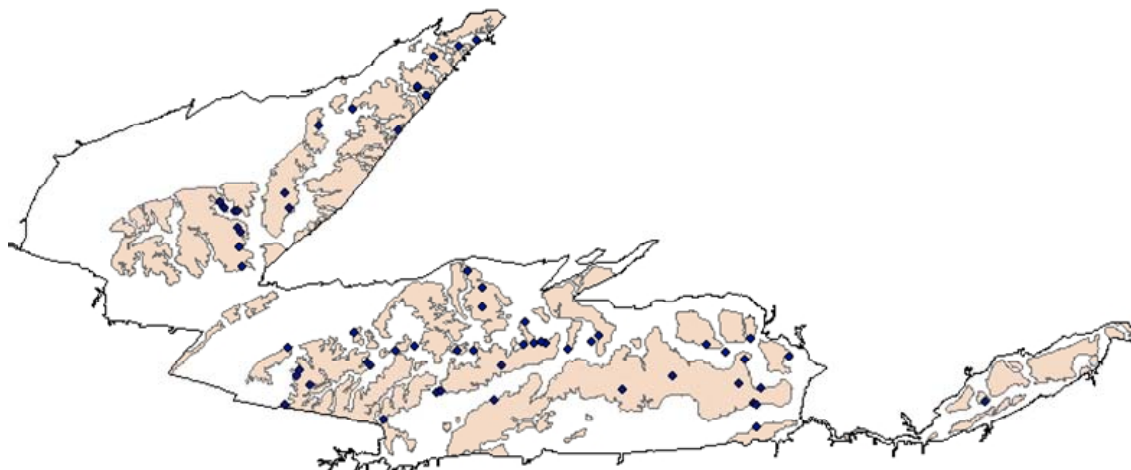


Figura 5.2. 4 – Área de ocorrência do Aquífero Sousa e distribuição dos poços monitorados.

a) Índice G = 0,2 - Tipo de Aquífero – Confinado.

O aquífero Sousa Superior tem por arcabouço as camadas de arenitos finos a médios, de cores variadas, intercalados, em alternância irregular, nos siltitos e folhelhos micáceos e calcíferos da secção superior da Formação Sousa. Tem por embasamento impermeável os sedimentos da Formação Sousa Inferior e por limite superior os siltitos e folhelhos, micáceos e calcíferos, do próprio membro superior.

Trata-se, portanto, de um aquífero do tipo confinado, heterogêneo e anisotrópico, que parece ter sido o objeto das captações até aqui encetadas. Sua espessura confunde-se com a espessura de toda a secção superior da Formação Sousa, embora a produção d'água, em quantidades significativas, esteja restrita aos níveis areníticos do membro.

b) Índice O = 0,7 - Tipo de litologia

Arenitos intercalados nos folhelho e siltitos da formação Sousa superior.

c) Índice D= 0,8 Profundidade do Nível Estático ou do Topo do Aquífero

Foi considerado o valor médio da profundidade do nível estático medido nos poços tubulares monitorados na etapa de campo do mês de fevereiro de 2007, que correspondeu a 6,98 metros.

d) Índice GOD para o aquífero Sousa – 0,11 (Vulnerabilidade Baixa).

4) Aquífero Antenor Navarro (Kan)

✓ - Área de ocorrência do Aquífero Antenor Navarro - Livre

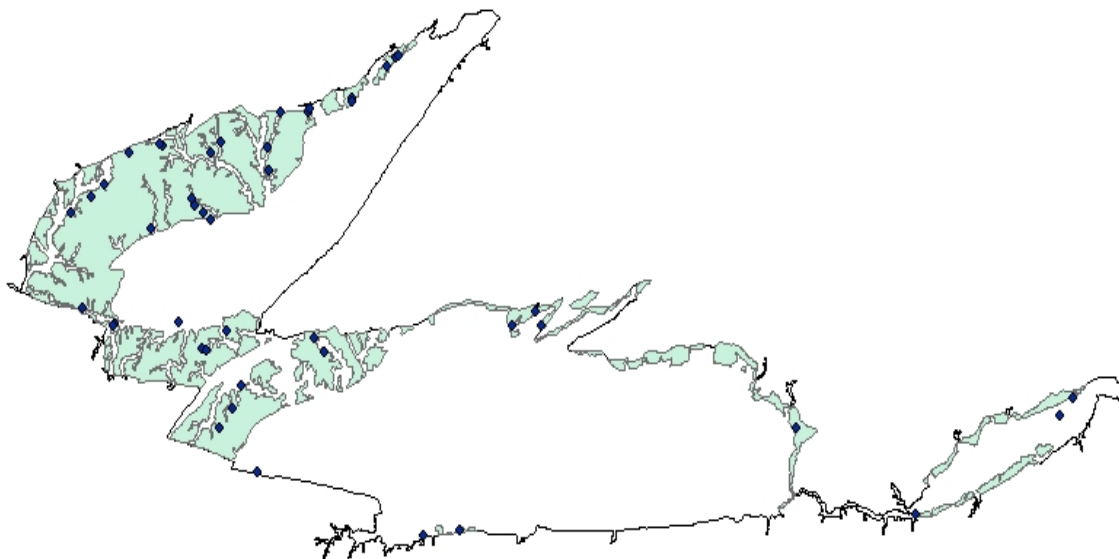


Figura 5.2. 5 – Área de ocorrência do Aquífero Antenor Navarro –quando Livre - e distribuição dos poços monitorados.

a) **Índice G = 1,0** - Tipo de Aquífero Livre ou Confinado.

Observação: Considerou-se apenas o *aquífero livre* Antenor Navarro, onde o mesmo aflora em superfície.

b) **Índice O = 0,7** - Tipo de litologia

Está representada predominantemente por arenitos grossos a conglomeráticos (imaturos), de coloração variando de creme a avermelhados, contendo níveis de conglomerados e de arenitos médios a finos.

c) **Índice D= 0,7** - Profundidade do Nível Estático ou do Topo do Aquífero

Observação: Considerou-se o valor médio da profundidade do nível estático medido nos poços tubulares monitorados na etapa de campo do mês de novembro de 2007, que correspondeu a 10,27 metros.

d) Índice GOD para o aquífero Antenor Navarro - 0,49 (Vulnerabilidade Moderada).

As unidades geológicas foram assim classificadas (Fig. 5.2.6) em relação ao seu índice de vulnerabilidade conforme a metodologia acima adotada:

- ✓ Vulnerabilidade Alta a Extrema - Compreendem as areias aluviais (Qal).
- ✓ Vulnerabilidade Moderada – Compreende a área de ocorrência do aquífero Antenor Navarro quando livre.
- ✓ Vulnerabilidade Alta - Compreende a área de ocorrência do aquífero Rio Piranhas.
- ✓ Vulnerabilidade Baixa - Compreende a área de ocorrência da formação Sousa Superior.

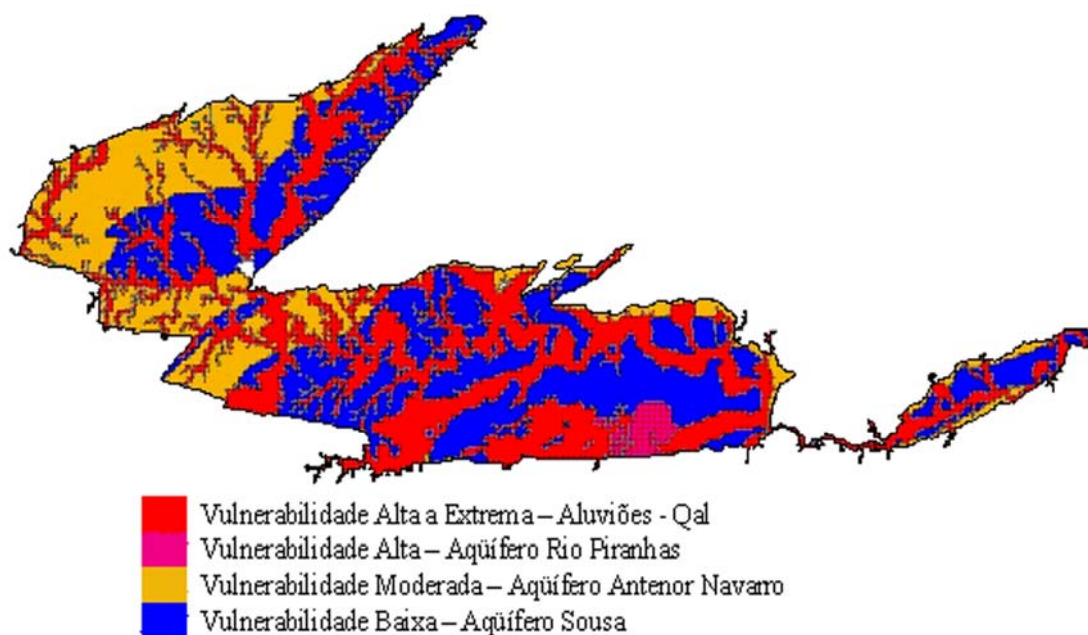


Figura 5.2. 6 – Classificação da Bacia Sedimentar Rio do Peixe em relação ao seu grau de vulnerabilidade.

5.2.2. CARACTERIZAÇÃO E MAPEAMENTO DAS FONTES POTENCIAIS DE POLUIÇÃO

5.2.2.1. Potencialidade de risco de contaminação dos aquíferos

A metodologia utilizada para definição da potencialidade de risco de contaminação dos aquíferos, também baseada em Foster & Hirata (1987), consistiu na interação entre a vulnerabilidade natural dos aquíferos e da caracterização das cargas contaminantes identificadas na região da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

Ao nível de reconhecimento e com base nos dados disponíveis foram cadastradas as principais atividades potencialmente geradoras de contaminantes, tais como, lixões, indústrias, postos de gasolina, cemitérios, observadas as condições de saneamento básico e de agricultura irrigada existentes na região, associando-as, quando possível, a classe do contaminante, o tipo de solo, e proximidade de cursos d'água superficiais e de captações de água subterrânea, etc.

A seguir apresentam-se as principais características das principais fontes poluidoras, dispersas ou pontuais, cadastradas na região em estudo.

Fontes dispersas

Sistema de Saneamento Básico

Os principais contaminantes envolvidos em áreas sem esgotamento sanitário adequado são os nutrientes e sais (nitrato e cloro) as bactérias patogênicas e os compostos orgânicos solúveis.

A situação das instalações sanitárias existentes nas áreas urbanas e rurais municipais está discriminada na Tabela 5.2.1.

Estes dados são oriundos do Sistema de Informação de Atenção Básica – SIAB do Ministério de Saúde e gerados a partir do trabalho das equipes de Saúde da Família (ESF) e Agentes comunitários de Saúde (ACS) que atuam em praticamente todas as áreas dos municípios que cobrem a Bacia do Sedimentar do Rio do Peixe.

Os principais sistemas de saneamento estão relacionados ao destino dado às fezes e urina por domicílio cadastrado e se referem a sistemas de esgoto (rede geral pública), fossa (qualquer tipo de fossa) e lançamento a céu aberto (no quintal na rua, em um riacho, etc).

Observa-se (Fig. 5.2.7) que predomina nas zonas urbanas o sistema de esgoto público (90%), seguido de fossa e céu aberto enquanto na zona rural esta ordem, como é de se esperar, se inverte, ou seja, predomínio de sistema a céu aberto (50%), fossa e rede pública (10%).

Tabela 5.2 1 – Situação de Saneamento em maio/2007 – Número de instalações nos municípios da Bacia do Rio do Peixe

Município	Pp.Est	Área (km ²)	Sist. Esgoto. Público			Sistema Fossa			Esgoto Céu Aberto		
			Urb	Rur	Tot	Urb	Rur	Tot	Urb	Rur	Tot
Aparecida	7254	222,7	19	05	24	595	334	929	253	673	926
Marizópolis	5415	64	73	0	73	1309	0	1309	268	0	268
Poço J. Moura	3086	98	398	0	398	130	0	130	701	0	701
Pombal	33212	889	3758	01	3759	2646	191	2837	1154	134	1288
Santa Helena	6202	210	21	45	66	580	655	1235	113	383	496
São Domingos	2138	169	104	0	104	212	0	212	431	0	431
São J. R. Peixe	17838	474	1103	25	1128	377	669	1046	404	1691	2095
Sousa	63622	842	11652	534	12186	1580	1602	3182	1934	1630	3564
Triunfo	9537	223	236	05	241	821	277	1098	202	883	1085
Uiraúna	13271	295	332	1257	1589	265	850	1115	31	903	934
Total	161575	3493	17592	1872	19568	8515	4578	13093	5491	6297	12422

Fontes: Sistema de Informação de Atenção Básica – SIAB – Ministério da Saúde
IBGE – Censo 2006 (Previsão).

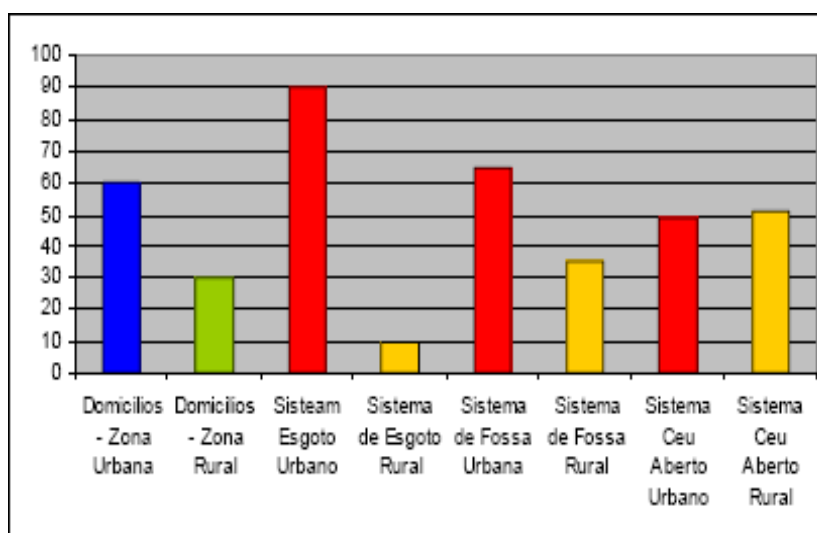


Figura 5.2. 7 – Distribuição percentual dos tipos de saneamento pelas zonas urbanas e rurais.

A metodologia adotada por Foster & Hirata (1987) para definir o grau de risco de contaminação por influência das condições de saneamento de uma região se baseia (Tab. 5.2.2) na sua densidade populacional (habitantes/km²) e no percentual de sistema de esgoto implantado nestas áreas.

Tabela 5.2 2 – Indicadores para avaliação de risco de contaminação segundo as condições sanitárias.

Densidade de população Hab/km ²	Sistema de Esgoto implantado		
	Alta (> 75%)	Média (25 - 75%)	Mínima (<25%)
Baixa (< 100)	Baixa	Moderada	Moderada
Média (100 - 200)	Moderada	Moderada	Alta
Alta (> 200)	Moderada	Alta	Alta

Fonte: Foster e Hirata (1987)

Com base nesta metodologia e conforme os dados coletados na região, exibidos na Tabela 5.2.3, constata-se que:

Tabela 5.2 3 – Percentual dos Sistemas de Saneamento (por densidade populacional, domicílios e tipos) existentes nos municípios da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe em maio de 2007

Município	Dens. Hb/ha	%Domic. Urb	%Sist. Esgoto. Público		%Sistema Fossa		%Esgoto Céu Aberto	
			Urb	Rur	Urb	Rur	Urb	Rur
Aparecida	26,46	46	79	21	64	36	28	72
Marizópolis	84,00	100	100	0	100	0	100	0
Poço J. Moura	31,50	100	100	0	100	0	100	0
Pombal	37,40	89	100	0	93	7	89	11
Santa Helena	29,50	40	32	68	47	53	23	77
São Domingos	12,60	100	100	0	100	0	100	0
São J. R. Peixe	37,60	44	98	2	36	64	19	81
Sousa	75,60	80	96	4	49	51	54	46
Triunfo	42,80	52	98	2	75	25	19	81
Uiraúna	45,00	18	21	79	24	76	04	96
Total	42,24	60	90	10	65	35	49	51

Fonte: Sistema de Informação de Atenção Básica – SIAB – Ministério da Saúde

- ✓ Os municípios da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe possuem baixa densidade populacional (<100 hab/km²) considerando-se as áreas urbanas e rurais;
- ✓ Excetuando-se as sedes municipais de Santa Helena e Uiraúna, todas as outras possuem sistema de esgoto público implantado em praticamente todos os domicílios

- ✓ inventariados, tendo baixo risco de contaminação por esgotamento sanitário utilizando-se a rede pública;
- ✓ As sedes municipais de Aparecida, Santa Helena, Sousa e São João do Rio do Peixe, apresentam ainda problemas de esgotamento a céu aberto, com os rios Piranhas e Rio do Peixe, funcionando como receptores de esgotos sanitários e apresentando também deficiências no número de fossas implantadas por domicílios. Estas áreas, portanto, também possuem moderado risco de contaminação;

Serviços diversos

Postos de Combustíveis

Compreendem atividades diversas como postos de gasolina, oficinas de automóveis, lavanderias, hospitais, etc. Os principais contaminantes produzidos são os compostos tóxicos sintéticos e orgânicos, representados em grande parte por cloro/benzenos.

Estas atividades estão preferencialmente desenvolvidas nas áreas urbanas e em alguns pontos isolados na região.

Na Tabela 5.2.4 estão representados, dentre estes serviços, os postos de gasolina cadastrados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe e que constituem uma fonte potencial para contaminação dos aquíferos mais superficiais. Na Figura 5.2.2.2 a distribuição geográfica dos postos de combustíveis e os poços tubulares localizados em suas proximidades.

Atividades agrícolas

A agricultura irrigada constitui uma das principais atividades geradoras de contaminantes, principalmente quando associada ao uso de fertilizantes e praguicidas, que podem causar contaminação das águas subterrâneas por nitratos e outros íons móveis.

Tabela 5.2 4 - Postos de combustíveis cadastrados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe

N.ponto	UTM(N)	UTM(E)	Município	Nome Fantasia	Litologia	Localidade	Obs. Pontos d'água mais próximos
P37	9272363	545166	Triunfo	Mangueira	Aluvião-A.Navarro	Periferia	P(95) - (500m)
P68A	9256449	560857	São João do Rio do Peixe	Texaco	Aluvião-A.Navarro	Sede	DV815(400m)
P68B	9255897	560984	São João do Rio do Peixe	BR-PETROBRAS	Aluvião-A.Navarro	Sede	DV815(800m)
P68C	9254998	561346	São João do Rio do Peixe	TANTAN	Aluvião-Sousa	Sede	DW886 e DW952(500m)
P99	9278704	564680	Uiraúna	SAT	Arenitos-A.Navarro	Sede	P245 - (1km)
P99A	9279430	565680	Uiraúna	BR-PETROBRAS	Arenitos-A.Navarro	Sede	DW667 e DW689(200m)
P101	9253340	584047	Sousa	PETROVIA	Aluvião-Sousa	Sede	P62(1km)
P102	9253791	583821	Sousa	TEXACO	Aluvião-Sousa	Periferia	P227(1km)
P102A	9243401	571608	Marizópolis	ELLO	Cristalino	Sede	CH040(1,5km)
P102B	9250330	580630	BR-230	Texaco	Aluvião-Sousa	Massape	P228(100m)
P107A	9265148	532518	Umarí-CE	ELLO	Cobert.cristalino	Sede	P223(1km)

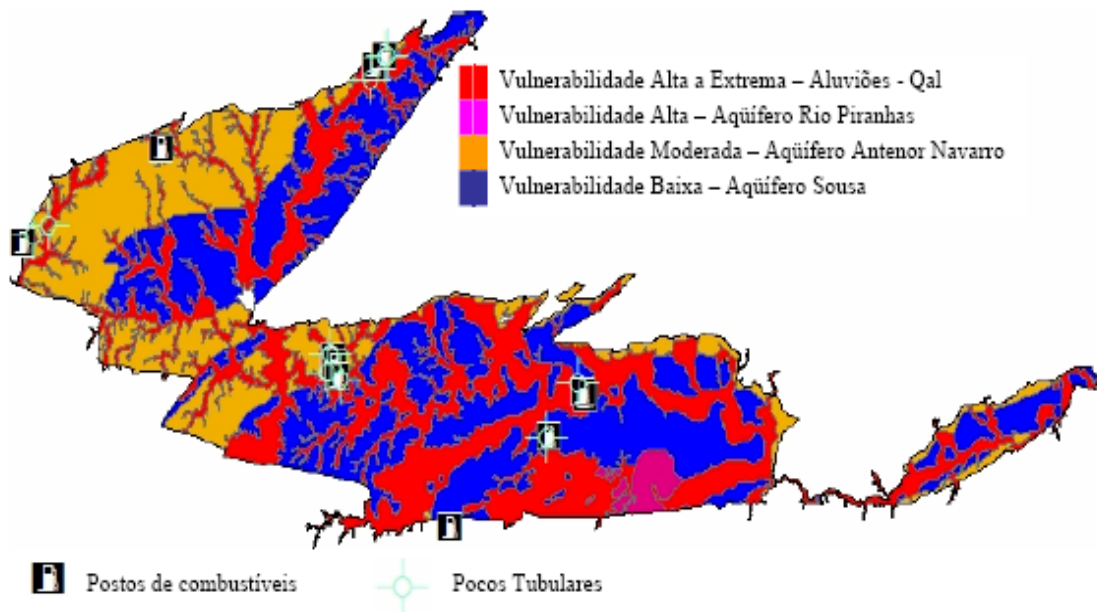


Figura 5.2. 8 – Distribuição geográfica dos postos de combustíveis e poços tubulares localizados em suas proximidades.

Na região da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, estão implantados diversos projetos de irrigação (Tab. 5.2.5) dos quais se destacam quatro grandes perímetros

irrigados: Várzeas de Sousa – em implantação - (fotos 5.2.1 e 5.2.2), São Gonçalo (foto 5.2.3), Pilões (fotos 5.2.4 e 5.2.5) e Lagoa do Arroz (foto 5.2.6). O primeiro gerido pelo Governo do Estado da Paraíba em convênio com o Ministério de Integração Nacional e os três últimos pelo DNOCS.

Tabela 5.2 5 - Principais perímetros irrigados e pequenos projetos de irrigação localizados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

N. Ponto	Nome do Projeto (irrigação/acudagem)	UTM_N	UTM_E	Municípios Beneficiados	Área (ha)	Uso das Águas
PSG	Proj. São Gonçalo	9243500	575750	Sousa	3045	Irrig./pisc./turismo
PLA	Proj. Lagoa do Arroz	9248330	548250	Cajazeiras, Santa Helena, Sousa	1228	Irrig./pisc./perenização.
PPPI	Proj. Pilões	9260000	553380	São J. Rio Peixe	484	Irrig./pisc./turismo
PVS	Proj. Várzeas de Sousa	9246971	597194	Sousa/Aparecida	5100	Irrig./gravid/aspersão
P147	Irrigação (Feijão)	9253918	582800	Sousa	-	Irrig./gravid/aspersão
149	Irrigação (Feijão)	9254254	582349	Sousa	-	Irrig./gravid/aspersão
P169	Irrigação (Arroz)	9255562	563053	São J. Rio Peixe	-	Irrig./gravid/aspersão
P183	Irrigação (Arroz)	9245906	584671	Sousa	-	Irrig./gravid/aspersão
P186	Irrigação (Arroz, coco)	9246795	582615	Sousa	-	Irrig./gravid/aspersão



Foto 5.2.1 – Vista da tomada d’água do Projeto Várzeas de Sousa a partir do Açude Coremas.



Foto 5.2.2 – Vista da Barragem de Compensação. Projeto Várzeas de Sousa.

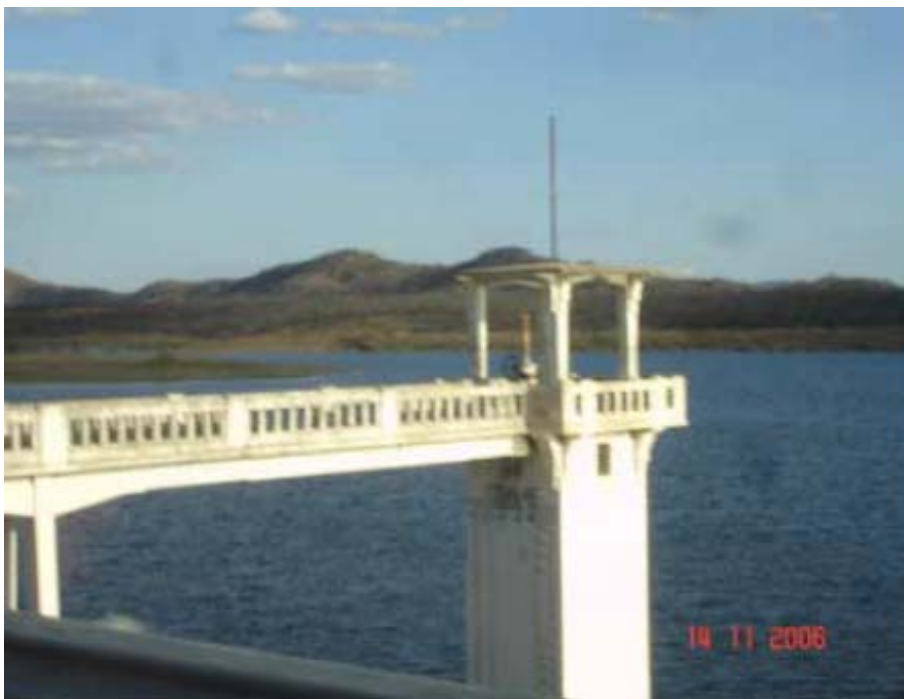


Foto 5.2.3 – Vista do Açude São Gonçalo que abastece o projeto de irrigação do mesmo nome administrado pelo DNOCS.



Foto 5.2.4 – Vista do Açude Pilões, localizado no município de Triunfo.



Foto 5.2.5 – Vista do reservatório do Açude Pilões. A jusante observase o cultivo de arroz irrigado por estas águas.



Foto 5.2.6 – Plantação de arroz, localizada próxima a São João do Rio do Peixe, cultivada nas aluviões do Rio do Peixe.

Estas áreas irrigadas estão distribuídas tanto em regiões consideradas como de elevada vulnerabilidade - próximas ou ao longo dos aluviões dos rios Piranhas e do Peixe, como também de baixa e moderada vulnerabilidade (Fig. 5.2.9).

Fontes pontuais

Atividades industriais

Uma das principais atividades que contribui para a alteração do meio ambiente são as indústrias - tanto por efeitos diretos (geração de poluentes e exploração dos recursos naturais) como pelos indiretos - atração de outras indústrias com o conseqüente aumento populacional.

A atividade industrial na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe ainda é muito incipiente. Apenas nos maiores centros urbanos como Sousa e São João do rio Peixe ela é

um pouco mais desenvolvida, no entanto com a existência de pequenas indústrias em geral de beneficiamento de algodão, extração de óleo vegetal, torrefação e moagem de café, saboarias, cerâmicas e indústrias de alimentos.

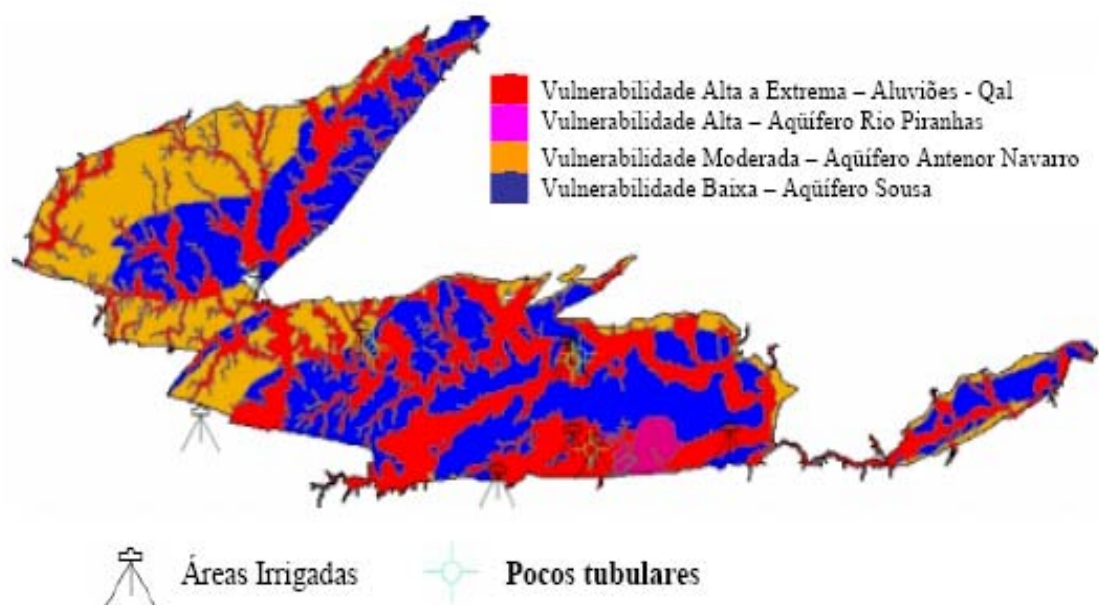


Figura 5.2. 9 – Distribuição geográfica das áreas irrigadas e poços tubulares em suas proximidades.

Na área rural de Sousa está implantado o Distrito Industrial do município, porém com poucas indústrias ali instaladas. Na Tabela 5.2.6 estão listadas as principais indústrias cadastradas na região e na Figura 5.2.10 a distribuição geográfica das mesmas, e os poços tubulares localizados em suas proximidades.

Tabela 5.2 6 - Principais perímetros irrigados e pequenos projetos de irrigação localizados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

N. PONTO	UTM N	UTM E	TIPOLOGIA	MUNICIPIO	PROPRIETARIO	LITOL./AQUIFERO	LOCALIZACA	POCOS_PROX
P38	9259092	580188	Saboaria	Sousa	Lavatudo	Aluvião-Sousa	Fazenda Abóbora	DV095 - (200m)
P63	9250043	573792	Jazida de argila	Marizópolis	-	Aluvião-Sousa	Riacho dos Silvas	D049 e DV070(1km)
P66	9253456	585394	Algodoeira	Sousa	Raimundo Gadelha	Aluvião-Sousa	Sede	P82 (2,5km)
P67	9253237	585353	Algodoeira	Sousa	Sr.Oliveira	Aluvião	Sede	P82 (2,5km)
P68	9250124	579760	Distrito Industrial	Sousa	-	Aluvião-Sousa	Periferia	P228(700m) - Diversas Industrias
P103	9254171	583611	Saboaria	Sousa	Novo Brilho	Aluvião-Sousa	Periferia	P227(500m)
P103A	9250610	583321	Saboaria	Sousa	Saboaria Novo Reino	Aluvião-Sousa	Periferia	P82 e P184(2,5km)
P104	9256638	578883	Cerâmica ICEL	Sousa	Ceramica ICEL	Aluvião-Sousa	Passagem de Pedra	DV686(800m)
P104A	9249818	600175	Cerâmica	Aparecida	Queimadas	Cobert.Sousa	Sítio Queimadas	CG954 e CG943(500m)
P108	9278337	564478	Fabrica	Uiraúna	UNAMILHO	Arenitos-A.Navarro	Periferia	DW6672 P245(1,5km)
P143	9253603	583453	Fabrica	Sousa	Sorvetes Marini	Cobert-Sousa	Periferia	P146,P148 e P227(1km)

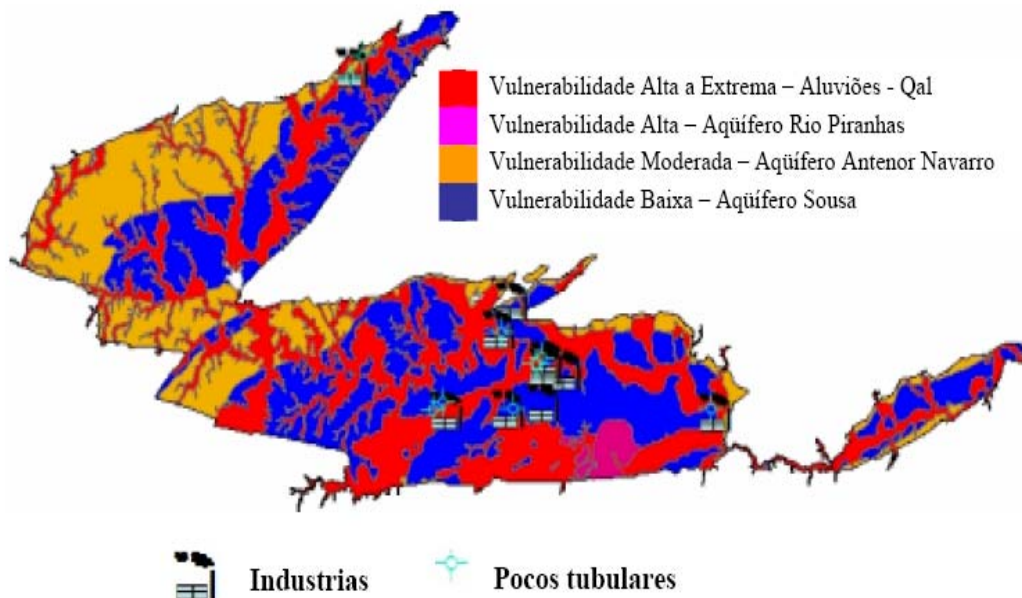


Figura 5.2. 10 – Distribuição geográfica das principais indústrias cadastradas na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe e dos poços tubulares localizados em suas proximidades.

Resíduos sólidos urbanos

São considerados como resíduos sólidos urbanos aqueles de origem domiciliar, público ou comercial, não estando neles incluídos os oriundos das atividades industriais e hospitalares.

As disposições no solo destes resíduos são usualmente encarados como elementos poluidores e passam a serem considerados parte integrante do ecossistema representando um grave problema de saúde pública.

Nenhum dos municípios da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe possui aterros sanitários e estações de compostagem e triagem, sendo todo o destino final do lixo coletado enviado para vazadouros a céu aberto, os denominados lixões (Tab. 5.2.7).

O município que apresenta maiores problemas relacionados a disposição destes resíduos é o de Sousa, no qual os principais lixões estão localizados próximos a sua sede, sendo também lançados no leito do Rio do Peixe, que corta a cidade.

Tabela 5.2 7 – Localização dos principais lixões cadastrados na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe

N.ponto	UTM(N)	UTM(E)	Município	Litologia	Localidade	Pontos d'água mais próximos
P13A	0272403	542891	Triunfo	Arenitos-A.Navarro	Centro-periferia	CM481 e CM482 - (500m)
P25	0257733	588304	São João do Rio do Peixe	Cobert.-Cristalino?	Periferia	DM980, DM981 e DM989 - (1km)
P44	0248137	615730	São Domingos do Pomal	Cristalino	Sítio Umarí	CH077(200m)
P49	0253587	586988	Sousa	Aluvião-Sousa	Bairro Gato Preto	P82, DM082 e P198 (2,6km)
P49A	0250470	587524	Sousa	Aluvião-Sousa	Bairro Gato Preto	DM082 e P198 (2,0km)
P49B	0249837	572290	Marizópolis	Cristalino	Sede	DM040(1km)
P64	0248518	576077	Sousa	Aluvião-Sousa	Periferia	DM072 e DM071(2,5km)
P100	0257761	588281	São João do Rio do Peixe	Cobert.Cristalino	Pe de Serra	P28(3km)
P141	0252708	584480	Sousa	Aluvião-Sousa	Rio do Peixe-periferia	P82(500m)
P144	0253850	583405	Sousa	Aluvião-Sousa	Periferia	P148,P149 e P227(1km)
P167	0257800	583172	Sousa	Arenitos-A.Navarro	Abencao de Deus	CH401(800m)
P187	0245848	581603	Sousa	Aluvião-Sousa	Núcleo III	P188(1,5km)
P189	0244100	581250	Sousa	Aluvião-Cristalino	Núcleo II	P188(1,0km)

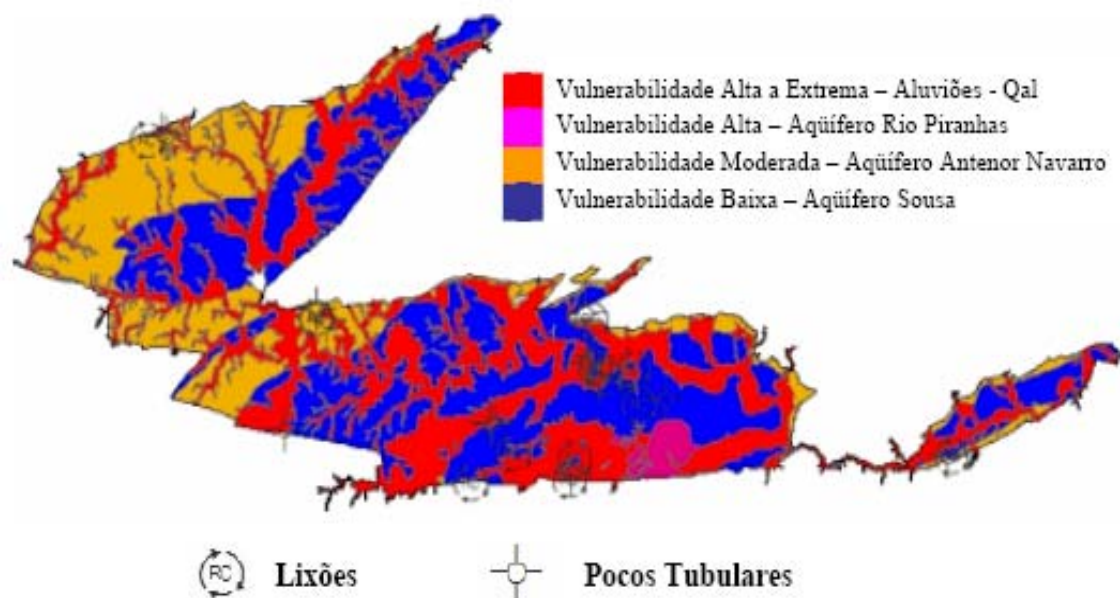


Figura 5.2. 11 – Localização dos principais lixões e dos poços tubulares localizados em suas proximidades.



Foto 5.2.7 – Vista do Lixão localizado no Sítio Cadeado, próximo à cidade de Sousa.



Foto 5.2.8 – Vista do Lixão localizado no Sítio Cadeado, próximo a cidade de Sousa. Observa-se a presença dos catadores.



Foto 5.2.9 – Lixão localizado próximo a cidade de São João do Rio do Peixe.

Cemitérios

Os cemitérios também representam uma fonte pontual de possível contaminação da água subterrânea em bactérias patogênicas principalmente naqueles localizados em áreas residenciais. Na Tabela 5.2.8 estão listados os cemitérios cadastrados na Bacia do Sedimentar do Rio do Peixe, a litologia local e os pontos d'água situados em suas proximidades, o que também pode ser observado na Figura 5.2.12.

Tabela 5.2.8 - Distribuição geográfica dos cemitérios cadastrados na área da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

N.ponto	UTM(N)	UTM(E)	Município	Nome	Litol./Aquifero	Localidade	Pontos d'água mais próximos
P13	9272432	543874	Trunfo	-	Arenitos-A.Navarro	Centro-periferia	CM461 e CM462 - (500m)
P24	9278545	584840	Uiraúna	Coração de Jesus e N.S.Conceição	Aluvião-A.Navarro	Centro	P245 - (1km)
P35	9256928	539020	Santa Helena	-	Coberturas-Cristalino	Periferia	CM016, P112 e P112 - (1km)
P40	9253087	628517	Pombal	-	Aluvião	Sítio Ponteiros	CO882 e CO887 - (1km)
P43	9250178	619838	S.Domingos do Pombal	Boa Vista	Arenitos-A.Navarro	Sítio Boa Vista	CH071 e CH058 - (1,5km)
P45	9246136	618817	São Domingos do Pombal	-	Cristalino	Sede	CH016 - (500m)
P45A	9272590	553888	Povo Jose de Moura	Nossa Senhora da Conceição	Aluvião-A.Navarro	Sede	P208 e P210 - (300m)
P45B	9273320	554205	Povo Jose de Moura	São Geraldo	Arenitos-A.Navarro	Sede	P208 e P210 - (300m)
P52	9244008	588818	São João do Rio do Peixe	-	Aluvião-Sousa	Umari de Baixo	DV932(400m)
P59	9256858	580780	São João do Rio do Peixe	-	Aluvião-A.Navarro	Sede	DV815(300m)
P65	9253304	585400	Sousa	São João Batista	Aluvião-Sousa	Sede	P82 (2,5km)
P65A	9243689	572128	Marizópolis	Santo Antonio	Cristalino	Sede	CH040(1,2km)

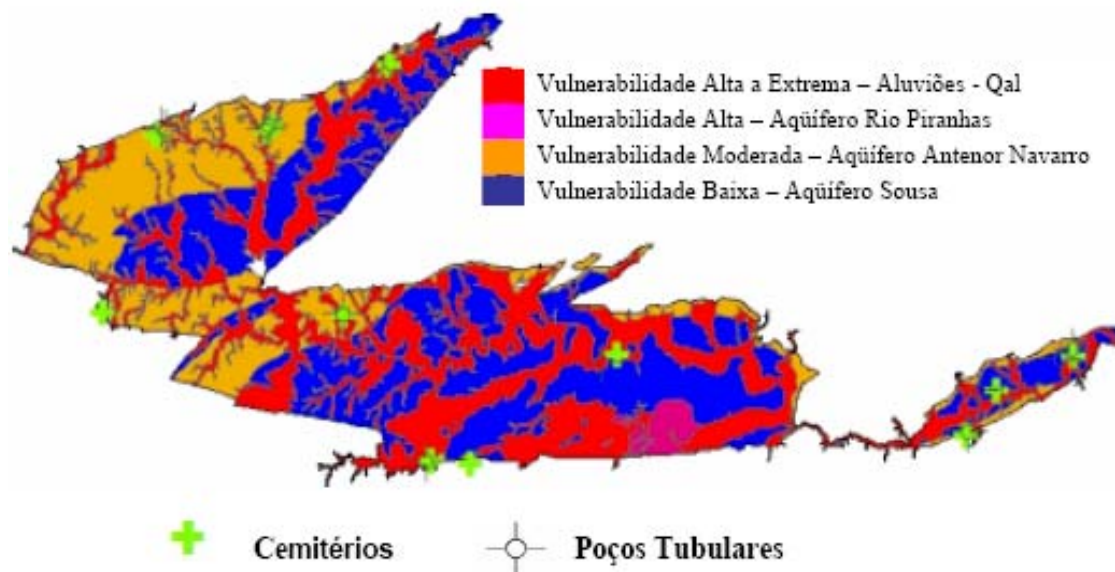


Figura 5.2. 12 – Distribuição geográfica dos cemitérios cadastradas na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe e dos poços tubulares localizados em suas proximidades.

5.3. MAPEAMENTO DOS RISCOS DE POLUIÇÃO

Na Figura 5.2.13 estão indicadas todas as fontes potenciais de poluição cadastradas na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, enquanto na Figura 5.2.14 estão selecionadas as principais áreas com potencial risco de contaminação, quais sejam: área A – região ao entorno da cidade de Sousa com risco moderado a alto e área B – região ao entorno da sede do município de São João do Rio do Peixe, também com risco de contaminação de moderado a alto. Toda a área restante da bacia pode ser considerada como tendo baixo risco de contaminação.

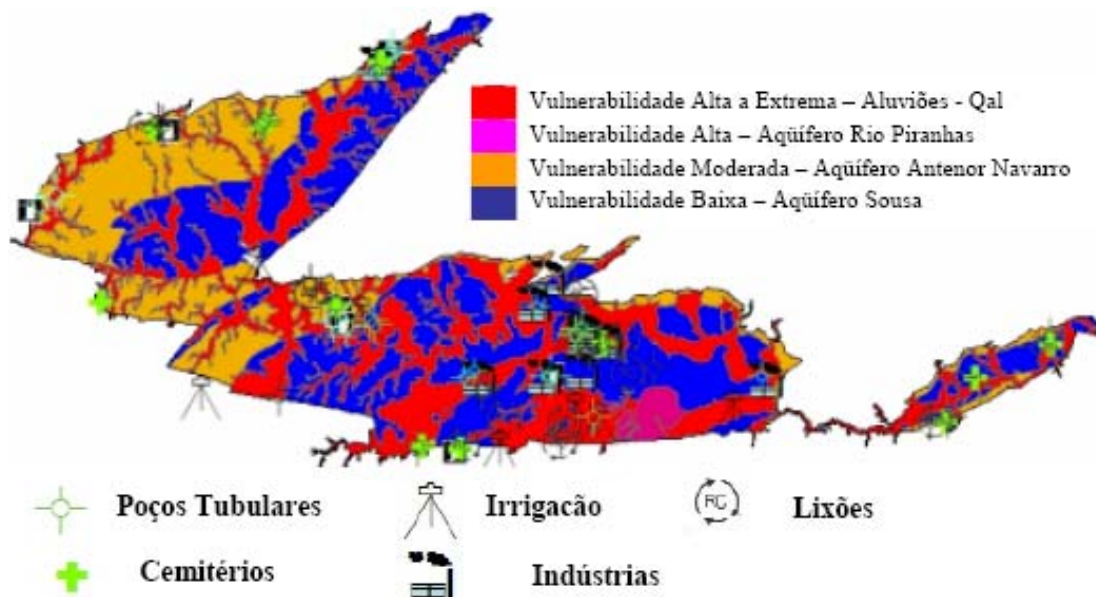


Figura 5.2. 13 – Localização das fontes potenciais de poluições cadastradas na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

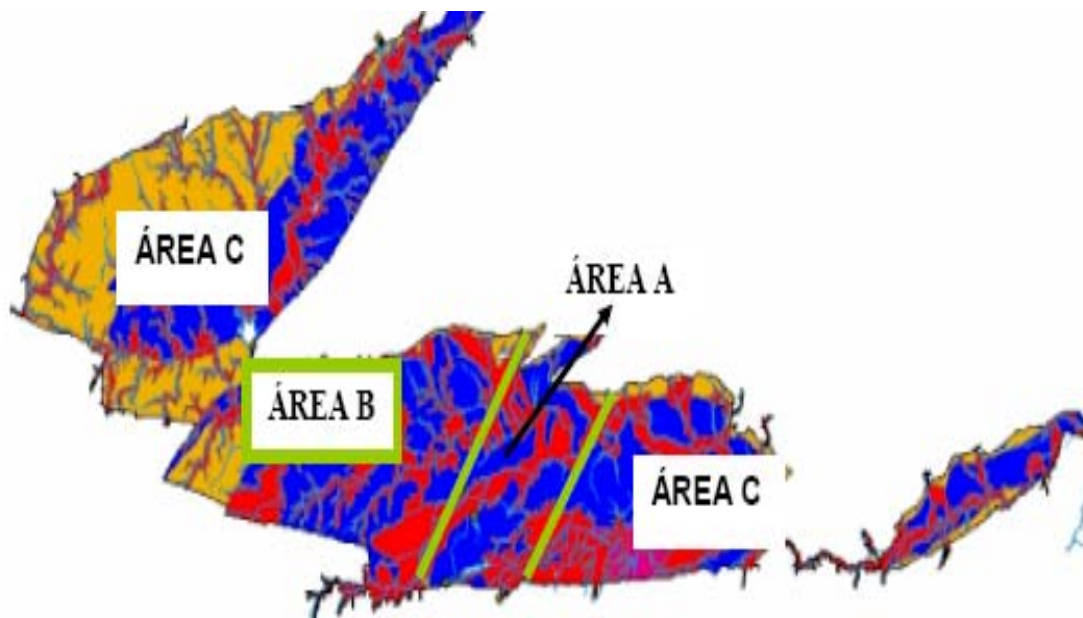


Figura 5.2. 14 – Risco de contaminação; Áreas A e B – risco moderado a alto, Área C – risco baixo de contaminação.

6. SUBSÍDIOS À GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA BACIA

6.1 ZONEAMENTO EXPLOTÁVEL

A aplicação do modelo consistiu em se fazer a verificação do volume anual da recarga para a Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, sendo esta igual à chamada reserva renovável e disponível para gestão hídrica da bacia. O modelo permite também verificar o comportamento do sistema frente a explorações significativas deste.

Para avaliar o comportamento do aquífero diante de um possível aumento das retiradas de água, foram realizadas simulações do sistema considerando retiradas anuais do sistema.

Quatro cenários de retiradas foram simulados pelo modelo, sendo o primeiro (em regime estacionário) e o segundo (em regime transitório), ambos com 180 dias de duração e vazão de bombeamento de 250 m³/dia/poço. Considerando os 194 poços existentes, isto equivale a um volume total de 8.730.000 m³. O terceiro e o quarto cenários foram respectivamente idênticos, com exceção da vazão, que foi de 500 m³/dia/poço, resultando num volume bombeado total de 17.460.000 m³.

A Figura 6.1.1 mostra o rebaixamento dos níveis potenciométricos para o primeiro cenário (regime estacionário, com poços bombeando 250 m³/dia). Observam-se rebaixamentos da ordem de 1 a 2 metros, com maiores variações nas bordas da bacia, chegando a rebaixar cerca de 5 metros em alguns locais desta.

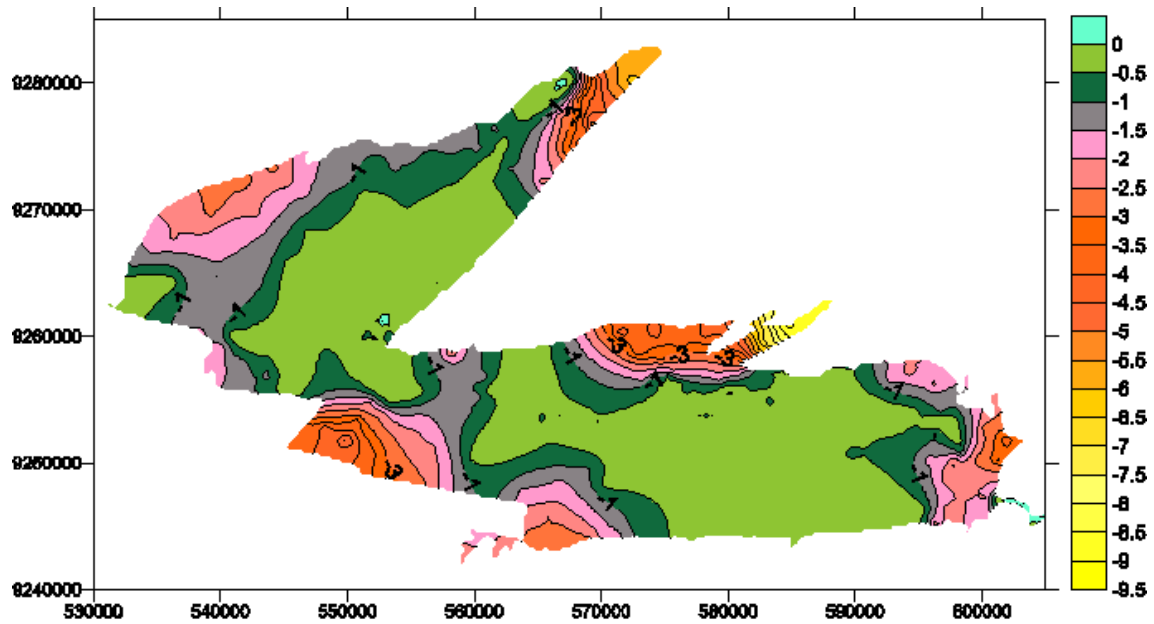


Figura 6.1. 1 - Mapa de rebaixamento para o primeiro cenário ($Q=250 \text{ m}^3/\text{dia}$ no regime estacionário).

A Figura 6.1.2 mostra o rebaixamento dos níveis potenciométricos para o segundo cenário (regime transitório, com poços bombeando $250 \text{ m}^3/\text{dia}$).

Esta simulação apresenta valores de rebaixamento de nível pequenos, da ordem de 0 a 1 metro em quase toda a bacia, atingindo um máximo de cerca de 4 metros num local isolado, próximo a Uiraúna.

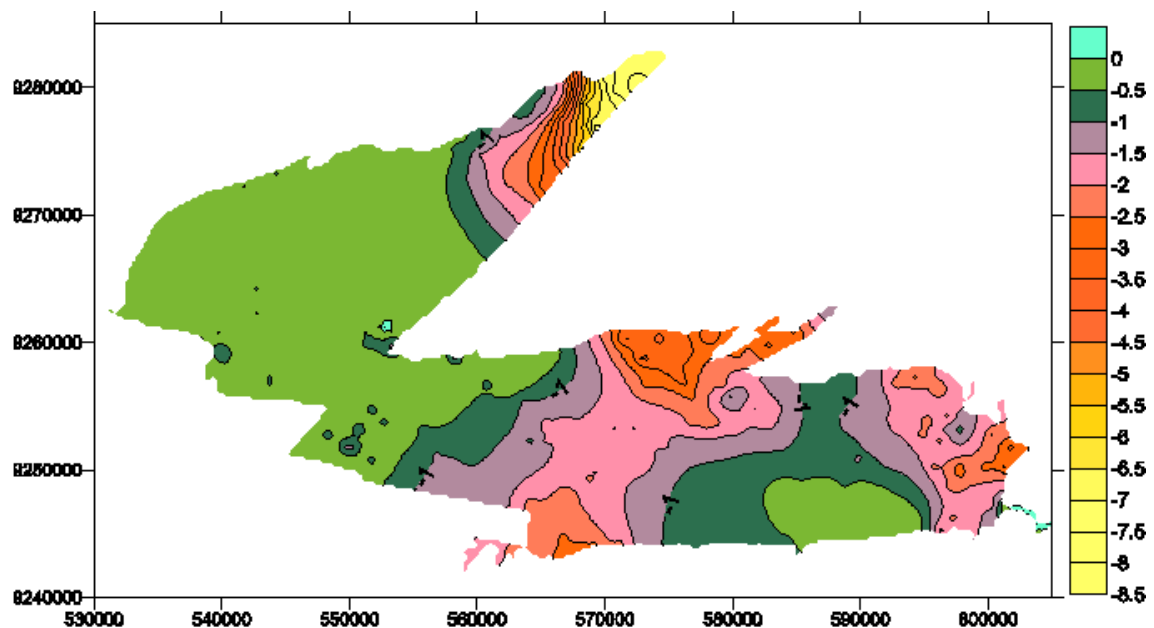


Figura 6.1. 2 - Mapa de rebaixamento para o segundo cenário ($Q = 250 \text{ m}^3/\text{dia}$ no regime transitório)

A Figura 6.1.3 mostra o rebaixamento dos níveis potenciométricos para o terceiro cenário (regime estacionário, com poços bombeando 500 m³/dia).

Neste caso o rebaixamento aumenta bastante nas bordas da bacia, onde os níveis rebaixam em até 13 metros. No interior da bacia, no entanto, os níveis potenciométricos não se mostram muito diferentes daqueles encontrados para o primeiro cenário.

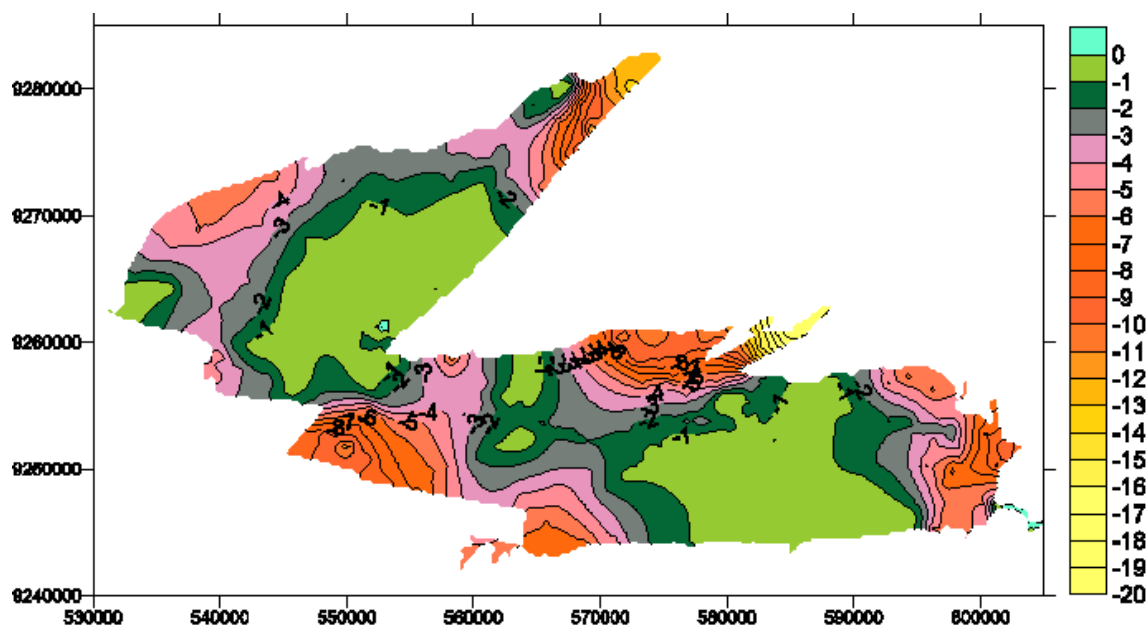


Figura 6.1. 3 - Mapa de rebaixamento para o terceiro cenário (Q = 500 m³/dia no regime estacionário).

A Figura 6.1.4 mostra o rebaixamento dos níveis potenciométricos para o quarto cenário (regime transitório, com poços bombeando 500 m³/dia).

Neste caso o rebaixamento se mostrou também pequeno, apresentando, em geral, valores menores que 1 metro na sub-bacia de Brejo das Freiras e entre 0 e 6 metros na sub-bacia de Sousa. A maior variação, no entanto, foi registrada próxima a cidade de Uiraúna, atingindo cerca de 15 metros neste local.

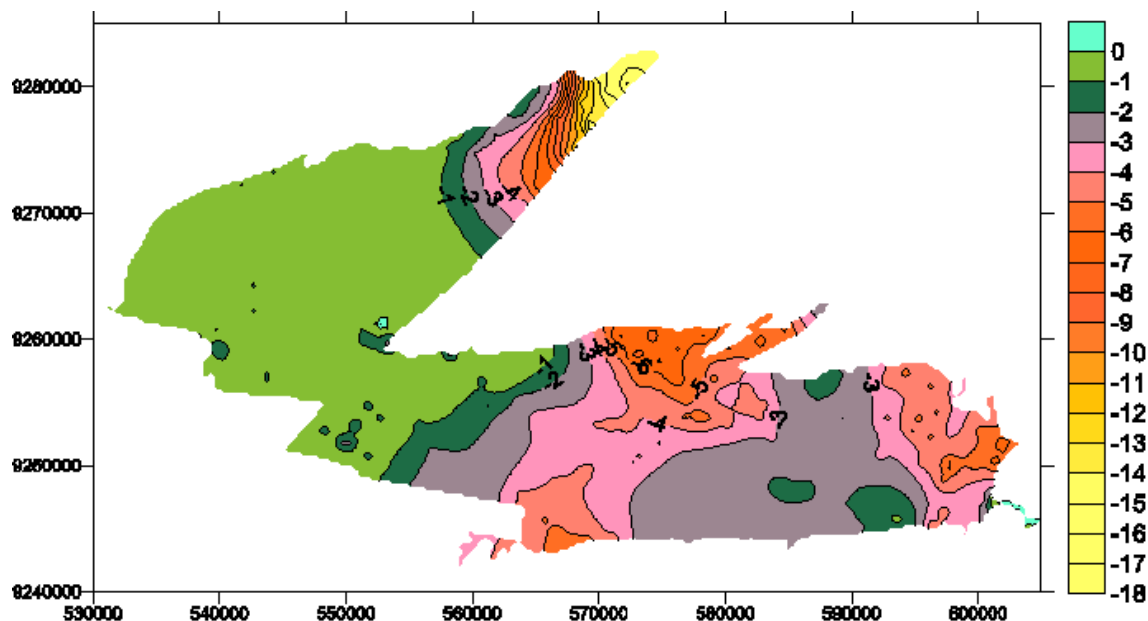


Figura 6.1. 4 - Mapa de rebaixamento para o quarto cenário ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{dia}$ no regime transitório)

Em linhas gerais a simulação mostra que o aquífero não apresenta rebaixamentos significativos, decorrentes das retiradas simuladas, como pode ser visto nas Figuras 6.1.1 a 6.1.4, atingindo os maiores valores nas bordas da bacia, principalmente na extremidade superior da sub-bacia de Brejo das Freiras, próximo ao município de Uiraúna.

Desta forma, pode-se concluir que não há fortes restrições para exploração racional de água subterrânea em qualquer uma das sub-bacias.

6.2. OBRAS HÍDRICAS RECOMENDADAS E OUTRAS CONSIDERAÇÕES

Evidentemente, as obras hídricas recomendadas devem ser projetadas em função das condições de jazimento e de circulação das águas subterrâneas nas diversas unidades aquíferas da bacia: Antenor Navarro, Sousa, Rio Piranhas e Aluvial.

Para o aquífero Aluvial, ocorrente, de uma maneira geral, em condições rasas de jazimento e circulação, pequenas espessuras saturadas e, conseqüentemente, baixas transmissibilidades, são recomendados poços escavados, de grande diâmetro (2 ou mais metros, a depender de profundidades e vazões demandadas) e, em alguns casos de demandas maiores, a construção de barragens subterrâneas. Nestes casos estudos prévios para conhecimento de litologias e de espessuras serão necessários à definição dos locais destes represamentos do fluxo sub-superficial. Em áreas deste aquífero em que o pacote aluvial seja francamente arenoso e espessura saturada relativamente grande (6 metros ou mais), pode-se optar por perfurações de poços de pequeno diâmetro (10 polegadas ou mais) como forma de obtenção de vazões, relativamente, elevadas. Uma outra obra recomendada para aquíferos aluviais é a construção de poço tipo coletor com drenos radiais, ou do poço Bico-dePato, de alvenaria seca de tijolos com forma e dimensões especiais.

Em relação aos demais aquíferos, a captação somente pode ser efetivada através da perfuração de poços tubulares, de pequeno diâmetro, profundos. Isto exige a elaboração prévia de projetos de poços que contemplem as condições de jazimento e circulação desses aquíferos, de um lado, e os aspectos socioeconômicos de outro, entre eles a vazão requerida. De uma maneira geral, com respeito à profundidade de captação e diâmetro, pelo nível de conhecimento atual das condições de circulação e fluxo, recomendam-se, orientativamente, as seguintes condições de perfuração de poços:

Para o Antenor Navarro, na área de recarga na sub-bacia de Triunfo-Brejo das Freiras, poços com profundidades de até 250 metros, quando se espera que tenham atingido o embasamento cristalino impermeável;

Para o Antenor Navarro, na área sob carga de pressão, exercida pelo pacote de sedimentos sobreposto (formações Sousa, Rio Piranha e Aluvial), poços entre 250 e, pelo menos, 1.000 metros de profundidade, de modo a captar toda espessura aquífera, atingindo-se o embasamento cristalino impermeável;

Para os níveis aquíferos intercalados no aquífero/aquícludo Sousa, a julgar pelas perfurações já encetadas, a profundidade dos poços deve situar-se em torno dos 50 a 60 metros, podendo, eventualmente, na dependência do conhecimento hidro-lito-estratigráfico

(existência de duas ou mais lentes areníticas saturadas), as perfurações atingirem os 100m ou mais;

Para o aquífero Rio Piranhas, recomendam-se poços com 100m de profundidade;

Em todos os casos, estes poços devem ser filtrados em toda sua extensão produtora, em diâmetros não inferiores a 6 polegadas.

Evidentemente, no momento, todas estas recomendações são genéricas. A sua execução dependerá das vazões demandadas e da possibilidade de serem atendidas com estas obras, em número em que a relação custo-benefício seja aceitavelmente positiva. Isto exige um conhecimento das condições de oferta, ainda, não disponível, de vez que os poços até hoje perfurados na bacia não preenchem os requisitos definidos pelas condições de jazimento e de circulação dos aquíferos da bacia. Talvez, a exceção ocorra com as captações das unidades aquíferas contidas na formação Sousa.

Em relação aos tipos de demandas (abastecimento humano urbano, abastecimento humano rural, industrial, irrigação e pecuária), faltam dados sobre as reais produtividades de poços dos aquíferos Aluvial, Rio Piranhas e, principalmente, Antenor Navarro. No estágio atual de conhecimento, todos os poços construídos nestes diversos aquíferos apresentam baixas vazões, em razão de suas características construtivas não contemplarem as esperadas condições de jazimento e de circulação destes aquíferos. Como sempre, as lentes aquíferas da Formação Sousa talvez sejam as que apresentem as menores produtividades obtidas nos poços já perfurados, de vez que as suas condições litológicas, dimensionais e hidrodinâmicas são sofríveis, não se devendo esperar grandes vazões em seus poços. Assim sendo, e tendo em vista os aspectos qualitativos de suas águas, as águas subterrâneas destes poços somente seriam compatíveis com pequenas demandas, físico-quimicamente pouco exigentes, como soem ser as demandas da pecuária.

Mas, existe na área da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, inserida na região semi-árida do Nordeste, extensivamente ocupada por uma agricultura de subsistência, dita de sequeiro, uma demanda que não é considerada nos planos de recursos hídricos regionais e estaduais formulados: a demanda dessa atividade agrícola quando ocorrem as secas. Em tais planos, considerou-se como regular o período chuvoso do semi-árido, o que de fato



acontece, muito freqüentemente, nas regiões de climas úmidos, sub-úmidos ou temperados do Brasil e do mundo. Entretanto, no semi-árido paraibano, as irregularidades pluviiais são freqüentes, ocorrendo os denominados veranicos mesmo em anos de chuvas médias ou superiores, o que acarreta em danos às colheitas, quaisquer que sejam elas, de subsistência ou não. Isto ocorre, obviamente, porque a demanda hídrica provocada pelo veranico não é atendida. Para evitar tais prejuízos, seria preciso dotar estas áreas de produção agrícola de sistemas de irrigação, os mais simples e eficientes possíveis, de modo que boa parte da produção não sofresse os efeitos danosos dos veranicos e pudesse ser colhida. As águas subterrâneas, por suas característica de ocorrência permitem atender estas demandas de forma adequada, tanto em termos de quantidade, quanto de qualidade. Seria a irrigação chamada de salvação, a ser empreendida durante a estação chuvosa onde todos plantem e poucos colhem quando ocorrem secas e veranicos. Na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, até os poços captando as unidades aquíferas Sousa se prestam ao atendimento destas demandas, normalmente pequenas. Para os grandes projetos de irrigação instalados ou em vias de instalação o suprimento hídrico já está assegurado pelos reservatórios superficiais de Engo Ávidos, São Gonçalo, lagoa do Arroz, etc. e pelo Canal da Redenção que viabiliza a transposição das águas da bacia do rio Piancó (Açude Coremas-Mãe d'Água) para o projeto denominado Várzeas de Sousa.



7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1. CONCLUSÕES

O presente estudo indica resultados que validam os esforços direcionados a um entendimento geral do comportamento hidrogeológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe e da distribuição qualitativa de suas águas. Aspectos geológicos e geofísicos puderam ser confrontados, conflitos surgiram, indicando a complexidade tectônica existente e confirmando, também em escala global, estudos realizados por Françollin (1992) e Lima Filho (1991), reforçando a necessidade de estudos mais detalhados capazes de elucidarem as dualidades. Contudo, ganhos ocorreram, pois indiscutivelmente melhorou o nível de conhecimento e reconhecimento da região em todos os aspectos, inclusive das limitações naturais imposta pelo sistema aquífero.

Houve um acompanhamento qualitativo e quantitativo contínuo das águas subterrâneas, através de campanhas de monitoramentos periódicos em toda a bacia, seguido da modelagem matemática do fluxo d'água subterrâneo na bacia, numa abordagem conceitual bi-dimensional, resultando na elaboração de mapas potenciométricos e hidroquímicos.

Esses estudos, juntamente com a aplicação de dois métodos de Balanço Hídrico, permitiram uma avaliação preliminar do volume de água subterrânea renovável no ciclo hidrológico, bem como, caracterização e classificação das águas para os mais diversos usos de aproveitamento. Áreas vulneráveis e de risco natural de contaminação foram identificadas e mapeadas, o que permite, em apoio à gestão dos recursos hídricos da bacia,

considerar medidas preventivas e realizar simulações de novos cenários para indicação da evolução desses fatores impactantes na bacia.

O modelo elaborado nestas pesquisas, ainda de caráter preliminar, conforme se discorreu neste trabalho, estimou a recarga no período de novembro de 2005 a maio de 2006 em cerca de 64.000.000 m³ e no período de novembro de 2006 a maio de 2007 em cerca de 46.000.000 m³. Como uma aproximação grosseira, poderíamos lançar mão dos valores desses recargas, e, assim, o potencial corresponderia à média dos valores (64 e 46 milhões de m³), isto é, 55.000.000 m³ e a disponibilidade, admitida entre 50 a 60% do potencial, ficaria entre 27,5 e 33 milhões de m³.

Em termos de qualidade de água, saliente-se a ocorrência mais freqüente das classes, C₃-S₁ e C₃-S₂, com alto perigo de salinização do solo, porém com baixo e médio risco de sódio, em toda a Bacia Sedimentar do Rio do Peixe. Entretanto, valores menores de salinidade são encontrados nos poços localizados nas bordas da sub-bacia de Brejo das Freiras, onde a formação aquífera Antenor Navarro ocorre em superfície, em particular, nas proximidades de Uiraúna e de Triunfo.

A contaminação bacteriana, também extensiva em toda a bacia, apresenta um ciclo caracterizado por aumentos significativos nos períodos chuvosos, quando a concentração salina diminui, e quedas nos períodos secos subsequentes, com o aumento da concentração de sais.

Porém, para que informações dessa natureza se sustentem de forma consistente, faz-se necessária a observação de um maior número de séries temporais das variáveis envolvidas no processo hidrológico (precipitação, vazão superficial e de base, infiltração, níveis piezométricos, análises físico-químico-bacteriana das águas etc.).

Apesar dos estudos geológicos de superfície e de sub-superfície terem sido executados, estes tiveram resultados discrepantes em termos de comportamento estrutural e lito-estratigráfico da bacia sedimentar, necessitando de estudos adicionais, inclusive, para determinação das características dimensionais das diversas formações geológicas que compõem a bacia.

As perfurações de poços estratigráficos e piezométricos e a instalação dos lisímetros, infelizmente sofreram retardamento, por motivos alheios à vontade da equipe, e, conseqüentemente, os dados obtidos nestas instalações não puderam ser completamente aproveitados no presente estudo. Contudo, os equipamentos estão funcionando plenamente e os dados ali coletados serão de grande valia para futuros estudos.

O presente estudo reforça a necessidade de exploração sustentada do sistema aquífero, que não pode ultrapassar a parcela de água subterrânea naturalmente, restituída à superfície, constituindo a vazão de base. A quantificação desta grandeza, através de medições e monitoramento, é fundamental não somente para a avaliação mais segura do potencial de água subterrânea, mas também na gestão integra dos recursos hídricos nesta bacia.

Por fim, convém destacar os importantes benefícios trazidos pela formação da rede cooperativa de pesquisas, que permitiu o intercâmbio de conhecimentos e experiências práticas entre as diversas instituições participantes.

7.2. RECOMENDAÇÕES

Torna-se pertinente a continuação dos estudos desenvolvidos pela rede de pesquisadores nas bacias sedimentares da região semi-árida do nordeste brasileiro, pois, a mesma integra esforços mútuos que buscam soluções exequíveis e que proporcionem a minimização dos efeitos negativos de um mal comum, as inevitáveis e severas secas.

Nobre são as intenções: o entendimento do sistema, em especial da sua potencialidade em termos de oferta hídrica, proporcionará subsídios para as políticas direcionadas ao bem estar da população, dando-lhe condições de adaptação e convívio com a variabilidade natural do clima semi-árido do Nordeste.

Assim, recomenda-se um estudo mais detalhado da zona efetivamente aproveitável, com foco no subsistema livre, ou seja, aluviões, formações Sousa, Rio Piranhas e Antenor Navarro, esta enquanto formação aflorante, que necessitará a investigação da relação rio-

aquífero, com medições do fluxo de base em pontos específicos ao longo dos principais rios visando, inclusive, informações complementares à realização do balanço hídrico.

A seguir tem-se o conjunto de ações e atividades prioritárias para a consolidação dos conhecimentos resultados do presente trabalho e para a realização de futuros estudos nesta bacia.:

- a) Execução de perfuração de poços estratigráficos e de piezômetros para esclarecer dúvidas referentes à estruturação geológica e para o monitoramento do lençol freático, respectivamente;
- b) Execução de testes de bombeamento em todas as formações aquíferas para obtenção da distribuição espacial dos parâmetros hidráulicos subterrâneos de cada formação aquífera existente na bacia;
- c) Estudos geológicos e geofísicos complementares, capazes de elucidarem os resultados discrepantes, em termos de comportamento estrutural e lito-estratigráfico da bacia sedimentar, encontrados pelos estudos atuais. Estes estudos são imprescindíveis para a determinação das características dimensionais das diversas formações geológicas que compõem a bacia;
- d) Continuação do monitoramento das variações do nível d'água subterrâneo na bacia;
- e) Continuação do monitoramento qualitativo nos aspectos físico-químicos, microbiológico e isotópico;
- f) Realização de monitoramento das vazões de recessão em pontos estratégicos dos principais rios inseridos na bacia;
- g) Realização de estudos específicos sobre a recarga na bacia sedimentar, para alimentação do modelo, fazendo uso de estações lisimétricas, de dados sobre o uso do solo e vegetação, etc.;
- h) Realização de estudos da influência dos principais reservatórios superficiais, situados na borda e no interior da bacia sedimentar, com relação ao processo de recarga e de circulação da água subterrânea a ser considerado na modelagem;
- i) Realização de estudos da influência dos perímetros irrigados na flutuação do nível piezométrico, a partir da inclusão de mais poços situados nessas zonas específicas;

- j) Continuação do processo de modelagem com a inclusão dos novos dados geológicos, de parâmetros obtidos nos testes de bombeamento, de nível d'água, de recarga, de chuva, de vazão superficial e de base, etc.
- k) Aumento da precisão das estimativas da recarga subterrânea através do refinamento dos modelos;
- l) Simulação de outros cenários na modelagem, considerando os vários usos da água subterrânea na bacia, visando oferecer subsídio ao planejamento e ao gerenciamento;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J do P. T. 1984. *Os Recursos de Água Subterrânea do Trópico Semi-Árido do Estado da Paraíba*. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, 1984.

ALBUQUERQUE, J do P. T. 1986. *O Sistema Aquífero Rio do Peixe*. 4º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Brasília, anais, p.194-207, 1986.

ALBUQUERQUE, J do P. T.; REGO, J.C. 1999. *Subsídios para o gerenciamento racional e integrado dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos do Estado da Paraíba*. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte: ABRH. Disponível em: CD-ROM.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. 1998. "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater". 20th ed. Washington D. C.: American Public Health Association, 1998, 1569p.

ANDERSON, M. P. e WOESSNER, W. W. 1992. *Applied Groundwater Modelling, Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press. Inc., San Diego, USA, 381pp.

ARBEITSKREIS GRUNDWASSERNEUBILDUNG DER FACHSEKTION HYDROGEOLOGIE DER DEUTSCHEN GEOLOGISCHEN GESELLSCHAFT. 1977. *Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate*. Geologisches Jahrbuch, C19, p3-98, Hannover-Germany.

BRADBURY, K. R. e ROTSCHILD, E. R. 1985. *A computerized technique for estimating de hydraulic conductivity of aquifers from the specific capacity data*. Ground Water 23, 2, 240-246.

BRITO, G.L.M. 2007. *Estimativas da Taxa de Recarga na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe(PB) pelo Método do Balanço Hídrico*. Dissertação de Mestrado, UFCG/ UAEC/ AERH, Campina Grande, 2007.

CAMARGO, A.P. 1971. *Balanço hídrico no Estado de São Paulo*. Campinas: IAC. 28p. (Boletim Técnico, n. 116)



CHIANG, W. H. e KINZELBACH, W. 2003. *3D-Groundwater Modeling With PMWIN. A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 346 pp.

COSTA, P.R.C.; SÁ, E.F.J.; ANDRADE, P.R. de; LINS, A.P.L.; ANTUNES, A.F.; SILVA, F.C.A. da; SCHOTS, H.A.2007. *Arcabouço Estrutural da Bacia do Rio do Peixe*. XI Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Natal-RN. 2007.

CPRM-UFCG. 2005. *Comportamento Hidrogeológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, Relatório Síntese com Análise Bibliográfica*. Universidade Federal de Campina Grande- Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

DOHERTY, J.; BREBBER, L. e WHITE, P. 1994. *PEST – Model Independent Parameter Estimation. User's Manual*. Watermark Computing. Austrália.

DOHERTY, J.; BREBBER, L. e WHITE, P. 1994. *PEST – Model Independent Parameter Estimation. User's Manual*. Watermark Computing. Austrália.

FEITOSA, E.C. 2006. *Bacia do Rio do Peixe - Estudo Geofísico por Eletroresistividade*. LABHID - Laboratório de Hidrogeologia, UFPE – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, p. 100, 2006.

FOSTER, S. S. D. & HIRATA, R. C. 1991. *Determinación del riesgo de contaminación de águas subterráneas. Una metodologia basada em datos existentes*. Lima: CEPIS, 1991. 81p.

FRANÇOLIN, J. B. 1992. *Analyse Structurale du Bassin du Rio do Peixe*. Tese de doutorado, Université de Rennes, Rennes, França.

LANÇA, R.M.M. 2007. *Aula Teórica de Hidrologia Aplicada: Capítulo I - Hidrologia de Superfície*. Disponível em: <http://w3.ualg.pt/~rlanca>; Acesso em: 17 de agosto de 2007.

FUNCEME.2007. FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. Disponível em: <http://www.funceme.br/>

KUNZLER, J. S. 2007. *Estimativa da recarga na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe através da modelagem matemática do fluxo subterrâneo*. Dissertação de Mestrado, UFCG/ UAEC/ AERH, Campina Grande, 2007.

LANÇA, R.M.M. 2007. *Aula Teórica de Hidrologia Aplicada: Capítulo I - Hidrologia de Superfície*. Disponível em: <http://w3.ualg.pt/~rlanca>; Acesso em: 17 de agosto de 2007.

LIMA FILHO, M.F. 1991. *Evolução Tectono-Sedimentar da Bacia do Rio do Peixe (PB)*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia., Universidade Federal de Pernambuco. 1991.



LIMA, E. A. DE, NASCIMENTO, D. A. DO & BRANDÃO, L. C. R. 2004. *Mapa "Hidroquímica dos Mananciais Subterrâneos da Folha Souza (SB.24-Z-A)"*. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Diretoria de Geociências-DGC, 2004.

McDONALD, M. G. e HARBAUGH, A. W. 1988. *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*. U. S. Geological Survey, Open-file report 83-875, Chapter A1.

McLIN, S. G. 2005. *Estimating the Aquifer Transmissivity from Specific Capacity Using MATLAB*. Ground Water 43, 4, 611-614.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. 2004. Portaria nº 518, Estabelece os procedimentos e responsabilidades.

MOLLE, F.; CADIER, E. 1992. *Manual do pequeno açude: construir, conservar e aproveitar pequenos açudes*, Recife, SUDENE/ORSTOM/TAPI, 1992

NOGUEIRA, F.C.C., OLIVEIRA, M. S. de, CASTRO, D.L. de. 2004. *Estudo Magnético e Gravimétrico do Arcabouço Estrutural da Bacia Rio do Peixe-PB*. Universidade Federal do Ceará, Revista de Geologia, Vol.17, Nº 1, 74-87, 2004.

OLIVEIRA, M.M. 2004. *Recarga de águas subterrâneas: Métodos de Avaliação*. Tese (Doutorado) - Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, LNEC, 2004.

OLIVEIRA, M.M. COSTA, A. M.; FRANCES, A. 2004. *Estimativa da recarga de águas subterrâneas a partir da análise dos hidrogramas de escoamento superficial na área abrangida pela Folha 6 da Carta Hidrogeológica de Portugal à escala 1:200 000*. Relatório 379/04 - NAS, Lisboa, LNEC, Dezembro de 2004, 123 pp.

PARALTA, E. A.; OLIVEIRA, M.M.; LUBCZYNSKI, M.W.;RIBEIRO, L.F. 2003. *"Avaliação da Recarga do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja Segundo Critérios Múltiplos – Disponibilidades Hídricas e Implicações Agro-Ambientais."* In Anais do 6º SILUSBA – Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Lisboa, pp. 501-516

PERH. 2006. *Plano Estadual de Recursos Hídricos*. Resumo Executivo & Atlas, Governo do Estado da Paraíba.

PINHEIRO, P.M.; MARACAJA, J.R.A.; ARAUJO JUNIOR, R.J.; REGO, J.C., CEBALLOS, B.S.O. 2007. *Qualidade da Água Subterrânea em Estações de Estiagem na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe-PB*. 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES. Ouro Preto. 2007.

relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências, 2004.

ROCHA, D.; AMARAL C. 2006. *Hidrogeologia da Bacia do Rio do Peixe - Geologia da Bacia do Rio do Peixe*. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Recife-PE, 2006.



ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. 1998. *Planilhas no Ambiente Exceltm para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial*. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137.

SIMMERS, I, (Editor) 1997. *Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas*. A.A. Balkema-Rotterdam, Holanda, 227 pp.

SOIL CONSERVATION SERVICE. 1972. *National Engineering Handbook*, section 4, Hydrology, U.S. Dept. of Agriculture, available from U. S. Government Printing Office, Washington D.C.

SOKAL, R., and F. ROHLF. 1981. *Biometry (2^o ed.)*. W. H. Freeman and Co, San Francisco, 854 p.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. 1955. *The water balance*. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104 pp.

TUCCI, C.E.M. 1993. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. São Paulo: Universidade Federal do Rio Grande do Sul / EDUSP.

UNEP/DEWA/RS.02-2. 2002. A survey of methods for groundwater recharge in arid and semi-arid regions. Early Warning and Assessment Report Series, United Nations. Environment Programme, Nairobi, Kenya.



ANEXOS



ANEXOS DE CAPÍTULOS



Capítulo 2:

Anexo A2.1 – Estado da Arte

Capítulo 3:

Anexo A3.1 – Geologia da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe

Anexo A3.2 – Estudo Geofísico por Eletroresistividade

Capítulo 4:

Anexo A4.1 – Tabela com Cadastro de Poços.

Anexo A4.2 – Cadastro dos Poços de Produção

Anexo A4.3 – Programa Computacional para Determinação da Transmissividade de Aquíferos

Anexo A4.4 – Dados de Precipitação

Anexo A4.5 – Programa Computacional BALSEQ

Capítulo 5:

Anexo A5.1 – Resultados da ANOVA – Análise Geral

Anexo A5.2 – Resultados da ANOVA – Análise no Período de Agosto a Novembro de 2005.

Anexo A5.3 – Resultados da ANOVA – Análise no Período de Agosto a Novembro de 2006

ANEXOS DE DISSERTAÇÕES E PUBLICAÇÕES

Dissertações de Mestrado

[A-Diss.1 - Estimativa da Taxa de Recarga na Bacia Sedimentar Rio do Peixe \(Pb\) pelo Método do Balanço Hídrico](#)

[A-Diss.2 - Estimativa da Recarga da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe através da Modelagem Matemática do Fluxo Subterrâneo](#)

Trabalhos Publicados em Congressos

[A-Pub.1 - Caracterização Hidrogeológica, Hidroquímica e Sanitária da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe](#)

[A-Pub.2 - Modelagem Matemática do Sistema Aquífero Rio do Peixe](#)

[A-Pub.3 - Aplicação do Modelo de Balanço Hídrico Sequencial Diário \(Balseq\) para Estimativa da Taxa de Recarga na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe – PB](#)

[A-Pub.4 - Qualidade da Água Subterrânea em Estações de Estiagem na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe-PB](#)

[A-Pub.5 - Características do Escoamento de Água Subterrânea na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe](#)

[A-Pub.6 - Distribuição da Qualidade da Água Subterrânea da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe – PB](#)

