

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos
Materiais - PPGEM/UFRGS

**AVALIAÇÃO DO GRAU DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS EM ÁREAS DE INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS DO
PROCESSAMENTO DO CARVÃO**

Raquel Barros Binotto

Geóloga

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

1997

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos
Materiais - PPGEM/UFRGS

**AVALIAÇÃO DO GRAU DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS EM ÁREAS DE INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS DO
PROCESSAMENTO DO CARVÃO**

Raquel Barros Binotto

Geóloga

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Minas, Metalúrgica e dos Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa/Tecnologia Mineral

Porto Alegre

1997

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e aprovada na sua forma final pelo Orientador, Co-Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. André Jablonski
PPGEM/UFRGS

Co-Orientador: Dr^a. Elba Calessio Teixeira
FEPAM

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Adriano Virgilio Damiani Bica

Escola de Engenharia, Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS

Prof. Dr. Nelson Amoretti Lisboa

Instituto de Geociências, Departamento de Geodésia, UFRGS

Prof^a. Dr^a. Ruth Néia Teixeira Lesssa

Universidade Federal de Pelotas - UFPel

Aos meus pais, Ayres e Simone, pelo exemplo de vida, apoio constante, fé inabalável, amor verdadeiro e descompromissado a mim dedicados.

Aos meus irmãos, Marcelo e Daniela, pela paciência, compreensão, carinho e amor dedicados.

Ao Marcelo, pelo apoio incondicional e carinho constante.

AGRADECIMENTOS

A todos, e foram muitos, que de diversas formas me apoiaram constantemente durante o longo desenrolar desta dissertação, o meu sincero reconhecimento.

Ao Prof. Dr. André Jablonski, agradeço pela oportunidade concedida, orientação e sugestões no texto final.

À amiga Elba Calessio Teixeira, o meu profundo agradecimento pelo apoio, estímulo e dedicação incansáveis em todas as esferas (pessoal, institucional, técnico-científica), tendo contribuído decisivamente para o bom andamento e finalização desta dissertação.

À FINEP/PADCT/GTM (Convênio nº65.93.0322.00) e CNPq pelo apoio financeiro, permitindo, efetivamente, a realização desta dissertação.

Às amigas Isabela, Aída, Gracianine e Daniela pelo apoio e amizade inabaláveis, fator determinante na conclusão desta dissertação.

Aos colegas de Mestrado dos diferentes cursos de Pós Graduação, especialmente aos amigos da sala 509 (Firmino, Eduardo, Maria da Graça, Margaret, Fabiana, Luciana, Saulo, Pires, Andrea, Fábio, João César, Silvia), à Miriam, Estela, Pedro Fábio, Christiano, Evandro, pelo apoio e carinho constantes.

Ao Cledion, Sr. João e Lauren pelo valiosos e imprescindível auxílio de campo, regado a boas doses de bom humor e companheirismo.

Ao Arthur pela competente atuação, inesgotável paciência e amizade inestimável.

Às diversas pessoas que auxiliaram, direta ou indiretamente, nas inúmeras etapas desenvolvidas nesta dissertação, especialmente:

- aos “bolsistas da Elba” Juliana, Rosângela, Ana, Andrea, Alex, Sadi, Marta, pela disposição incansável;
- à Janaína, Ivonete, Claudia, sempre prontas para auxiliar nos aspectos burocráticos;
- ao Sr. Generoso (Seu Gegê) pela força nos trabalhos de campo;
- à Josete, ao Claudiomiro, à Iolanda, ao Sr. Vanderlei, da CIENTEC, pelo auxílio prestado;
- ao Ângelo pela digitalização inicial dos mapas, posteriormente editados pelo Arthur;

- à Jane e Maria Lúcia, pelo auxílio prestado na determinação dos metais;
- ao Giovani e ao Ricier pelo auxílio nas etapas iniciais da dissertação;
- aos professores Milton Formoso, Jandira Fachel, Nelson Caicedo, Nelson Lisboa, pelo auxílio nas dúvidas;
- ao Antônio Flávio, Odilon e Ana, da CPRM, pelo apoio técnico;
- ao pessoal da Copelmi, ELETROSUSL, CRM pelos esclarecimentos e auxílio prestado.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------|
| RELAÇÃO DE FIGURAS | x |
| RELAÇÃO DE TABELAS | xiv |
| RELAÇÃO DE ABREVIATURAS | xvi |
| RESUMO | xviii |
| ABSTRACT | xix |
| | |
| 1 INTRODUÇÃO | 01 |
| 1.1 Enquadramento e Justificativa do Tema | 01 |
| 1.2 Apresentação da Área..... | 04 |
| 1.3 Objetivos..... | 06 |
| | |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 08 |
| 2.1 Geologia Regional - Bacia do Paraná | 08 |
| 2.1.1 Grupo Itararé..... | 09 |
| 2.1.1.1 Formação Rio do Sul | 09 |
| 2.1.2. Grupo Guatá..... | 10 |
| 2.1.2.1 Formação Rio Bonito | 10 |
| 2.1.2.2 Formação Palermo..... | 10 |
| 2.1.3 Grupo Passa Dois | 11 |
| 2.1.3.1 Formação Irati | 11 |
| 2.1.3.2 Formação Estrada Nova..... | 11 |
| 2.1.3.3 Formação Rio do Rasto | 11 |
| 2.1.4 Grupo São Bento | 12 |
| 2.1.4.1 Formação Rosário do Sul..... | 12 |
| 2.1.4.2 Formação Botucatu..... | 12 |
| 2.1.4.3 Formação Serra Geral..... | 13 |
| 2.2 Bacias Carboníferas do Estado do Rio Grande do Sul..... | 13 |
| 2.3 Geologia da Área - Bacia Carbonífera de Charqueadas..... | 20 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.4 | Caracterização Hidrogeológica da Região de Charqueadas | 23 |
| 2.5 | Aspectos Ambientais relativos às Atividades Carboníferas | 24 |
| 2.5.1 | O carvão: gênese, constituintes e associações geoquímicas | 24 |
| 2.5.2 | Rejeitos de carvão e cinzas: definição, caracterização e problemas ambientais | 28 |
| 2.5.2.1 | Rejeitos de carvão | 30 |
| 2.5.2.2 | Cinzas de carvão..... | 32 |
| 2.5.3 | Toxicidade dos elementos traços | 37 |
| 2.6 | Águas Subterrâneas..... | 41 |
| 2.6.1 | Forma de ocorrência e propriedades | 41 |
| 2.6.2 | Qualidade das águas subterrâneas | 46 |
| 2.6.3 | Aplicação da geofísica na contaminação das águas subterrâneas..... | 55 |
| 3 | MATERIAS E MÉTODOS | 58 |
| 3.1 | Fontes Poluidoras - Depósitos de Rejeitos de Carvão e Cinzas | 59 |
| 3.1.1 | Caracterização dos depósitos | 59 |
| 3.1.1.1 | Amostragem e preparação | 62 |
| 3.1.1.2 | Análises físicas, químicas e físico-químicas..... | 64 |
| 3.1.2 | Geofísica | 64 |
| 3.1.2.1 | Reconhecimento da área e estaqueamento..... | 66 |
| 3.1.2.2 | Aplicação do método eletromagnético EM-34-3 | 68 |
| 3.1.2.3 | Levantamento Taquiométrico | 68 |
| 3.2 | Instalação dos Piezômetros..... | 68 |
| 3.2.1 | Definição do local de instalação | 69 |
| 3.2.2 | Sondagem..... | 69 |
| 3.2.3 | Instalação do piezômetro | 73 |
| 3.2.4 | Pré-filtro..... | 73 |
| 3.2.5 | Acabamento | 75 |
| 3.3 | Nivelamento Geométrico..... | 75 |
| 3.4 | Testes de Infiltração e Bombeamento | 76 |
| 3.5 | Amostragem de Águas Subterrâneas | 79 |
| 3.5.1 | Procedimento de coleta..... | 79 |
| 3.5.2 | Parâmetros físicos, físico-químicos e químicos: metodologia de análise | 82 |

| | |
|--|-----|
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 85 |
| 4.1 Fontes Poluidoras - Depósitos de Rejeitos de Carvão e Cinzas | 85 |
| 4.1.1 Caracterização dos depósitos | 85 |
| 4.1.1.1 Descrição dos depósitos..... | 85 |
| 4.1.1.2 Análises físico-químicas e caracterização geoquímica dos depósitos.. | 94 |
| 4.1.2 Geofísica | 110 |
| 4.1.2.1 Nível 7,5 m..... | 110 |
| 4.1.2.2 Nível 15 m | 111 |
| 4.1.2.3 Nível 30 m | 112 |
| 4.1.2.4 Considerações finais..... | 112 |
| 4.1.3 Levantamento Taquiométrico | 119 |
| 4.2 Instalação dos Piezômetros..... | 121 |
| 4.3 Nivelamento Geométrico..... | 121 |
| 4.4 Testes de Infiltração e Bombeamento | 134 |
| 4.5 Amostragem de Águas Subterrâneas | 136 |
| 4.5.1 Coleta de águas subterrâneas - parâmetros monitorados..... | 136 |
| 4.5.2 Aplicação de métodos estatísticos..... | 142 |
| | |
| 5 CONCLUSÕES | 163 |
| | |
| 6 RECOMENDAÇÕES | 167 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 169 |
| | |
| ANEXO A: Resultados dos Ensaio de Infiltração | 177 |
| | |
| ANEXO B: Resultados dos Testes de Bombeamento | 181 |

RELAÇÃO DE FIGURAS

| | | |
|----|--|----|
| 01 | Localização da área de estudo - Região do Baixo Jacuí..... | 05 |
| 02 | Coluna Estratigráfica - Bacia do Paraná - RS..... | 09 |
| 03 | Bacia Carbonífera de Candiota (Teixeira <i>et al.</i> , 1995)..... | 14 |
| 04 | Bacia Carbonífera do Vale do Jacuí (Teixeira <i>et al.</i> , 1995) | 15 |
| 05 | Bacia Carbonífera Centro-Leste (Teixeira <i>et al.</i> , 1995) | 16 |
| 06 | Fácies de deposição do carvão na Bacia Carbonífera de Charqueadas - Santa Rita (modificado de Corêa da Silva, 1987)..... | 17 |
| 07 | Problemas ambientais relacionados às atividades carboníferas (modificado de Ward, 1984) | 29 |
| 08 | Divisão da água abaixo da superfície (modificado de Caicedo, 1993) | 42 |
| 09 | Tipos de aquíferos (Ramos <i>et al.</i> , 1989)..... | 44 |
| 10 | Superfícies potenciométricas e drenagens em aquíferos freático e confinado (Ramos <i>et al.</i> , 1989) | 45 |
| 11 | Posição aproximada de alguns ambientes naturais sob condições de Eh x pH (Brownlow, 1979) | 48 |
| 12 | Diagrama de Eh x pH para o Fe (Custódio e Llamas, 1983)..... | 49 |
| 13 | Localização dos depósitos de rejeitos de carvão e cinzas do Município de São Jerônimo (Teixeira <i>et al.</i> , 1996)..... | 60 |
| 14 | Localização dos depósitos de rejeitos de carvão e cinzas do Município de Charqueadas (Teixeira <i>et al.</i> , 1996) | 61 |
| 15 | Mapa de detalhe do depósito CH 20 - Capão da Roça e arredores | 65 |
| 16 | Croqui explicativo do método EM-34-3 (Costa & Ferlin, 1994)..... | 66 |
| 17 | Condutímetro EM-34-3 composto, à esquerda pela bobina receptora e, à direita, pela bobina transmissora e transmissor juntamente com os cabos de referência..... | 67 |
| 18 | Detalhe da aplicação do método eletromagnético EM-34-3..... | 68 |
| 19 | Localização dos piezômetros na Região de Charqueadas - São Jerônimo | 70 |
| 20 | Mapa de detalhe da localização dos piezômetros no depósito CH 20 - Capão da Roça e arredores..... | 71 |
| 21 | Operação de sondagem com trado mecânico..... | 72 |
| 22 | Operação de sondagem utilizando sonda à percussão..... | 73 |
| 23 | Canos de PVC utilizados para a montagem dos piezômetros onde observa-se em (a) os canos ranhurados colocados na porção final do piezômetro e em (b) os canos inteiros..... | 74 |
| 24 | Colocação do piezômetro até a cota final da sondagem, onde observa-se, na porção final do piezômetro, o revestimento com tela de bidim | 74 |
| 25 | Detalhe do piezômetro P4 (localizado na porção sudoeste do depósito CH 20), mostrando o acabamento final com laje de concreto | 75 |

| | | |
|----|---|----|
| 26 | Teste de infiltração realizado através do método de cilindros concêntricos..... | 77 |
| 27 | Teste de bombeamento do piezômetro, onde observa-se em (a) a bomba utilizada e em (b) o medidor eletrônico de nível | 78 |
| 28 | Bomba manual do tipo pistão de PVC com a qual é realizado o esgotamento dos piezômetros | 79 |
| 29 | Garrafa coletora manual de PVC com a qual é realizado o esgotamento e amostragem dos poços..... | 80 |
| 30 | Equipamento portátil de campo utilizado para medição de condutividade, TDS e temperatura | 81 |
| 31 | Equipamento portátil de campo - Photometer SQ 300 - utilizado para leitura do íon ferroso, ferro total, sulfato | 81 |
| 32 | Visão geral do depósito SJ 01, antiga área de descarte de cinzas | 86 |
| 33 | Pátio de estocagem do carvão onde observa-se, ao fundo, a UTSJ | 87 |
| 34 | Detalhe das pilhas de carvão dispostas no depósito SJ 02..... | 87 |
| 35 | Área de descarte de cinzas grossas - depósito SJ 02 | 88 |
| 36 | Detalhe da área de descarte das cinzas grossas - depósito SJ 02, onde observa-se a altura de aproximadamente 4 metros da bancada | 88 |
| 37 | Área de descarte de cinzas finas no depósito SJ 02, observando-se, ao fundo, a UTSJ | 89 |
| 38 | Depósito CH 01 - assoreamento dos baixios, às margens do Rio Jacuí..... | 90 |
| 39 | Detalhe do depósito CH 08, antiga área de deposição de rejeitos, atualmente revegetado..... | 91 |
| 40 | Depósito CH 17, de cinzas de carvão, em frente a Aços Finos Piratini..... | 92 |
| 41 | Detalhe do depósito CH 17 onde observa-se. No perfil escavado, a espessa camada de cinzas - superior a 4 metros, depositada | 93 |
| 42 | Detalhe do depósito CH 02, nas proximidades da ponte do Arroio dos Ratos..... | 93 |
| 43 | Visão geral do depósito CH 20, na localidade de Capão da Roça, com a superfície totalmente exposta..... | 95 |
| 44 | Detalhe das valetas de proteção construídas no depósito CH 20 - encontro das canaletas leste e oeste, onde observa-se a coloração vermelho-alaranjada da água captada | 96 |
| 45 | Detalhe do depósito CH 20, onde observa-se a ausência de cobertura vegetal na área localizada entre o talude de deposição dos rejeitos e a canaleta de proteção | 96 |
| 46 | Valores de pH para as amostras de rejeitos de carvão e cinzas estudadas | 98 |
| 47 | Teores de cinzas, Stot e Ctot para as diferentes amostras estudadas | 98 |
| 48 | Comportamento dos elementos estudados nas amostras CH 20A e CH 20B: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b)lixiviação (%); c) solubilização (%) | 99 |
| 49 | Comportamento dos elementos estudados nas amostras CH 20C e CH 20D: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b)lixiviação (%); c) solubilização (%) | 99 |

| | | |
|----|---|-----|
| 50 | Comportamento dos elementos estudados nas amostras P1A2 e P3A1: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b)lixiviação (%); c) solubilização (%) | 100 |
| 51 | Comportamento dos elementos estudados nas amostras P2A1 e P2A2: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b)lixiviação (%); c) solubilização (%) | 100 |
| 52 | Comportamento dos elementos estudados nas amostras CH 13A e CH 13B: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b)lixiviação (%); c) solubilização (%) | 100 |
| 53 | Comportamento dos elementos estudados nas amostras P15 e P16: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b)lixiviação (%); c) solubilização (%) | 100 |
| 54 | Comportamento dos elementos estudados nas amostras SJ01A e P7A1: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b)lixiviação (%); c) solubilização (%) | 101 |
| 55 | Comportamento dos elementos estudados nas amostrasSJ01B e SJ01C: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b)lixiviação (%); c) solubilização (%) | 101 |
| 56 | Comparação entre as concentrações do elemento Cd (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004..... | 106 |
| 57 | Comparação entre as concentrações do elemento Pb (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004..... | 106 |
| 58 | Comparação entre as concentrações do elemento Cu (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004..... | 107 |
| 59 | Comparação entre as concentrações do elemento Cr (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004..... | 107 |
| 60 | Comparação entre as concentrações do elemento Mn (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004..... | 108 |
| 61 | Comparação entre as concentrações do elemento Fe (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004..... | 108 |
| 62 | Comparação entre as concentrações do elemento Zn (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004..... | 109 |
| 63 | Variação da condutividade elétrica em profundidade: a) malha de pontos e contorno do depósito CH 20; b) representação em 3D - nível 7,5 m; c) representação em 3D - nível 15 m; d) representação em 3D - nível 30 m | 117 |
| 64 | Anomalias detectadas nos níveis (a) 7,5 m; (b) 15 m e (c) 30 m..... | 118 |
| 65 | Representação das variações topográficas observadas no depósito CH 20..... | 119 |
| 66 | Correlação topografia x condutividade elétrica para o nível 7,5 m | 120 |
| 67 | Correlação topografia x condutividade elétrica para o nível 15 m | 120 |
| 68 | Correlação topografia x condutividade elétrica para o nível 30 m | 120 |
| 69 | Perfis litológicos para os piezômetros (a) P1, (b) P2, (c) P3, (d) P4, (e) P5, (f) P6, (g) P7, (h) P8, (i) P9, (j) P10, (k) P11, (l) P12, (m) P13, (n) P14, (o) P15, (p) P16, (q) P17, (r) P18, (s) P19 e (t) P20..... | 122 |
| 70 | Mapas potenciométricos - representação esquemática para os meses monitorados: (a) abril, (b) maio, (c) junho, (d) julho, (e) agosto, (f) setembro, (g) outubro | 132 |
| 71 | Mapa potenciométrico de detalhe para o depósito CH 20..... | 133 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 72 | Variações do nível de água durante o período monitorado | 143 |
| 73 | Precipitação média anual para a região | 143 |
| 74 | Valores de pH..... | 151 |
| 75 | Valores de Eh (mV)..... | 151 |
| 76 | Valores de condutividade (μS)..... | 151 |
| 77 | Valores de TDS (mg/L) | 151 |
| 78 | Concentrações de OD (mg/L O_2) | 151 |
| 79 | Concentrações de Sulfato (mg/L SO_4^-)..... | 151 |
| 80 | Concentrações de Fe^{++} (mg/L Fe^{++}) | 151 |
| 81 | Concentrações de Fe_{tot} (mg/L Fe_{tot})..... | 151 |
| 82 | Valores de Resíduo Seco (mg/L) | 152 |
| 83 | Valores de Alcalinidade Total (mg/L CaCO_3)..... | 152 |
| 84 | Concentrações de Sulfeto (mg/L HS^-) | 152 |
| 85 | Concentrações de Alumínio ($\mu\text{g/L}$)..... | 152 |
| 86 | Concentrações de Cálcio (mg/L)..... | 152 |
| 87 | Concentrações de Magnésio (mg/L)..... | 152 |
| 88 | Concentrações de Potássio (mg/L) | 152 |
| 89 | Concentrações de Sódio (mg/L)..... | 152 |
| 90 | Concentrações de Manganês ($\mu\text{g/L}$)..... | 153 |
| 91 | Concentrações de Ferro ($\mu\text{g/L}$) | 153 |
| 92 | Concentrações de Cobre ($\mu\text{g/L}$) | 153 |
| 93 | Concentrações de Chumbo ($\mu\text{g/L}$) | 153 |
| 94 | Concentrações de Cromo ($\mu\text{g/L}$)..... | 153 |
| 95 | Concentrações de Zinco ($\mu\text{g/L}$)..... | 153 |
| 96 | Concentrações de Níquel ($\mu\text{g/L}$) | 153 |
| 97 | Concentrações de Cobalto ($\mu\text{g/L}$) | 153 |
| 98 | Concentrações de Cádmio ($\mu\text{g/L}$) | 154 |
| 99 | Concentrações de Molibdênio ($\mu\text{g/L}$)..... | 154 |
| 100 | Gráfico de cargas fatoriais apresentando a distribuição das variáveis nos fatores . | 158 |
| 101 | I.G.A.S. para os poços P2, P4, P1, P8, P5, P7 e P6, durante o período monitorado | 160 |
| 102 | I.G.A.S. para os poços P10, P19, P11, P9, P12, P13 e P6, durante o período monitorado | 161 |
| 103 | I.G.A.S. para os poços P17, P20, P16, P15, P18, P14 e P6, durante o período monitorado | 162 |

RELAÇÃO DE TABELAS

| | | |
|----|--|-----|
| 01 | Principais macerais do carvão (Tucker, 1991)..... | 25 |
| 02 | Principais minerais identificados nos carvões (Torrey, 1978)..... | 25 |
| 03 | Classificação dos elementos traços em cinzas de carvão pulverizadas em relação a sua propriedade de volatilização durante a combustão (Smith, 1987) | 33 |
| 04 | Parâmetros utilizados por Rohde (1995) para classificação toxicológica das cinzas | 37 |
| 05 | Valores de condutividades hidráulicas (K) para vários materiais geológicos (Freeze & Cherry, 1979) | 46 |
| 06 | Características químicas dos principais íons e substâncias dissolvidas nas águas subterrâneas (Custódio & Llamas, 1983) | 48 |
| 07 | Normas de potabilidade para águas (CETESB, 1990) | 50 |
| 08 | Valores médios de diversos parâmetros monitorados nos poços locados anteriormente à fase de recuperação da área em estudo (Schubert, 1979) | 53 |
| 09 | Valores médios de diversos parâmetros monitorados nos poços locados posteriormente à fase de recuperação da área em estudo (Schubert, 1979) | 53 |
| 10 | Amostras coletadas de rejeitos de carvão e cinzas..... | 62 |
| 11 | Amostras coletadas de rejeitos de carvão e cinzas - fase de instalação dos piezômetros | 62 |
| 12 | Posição, espaçamento das bobinas e profundidade alcançada..... | 67 |
| 13 | Localização e coordenadas geográficas dos piezômetros..... | 72 |
| 14 | Ensaio de infiltração: locais das determinações..... | 76 |
| 15 | Metodologia de análise dos parâmetros físico-químicos e químicos..... | 83 |
| 16 | Características dos depósitos mapeados em Charqueadas e São Jerônimo..... | 85 |
| 17 | Resultados das determinações dos teores de cinzas, Stot, Ctot e pH inicial | 97 |
| 18 | Concentrações dos elementos metálicos obtidos na extração total ($\mu\text{g/g}$) | 101 |
| 19 | Percentuais dos elementos estudados - lixiviação (%)..... | 102 |
| 20 | Percentuais dos elementos estudados - solubilização (%)..... | 103 |
| 21 | Ordem decrescente de mobilidade dos metais (lixiviação e solubilização) em comparação às concentrações totais dos metais (extração total)..... | 103 |
| 22 | Concentrações dos elementos estudados - lixiviação ($\mu\text{g/l}$) | 105 |
| 23 | Concentrações dos elementos estudados - solubilização ($\mu\text{g/L}$)..... | 105 |
| 24 | Valores de condutividade elétrica para todos os níveis (7,5; 15 e 30 metros) medidos em subsuperfície nas estações geofísicas a partir da aplicação do método EM-34-3 na área em estudo..... | 114 |
| 25 | Níveis potenciométricos | 131 |
| 26 | Taxa de infiltração básica (mm/h)..... | 134 |
| 27 | Resultados do teste de bombeamento..... | 135 |

| | | |
|----|---|-----|
| 28 | Descrição sucinta dos pontos de amostragem..... | 136 |
| 29 | Relação das concentrações dos elementos estudados com o branco da região (P6) nos diferentes poços amostrados | 139 |
| 30 | Comparação entre os elementos determinados nas águas subterrâneas com os valores admissíveis de potabilidade das águas especificados pelas OMS..... | 140 |
| 31 | Coleta de águas subterrâneas - nível de água em cada poço monitorado..... | 143 |
| 32 | Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de abril | 144 |
| 33 | Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de maio | 144 |
| 34 | Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de junho | 145 |
| 35 | Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de julho | 145 |
| 36 | Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de agosto | 146 |
| 37 | Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de setembro | 146 |
| 38 | Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de outubro | 147 |
| 39 | Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de abril | 147 |
| 40 | Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de maio..... | 148 |
| 41 | Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de junho | 148 |
| 42 | Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de julho | 149 |
| 43 | Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de agosto | 149 |
| 44 | Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de setembro | 150 |
| 45 | Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de outubro | 150 |
| 46 | Resultados obtidos a partir da análise descritiva realizada nos 19 poços monitorados de abril à outubro de 1996..... | 154 |
| 47 | Matriz de correlação para as variáveis estudadas relativas à qualidade da água subterrâneas nos 19 poços monitorados | 155 |
| 48 | Raízes características..... | 156 |
| 49 | Cargas Fatoriais dos Fatores Principais..... | 157 |

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AFP - Aços Finos Piratini

ASTM - American Society for Testing and Materials

b - espessura da camada

CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica

CH - Charqueadas

CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia

CRM - Companhia Riograndense de Mineração

Ctot - carbono total

DAM - Drenagem Ácida de Mina

DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral

Eh - potencial de oxidação-redução

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental

Fm. - Formação

I.G.A.S. - Índice Geral de Águas Subterrâneas

IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas

k - condutividade hidráulica

NBR - Norma Brasileira

OD - oxigênio dissolvido

OMS - Organização Mundial da Saúde

P - piezômetro / poço

pH - potencial de hidrogênio

ROM - run of mine

RS - Rio Grande do Sul

SJ - São Jerônimo

Stot - enxofre total

T - transmissividade

TDS - sólidos totais dissolvidos

TERMOCHAR - Usina Termoelétrica de Charqueadas

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UTSJ - Usina Termoelétrica de São Jerônimo

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo principal avaliar o grau de contaminação das águas subterrâneas em áreas de disposição inadequada de resíduos do processamento de carvão, bem como identificar e caracterizar, de forma genérica, as fontes poluidoras - depósitos de rejeitos de carvão e cinzas. Para tanto, foi aplicada, na região de Charqueadas/São Jerônimo, uma metodologia para detecção do grau de contaminação das águas subterrâneas do aquífero freático que consistiu, resumidamente, na realização das seguintes etapas: (a) caracterização das fontes poluidoras (rejeitos de carvão e cinzas); (b) aplicação do método geofísico EM-34-3; (c) instalação de piezômetros e monitoramento das águas subterrâneas; (d) tratamento dos dados; (e) análise final, incluindo comparação com o branco da região e legislação vigente. Os resultados obtidos permitiram concluir que as águas subterrâneas (aquífero freático) da região estudada estão sofrendo influência, em diferentes graus, dos resíduos caracterizados, dependendo, basicamente, do tipo e características dos resíduos, do perfil litológico do local e da distância das fontes poluidoras. Foi confirmado o maior potencial poluidor dos rejeitos de carvão em relação às cinzas, devido, principalmente, ao pH ácido, aos altos percentuais de Stot e aos maiores percentuais de lixiviação e solubilização para os elementos determinados nas amostras de rejeitos de carvão. O método geofísico aplicado configurou-se como uma técnica complementar e orientativa, tendo sido extremamente útil na definição da profundidade preferencial para instalação dos piezômetros, até o nível de 7,5 m. Com base nos resultados obtidos a partir da caracterização físico-química das águas subterrâneas monitoradas, constatou-se que, quando comparados ao branco da região e à legislação vigente, os poços sob influência de rejeitos de carvão apresentaram as concentrações mais elevadas dos metais estudados, especialmente de Fe e Mn, bem como os valores mais elevados de sulfato, condutividade, sólidos totais dissolvidos e resíduo seco. Ainda, dentre os parâmetros determinados, os que melhor detectaram a contaminação das águas subterrâneas, com decréscimo na qualidade, foram: condutividade, sólidos totais dissolvidos, resíduo seco, sulfato, ferro, cádmio, níquel, cromo, alumínio e cálcio.

ABSTRACT

This thesis aims at evaluating the groundwater contamination degree in several inadequate coal processing waste disposal sites, as well as identify and characterize, in a generic way, the pollution sources - coal wastes and ashes disposal sites. It was applied, in Charqueadas/São Jerônimo region, a methodology for detection of phreatic groundwater contamination degree in coal processing waste disposal sites. In a summarized way, the study was conducted in the following steps: (a) characterization of potential polluting sources (coal wastes and ashes); (b) application of geophysical technique EM-34-3; (c) monitoring wells installation and sampling of groundwater; (d) data treatment; (e) final analysis, including a comparison with regional background values and present legislation. The results obtained had showed that phreatic groundwater of studied area has been affected, in different levels, by the coal refuses studied, depending on kind of refuse, lithological characteristics of the area and distance from polluting sources. It was confirmed the greatest polluting potential of coal wastes in relation to ashes, which is due to acidic pH, great Stot content and higher metals leaching and solubilization percentual determined in coal waste samples. The geophysical technique was very useful as an additional and orientative technique for defintion of monitoring wells preferential depht, which was, in the studied case, until 7,5 meters. The groundwaters physical-chemical characterization showed that the wells affected by coal wastes had the highest metals content, mainly to Fe and Mn, as well as the greatest values of sulfate, conductivity, total dissolved solids and dry residue in comparison with background values and legislation. In addition, it was seen that the best parameters to detec the groundwater contamination were conductivity, total dissolved solids, dry residue, sulfate, Fe, Cd, Ni, Cr, Al and Ca.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Justificativa do Tema

Os últimos anos tem sido marcados pela conscientização do homem em relação aos problemas ambientais, bem como pela crescente preocupação com a crise energética deflagrada pela explosão demográfica e uso irracional dos recursos naturais.

Nesse contexto, o estado do Rio grande do Sul, conhecido pelas ocorrências e atividades carboníferas, essencialmente ligadas à geração de energia elétrica, apresenta sérios problemas ambientais advindos da produção e disposição inadequada dos resíduos do processamento do carvão.

Dentre estes problemas, aqueles relacionados à contaminação das águas subterrâneas em áreas sob influência destes resíduos tornam-se extremamente importantes devido à possibilidade de utilização dos aquíferos como fontes de suprimento de água potável, frente à crescente degradação dos recursos hídricos superficiais.

Na região do Baixo Jacuí, principalmente nos municípios de Charqueadas e São Jerônimo, tem sido reportada uma série de áreas de deposição inadequada de resíduos do processamento do carvão consideradas potencialmente poluidoras, cujas águas superficiais apresentaram altos teores de sólidos suspensos, pH ácido e metais dissolvidos provenientes dos efluentes de drenagem de mina e do beneficiamento de carvão (Teixeira *et al.*, 1995).

Além disso, muitos dos sítios de disposição inadequada de rejeitos de carvão e cinzas estão dispostos dentro do perímetro urbano dos municípios, cujos efeitos interagem diretamente com a população assentada nas proximidades destes depósitos.

Ressalta-se ainda que a região de Charqueadas/São Jerônimo está situada na porção terminal da bacia hidrográfica do Rio Jacuí, constituindo-se em uma região topograficamente plana e baixa, com nível de água raso (próximo à superfície), propícia ao desenvolvimento de banhados, nos quais muitos depósitos foram assentados inadequadamente, configurando uma situação bastante delicada em termos de contaminação para os cursos d'água superficiais e, principalmente, para o aquífero freático da região.

A disposição de rejeitos sólidos (carvão e cinzas) deveria ser realizada em condições tais que não promovessem reflexos negativos ao ambiente. Para tanto, seria necessária a observação de uma série de critérios tais como a seleção do local adequado para disposição dos resíduos, examinando-se as condições topográficas, hidrológicas e geológicas da área e a preparação prévia do local com a implementação de medidas preventivas contra a erosão, escoamento superficial e infiltração dos contaminantes.

Na prática, entretanto, as áreas para disposição dos resíduos advindos do processamento do carvão são aleatoriamente definidas, observando-se diversas situações inadequadas, entre as quais destacam-se:

- ausência de recobrimento planejado (cobertura vegetal ou camada de solo) na maior parte das áreas de disposição de rejeitos de carvão e de cinzas;
- crescimento desordenado e com falhas de vegetação natural em alguns locais dos depósitos estudados, principalmente nas áreas contendo cinzas;
- desaparecimento da vegetação original nas áreas e imediações dos depósitos de rejeitos de carvão;
- desenvolvimento de atividade antrópica de baixa renda nos depósitos estudados;
- disposição de resíduos sólidos urbanos pela população em geral e prefeituras nas áreas contendo rejeitos de carvão e cinzas;
- ausência de obras de engenharia (valetas de contenção, camada impermeabilizante na base dos depósitos, sistemas de drenagem das pilhas,...) em praticamente todos os depósitos;
- ocupação desordenada de extensas áreas, a maior parte inadequadas (áreas de banhado, por exemplo), para disposição dos resíduos do processamento do carvão, sobre as quais não é observado nenhum controle dos órgãos e instituições responsáveis (FEPAM, prefeituras, associação de moradores,...);
- inexistência de critérios para locação das áreas;
- freqüente atuação de processos de erosão nas superfícies expostas dos depósitos, com o desenvolvimento de sulcos, ravinas e voçorocas.

A maior parte das áreas de deposição de resíduos do processamento do carvão estudadas são pertencentes a companhias de mineração e termoelétricas, as quais, na época de descarte destes resíduos não sofriam qualquer tipo de fiscalização e exigência ambiental pelos órgãos competentes. Neste contexto, a escolha do local para disposição final destes resíduos

era baseada, única e exclusivamente, em uma decisão econômica, sem levar em consideração as interações destes depósitos com o ambiente, incluindo-se neste o homem.

Nos municípios de Charqueadas e São Jerônimo, as atividades ligadas ao processamento do carvão tiveram início efetivo no final do século XIX, a partir da exploração do carvão na mina de Arroio dos Ratos, o qual era armazenado e distribuído em Charqueadas, às margens do Rio Jacuí. Em 1956, iniciou-se a exploração de carvão, em mina subterrânea, no município de Charqueadas, bem como iniciou-se a construção da Usina Termoelétrica de Charqueadas - TERMOCHAR, a qual entrou em operação comercial em 1962. A Usina Termoelétrica de São Jerônimo -UTSJ entrou em operação com sua potência total em 1955, operando, a partir desta data, de forma contínua. A siderúrgica Aços Finos Piratini - AFP entrou em operação em 1973, permanecendo, da mesma forma que a TERMOCHAR e a UTSJ, ativa até hoje. A UTSJ gera, aproximadamente, 65.000 t/ano de cinzas e a TERMOCHAR 80.000 t/ano (Rohde, 1995).

Atualmente, a produção de carvão no Rio Grande do Sul é de 3.000.000 tons/ano, representando cerca de 60% da produção nacional, sendo utilizado nas indústrias cimenteira, petroquímica e de celulose; na geração de energia elétrica e, até dois anos atrás, na redução direta de minério de ferro.

É esperada uma maior produção de carvão nos próximos anos, visto que a produção hidro-energética tende a decair, possibilitando, principalmente no RS, uma exploração mais efetiva deste recurso mineral. Uma maior produção implica em um incremento significativo na lavra, no beneficiamento e na utilização de tal recurso.

As atividades carboníferas, como todo procedimento industrial, se não forem convenientemente planejadas com a adoção adequada de processos de controle ambiental podem gerar uma série de danos ao meio, às vezes, de caráter irreversível.

Alguns dos principais problemas associados com a mineração a céu aberto e subterrânea incluem erosão, geração de drenagem ácida de mina (DAM), aumento da carga de sólidos suspensos e descarga de efluentes diretamente nos corpos d'água adjacentes, formação de pilhas de rejeitos dispostas inadequadamente, destruição e degradação de florestas e terras aráveis.

Conforme já citado, a disposição inadequada de rejeitos de carvão e cinzas, em especial, tem se mostrado um dos problemas ambientais mais importantes em determinadas regiões do Estado do Rio Grande do Sul, podendo promover alterações significativas ao meio ambiente através da combustão espontânea das pilhas de rejeitos, da acidificação das águas

superficiais e subterrâneas, do assoreamento de rios e reservatórios, da alteração da geomorfologia e da degradação de extensas áreas rurais e urbanas com conseqüente desvalorização de propriedade.

Principalmente nos últimos anos, a partir da implementação mais efetiva da legislação ambiental, a qual prevê a recuperação completa das áreas degradadas por atividades de mineração, as empresas de mineração, em especial, passaram a ter interesse direto em estudos visando caracterizar estas áreas degradadas e avaliar os efeitos negativos das mesmas sobre o ambiente de um modo geral, concentrando esforços na parte referente à recuperação das áreas.

A partir do desenvolvimento destes projetos de recuperação das áreas degradadas, a população diretamente afetada por atividades potencialmente poluidoras poderá ser reintegrada ao seu ambiente natural, melhorando significativamente sua qualidade de vida.

Diante do quadro acima apresentando e visando contribuir para a adequação das atividades carboníferas aos padrões de segurança ambiental necessários e mundialmente aceitos, este trabalho enfoca os problemas ambientais nas águas subterrâneas (aqüífero freático) dos municípios de Charqueadas e São Jerônimo relacionados à inadequada disposição dos resíduos de processamento do carvão.

A pouca disponibilidade de dados referentes à qualidade das águas subterrâneas em regiões carboníferas, aliada à necessidade de desenvolvimento de critérios técnicos e legais que disciplinem a disposição de rejeitos do beneficiamento e de resíduos da combustão do carvão, bem como a crescente importância das águas subterrâneas no abastecimento público e privado, conduzem a um grande interesse no estudo dos aqüíferos em áreas sob influência destes depósitos.

1.2 Apresentação da Área

A área em estudo compreende os municípios de Charqueadas e São Jerônimo localizados na Região do Baixo Jacuí, a 60-70 km de Porto Alegre, cuja via de acesso principal são as rodovias federal - BR 290 e estadual - RS 401, conforme pode ser visualizado na Figura 01.

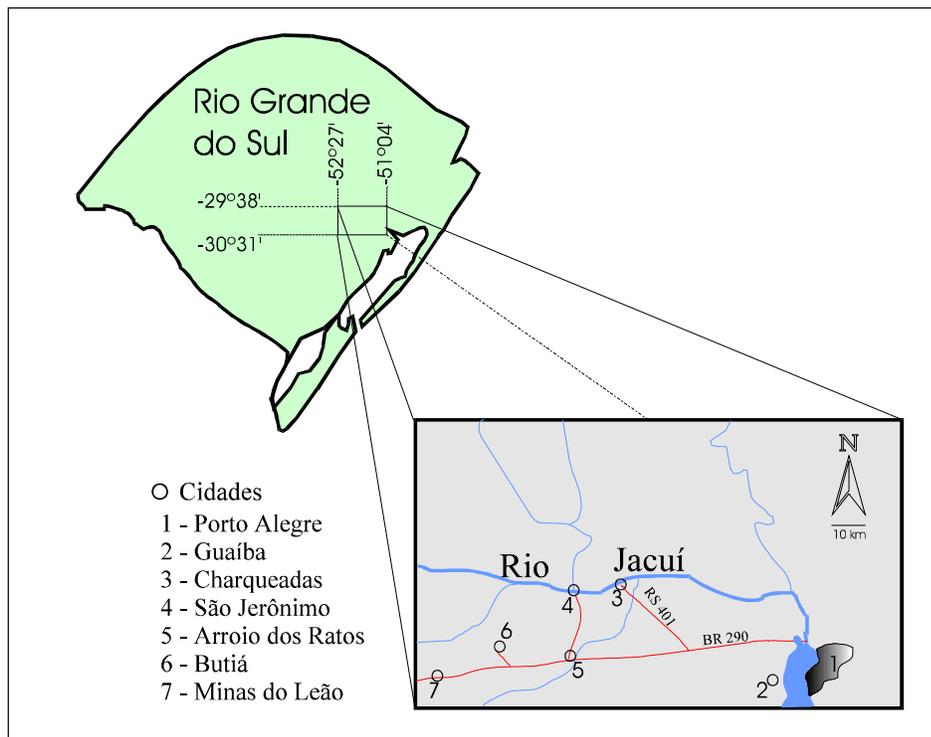


Figura 01: Localização da área de estudo - Região do Baixo Jacuí.

Geomorfologicamente, os municípios de Charqueadas e São Jerônimo inserem-se no Domínio Morfoestrutural das Bacias e Coberturas Sedimentares - Região Geomorfológica Depressão Central Gaúcha e, mais especificamente, na Unidade Geomorfológica Depressão Rio Jacuí. Tal unidade de mapeamento caracteriza-se por apresentar um relevo sem grandes variações altimétricas, dando à paisagem um caráter monótono onde observam-se vastas superfícies planas, rampeadas, recobertas por colúvios, com dissecação incipiente (IBGE, 1986).

O clima da região caracteriza-se por ser quente, com temperatura média anual de 19,4°C. As normais pluviométricas anuais são superiores a 1800 mm. Em relação às outras regiões do Estado, a área em estudo faz parte do regime de chuvas de inverno (28%). A velocidade média geral dos ventos varia entre 1,5 e 2,0 m/s, predominando acentuadamente os do quadrante leste. Segundo IBGE (1986), esta região é classificada como pertencente ao tipo climático úmido a subúmido, médio quente. Pela classificação proposta por Köppen, esta

região fisiográfica insere-se totalmente no tipo climático Cfa ou subtropical úmido (Ferraro & Hasenack, 1995).

A vegetação arbórea nativa é constituída pela mata ciliar junto ao rio Jacuí e afluentes. São pouco freqüentes os capões nativos (comunidades isoladas) espalhados pelas formações campestres, as quais são constituídas por gramíneas, conformando o tipo de vegetação denominado de Campestre ou Campos Nativos. Na região é freqüente a ocupação de tais áreas, geralmente aquelas melhor drenadas e elevadas do micro-relevo, com florestamentos (eucaliptos e acácias) e, eventualmente, pastagens cultivadas (COPELMI, 1994).

Em relação aos solos desta região, identificam-se duas unidades principais de mapeamento (COPELMI, 1994): (i) Planossolo Eutrófico - solos mal drenados, coloração acinzentada, derivados de sedimentos aluvionares quaternários, fortemente ácidos com teores baixos de fósforo disponível e matéria orgânica; (ii) Podzólico Vermelho-Escuro Latossólico Álico - solos muito profundos, bem drenados, coloração vermelha escura, fertilidade natural baixa, ácidos, saturação de bases baixa e teores de alumínio trocável e saturação em alumínio elevados.

O primeiro tipo de solo é basicamente utilizado para o cultivo de extensas lavouras de arroz irrigado e para exploração da pastagem nativa pela pecuária de corte. O segundo, que ocupa micro-relevos ou relevos suavemente ondulados, é caracterizado pela exploração de pastagem nativa e plantio de núcleos florestados com eucalipto e acácia-negra.

Além das atividades agropastoris desenvolvidas na Região do Baixo Jacuí, destaca-se como principal atividade econômica o processamento do carvão, desde a etapa de lavra até a sua utilização, conforme já comentado no item anterior.

1.3 Objetivos

Este trabalho visa, em seu desenvolvimento, identificar e caracterizar, de forma geral, as fontes poluidoras - depósitos de rejeitos de carvão e cinzas, com base em descrições de campo e em análises físico-químicas (ensaios de solubilização, lixiviação e extração), a fim de determinar seus riscos potenciais ao ambiente.

Objetiva ainda, avaliar o grau de contaminação das água subterrâneas da região de Charqueadas/São Jerônimo face ao impacto gerado pela disposição inadequada de resíduos do processamento do carvão, a partir da comparação dos resultados obtidos, da geologia local e

da associação com os depósitos de rejeito de carvão e cinzas estudados com a legislação vigente e *background* da área.

Pretende-se também fornecer subsídios metodológicos e capacitação técnica para a realização de futuros estudos ambientais relacionados à contaminação de águas subterrâneas, a partir da otimização de uma metodologia para avaliação da contaminação das águas subterrâneas em áreas de deposição inadequada de resíduos do processamento do carvão. Nesse sentido, será testada a eficiência das técnicas geofísicas (especificamente do método eletromagnético EM-34-3), hidrogeológicas e hidrogeoquímicas na avaliação da contaminação das águas subterrâneas em áreas de deposição inadequada de resíduos do processamento do carvão, comparando-se os resultados obtidos pelas duas técnicas empregadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geologia Regional - Bacia do Paraná

No Brasil, as mais importantes ocorrências de carvão situam-se na Bacia do Paraná, uma extensa depressão deposicional situada na parte centro-leste do continente sul-americano que estende-se por cerca de 1600000 km². Destes, 1000000 km² localizam-se no território brasileiro (estados de Goiás, Mato Grosso, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul), 400000 km² na Argentina, 100000km² no Paraguai e 100000 km² no Uruguai (Schneider *et al.*, 1974). Possui um formato alongado na direção NNE-SSW (1750 km de comprimento), com uma largura média de 900 km. Dois terços da porção brasileira são cobertos por derrames de lava basáltica, que podem atingir até 1700 m de espessura. A espessura máxima de rochas sedimentares e vulcânicas situa-se em torno de 8.000 m (Zalán *et al.*, 1990).

Segundo Zalán *et al.* (1990), as rochas sedimentares da Bacia do Paraná foram depositadas sobre uma vasta área de escudo do então recém construído continente do Gondwana. Tal supercontinente era, então, composto de vários núcleos cratônicos (terrenos granulíticos e de terrenos do tipo granito-greenstone), rodeados por cinturões móveis (rochas metassedimentares dobradas e empurradas; granitóides e regiões cratônicas) e dispersamente cobertos por remanescentes de *foreland basins*, de natureza molássica, todos formados durante o ciclo Brasileiro. Assim, o embasamento aflorante que bordejia a Bacia do Paraná é constituído por: (i) margem leste/sudeste - dois cinturões móveis brasileiros principais, com direção NE (*cinturões Dom Feliciano e Ribeira*) separados por um núcleo cratônico (*Rio de La Plata/Luiz Alves*); (ii) margem norte/nordeste - um cinturão móvel principal, com direção NW (*faixa Uruaçu*) e dois maciços de rochas cristalinas (*maciços de Guaxupé e de Goiás*), que representam o embasamento aflorante das rochas metassedimentares proterozóicas, ocorrentes nos cinturões de dobramento; (iii) margem oeste/noroeste - um cinturão móvel principal (*faixa de dobramentos Paraguai-Araguaia*).

Em relação à estratigrafia da Bacia do Paraná, a mesma tem sido bastante discutida por uma série de autores dentre os quais destacam-se os trabalhos de White (1908), Sanford & Lange (1960), Northfleet *et al.* (1969), Scheneider *et al.* (1974), Fúlfaro *et al.*(1980), Zalán *et al.*(1986) e CPRM (1986). A seguir, será apresentada, resumidamente, a estratigrafia da Bacia

do Paraná (Figura 02) no Rio Grande do Sul com base nos trabalhos de Schneider *et al.* (1974) e CPRM (1986).

| | | |
|----------------------------|------------------|---------------------------------------|
| Juro-Cretáceo | Grupo São Bento | Fm. Serra Geral |
| | | Fm. Botucatu |
| Triássico | | Fm. Rosário do Sul Mb. Santa Maria |
| Permiano | Grupo Passa Dois | Fm. Rio do Rasto |
| | | Fm. Estrada Nova |
| | | Fm. Irati |
| | Grupo Guatá | Fm. Palermo |
| | | Fm. Rio Bonito |
| | Grupo Itararé | Fm. Rio do Sul |
| Embasamento pré-gonduânico | | |

Figura 02: Coluna Estratigráfica - Bacia do Paraná no RS (modificado de CPRM, 1986).

2.1.1 Grupo Itararé

2.1.1.1 Formação Rio do Sul

Segundo Schneider *et al.* (1974), esta Fm. é caracterizada pelos sedimentos essencialmente argilosos que ocorrem na parte superior do Grupo Itararé. A parte basal constitui-se de folhelhos e argilitos cinza escuros, localmente com aspecto várvido e a porção superior de argilitos, folhelhos várvidos, ritmitos, arenitos finos e diamictitos. A Fm. Rio do Sul assenta diretamente sobre o embasamento e o contato superior com a Fm. Rio Bonito é

concordante. Esses depósitos são relacionados a ambiente essencialmente marinho com influência de ambiente glacial.

2.1.2 Grupo Guatá

2.1.2.1 Formação Rio Bonito

Apresenta, no RS, três conjuntos litológicos distintos, que ocorrem tanto em associação vertical quanto interdigitados lateralmente ou mesmo isolados, fazendo com que em cada região do Estado, a composição litológica da Fm. apresente características particulares.

O primeiro conjunto litológico é formado predominantemente por arenitos médios e grossos, cinza-claros, arcoseanos, localmente conglomeráticos com grânulos e seixos de rochas sedimentares, ígneas e metamórficas. Secundariamente, ocorrem arenitos muito finos, finos e médios. Siltitos cinza e cinza esverdeados ou cinza escuros e carbonosos com leitos e camadas de carvão são de ocorrência subordinada, bem como conglomerados com matriz arenosa e seixos de diversas litologias. Ocorre normalmente na porção basal da Fm. Rio Bonito em contato discordante com o embasamento Pré-Gonduânico e abrupto erosivo, raramente gradacional, com rochas do Grupo Itararé.

O segundo conjunto é predominantemente pelítico, sendo constituído por siltitos cinza a cinza-claros; cinza-escuros a pretos, carbonosos, por vezes argilosos, maciços, mais raramente com interlaminações de arenitos e intercalações de leitos e camadas de carvão. É neste conjunto que desenvolvem-se as principais camadas de carvão do RS. Suas relações de contato com o conjunto anterior são de concordância, localmente interdigitado e discordante sobre o embasamento Pré-Gonduânico quando ausente o conjunto arenoso basal.

O terceiro conjunto litológico é constituído essencialmente por arenitos quartzosos a ortoquartzíticos, finos a médios, cinza-claros, cinza-esverdeados, localmente grossos com grânulos e seixos dispersos. Subordinadamente, ocorrem leitos e camadas de siltitos cinza a cinza-escuros e carbonosos, leitos e camadas de carvão. O contato com os outros dois conjuntos é concordante, localmente de natureza interdigitada e discordante sobre o embasamento Pré-Gonduânico.

Em relação ao ambiente deposicional, observa-se que os depósitos continentais (flúvio-deltáicos) são os que predominam na Fm. Rio Bonito no RS, com influências locais de episódios rápidos transgressivos (Schneider *et al.*, 1974).

2.1.2.2 Formação Palermo

O intervalo basal desta Fm. é constituído predominantemente por uma interlaminação de silte e areia fina a muito fina, com laminação ondulada, *wavy*, *linsen*, localmente *flaser*, formando um conjunto com intercalações de leitos e lentes de arenito fino a médio, ortoquartzítico, com marcas de onda. Esta Fm. está em contato com a Fm. Rio Bonito. A deposição da Fm. Palermo, composta por siltitos e siltitos arenosos de cor cinza depositados em um ambiente marinho de plataforma rasa, ultrapassou a sedimentação continental do Rio Bonito, recobrando, transgressivamente, toda a bacia e depositando-se em discordância sobre o embasamento Pré-Gonduânico.

2.1.3 Grupo Passa Dois

2.1.3.1 Formação Irati

Representa uma seqüência sedimentar pelítica, predominantemente de coloração cinza-escura a preta, associada a níveis carbonáticos concentrados na metade superior. O contato desta Fm. com a Fm. Palermo é concordante. Os sedimentos que compõe esta unidade foram depositados em ambiente marinho raso, abaixo do nível normal de ação das ondas, onde restrições da bacia propiciaram condições de deposição de margas, calcários e folhelhos pirobetuminosos.

2.1.3.2 Formação Estrada Nova

Composta, na porção superior, por folhelhos e siltitos cinza a cinza-escuros com laminação plano-paralela esparsa. Aparecem raros leitos de calcários impuros, siltitos carbonáticos e arenitos muito finos. Na porção inferior ocorrem siltitos cinza-escuros com intercalações de folhelhos, raros leitos de calcário e arenitos muito finos. Os contatos no topo e na base são transicionais com as Fms. Rio do Rasto e Irati, respectivamente. Seu ambiente deposicional é marinho de águas calmas, abaixo do nível de ação das ondas.

2.1.3.3 Formação Rio do Rasto

É constituída por uma seqüência de rochas sedimentares essencialmente clásticas. A sua porção basal é predominantemente pelítica com intercalações de leitos, lentes e camadas de arenitos finos; a porção superior é predominantemente arenosa com intercalações de leitos e camadas de pelitos. As rochas de ambas as porções apresentam cores avermelhadas dominantes. O contato com a Fm. Estrada Nova é transicional. Sua deposição inicia-se em um ambiente marinho raso que transiciona para depósitos de planície costeira e finalmente para depósitos flúvio-deltáicos, caracterizando, desde os pelitos, da Fm. Estrada Nova, um processo de regressão, com o assoreamento paulatino da bacia.

2.1.4 Grupo São Bento

2.1.4.1 Formação Rosário do Sul

Sua porção basal é constituída predominantemente por arenitos finos a muito finos, de cores avermelhadas, quartzosos, com proporções variadas de feldspatos. A porção mediana da Fm. Rosário do Sul apresenta arenitos médios a grossos, de cores lilás, cinza-amareladas e cinza-rosadas. O topo é constituído por siltitos vermelhos, maciços, homogêneos e fossilíferos; localmente são encontradas pequenas lentes de arenitos. A porção superior é composta predominantemente por arenitos vermelhos e castanho-avermelhados, finos a conglomeráticos. Siltitos e argilitos ocorrem subordinadamente. Os contatos entre estas três seqüências são concordantes, embora ocorram diastemas representados por superfícies de erosão. O contato com a Fm. Rio do Rasto parece ser concordante, relacionando-se as feições erosionais a diastemas erosivos e, em algumas áreas, presença de relações de contato gradacionais. As características litológicas e sedimentares desta Fm. indicam origem em ambiente continental flúvio-eólico e sistema lacustrino associado.

Membro Santa Maria: segundo Schneider *et al.* (1974), compreende os sedimentos vermelhos, argilosos, situados na porção superior da Fm. Rosário do Sul. Constitui-se de argilitos silticos e siltitos arenosos, vermelhos, fratura subconchoidal com nódulos calcíferos dispostos em níveis. Ocasionalmente, intercalam-se corpos lenticulares de arenitos fino/médio/grosseiros. Em superfície, a forma erosional em ravinamento dos afloramentos é característica. Os argilitos, em geral, não apresentam estruturas internas. Quando presentes, limitam-se a estratificação cruzada, planar e acanalada. Apresenta relações estratigráficas de interdigitação com a fácies arenosa da Fm. Rosário do Sul. O contato superior, com a Fm. Botucatu, é discordante.

2.1.4.2 Formação Botucatu

É constituída por arenitos avermelhados, finos e médios, normalmente bimodais, quartzosos, friáveis, com grãos foscos e geralmente bem arredondados. Localmente, e com maior freqüência na porção basal, ocorrem arenitos mal selecionados. A estratificação cruzada de grande porte é a estrutura sedimentar característica desta unidade. Seu contato inferior com o embasamento Pré-Gonduânico e com as Fms. Rio do Rasto e Rosário do Sul é discordante. Suas características litológicas e sedimentares são de deposição eólica em clima desértico.

2.1.4.3 Formação Serra Geral

A Fm. Serra Geral constitui-se, litologicamente, em uma seqüência básica, predominante, e uma seqüência ácida, mais abundante no topo do pacote, porém com possibilidades de intercalações locais junto à seqüência básica inferior. Corpos de arenitos eólicos, de posição interderrame, ocorrem também na unidade, encontrando-se posicionados preferencialmente na seqüência básica inferior. A seqüência básica é constituída predominantemente por rochas efusivas, as quais estão agrupadas em três grandes grupos: basaltos, andesitos e basaltos com textura vítrea. Associadas a essa unidade são ainda encontradas inúmeras intercalações de arenitos interderrames, bem como tipos litológicos subordinados, representados por brechas basálticas e sedimentares. Corpos hipabissais de natureza semelhante às efusivas básicas são também encontrados, ocorrendo em forma de sills e diques. A seqüência ácida foi agrupada em quatro grandes tipos petrográficos, definidos como basaltos pórfiros, os dacitos e riódacitos felsíticos, os riolitos felsíticos e os fenobasaltos vítreos. O contato inferior com os arenitos da Fm. Botucatu é discordante e com as unidades mais antigas marca-se por discordância erosiva. Esta Fm. é resultado do intenso vulcanismo de fissura, iniciado quando ainda perduravam as condições desérticas de sedimentação da Fm. Botucatu.

2.2 Bacias Carboníferas do Estado do Rio Grande do Sul

No RS, as bacias carboníferas estão localizadas, conforme Figuras 03, 04 e 05, ao longo da borda do Escudo Sul-rio-grandense, na porção sudoeste (Bacia Carbonífera de Candiota), passando pela região central (Bacia Carbonífera do Vale do Jacuí: Capané, Iruí, Butiá, Charqueadas, Santa Rita, Faxinal, São Sepé, Leão, Água Boa, Arroio dos Ratos, Guaíba) até a porção leste do Estado (Bacia Carbonífera Centro-Leste: Gravataí, Morungava, Chico Lomã, Santa Terezinha), apresentando uma sedimentação essencialmente paleozóica, com coberturas mais recentes e vulcanismo mesozóico associado (Corrêa da Silva, 1991).

As camadas de carvão situam-se na Formação Rio Bonito, Grupo Guatá, Supergrupo Tubarão e encontram-se inter-relacionadas com diferentes tipos de rochas como orto e paraconglomerados, arenitos quartzosos, argilitos, siltitos e margas.

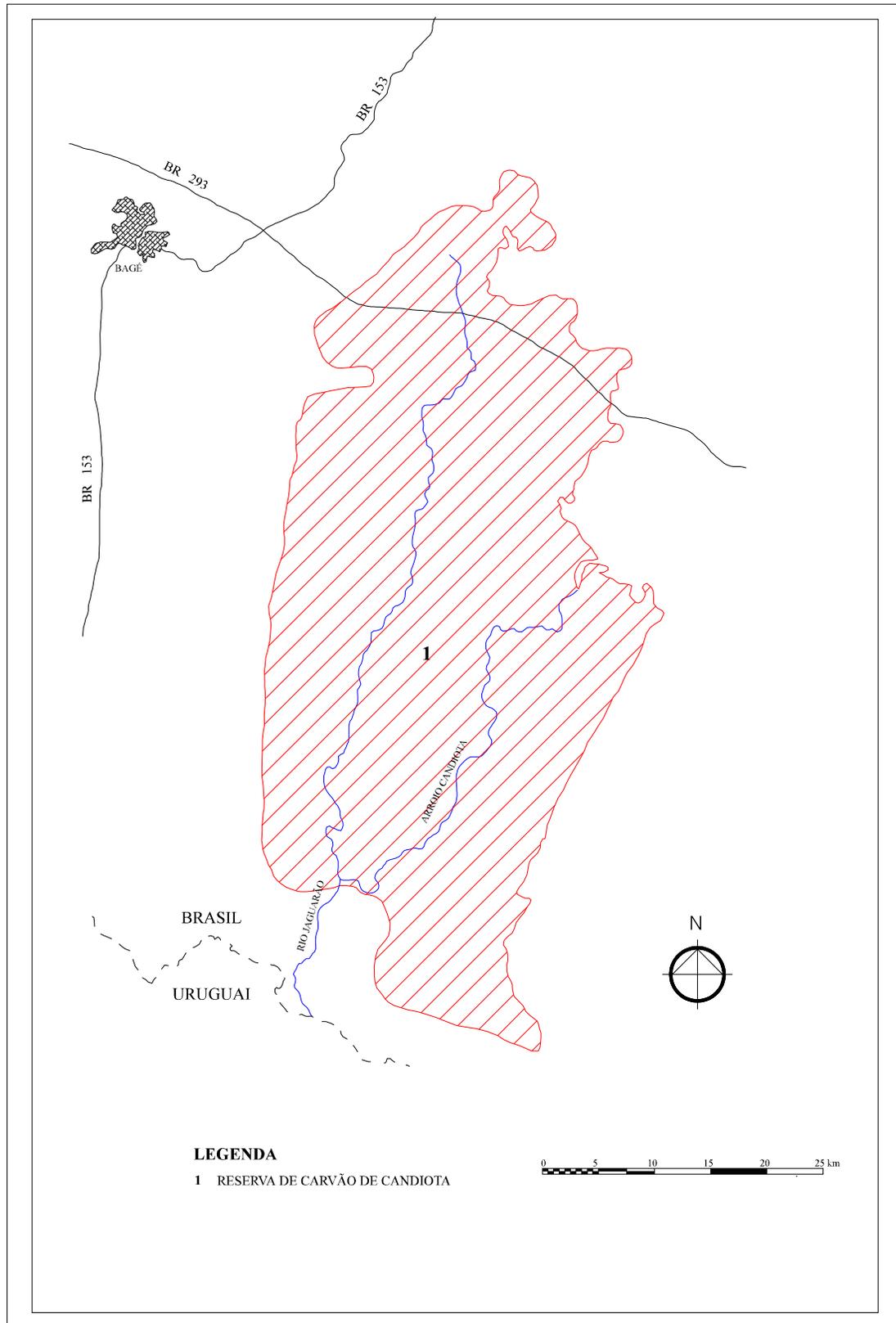


Figura 03: Bacia Carbonífera de Candiota (Teixeira *et al.*, 1995).

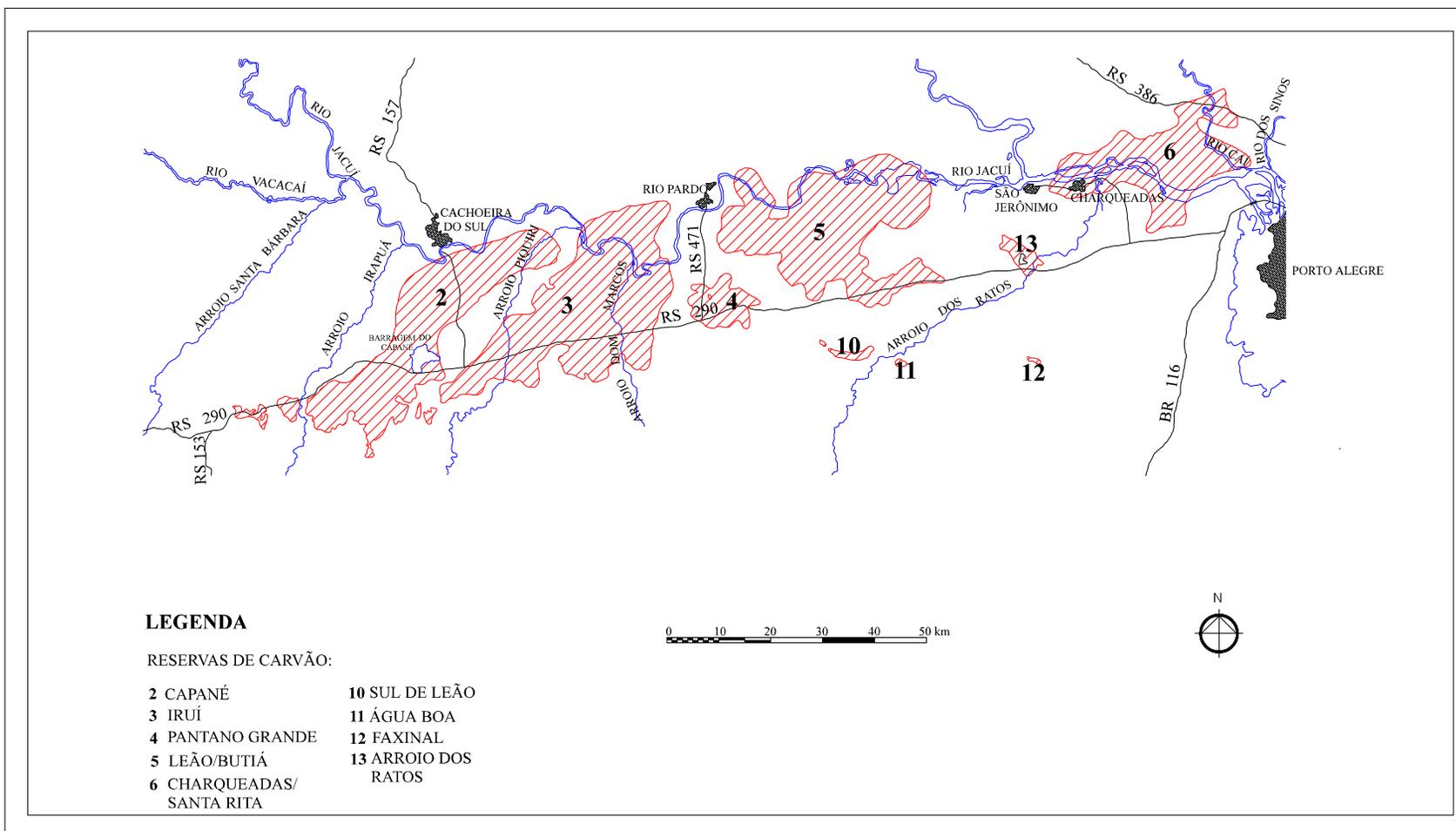


Figura 04: Bacia Carbonífera do Vale do Jacuí (Teixeira *et al.*, 1995).

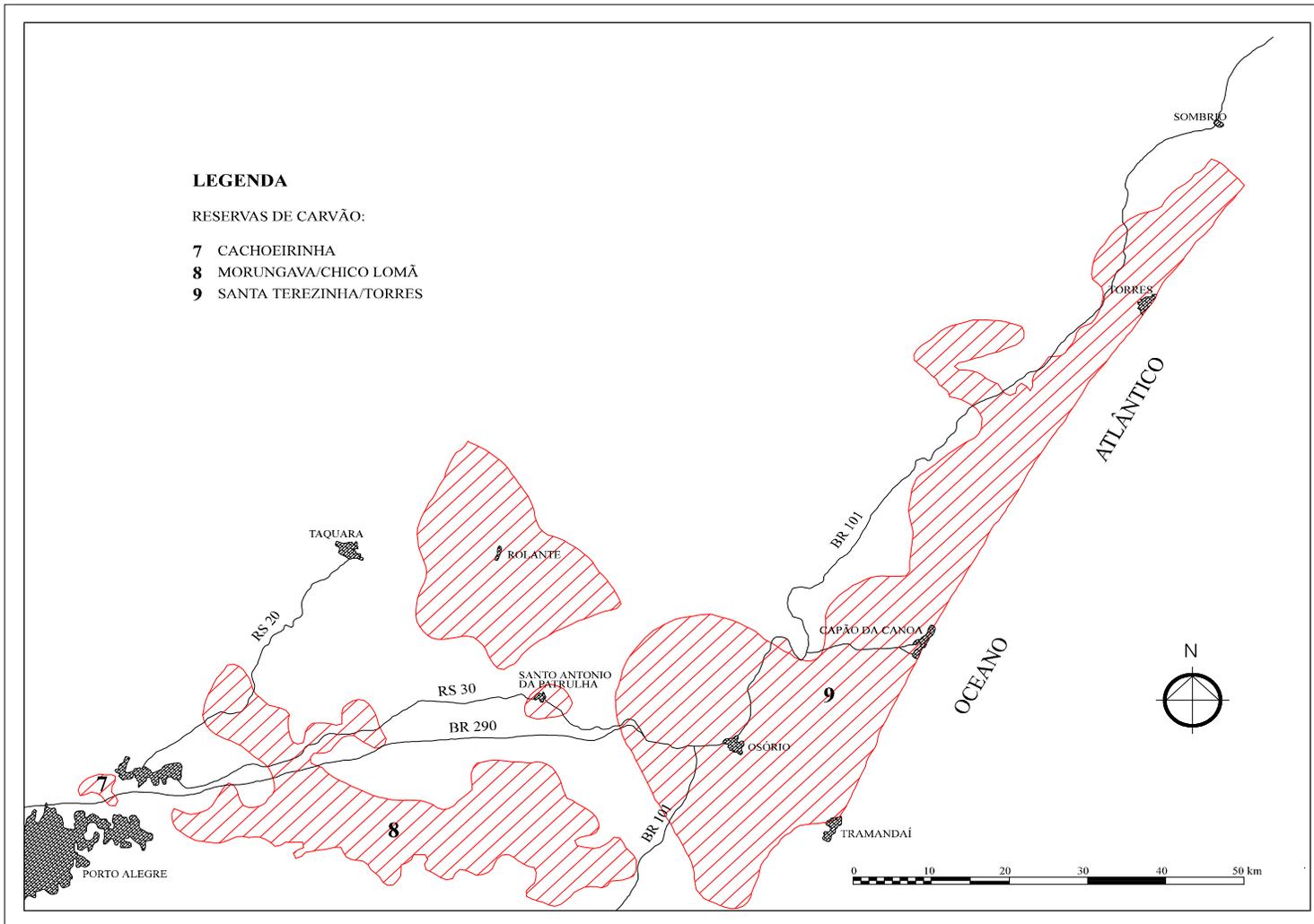


Figura 05: Bacia Carbonífera Centro-Leste (Teixeira *et al.*, 1995).

Quanto à gênese destas camadas de carvão no estado do RS, Corrêa da Silva (1987) observa que estas formaram-se em turfeiras predominantemente subaquáticas, de fácies orgânicas límnic e limnotelmática (Figura 06), sendo compostas por vegetais pteridofíticos de porte herbáceo e arbustivo associados a gimnospermas arborescentes e a elementos vegetais relacionados a algas. O desenvolvimento da vegetação foi condicionado pelas variações do nível d'água nas turfeiras, proporcionando a deposição simultânea de matéria orgânica e inorgânica intimamente associadas e a oxidação dos detritos vegetais transportados para o interior das turfeiras. As camadas de carvão formadas sob estas condições geológicas apresentam altos teores de minerais, em especial argilas e de inertes, associados a quantidades expressivas de constituintes exinóticos, derivados de algas e esporos.

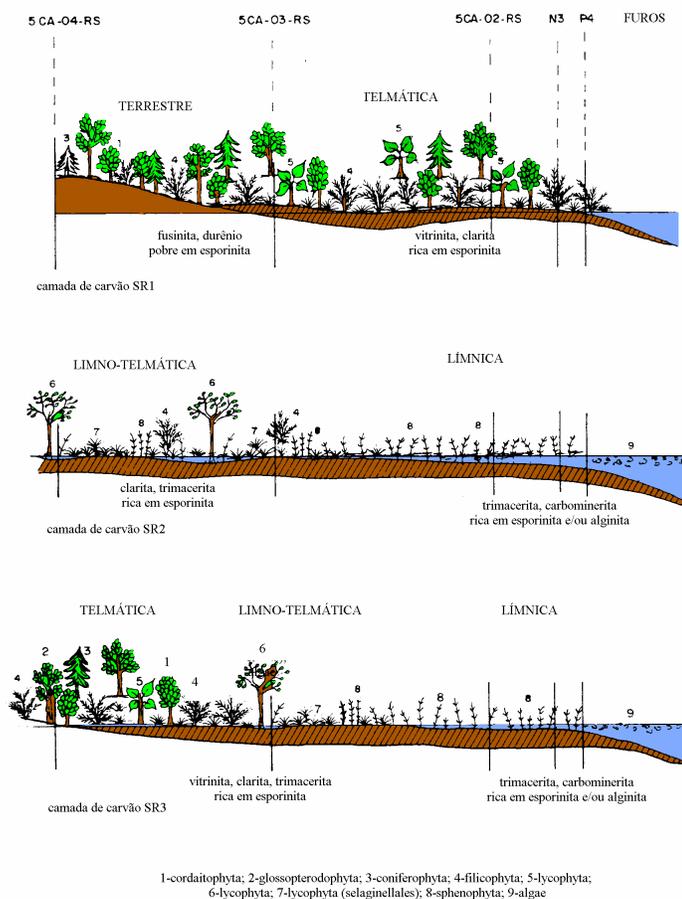


Figura 06: Fácies de deposição do carvão na Bacia Carbonífera de Charqueadas - Santa Rita (modificado de Corrêa da Silva, 1987).

Conforme Piccoli *et al.* (1986), as jazidas carboníferas do estado apresentam um número variável de camadas de carvão, cuja espessura é bastante diferenciada, sendo geralmente inferior a 2m, exceto a Camada Candiota que chega a alcançar mais de 4 m.

A jazida de Candiota é uma das mais importantes do estado, possuindo 16 níveis carbonosos em uma área de aproximadamente 2000 km². Outra jazida é a de Jaguarão que é considerada uma extensão da jazida de Candiota, possuindo apenas 4 km², ao longo do rio Jaguarão. O carvão nestas jazidas é classificado como Betuminoso Alto Volátil C, com teores médios de cinzas de 42% e de enxofre de 2%.

A região centro-leste possui a maior concentração de jazidas de carvão, incluindo a Jazida de São Sepé, com 8 km² de área e apenas uma camada de interesse econômico. A primeira grande jazida nesta área é a de Capané que distribui-se em uma área de 600 km² com a forma de uma faixa alongada de direção sudoeste-nordeste. Paralela a esta, ocorre a jazida de Iruí, também de forma alongada na mesma direção da anterior, com uma superfície de 850 km², apresentando três níveis carbonosos. Nestas jazidas o carvão é classificado como Betuminoso Alto Volátil, apresentando teores de cinza da ordem de 55 a 60% e de enxofre superior a 3%.

As jazidas do Leão e Pantano Grande são contemporâneas, possuem uma forma alongada segundo SW-NE com uma área de 1070 km² e recursos de carvão de três bilhões de toneladas. O carvão é do tipo Betuminoso Alto Volátil C, com teores médios de cinza de 56% e de enxofre entre 1 e 5%, exibindo em alguns setores da jazida propriedades coqueificantes.

Ao sul e sudeste da jazida de Leão existem quatro pequenas jazidas: Cerro do Roque, Água Boa, Faxinal e Arroio dos Cachorros. O carvão apresenta características semelhantes à jazida de Leão.

À oeste da região metropolitana de Porto Alegre ocorre a jazida de Charqueadas/Santa Rita com área de 400 km². Possui recursos da ordem de 150 milhões de toneladas de carvão nas suas seis camadas identificadas. O carvão apresenta 45% de cinzas e 1,1% de enxofre e é classificado como Betuminoso Alto Volátil B.

À leste da região metropolitana ocorrem as jazidas de Morungava/Chico Lomã, Santa Terezinha e Gravataí. A jazida de Morungava/Chico Lomã possui área conhecida de 1200 km² alongada segundo a direção E-W e é formada por seis níveis carbonosos com recursos que somam 3 bilhões de toneladas. O carvão tem teores de cinza de 45 a 64% e de enxofre de 0,7 a 2%, sendo classificado como Betuminoso Alto Volátil B.

Na região litorânea do Estado, coberta por sedimentos cenozóicos da planície costeira e pelos derrames da Fm. Serra Geral, situa-se a jazida de Santa Terezinha com área conhecida de 1000 km² e recursos da ordem de 4 bilhões de toneladas de carvão.

Atualmente, a produção de carvão no RS é de 3000000 tons/ano, representando cerca de 60 % da produção nacional (DNPM, 1994), sendo utilizado nas indústrias cimenteira, petroquímica e de celulose; na geração de energia elétrica e, até dois anos atrás, na redução direta de minério de ferro.

A COPELMI (minas de Charqueadas - subterrânea, Recreio - céu aberto, Faxinal - céu aberto, Butiá-Leste - céu aberto) e a CRM (Leão I - subterrânea, Iruí - céu aberto, Candiota - céu aberto) têm as concessões das reservas carboníferas do RS.

Segundo dados reportados pela COPELMI (1993), a produção de carvão ROM em 1993 foi 566455 t/ano.

As produções das minas do Recreio (1057130 t/ano) e do Faxinal (28620 t/ano) em 1993 decresceram em relação aos outros anos, enquanto que a do Butiá-Leste (480705 t/ano) aumentou. A COPELMI prevê para 1998 um aumento na produção de carvão em relação à 93, podendo atingir cerca de 1680000 t/ano.

Atualmente, encontram-se paralisadas as minas de Charqueadas e Faxinal e em atividade as minas do Recreio e Butiá-Leste. A mina Guaíba, também pertencente à COPELMI está em fase de planejamento.

Quanto às minas pertencentes a CRM - Candiota e Leão I, encontram-se em atividade com produção 1216171 t/ano e 153667 t/ano, respectivamente. Também em atividade, desde 1992, a mina Taquara tem uma produção, apesar de pequena, que praticamente dobrou em 1993 (71883 t/ano). Por outro lado, a mina do Iruí encontra-se desativada.

A previsão para 1998 de produção de carvão proveniente das minas pertencentes a CRM é de aumentar para Candiota (2240000 t/ano) e de diminuir para Leão (84000 t/ano) (DNPM,1994).

Os carvões das minas em atividade apresentam as seguintes características:

Recreio : ROM - Cz: 58,4% ; S: 1,9%; poder calorífico: 2670 kcal/kg
CE 4700 - Cz: 34,5% ; S: 0,8%; poder calorífico: 4752 kcal/kg

Butiá-Leste : ROM - Cz: 51,1% ; S: 2,3%; poder calorífico: 3550 kcal/kg
CE 4700 - Cz: 34,6% ; S: 0,8%; poder calorífico: 4752 kcal/kg

Candiota : ROM - Cz: 55,2% ; S: 1,58%; poder calorífico: 2930 kcal/kg
CE 4200 - Cz: 37,9% ; S: 0,9%; poder calorífico: 4605 kcal/kg

Leão : ROM - Cz: 58,3% ; S: 0,9%; poder calorífico: 2810 kcal/kg
CE 4700 - Cz: 34,1% ; S: 0,65%; poder calorífico: 4750 kcal/kg

2.3 Geologia da Área - Bacia Carbonífera de Charqueadas

A Bacia de Charqueadas, inserida na Bacia Carbonífera do Vale do Jacuí (Corrêa da Silva, 1991), estende-se desde as proximidades de sua confluência com o Rio Taquari até o estuário do Guaíba, abrangendo parte dos Municípios de São Jerônimo, Triunfo, Montenegro, Eldorado do Sul e Guaíba (DNPM, 1987). Esta jazida tem uma forma alongada no sentido leste-oeste, com aproximadamente 40 km segundo seu eixo maior; sua largura média é de 8 km na porção oeste, aumentando para cerca de 16 km em sua extremidade oriental. Possui seis camadas de carvão, estatigraficamente posicionadas nas porções média e superior da Fm. Rio Bonito. A cobertura de rochas acima das principais camadas é considerável, normalmente superior a 250 m, atingindo até 400 m na parte norte da jazida.

Segundo Corrêa da Silva *et al.* (1985), os carvões desta bacia formaram-se em ambiente rigorosamente sapropélico e petrograficamente têm mais caráter de folhelho oleígeno do que de carvão. Indício disso é também o alto teor de pirita nos carvões e o alto teor de argilo-minerais, também indicativo de sua formação subaquática.

Quanto às unidades litoestratigráficas presentes nesta bacia têm-se: a) Grupo Itararé; b) Formação Rio Bonito; c) Formação Palermo; d) Formação Irati; e) Formação Estrada Nova; f) Formação Rio do Rastro; g) Formação Serra Geral; h) Sedimentação Quaternária/Recente, as quais serão comentadas a seguir (segundo COPELMI, 1994 e Piccoli *et al.*, 1985).

a) Grupo Itararé

É constituído predominantemente por pelitos e, secundariamente, por arenitos e conglomerados. Siltito é a rocha pelítica mais abundante e, nas litologias grossas dominam os ortoconglomerados. Não ocorrem camadas de carvão nesta unidade. Os estratos de ortoconglomerados são maciços, comumente com matriz siltico-arenosa e com pequena

espessura (10 - 30 cm). Os siltitos e argilitos possuem cor cinza escuro, tendendo, localmente, ao bordô. Níveis esverdeados podem ocorrer. Os siltitos ocorrem em camadas de até 1,5 m com lâminas e lentes de argilitos intercaladas. Frequentemente, observam-se intercalações de bandas milimétricas de arenitos finos. Os estratos de pelitos são geralmente maciços, podendo ocorrer ocasionalmente, laminação ondulada e estratificação irregular. Localmente, desenvolvem-se horizontes de pelitos carbonosos no topo, junto ao contato com a Fm. Rio Bonito. Os arenitos são predominantemente médios a grossos, embora ocorram níveis de arenitos finos intercalados. Aparecem horizontes de seixos e grânulos intercalados nos pacotes arenosos. A cor é cinza claro a médio, eventualmente cinza avermelhado ou amarronado. Os pacotes arenosos possuem espessura variável, geralmente entre 30 e 50 cm. As estruturas sedimentares, exceto laminação plano-paralela incipiente muito rara, são ausentes.

b) Formação Rio Bonito

É caracterizada por um amplo predomínio de siltitos e argilitos sobre as demais litologias. Arenitos médios a grossos e conglomerados são subordinados nesta unidade. A presença de camadas de carvão é sua principal característica, totalizando até 15% das litologias da Fm. Rio Bonito (camadas SB, MB, F₁F, I₂B e I₃F da Jazida de Charqueadas). Predominam os paraconglomerados (pedra-areia) que localizam-se preferencialmente associados às camadas de carvão, com espessuras de 10 cm até 1,2 m, por vezes apresentando níveis sílticos e carbonosos intercalados. Concreções de pirita são comuns. As cores são cinzas, em tons variados. A matriz é síltico-arenosa a síltico-argilosa (secundariamente). Nos locais onde não ocorre carvão, existem pacotes de 10 a 20 cm compostos de paraconglomerados com ortoconglomerados associados e intercalações sílticas de pequena espessura. Os ortoconglomerados podem gradar para arenito grosso, médio e fino. Os pelitos são de cor cinza claro a escuro, ocorrendo, raramente, tons esverdeados, avermelhados ou amarelados. Os siltitos, ocasionalmente com lâminas ou lentes de arenitos finos intercalados, são mais abundantes do que os argilitos. A espessura dos estratos pelíticos é muito variável de 20-30 cm até 5 m. As camadas são maciças. Os pelitos carbonosos ocorrem em níveis centimétricos (até 80 cm), próximos ou associados às camadas de carvão. Possuem níveis milimétricos de vitrênio. Os arenitos são finos a grossos, porém os termos finos a médios são mais comuns. A cor predominante é cinza claro a médio. A espessura dos estratos varia de poucos centímetros até 1,5 m. Os arenitos aparecem intercalados a siltitos, apresentando estratificação lenticular, plano-paralela e *wavy*. Lentes de margas ocorrem raramente. A espessura total da unidade é de aproximadamente 90 a 120 metros.

c) Formação Palermo

Definida por uma sedimentação marinho rasa, é composta por siltitos cinzas, com intercalações de arenitos finos a médios, com cimento carbonático, laminação plano-ondulada, lenticular, com estrutura do tipo "flaser" e bioturbações. Na base ocorrem arenitos médios, localizadamente carbonáticos. A espessura média é de 40 metros.

d) Formação Irati

Caracteriza-se pela presença de folhelhos carbonosos, micáceos, pretos, intercalados com margas na base, ocasionalmente brechados, com laminação plano-paralela. Apresenta uma espessura de 15 a 20 metros.

e) Formação Estrada Nova

Unidade representada por uma sedimentação marinha, constituída predominantemente por siltitos cinzas, micáceos, localizadamente carbonáticos. A espessura é de aproximadamente 80 metros.

f) Formação Rio do Rasto

Caracteriza-se por uma sedimentação flúvio-lacustre, sendo composta, litologicamente, por arenitos finos a médios, siltitos e argilitos, estratificados, com tonalidades avermelhadas, localizadamente esverdeados, mergulhando para noroeste com valores entre 1 e 2 graus. A espessura desta unidade é da ordem de 70 a 90 metros.

g) Formação Serra Geral

Representada na área por sills e diques de diabásio intrudidos ao longo dos planos de fraqueza e dos contatos entre as unidades litológicas. Normalmente preenchem zonas de falhas ou fraturas, ocorrendo, mais comumente, nas Fms. Irati e Rio Bonito (ocorrem tangenciando as camadas de carvão). A espessura média destes sills e diques varia de alguns centímetros até 90 metros.

h) Sedimentação Quaternária/Recente**- Fácies Argilo-arenosa**

Sedimentação característica de ambiente fluvial, sendo representada, do topo para a base, por argilas, areias de granulometria variada, grânulos e cascalhos finos, dispostos em grano-decrescência. A espessura média deste pacote é de 25 metros.

- Fácies Conglomerática

Constitui-se também por uma sedimentação fluvial, com fácies de canal e planície de inundação amplamente desenvolvidas. Está representada por terraços fluviais de paraconglomerados com matriz argilosa, interdigitados, localizadamente, com camadas arenosas e siltico-argilosas. A grano-decrescência deste pacote sedimentar é marcante e a sua espessura varia de 5 a 15 metros.

2.4 Caracterização Hidrogeológica da Região de Charqueadas

Os dados hidrogeológicos disponíveis na área de estudo foram desenvolvidos pela COMPEQUI-RIO, na Mina de Charqueadas, explorada pela empresa de mineração COPELMI. Sob o âmbito hidrológico, a Mina de Charqueadas é definida por duas situações distintas (COPELMI, 1994):

- sedimentação de caráter aluvionar recobrimdo a sedimentação gondwânica com características típicas de aquífero livre e/ou semiconfinado em determinadas porções da área;
- sedimentação gondwânica caracterizada pelo predomínio de aquícludes (Estrada Nova, Irati, topo do Palermo, Rio Bonito) e aquíferos livres e/ou localmente confinados (Rio do Rastro, base do Palermo, Rio Bonito e Itararé).

a) Aquífero Superficial - Sedimentação Terciária/Quaternária

Constitui-se num aquífero resultante da deposição de sedimentos arenosos inconsolidados a semi-consolidados, depositados ao longo da planície de inundação do Rio Jacuí. Apresenta três horizontes distintos:

- superior: predominantemente argiloso, com espessura da ordem de 9 a 12 metros;
- médio: arenoso, com granulometria variável desde areia muito fina até grânulos, com espessura de 15 a 20 metros;
- basal: conglomerático, com matriz siltico arenosa, apresentando seixos (2-15 cm) até matacões), com espessura da ordem de 10 metros.

O fluxo regional, com gradiente extremamente baixo (<1%) desenvolve-se de modo oblíquo e paralelo ao sentido principal do Rio Jacuí.

b) Aquífero Rio do Rasto

Em decorrência da predominância dos termos mais argilosos da unidade no local da Mina de Charqueadas, os parâmetros hidrogeológicos, como aquífero, são extremamente modestos, acusando vazões inferiores a 600 litros por hora.

c) Aquicludes Estrada Nova, Irati, Palermo (topo) e Rio Bonito (exceto base)

O caráter siltico-argiloso e argiloso destas unidades confere a estas formações a designação de aquicludes ou seja, apesar da grande capacidade de retenção de água, esta não move-se facilmente, em função da baixa permeabilidade das litologias que compõe estas unidades.

d) Aquífero Rio Bonito (porção basal)

Caracterizado pela heterogeneidade das litologias (siltitos, argilitos, margas, para e ortoconglomerados, arenitos) esta unidade apresenta comportamento de aquífero, embora com vazões baixas ($< 2 \text{ m}^3/\text{h}$) e extremamente variáveis de um local para outro.

2.5 Aspectos Ambientais Relativos às Atividades Carboníferas

2.5.1 O carvão: gênese, constituintes e associações geoquímicas

O carvão, uma rocha sedimentar fóssil, forma-se a partir da morte e acumulação de vegetais nos pântanos, sob condições de baixa taxa de erosão, rápida deposição de material, subsidência e sedimentação subsequente. O primeiro estágio na gênese do carvão é a formação da “turfa” que, a partir dos processos de carbonificação (processos microbiológicos, físicos e químicos) vai evoluindo até a formação do carvão propriamente dito, nos seus diferentes ranks (linhito, sub-betuminoso, betuminoso, semi-antracito, antracito). O rank de um carvão é, basicamente, uma medida do seu grau de carbonificação, sendo que quanto maior o rank, maior será a concentração de carbono e menor o conteúdo de voláteis - H_2 , CO_2 , CH_4 , H_2O ,.. (Tucker, 1991).

Distinguem-se duas frações no carvão: orgânica e inorgânica.

Na fração orgânica, os menores constituintes orgânicos individuais do carvão são denominados macerais (similares aos minerais das rochas ígneas) e a Tabela 01 apresenta os grupos de macerais existentes e suas características (Tucker, 1991).

Tabela 01: Principais macerais do carvão (Tucker, 1991).

| Grupo de Maceral | Macerais | Origem |
|-------------------------|--|--|
| Vitrinita | Colinita, Telinita | Caule |
| Inertinita | Fusinita, Semifusinita Esclerotinita Micrinita | Tecidos lenhosos Fungos Resinas polimerizadas |
| Liptinita | Esporinita Cutinita Resinita Alginita | Esporos Cutículas Resinas Algas |

A fração inorgânica é representada por diversos tipos de rochas e minerais, os quais tem sido identificados associados com diferentes carvões. Apesar de algumas variações de local para local e mesmo de uma camada de carvão para outra, certos minerais estão presentes em praticamente todos os carvões: alumino-silicatos (argilo-minerais), silicatos, carbonatos, sulfetos e sulfatos. A Tabela 02 relaciona os principais minerais observados (Torrey, 1978):

Tabela 02: Principais minerais identificados nos carvões (Torrey, 1978).

| Classe | Minerais |
|-------------------|----------------------------------|
| alumino-silicatos | ilita, caolinita, montmorilonita |
| sulfetos | pirita, marcasita |
| silicatos | quartzo |
| sulfatos | gipso |
| carbonatos | calcita, dolomita, siderita |

Associados às frações inorgânica e orgânica dos carvões, observam-se vários elementos traços, cuja ocorrência tem sido estudada por diversos autores, entre os quais destacam-se Goldschmidt (1954), Breger (1958), Nicholls (1968), Gluskoter *et al.*(1974), Palmer & Filby (1984), Raask (1985), Swaine(1990), Buggey *et al.*(1995), Querol *et al.* (1995).

Tais elementos traços, segundo Breger (1958) teriam sido concentrados nos carvões em dois estágios: 1) acumulação de elementos como resultado da atividade de certos organismos, ainda no seu período de vida: C, N, P, S, Fe, Si, Ca, Ba, Mn, I, Cu, V e Zn; 2) acumulação após a morte de determinados organismos por: (i) via mecânica, através de minerais e fragmentos de rochas que se depositam durante a formação do carvão - Si, Al, Ca, Mg, Fe, Mn, Na, K, entre outros; (ii) via química, a partir da incorporação destes elementos em moléculas orgânicas - Ga e Ge; (iii) via química, a partir da precipitação de sulfetos - Fe, Cu, Pb, Zn; (iv) via química, por produtos de oxidação - Ag; (v) adsorção física - V, Ag, Th, U.

A concentração dos elementos traços nos carvões é explicada, simplificada, por Nicholls (1968) da seguinte forma: (i) os elementos associados com a fração orgânica foram originados das plantas formadoras do carvão, concentrando-se a partir de compostos organo-metálicos; (ii) os elementos associados com a fração inorgânica foram resultado da sorção dos detritos inorgânicos pelas águas de circulação, durante os primeiros estágios de formação da turfa ou durante os processos de diagênese e/ou sedimentação.

Recentemente, Swaine (1990 apud Buggery *et al.*, 1995), descreve que os elementos traços foram concentrados nos carvões por processos que ocorreram antes, durante e após a formação do carvão. Embora os vegetais que deram origem aos carvões nos pântanos/turfeiras possam ter concentrado alguns elementos traços por processos biológicos e físico-químicos, existem poucas evidências que sugerem que os elementos traços retidos nos tecidos das plantas possam ter sido incorporados ao carvão. Por outro lado, sabe-se que os processos de sedimentação contemporânea e remobilização/mineralização pós-deposicionais, controlados principalmente pelas condições de Eh e pH do meio, atuaram efetivamente na concentração dos elementos traços nos carvões.

Enquanto a maior parte dos elementos traços associa-se preferencialmente com a fração orgânica ou inorgânica, alguns elementos traços mostram uma afinidade por ambas as frações.

Goldschmidt (1954) foi quem primeiro desenvolveu estudos de associação dos elementos traços com a fração orgânica e/ou inorgânica do carvão, observando a presença de V, Mo e Ni como compostos organo-metálicos e identificando os elementos associados com a matéria mineral do carvão. Posteriormente, Nicholls (1968) propôs um método qualitativo para determinar a afinidade dos elementos com estas frações e Gluskoter *et al.* (1974)

desenvolveram um método empírico que permite calcular um índice de afinidade orgânica dos elementos traços.

Raask (1985) postulou que a associação de diversos elementos traços com as espécies minerais presentes no carvão é condicionada, muitas vezes, pelo comportamento dos elementos maiores - Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, S, Cl. Este mesmo autor observou associações dos elementos Mn, Fe e Ca aos carbonatos; do Mo a sulfetos (principalmente FeS₂); do Fe a sulfetos (principalmente pirita) e a carbonatos (siderita); do Co, Ni, Zn (esfarelita), Cd (esfarelita) a sulfetos e do Cu a sulfetos e fração orgânica.

A associação dos elementos Si, Ti, Al, K a argilo-minerais e Fe, As, Hg, Mo, Pb, Cd e Zn a sulfetos foi descrita por Torrey (1978).

Palmer & Filby (1984) apresentaram a distribuição dos elementos traços nos carvões norte-americanos. A partir dos resultados obtidos concluíram que a pirita concentra-se nas frações mais grossas e os elementos calcófilos Fe, Se, Hg, Sb, As são fortemente associados a este mineral nestas frações. Os elementos Se, V, Cr e Ba concentram-se na fração argilosa mas parecem apresentar outras associações. Observaram ainda que os elementos K, Cs, Rb, Al associam-se aos argilo-minerais.

Querol *et al.* (1995), a partir de estudos realizados em carvões sub-betuminosos espanhóis, observaram que os elementos traços concentram-se preferencialmente na fase orgânica ou inorgânica, da seguinte forma: (i) em argilo-minerais e feldspatos: Al, K, Mg, Na, P, Ti, Li, Cr, Ni, Cu, Ga, Rb, V, Sr, Y, Sn, Cs, Ba, Ta, Pb, Bi, Th, U, REEs; (ii) em sulfetos de ferro: S, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Hg, W, Pb, Tl; (iii) em carbonatos: C, Ca, Mn, Co; (iv) em sulfatos: S, Ca, Fe, Ba; (v) em minerais pesados - turmalina: B; (vi) em diversas fases minerais: Co, W (carbonatos e sulfetos), Ni, Cu, Pb (argilo-minerais e sulfetos), S (sulfetos, sulfatos e matéria orgânica), C (carbonatos e matéria orgânica); (vi) na matéria orgânica: C, N, S, Be, B, Ge, V, W e Zn.

Alguns trabalhos (Sanchez *et al.*, 1985; Fiedler, 1987; Solari *et al.*, 1989; Pires, 1990; Pires & Teixeira, 1992) tem sido realizados nos carvões brasileiros visando à determinação da distribuição geoquímica dos elementos traços nestes carvões.

Pires & Teixeira (1992) observaram, a partir da aplicação de um modelo quantitativo de distribuição geoquímica dos elementos traços no carvão do Leão (RS-Brasil), que: (i) os elementos As, Cd, Cr, Cu, Mo, Pd e Zn mostraram-se principalmente associados a sulfetos com associações secundárias nas frações orgânica e não-sulfetada; (ii) os elementos Co, Ni, Mn e V mostraram associação preferencial à fração inorgânica. A partir dos resultados

obtidos sugeriram que os elementos associados às frações sulfetada e orgânica (Pb, Mo, As, Cd, Cu, Cr, Zn) provavelmente apresentam uma tendência maior para volatilização e enriquecimento nas cinzas volantes produzidas pela combustão do carvão.

A partir do que foi exposto, observa-se que embora a maior parte dos elementos traços não se concentre em um único mineral ou fase, sua distribuição relaciona-se ao tamanho e à densidade, logo uma tendência geral de quais são os minerais que controlam o comportamento dos elementos traços pode ser estabelecida para diversos deles (Palmer & Filby, 1984).

Cabe ressaltar que, nos últimos anos, o estudo dos elementos traços tem sido intensificado devido aos possíveis problemas ambientais (toxicidade de alguns elementos) gerados pela concentração destes elementos no meio ambiente durante os processos de beneficiamento e utilização do carvão.

Segundo Buggey *et al.* (1995), apesar dos elementos traços estarem presentes em concentrações baixas na maioria dos carvões, a queima de toneladas de carvão em termoelétricas pode gerar um significativo impacto ao meio ambiente. O conhecimento da distribuição e concentração dos elementos traços nos carvões permitem prever o comportamento destes elementos conforme eles vão sendo emitidos para a atmosfera durante a queima do carvão. Sabe-se, por exemplo, que os elementos traços associados às frações orgânica e sulfetada volatilizam-se durante a combustão do carvão, o que não ocorre aos metais presentes nos alumino-silicatos (Pires & Teixeira, 1992).

2.5.2 Rejeitos de carvão e cinzas: definição, caracterização e problemas ambientais

Conforme já comentado, o carvão brasileiro contém quantidade significativa de matéria mineral associada. De forma genérica, os constituintes inorgânicos dos carvões brasileiros freqüentemente representam 50% ou mais do produto run-of-mine (ROM). Tal matéria mineral, além de diminuir o poder calorífico do carvão, gera problemas de poluição atmosférica durante a queima do carvão. Numa tentativa de reduzir-se tais problemas são aplicados processos de beneficiamento utilizando-se jigs, ciclones, mesas vibratórias,... O rejeito deste processo será descartado em uma área previamente estabelecida, sendo disposto sob a forma de pilhas e aterros ou preenchendo antigas cavas de minas, juntamente com o estéril da fase de exploração. A fração fina do rejeito geralmente é disposta em lagoas ou bacias de decantação (Torrey, 1978).

Posteriormente, o carvão já devidamente beneficiado poderá ser empregado para os diversos fins a que se destina - utilização nas indústrias cimenteira, petroquímica e de celulose; na geração de energia elétrica, na fabricação do coque,..., destacando-se que, no estado do Rio Grande do Sul, o carvão é principalmente utilizado na geração de energia pelas termoelétricas. Além dos problemas de poluição atmosférica acarretados, a queima do carvão gera resíduos - cinzas de carvão constituídos pela matéria mineral presente nos carvões. Nos processos de combustão em leito fixo as cinzas resultantes são predominantemente de granulometria grossa, apresentando forma compactada com quantidades significativas de matéria carbonosa. Na queima de carvão pulverizado ou em leito fluidizado, as cinzas resultantes são predominantemente de granulometria fina, sendo divididas em: (i) cinzas volantes, arrastadas pelos gases de combustão e abatidas por equipamentos mecânicos ou eletrostáticos; (ii) cinzas de fundo, mais pesadas, coletadas no fundo das fornalhas (Rhode, 1995).

Tanto os rejeitos de carvão quanto as cinzas podem promover diversos problemas ambientais resultantes das atividades do processamento do carvão, conforme pode ser visualizado, de forma esquemática, na Figura 07.

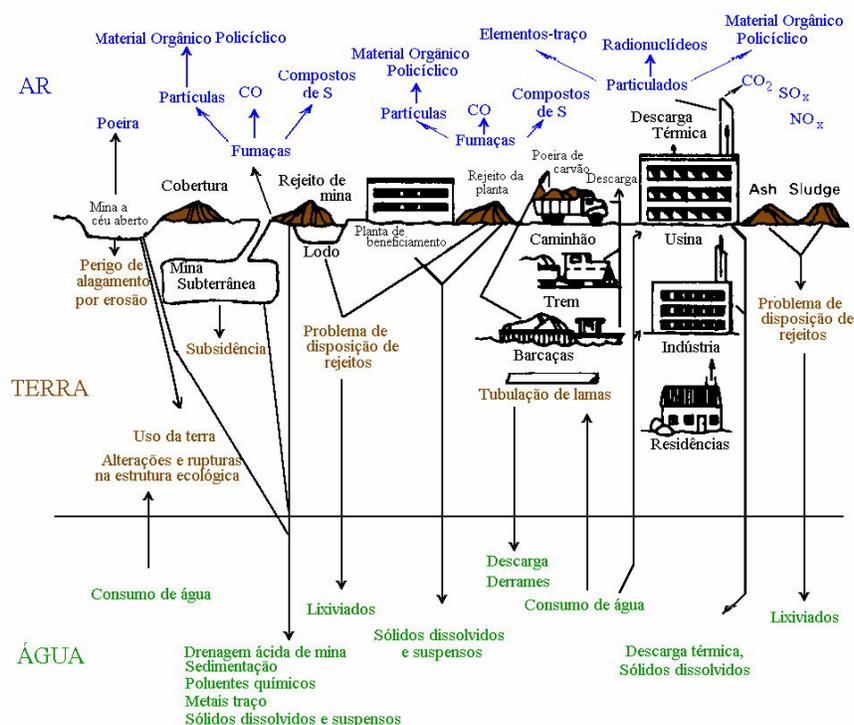


Figura 07: Problemas ambientais relacionados às atividades carboníferas (modificado de Ward, 1984).

2.5.2.1 Rejeitos de carvão

Diversos problemas ambientais são associados à deposição inadequada de rejeitos de carvão, destacando-se: escorregamentos, ravinamentos, acidificação das águas superficiais e subterrâneas, aumento da carga de sólidos suspensos dos cursos d'água adjacentes aos depósitos, desvalorização de propriedades (Schubert, 1979).

A lixiviação dos poluentes de pilhas de rejeitos de carvão depende, basicamente, de uma série de condições específicas de cada situação como: tamanho das partículas, permeabilidade, grau de compactação, mineralogia e composição dos rejeitos, padrões de disposição e drenagem das pilhas. Dependendo do tipo de material do qual o rejeito é constituído, serão observadas variações na disponibilidade dos contaminantes, o que pode ser atribuído, também, aos diferentes tipos de carvões existentes bem como aos métodos de mineração e beneficiamento utilizados. Além disso, a quantidade destes contaminantes lixiviados será função das características hidrogeológicas da área de disposição final destes resíduos (Torrey, 1978).

Diversos trabalhos (Hayward, 1986; Gonzalez Cañibabo & Leininger, 1987; Szczepanska & Twardowska, 1987; Twardowska & Szczepanska, 1990; Gonzalez Cañibabo *et al.*, 1990; Twardowska *et al.*, 1990; Sleeman, 1990; Bell *et al.*, 1992) tem sido desenvolvidos a fim de determinarem-se as propriedades físicas e químicas dos rejeitos de carvão, procurando-se avaliar a influência destes no meio ambiente.

Szczepanska & Twardowska (1987), estudando uma área de descarte de rejeitos de carvão localizada na Polônia, observaram diversos efeitos negativos ao meio ambiente. A causa principal foi a lixiviação dos cloretos e dos sulfetos de Fe com subsequente formação de drenagem ácida contendo altas concentrações de sulfato, Fe e metais pesados. Desta forma, os rejeitos de carvão foram considerados uma significativa fonte de contaminação para as águas superficiais e subterrâneas adjacentes à área estudada, com concentrações de sólidos totais dissolvidos - TDS (aumento de seis a catorze vezes na concentração inicial), sulfatos (aumento de 11 a 33 vezes na concentração inicial), cloretos e metais pesados bastante altas.

Twardowska & Szczepanska (1990) em estudo semelhante, mostraram, a partir de experimentos utilizando colunas de lixiviação e estudos de campo em rejeitos de carvão, o alto e permanente potencial poluidor e corrosivo dos rejeitos com baixa capacidade de tamponamento (capacidade de consumir os ácidos gerados) no meio aquático.

Gonzalez Cañibabo *et al.* (1990) também realizaram testes de lixiviação em rejeitos de carvões (espanhóis) cabendo destacar que seus resultados diferenciam-se dos demais trabalhos apresentados, uma vez que tais rejeitos não foram considerados potencialmente poluidores de acordo com a “Spanish Law of Waters”. Analisando-se os resultados obtidos, observaram que o pH das amostras variava de neutro a básico (7,2 - 9,2).

Em uma linha de pesquisa um pouco diferenciada das demais, Bell *et al.* (1992) estudaram o comportamento de quatro pilhas de rejeitos dispostas em uma área piloto no Canadá, cada uma apresentando diferenças no que se refere ao grau de compactação e a implementação ou não de tratamento químico e/ou microbiológico. Os resultados obtidos durante o primeiro ano de monitoramento indicaram que as águas provenientes do escoamento superficial das pilhas eram salobras (TDS: 3600-4800 mg/L), corrosivas e predominantemente do tipo sódio-sulfáticas. Concentrações de SO_4 e de Cl^- variaram, respectivamente, de 2080 a 2940 mg/L e de 146 a 301 mg/L, com valores médios de pH de 5,8 (pilha 1), 3,6 (pilha 2), 3,3 (pilha 3), 6,5 (pilha 4).

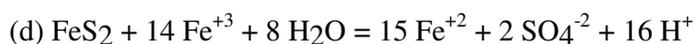
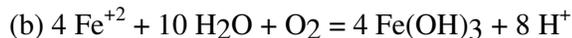
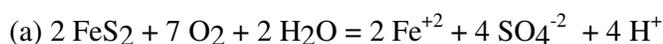
Observando diversos resultados obtidos a partir da caracterização dos rejeitos de carvão (Torrey, 1978; Szczepanska & Twardowska, 1987; Twardowska & Szczepanska, 1990; Bell *et al.*, 1992), foi evidenciado que as drenagens provenientes das pilhas de rejeitos de carvão apresentavam matéria mineral suspensa ou dissolvida em quantidades significativas. Geralmente, as concentrações mais elevadas de contaminantes - Fe, Al, Ca, Mg e sulfato, são encontradas em drenagens ácidas. Além disso, tem sido observado que os rejeitos de carvão continuam a produzir contaminantes por muitos anos após sua disposição inicial. A este respeito, alguns autores (Singer & Stumm, 1970 apud Torrey, 1978; Curtis, 1972 apud Torrey, 1978) destacam que os rejeitos mais antigos podem ser considerados mais propícios ao desenvolvimento de drenagem ácida do que os recém depositados, devido, provavelmente, à ação tardia de bactérias. Desta forma, conclui-se que os rejeitos de carvão expostos só podem ser considerados inócuos ao meio ambiente em condições tais que o fluxo de água existente seja severamente limitado ou ausente.

A partir dos trabalhos acima apresentados, observa-se que a formação de drenagem ácida é um dos problemas ambientais relacionados com as atividades carboníferas mais sérios, podendo afetar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

Salomons (1995) postulou que os pré-requisitos para a formação de drenagem ácida de mina - DAM são: (i) rápida taxa de oxidação do enxofre e formação de ácido sulfúrico em uma velocidade maior que a de neutralização da drenagem pelos materiais alcalinos presentes

nos resíduos da mineração; (ii) acesso ao oxigênio e a água e (iii) velocidade de precipitação maior que a de evaporação.

Torrey (1978) estabeleceu que a drenagem ácida ocorre quando os sulfetos de ferro (pirita e marcasita) são expostos ao ar e a água. A reação entre a pirita, a água e o oxigênio do ar leva à produção de um líquido (DAM) caracterizado pelo pH ácido e altos teores de sulfatos e cátions (principalmente Fe e Mn). O enxofre se oxida para ácido sulfúrico e o ferro é liberado como sulfato de ferro. A pirita, que fora formada geologicamente na ausência de oxigênio, ao ser exposta ao ar, reage rapidamente catalisada por uma série de microorganismos (*Thiobacillus ferrooxidans* e *Thiobacillus thiooxidans*). A oxidação da pirita ocorre em quatro passos (Kleinman *et al.*, 1981 apud Salomons, 1995):



As soluções ácidas produzidas pelo intemperismo da pirita afetarão outros minerais presentes nas pilhas de rejeitos. Determinados argilo-minerais serão dissolvidos, liberando Al e outros íons para a solução e a degradação da pirita e marcasita promoverá a mobilização de Fe, sulfato e elementos traços. Além disso, os carbonatos presentes serão dissolvidos resultando na liberação de Ca e Mg, bem como nos elementos traços associados (Torrey, 1978).

2.5.2.2 Cinzas de carvão

Estudos sobre a mobilidade dos elementos traços durante a combustão do carvão tem mostrado que a presença destes elementos depende de suas afinidades e concentrações nas diferentes fases constituintes do carvão. A volatilidade depende, além das afinidades e concentrações geoquímicas dos elementos traços, da tecnologia de combustão - temperatura, tempo de exposição, forma de geração de cinza,... Embora o controle de particulados nas termoelétricas (precipitadores eletrostáticos, filtros, ciclones,...) apresente alta eficiência de retenção (frequentemente maior que 99,9%), consideráveis quantidades de partículas finas (inaláveis: < 10µm) são emitidas para a atmosfera uma vez que para este tamanho de partícula, a eficiência destes equipamentos diminui. Essas partículas são consideradas altamente poluentes devido à alta área superficial de cada uma, propiciando a condensação

dos elementos traços sobre a superfície da partícula durante o resfriamento dos gases de combustão (Querol *et al.*, 1995).

Segundo Sanchez *et al.* (1994), os elementos traços presentes no carvão não se distribuem igualmente nos subprodutos da combustão do carvão - cinzas volantes e de fundo. Certos elementos (Ni, Cr, Cd, Co, Pb,...) concentram-se, preferencialmente, na superfície das partículas mais finas devido ao mecanismo de volatilização-condensação e à alta energia superficial destas partículas.

Diversos trabalhos (Klein *et al.*, 1975; Coles *et al.*, 1979; Meij *et al.*, 1985 apud Smith, 1987; Chadwick *et al.*, 1987) tem sido realizados visando a classificação dos elementos traços segundo suas propriedades de volatilização durante a combustão com conseqüente concentração em uma das fases geradas (cinzas leves de chaminé, cinzas leves retidas no precipitador, cinzas pesadas). De acordo com Smith (1987), tais elementos podem ser classificados no mesmo grupo ou em grupos distintos por diferentes autores, segundo as associações geoquímicas destes elementos (Tabela 03):

Tabela 03: Classificação dos elementos traços em cinzas de carvão pulverizadas em relação a sua propriedades de volatilização durante a combustão (Smith, 1987).

| Grupo | Elementos |
|---|--|
| Grupo I (não-voláteis) | Al, Ba, (Be), Ca, Ce, Co, (Cr), Eu, Fe, Hf, K, La, Mg, Mn, (Ni), Rb, Sc, Si, Sm, Sr, Ta, Th, Ti, (U), (Zr) |
| Grupo II (volatilização-condensação) | As, (B), (Ba), (Be), Cd, (Co), Cu, Ga, (Ge), Mo, (Ni), Pb, Sb, Se, (Sn), (Te), (Tl), (V), Zn |
| Grupo I/II (intermediário) | (Ba), (Bi), (Co), Cr, Cs, (Cu), (I), (Mo), Na, Ni, (Se), (Sr), (Ta), U, V, (W) |
| Grupo III (volatilização - não condensação) | B, Br, Cl, F, Hg |

OBS: Os elementos em parênteses referem-se às classificações de Coles *et al.* (1979), CRIEPI (1985) e Conzemius *et al.* (1984) que diferem da classificação proposta por Klein *et al.* (1975).

- Grupo I: elementos que apresentam baixa volatilidade mesmo a altas temperaturas (1200-1600°C), dividindo-se igualmente nas cinzas pesadas e leves, não se concentrando nas cinzas leves de chaminé. As cinzas leves tendem a ser enriquecidas em Fe, Mg e Mn e depletadas em Al, Ca, K e Si. Chadwick *et al.* (1987) observou que os elementos deste

grupo apresentam, nas rochas crustais, comportamento litófilo, associando-se a aluminossilicatos.

- Grupo II: elementos que são volatilizados e logo em seguida condensados nas partículas finas. Chadwick *et al.* (1987) observou que os elementos deste grupo apresentam, nas rochas crustais, comportamento calcófilo, associando-se a sulfetos.
- Grupo III: elementos voláteis que são emitidos para a atmosfera na forma gasosa.

De acordo com Querol *et al.* (1995), elementos que possuem afinidade geoquímica com sulfetos e matéria orgânica são, geralmente, volatilizados durante a combustão. Entretanto, se estes elementos não forem volatilizados, os mesmos poderão estar presentes nas cinzas, principalmente na forma de óxidos e sulfatos, sendo, portanto, facilmente extraíveis dos resíduos no processo de lixiviação.

Desta forma, além dos problemas de contaminação atmosférica ocasionados pelas cinzas, as mesmas podem promover, quando expostas ao meio aquoso, a solubilização de diversos elementos potencialmente tóxicos com conseqüente contaminação das águas superficiais e subterrâneas a partir da lixiviação destas cinzas depositadas, na maior parte dos casos, de forma inadequada.

Segundo Eary *et al.* (1990), as taxas e quantidades de elementos traços solubilizados durante a lixiviação de cinzas de carvão são influenciadas, principalmente, pelas concentrações totais e distribuição destes elementos nos resíduos. A distribuição de um elemento específico nas fases sólidas pode ser importante no controle de sua taxa inicial de lixiviação. Elementos que são enriquecidos nas superfícies das partículas são mais facilmente disponíveis ao ambiente. Conseqüentemente, eles podem ser lixiviados inicialmente a taxas mais rápidas do que os elementos associados à matriz no resíduo.

Diversos estudos relativos aos aspectos ambientais da disposição de cinzas de carvão tem sido desenvolvidos, combinando análises elementares totais com diversos testes de extração dos elementos presentes nestes resíduos. Tais testes (de extração) são adequados na obtenção do efeito ambiental potencial destes resíduos na composição das águas subterrâneas, sendo que freqüentemente estes testes referem-se à solubilização dos elementos menores. Embora a quantidade total e as concentrações finais na solução estudada de elementos menores nos extratos sejam variáveis, algumas tendências podem ser observadas. Elementos enriquecidos nas superfícies das partículas na forma de óxidos e sais solúveis nos resíduos brutos - B, Cd, Cu, Mo, Se e Zn, parecem ser dissolvidos mais rapidamente dos que os demais

elementos menores, sendo mais rapidamente lixiviados das cinzas leves do que das pesadas (Eary *et al.*, 1990).

Eary *et al.* (1990) destacam a importância da variável pH, sendo considerada fator principal no controle da solubilidade de diversos resíduos e, conseqüentemente, nas características dos lixiviados. O pH das soluções obtidas a partir de lixiviações de cinzas depende de suas composições e pode variar durante o tempo de acordo com os processos de intemperismo atuantes. Resíduos derivados de carvões com altos teores de enxofre freqüentemente produzem lixiviados com baixo pH, enquanto que os derivados de carvões com baixos teores de enxofre freqüentemente produzem lixiviados alcalinos devido à rápida dissolução dos óxidos constituídos por elementos alcalinos e alcalino-terrosos quando expostos à água.

Quanto à caracterização das cinzas de carvão e os problemas ambientais gerados, a maior parte dos pesquisadores estão voltados para a caracterização das cinzas leves - fly ashes (Natusch *et al.*, 1975; Dressen *et al.*, 1977; Torrey, 1978; Coles *et al.*, 1979; Chadwick *et al.*, 1987; Heystee & Allan, 1992; Egemen & Yurteri, 1994; Teixeira *et al.*, 1992; Rohde, 1995) existindo poucos trabalhos relativos às propriedades das cinzas pesadas - bottom ashes (Huang & Lovell, 1992, Chadwick *et al.*, 1987; Rohde, 1995).

Egemen & Yurteri (1994) estudaram o comportamento dos íons metálicos em um depósito de cinzas leves na Turquia. Em relação à constituição das cinzas estudadas, reportaram que os elementos Fe, Ca, Na e K foram os que apresentaram concentrações mais altas. Os elementos obtidos a partir de extrações totais estariam concentrados, em ordem decrescente, da seguinte forma: $K > Fe > Ca > Na > Mg > Ni > Pb > Cu > Mn > Zn > Cd$. A partir de testes de lixiviação com água realizados em cinzas leves, observaram que os elementos Cu, Ni, Mn e Pb não apresentaram mobilidade significativa. Entretanto, os elementos Zn e Cd foram detectados em níveis mais elevados. O ranking geral das concentrações de metais dissolvidos nas amostras lixiviadas foi o seguinte: $Ca > Na > Mg > K > Zn > Cd > Fe > Ni > Cu > Mn$. Em relação ao percentual de lixiviação dos elementos estudados, os mesmos se comportaram da seguinte forma: $Ca > Na > Mg > Zn > K > Mn > Ni = Cu > Fe$. Analisando-se os resultados obtidos, conclui-se que não é possível estabelecer uma correlação direta entre a composição das cinzas e o percentual de lixiviação observado, ou seja, elementos com concentrações mais elevadas nas amostras de cinzas não necessariamente resultarão em elevadas concentrações no lixiviado. Tal fato é fortemente influenciado pelos valores observados de pH, situados entre 8,7 e 9,3.

Estudos realizados por Johnston & Eagleson (1991; apud Heystee & Allan, 1992) identificaram quatro contaminantes principais nos depósitos de cinzas de Ontario Hydro (Canadá): sulfato (1450-2400 mg/L), Boro (19-51 mg/L), As (0,07 mg/L) e Se (0,05 mg/L) com concentrações acima dos valores de background da área e/ou dos padrões vigentes para água potável.

Entre as diversas aplicações das cinzas, Huang & Lovell (1992) realizaram diversos experimentos (abrasão, resistência, permeabilidade, compactação, compressibilidade, ...) em cinzas pesadas dos EUA com a finalidade de testar suas propriedades para utilização destas cinzas na pavimentação de estradas. Em relação a natureza potencialmente tóxica destas cinzas, foram realizados testes de lixiviação, comparando-se os resultados com normas prescritas pela Environmental Protection Agency - EPA (1985). A partir destes testes, classificaram-se tais cinzas como não-perigosas devido, principalmente, às baixas concentrações obtidas para diversos metais pesados. Além disso, o efeito destas cinzas pesadas sobre a qualidade das águas subterrâneas foi avaliado utilizando-se testes de lixiviação específicos para o estado de Indiana (Indiana Register, 1989). Os resultados obtidos confirmaram o caráter não perigoso destas cinzas, com efeitos mínimos sobre a qualidade das águas subterrâneas.

No Brasil, a maior parte dos trabalhos realizados (Andrade, 1985; Machado, 1985; Fiedler, 1987; Sánchez, 1987; Sanchez *et al.*, 1994) refere-se à caracterização das cinzas leves e pesadas amostradas diretamente nas chaminés, precipitadores, ciclones,... (para cinzas leves) ou cubas dos decantadores (para cinzas pesadas), não existindo trabalhos específicos de amostragem de cinzas nas áreas de deposição das mesmas. Além disso, o enfoque de tais trabalhos é, principalmente, os efeitos destas cinzas na contaminação atmosférica das regiões em que estão situadas as termoelétricas.

Dentre estes trabalhos, Rohde (1995) realizou diversas caracterizações (física, hidrogeológica, químico-mineralógica, químico-toxicológica e radiológica) nas cinzas leves e pesadas das Usinas Termoelétricas de São Jerônimo e Charqueadas. Em relação à classificação toxicológica destas cinzas com provável influência na contaminação das águas superficiais e subterrâneas, este autor chega à conclusão que as cinzas estudadas constituem resíduos “não-inertes” segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 1987), necessitando de técnicas específicas e adequadas para sua disposição no solo. Tal conclusão foi baseada nos resultados obtidos nos ensaios de solubilização e sumarizados na Tabela 04.

Tabela 04: Parâmetros utilizados por Rohde (1995) para classificação toxicológica das cinzas de São Jerônimo e Charqueadas.

| Parâmetro | cinza leve (SJ) | cinza grossa (SJ) | cinza leve (CH) | cinza pesada (CH) |
|------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| As (µg/L) | 51,4 | - | - | - |
| Al (mg/L) | 0,47 | 0,66 | 4,10 | 2,30 |
| Dureza (mg/L) | - | - | 611 | 511 |
| Fenol (mg/L) | 0,33 | 0,04 | 0,04 | 0,02 |
| Fluoreto (mg/L) | 2,0 | 1,5 | 1,8 | 2,5 |

A partir do que foi exposto, observa-se que, de uma forma geral, o fator predominante que controla a mobilização dos elementos no meio aquoso a partir de um depósito de cinzas é o pH. Geralmente, os elementos traços apresentam sua solubilidade reduzida conforme o pH do meio circundante torna-se mais básico. Desta forma, a composição das cinzas influencia decisivamente na mobilidade ou não dos metais no meio ambiente (Torrey, 1978).

2.5.3 Toxicidade dos elementos traços

Conforme previamente discutido, o carvão contém diversos elementos traços os quais, durante os processos de exploração, beneficiamento e combustão, são enriquecidos nas diversas fases geradas - rejeitos de carvão, cinzas leves e pesadas, ou são emitidos diretamente para a atmosfera. Determinados elementos traços como o Zn e Mn podem ser benéficos ao ambiente, entretanto, em concentrações suficientemente altas, podem ser poluentes tóxicos.

Torrey (1978) observou que os elementos Fe, Al e Mn, os quais frequentemente são lixiviados das pilhas de rejeitos em grandes quantidades, podem ser prejudiciais aos solos, plantas e vida aquática. Por exemplo, quantidades tão pequenas quanto 400 ppm de Fe ou Al nos solos resultam na morte de sementes de pinos, enquanto que determinadas espécies de peixes podem ser mortas com concentrações menores que 0,5 ppm. Soluções contendo 2,5 ppm de Ni, 5 ppm de Cu, 25 ppm de Zn, 250 ppm de Mn foram reportadas como tóxicas para pinheiros, e concentrações de Cu entre 1,5 e 11,6 ppm mataram diversas espécies de peixes em 24 hs. Na realidade, a notória dificuldade de desenvolvimento de vegetação em muitos rejeitos ácidos de carvão deve-se à presença de quantidades significativas e tóxicas de Fe, Al e Mn presentes nestes materiais. Outros elementos presentes nos rejeitos de carvão e considerados perigosos incluem o Be, Ni, Co, Cu e Y.

Em relação aos elementos presentes nas cinzas de carvão, Querol *et al.* (1995) relataram que certos compostos contendo As, Cd, Cr e Ni podem ser carcinogênicos ao

homem. Em experimentos realizados com animais, os elementos Be, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Ti e Zn também têm apresentado propriedades carcinogênicas.

A acumulação de elementos traços pela vegetação terrestre desenvolvida nas proximidades de lagoas de disposição de cinzas ou em depósitos de cinzas tem sido examinada nos últimos anos, observando-se concentrações elevadas de B, Se, Ni, As, Cu, Co e Zn. Outros estudos reportaram a acumulação de diversos elementos potencialmente tóxicos, principalmente Se, Cd, As e Zn, nas faunas de vertebrados e invertebrados bem como na vegetação aquática de áreas de disposição de cinzas em lagos (Chadwick *et al.*, 1987).

A seguir, serão comentados alguns aspectos relativos à importância e toxicidade (crônica) dos principais elementos observados nos carvões, rejeitos e cinzas de carvão (Moore, 1991):

- Alumínio (Al) - concentração média na crosta - 8 % : a importância ambiental do Al tem aumentado consideravelmente nos últimos anos devido ao aumento de sua mobilidade promovido a partir da acidificação das águas. Tal fato tem promovido a formação e/ou resolubilização de complexos inorgânicos e orgânicos de Al nas águas superficiais. Em determinadas concentrações o Al é tóxico para plantas (algas) e peixes, sendo que o valor máximo permitido para proteção da vida aquática no Canadá e países europeus é de (i) 0,005 mg/L (pH<6,5; Ca<4 mg/L) e (ii) 0,1 mg/L (pH>6,5; Ca>4mg/L). Para o homem, o principal problema associado a altas concentrações de Al é a doença de Alzheimer. O valor recomendado para água potável (EUA, Canadá e países europeus) varia de 0,05 a 0,2 mg/L.
- Cádmio (Cd) - concentração média na crosta - 0,2 mg/kg: o Cd é de considerável importância ambiental e para a saúde devido a sua alta mobilidade e toxicidade para diversas formas de vida, possuindo propriedades carcinogênicas reconhecidas para os animais. Os problemas de saúde para o homem associados com o Cd relacionam-se a disfunções renais, bem como ao seu potencial efeito carcinogênico. O valor recomendado para água potável (EUA, Canadá e países europeus) é de 0,005 mg/L.
- Cromo (Cr) - concentração média na crosta - 100 mg/kg: o Cr⁺⁶ é, geralmente, moderadamente tóxico para algas e outras plantas aquáticas. Para os peixes tanto os compostos de Cr⁺⁶ quanto de Cr⁺³ são considerados tóxicos. Para o homem, os compostos de Cr⁺⁶ são mais tóxicos do que Cr⁺³. Alguns compostos de Cr⁺⁶ solúveis em água são freqüentemente mutagênicos e carcinogênicos e outros, insolúveis (cromatos de Ca, Pb, Sr,

- Zn) podem ser carcinogênicos. O valor recomendado para água potável (EUA, Canadá e países europeus) é de 0,05 mg/L.
- Cobalto (Co) - concentração média na crosta - 25 mg/kg: apesar das baixas concentrações de Co nas águas superficiais, ele é potencialmente tóxico. O Co é constituinte da vitamina B₁₂, essencial aos homens, sendo moderadamente tóxico para a maior parte das espécies aquáticas (mais tóxico que Cr⁺³, Cr⁺⁶, Mn⁺⁷, Mo⁺⁶ e muito menos tóxico do que Al⁺², Cd⁺² e Cu⁺²). No homem, o Co pode causar perda parcial ou total do olfato, problemas gastrointestinais, trombozes, problemas de tireóide,.... Algumas espécies tem sido relatadas como carcinogênicas para ratos. O valor recomendado para água potável (EUA, Canadá e países europeus) é de 1,00 mg/L.
 - Cobre (Cu) - concentração média na crosta - 50 mg/kg: o Cu é um elemento essencial em diversas reações enzimáticas dos mamíferos. É considerado altamente tóxico para a maior parte das espécies de plantas aquáticas, sendo utilizado, rotineiramente, como algicida e herbicida. Também é altamente tóxico para a maior parte das espécies de invertebrados e peixes. O valor recomendado para água potável (EUA, Canadá e países europeus) é de 1,00 mg/L.
 - Ferro (Fe) - concentração média na crosta - 5 %: é um elemento essencial para animais e plantas. Em águas pode limitar, direta ou indiretamente o crescimento de algas. É essencial no transporte do oxigênio no sangue de todos os vertebrados e de alguns invertebrados. Embora o Fe seja considerado de pouca significância toxicológica, freqüentemente é ele que controla as concentrações dos demais elementos, incluindo diversos metais pesados tóxicos. O Fe⁺³ é moderadamente tóxico para diversas espécies de plantas aquáticas e, juntamente com o Fe⁺², para a maior parte das espécies de invertebrados. O valor recomendado para água potável (EUA, Canadá e países europeus) é de 0,3 mg/L (padrão estético).
 - Chumbo (Pb) - concentração média na crosta - 15 mg/kg: chumbo inorgânico é moderadamente tóxico para plantas aquáticas (mais tóxico do que Cr, Mn, Ba, Zn e Fe e menos tóxico do que Cd, Hg, Cu). O chumbo atua sinergicamente com combinações de Cu e Zn e com Cu, Zn e H⁺. Como a maior parte dos metais, sua complexação com ácidos húmicos, outras moléculas orgânicas e ligantes inorgânicos pode reduzir sua toxicidade na maior parte das espécies de plantas estudadas. Para plantas aquáticas, é geralmente assumido que compostos orgânicos de chumbo, particularmente tetraetil de chumbo, são mais tóxicos do que os derivados metilados ou compostos inorgânicos. Efeitos crônicos

tóxicos (redução da capacidade reprodutiva) tem sido reportados em espécies de invertebrados em concentrações tão pequenas quanto 0,019-0,025 mg/L. Para peixes também têm sido observados efeitos crônicos tóxicos relacionados com chumbo inorgânico a concentrações menores do que 0,010 mg/L. Em relação ao homem, diversos efeitos crônicos tóxicos tem sido reportados: perda de apetite, constipação, anemia, fraqueza, insônia, dores musculares, hipertensão, disfunção renal, danos ao sistema nervoso periférico,... Em relação às suas propriedades carcinogênicas, existem evidências experimentais de tumores renais para chumbo inorgânico após ingestão de altas doses em ratos. A Agência Internacional de Pesquisa do Câncer classifica o chumbo dentro do Grupo 3: evidências cancerígenas inadequadas em homens e suficientes evidências cancerígenas para alguns sais de chumbo em animais. O valor recomendado para água potável (EUA, Canadá e países europeus) é de 0,05 mg/L, sendo que estudos recentes têm demonstrado que este valor deveria ser reduzido para 0,02 mg/L.

- Manganês (Mn) - concentração média na crosta - 950 mg/kg: o Mn é um elemento traço essencial para plantas e animais. Em águas, pode limitar, direta ou indiretamente, o crescimento de algas. É também um componente essencial de vários sistemas enzimáticos em animais. Embora o Mn seja considerado de pouca significância toxicológica, ele pode controlar as concentrações dos demais elementos, incluindo diversos metais pesados tóxicos. O Mn^{+2} varia de fraco a moderadamente tóxico para a maior parte das espécies de plantas aquáticas e invertebrados. Os efeitos crônicos tóxicos para o homem são reportados em estudos com mineiros, resultando em problemas no sistema nervoso central, afetando as funções neuro-transmissoras. O valor recomendado para água potável (EUA, Canadá e países europeus) é de 0,05 mg/L (valor estético).
- Níquel (Ni) - concentração média na crosta - 75 mg/kg: o Ni^{+2} é moderado a altamente tóxico para a maior parte das espécies de plantas aquáticas. Já para os invertebrados, o Ni^{+2} é um dos agentes inorgânicos menos tóxicos, sendo relativamente não-tóxico para peixes. Para os homens, algumas formas de Ni são conhecidas pelo seu potencial carcinogênico, principalmente no desenvolvimento de câncer respiratório, não havendo, entretanto, evidências de seu potencial carcinogênico a partir da ingestão de Ni na comida ou em águas.
- Enxofre (S): concentração média na crosta - 260 mg/kg: o S apresenta grande importância ambiental visto que ele se complexa com diversos agentes tóxicos, matéria orgânica e hidrogênio, sendo o principal agente da acidificação das águas em geral. A acidificação das

águas tem um efeito negativo na saúde humana uma vez que aumenta a mobilidade de diversos elementos pesados tóxicos, especialmente Cu, Cd, Pb, Hg e Al. O valor recomendado para água potável (EUA, Canadá e países europeus) é de: (i) para sulfato: 250 - 400 mg/L (estético - sabor), (ii) para sulfeto: 0,05 mg/L (estético).

- Zinco (Zn) - concentração média na crosta - 70 mg/kg: a toxicidade do zinco em plantas aquáticas é altamente variável com efetiva concentração permitida variando de <0,01 a >100 mg/L. O Zn^{+2} é moderadamente tóxico para a maior parte das espécies de peixes. O valor recomendado para água potável (EUA, Canadá e países europeus) é de 5,0 mg/L (estético - sabor).

2.6 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

2.6.1 Forma de ocorrência e propriedades

Parte da água da precipitação atmosférica infiltra-se no solo, onde podemos distinguir duas zonas principais (Figura 08), de acordo com a proporção relativa do espaço poroso ocupado pela água (Caicedo, 1993):

- zona de aeração: os poros contêm água e ar (ou vapor de água). Está limitada pela superfície do terreno e pela linha de saturação. Pode-se identificar três sub-zonas: (i) sub-zona de água do solo (cinturão de umidade onde as plantas se desenvolvem); (ii) sub-zona intermediária; (iii) sub-zona capilar.
- zona de saturação: todos os espaços vazios encontram-se completamente ocupados pela água. Está limitada superiormente pela linha de saturação (superfície piezométrica) e inferiormente por uma barreira impermeável. Na linha de saturação a pressão da água é igual à pressão atmosférica de água do solo (cinturão de umidade onde as plantas se desenvolvem).

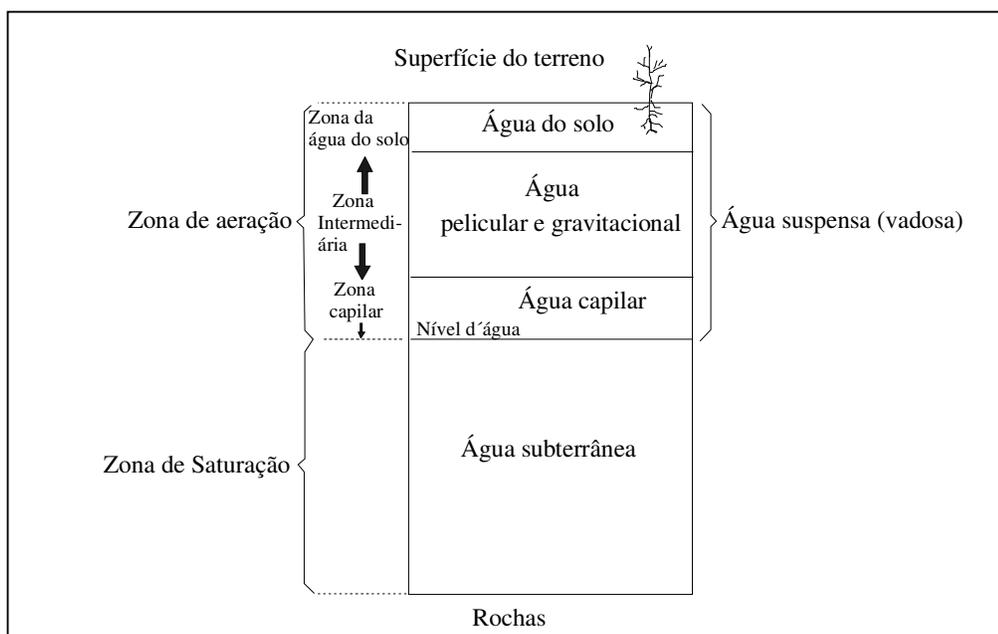


Figura 08: Divisão da água abaixo da superfície (modificado de Caicedo, 1993).

Toda a água contida abaixo da zona de aeração, ou seja, na zona de saturação é denominada de água subterrânea. Dependendo da interação água-material geológico, os sistemas hidrogeológicos serão classificados em (Ramos *et al.*, 1989):

- aquíferos: são formações geológicas com suficiente permeabilidade para armazenar e transmitir quantidades significativas de água, sob gradientes naturais. A maioria dos aquíferos desenvolvidos na maioria dos países do mundo, com altas vazões, consistem de areias e cascalhos inconsolidados encontrados em planícies costeiras, vales aluviais e depósitos glaciais. No Brasil, além destes tipos, também são aquíferos adequados os arenitos (Ex: arenito Botucatu), basaltos fraturados (Ex: Fm. Serra Geral) e calcários com canais formados por dissolução e fraturas. Em algumas áreas, rochas cristalinas fraturadas, tal como granitos, tem sido perfuradas para o suprimento de água, mas as vazões são em geral bem baixas, se comparadas às dos aquíferos de areia e de cascalho.
- aquitardes: são formações de baixa permeabilidade que armazenam água mas não podem suprir poços de bombeamento. Eles podem, contudo, transmitir água suficiente através de enormes áreas, tornando-se importantes em estudos regionais de suprimento de água. As camadas de argilas e de folhelhos que separam muitos aquíferos confinados são bons exemplos de aquitardes transmitindo água através de drenança vertical. Eles são tipicamente menos permeáveis em mais de uma a duas ordens de grandeza do que o

material geológico do aquífero que eles confinam ou semiconfinam. Em estudos de aquíferos, aquitardes são também conhecidos como camadas confinantes drenantes.

- aquiclude: pode ser considerado um exemplo extremo de um aquitarde. É utilizado para descrever materiais geológicos que são impermeáveis à água. Hidrogeólogos utilizavam este termo anos atrás para caracterizar materiais que transmitem fluxos extremamente baixos de água. Como todos os materiais transmitem água em um grau ou outro (em alguns casos pode ser somente de alguns metros em mil anos), os materiais impermeáveis, estritamente falando, não existem.

Os aquíferos podem ser classificados em dois tipos principais: não-confinados e confinados, dependendo da presença ou ausência de um lençol freático. Um lençol freático é a superfície superior da zona de saturação que está em contato direto com a pressão do ar atmosférico, através dos espaços vazios no material geológico acima. Ao longo dessa superfície a pressão é considerada como sendo a atmosférica. A profundidade até esse nível d'água pode ser inferior a 10 m em regiões úmidas ou superior a 100 m em climas secos. A Figura 09 mostra, de forma esquemática, os seguintes tipos de aquíferos (Ramos *et al.*, 1989):

- aquíferos não-confinados, também denominado freáticos ou livres (aquífero A na Figura 09): a superfície freática está sob pressão atmosférica, o fluxo é horizontal e o nível de água no poço localizado na posição 7 é virtualmente o mesmo que o nível de água fora do poço. O termo “não-confinado” significa que a superfície freática não está confinada ou impedida de movimentar-se para cima e para baixo, através de materiais menos permeáveis, tais como camadas de argilas.
- aquíferos suspensos (localizações 3 e 4 na Figura 09): tipo de aquífero não-confinado onde a água tem extensão horizontal limitada. No caso da localização 4 (Figura 09) a superfície do lençol freático intercepta a superfície do solo, produzindo uma nascente surgente temporária. Dependendo da extensão e da espessura saturada, os aquíferos suspensos podem ser fontes adequadas para poços residenciais individuais, sendo inadequados para poços municipais bombeando por longos períodos.
- aquíferos confinados (aquífero B na Figura 09): são formações geológicas permeáveis que são contornados abaixo e acima por materiais relativamente impermeáveis e que estão sob pressões maiores do que a pressão atmosférica. Estes estratos de baixa permeabilidade separam os materiais que formam o aquífero de permeabilidade mais alta do contato direto com a pressão atmosférica e impedem o movimento ascendente e descendente da água.

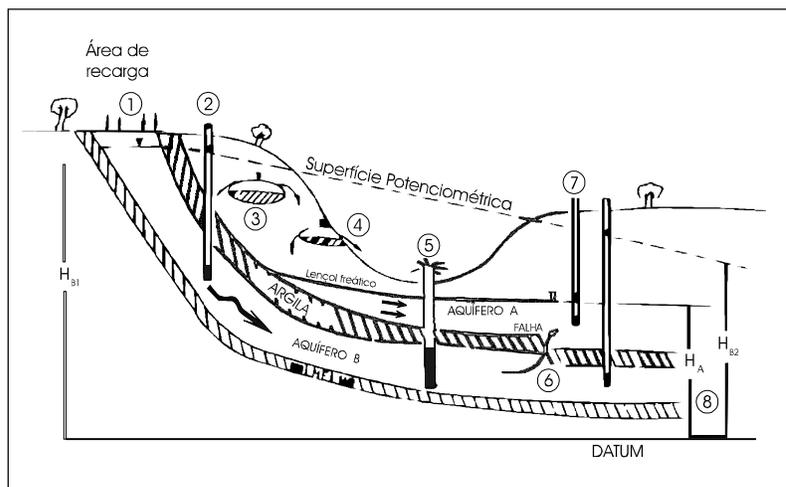


Figura 09: Tipos de aquíferos (Ramos *et al.*, 1989), onde Aquífero A - aquífero não confinado (freático); Aquífero B - aquífero confinado; 1 - área de recarga do aquífero confinado; 2 - poço em aquífero confinado; 3 e 4 - aquíferos suspensos; 5 - poço surgente; 6 - migração de água do aquífero B para o aquífero A; 7 - poço em aquífero não confinado (livre); 8 - aquítarde (folhelho); H_A - altura do nível freático no aquífero A; H_{B1} e H_{B2} - alturas dos níveis d'água no aquífero B.

Os níveis de água nos poços que penetram um aquífero freático sob condições de fluxo horizontal serão iguais ao nível do lençol freático em torno desses poços. Quando estes níveis são unidos, fica definido um plano, chamado lençol freático ou superfície potenciométrica. Essa superfície móvel descreve não somente o potencial total da água mas é literalmente o contorno físico do lençol freático (Ramos *et al.*, 1989).

A água subterrânea está sempre em movimento de áreas de maior potencial para áreas de menor potencial. As elevações das superfícies potenciométricas são medidas a partir de um datum único, em metros (Figura 10). Quanto mais alta for a elevação, mais alto é o potencial (corresponde à altura da superfície potenciométrica acima de um dado datum). Observando-se a Figura 10 nota-se que o aquífero confinado 3 (com sua superfície potenciométrica acima da superfície do solo) possui potencial mais alto do que o aquífero 2, logo a água fluirá do aquífero 3 em direção ao aquífero 2.

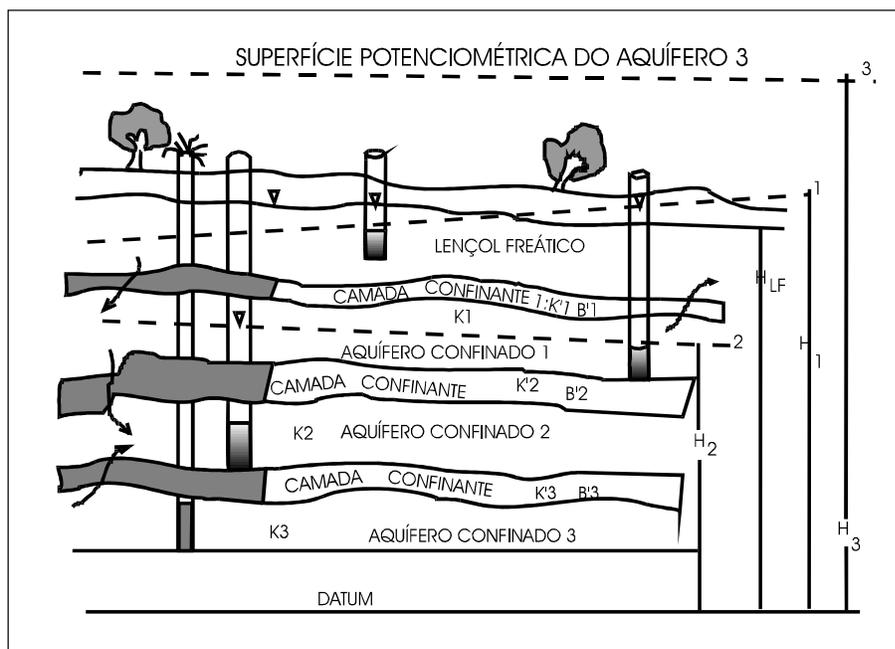


Figura 10: Superfícies potenciométricas e drenagens em aquíferos freático e confinado (Ramos *et al.*, 1989), onde H_{LF} , H_1 , H_2 e H_3 - elevações das superfícies potenciométricas; K_1 , K_2 , K_3 - condutividades hidráulicas; $K'1$, $K'2$, $K'3$ - camadas confinantes; $B'1$, $B'2$, $B'3$ - espessuras dos aquíferos.

Algumas propriedades hidrogeológicas caracterizam os diferentes aquíferos em termos de suas propriedades de fluxo e armazenamento. As principais propriedades de fluxo são a condutividade hidráulica e a transmissividade, ao passo que as características de armazenamento incluem a porosidade, o coeficiente de armazenamento e a vazão específica.

Segundo Ramos *et al.* (1989), a condutividade hidráulica ($K = k \cdot \gamma / \mu$) é uma medida da habilidade do aquífero de conduzir água sob a influência do gradiente de uma superfície potenciométrica, sendo uma propriedade tanto do meio poroso como do líquido que o atravessa. O meio poroso é caracterizado por k (permeabilidade intrínseca), enquanto μ (viscosidade dinâmica do fluido) e γ (peso específico $\gamma = \rho g$, onde ρ é a densidade e g é a aceleração da gravidade) são propriedades do fluido em particular. Areias e cascalhos apresentam altos valores de k (10^{-2} a 10 cm/s) enquanto que folhelhos e argilas possuem valores relativamente baixos (10^{-10} a 10^{-7} cm/s). A Tabela 05 apresenta alguns valores de condutividade hidráulica comuns a diversos materiais geológicos, cabendo destacar que quanto maior a condutividade, melhor o aquífero conduz água.

Tabela 05: Valores de condutividades hidráulicas (K) para vários materiais geológicos (Freeze e Cherry, 1979).

| Materiais Geológicos | K (cm/s) | K (m/s) |
|---|----------------------|-----------------------|
| Rochas ígneas e metamórficas não fraturadas | $10^{-11} - 10^{-8}$ | $10^{-13} - 10^{-10}$ |
| Folhelhos | $10^{-11} - 10^{-7}$ | $10^{-13} - 10^{-9}$ |
| Arenitos | $10^{-8} - 10^{-4}$ | $10^{-10} - 10^{-6}$ |
| Calcários | $10^{-7} - 10^{-4}$ | $10^{-9} - 10^{-6}$ |
| Rochas ígneas e metamórficas fraturadas | $10^{-6} - 10^{-2}$ | $10^{-8} - 10^{-4}$ |
| Basalto permeável | $10^{-5} - 1$ | $10^{-7} - 10^{-2}$ |
| Calcário cárstico | $10^{-4} - 1$ | $10^{-4} - 10^{-2}$ |
| Argila marinha não intemperizada | $10^{-10} - 10^{-7}$ | $10^{-12} - 10^{-9}$ |
| Filito | $10^{-10} - 10^{-4}$ | $10^{-12} - 10^{-6}$ |
| Silte, Loess | $10^{-7} - 10^{-3}$ | $10^{-9} - 10^{-5}$ |
| Areia siltosa | $10^{-5} - 10^{-1}$ | $10^{-7} - 10^{-3}$ |
| Areia pura | $10^{-4} - 1$ | $10^{-6} - 10^{-2}$ |
| Cascalho | $10^{-1} - 10^2$ | $10^{-3} - 1$ |

A transmissividade, definida por $T=K.b$, está diretamente relacionada à condutividade hidráulica K. É definida como sendo a taxa volumétrica de fluxo através de uma seção de largura unitária e altura iguais à espessura b do aquífero quando o gradiente hidráulico é 1.

A porosidade total de um material geológico é definida como sendo o volume de vazios dividido pelo volume total, representando a quantidade máxima de água que um dado volume de material geológico pode conter.

O volume de água liberado ou absorvido por um aquífero quando a carga é aumentada ou diminuída pode ser quantificado pelo coeficiente de armazenamento de um aquífero. Nos aquíferos freáticos o coeficiente de armazenamento é chamado de vazão específica, S_y e comumente varia de 0,03 a 0,40. Enquanto as areias e cascalhos estão tipicamente dentro do intervalo de 0,2 a 0,35, alguns tilitos podem ter valores de 0,05.

2.6.2 Qualidade das águas subterrâneas

Segundo Custodio & Llamas (1983), a água é considerada como o solvente mais abundante, capaz de incorporar grande quantidade de substâncias ao entrar em contato com os terrenos pelos quais passa. As águas subterrâneas têm uma grande capacidade de dissolver materiais considerando-se as maiores superfícies de contato, lentas velocidades de circulação e maiores pressões e temperaturas a que estão submetidas. Pode-se dizer, de forma genérica,

que as concentrações salinas das águas subterrâneas são superiores às das águas superficiais, enquanto que a concentração dos sólidos em suspensão e de matéria orgânica são menores.

Em águas subterrâneas naturais, a maioria das substâncias dissolvidas se encontram em estado iônico, sendo que os íons mais frequentemente observados (íons fundamentais) são: Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3H^- , NO_3^- , CO_3^{2-} , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ . Os gases mais comumente encontrados são o CO_2 e O_2 . Entre as substâncias dissolvidas pouco ionizáveis ou em estado coloidal destacam-se os ácidos e os ânions derivados da sílica. Os íons restantes e substâncias dissolvidas se encontram em pequenas quantidades, sendo denominados íons menores e elementos traços. Os íons menores mais importantes (concentrações entre 0,01 - 10 ppm) são: Fe^{++} , NO_2^- , F^- , NH_4^+ , Sr^{++} . Em concentrações entre 0,0001 e 0,1 ppm encontram-se os seguintes íons: Br^- , S^{--} , PO_3^{-3} , BO_3H_2^- , NO_2^- , OH^- , I^- , Fe^{+++} , Mn^{++} , NH_4^+ , H^+ , Al^{+++} ,... Como elementos traços destacam-se As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, Ba, V, Hg, U.

Algumas características químicas dos principais íons e substâncias dissolvidas nas águas subterrâneas podem ser visualizadas na Tabela 06 (Custodio & Llamas, 1983).

Dentre os parâmetros físico-químicos, o pH e o potencial de oxidação-redução (Eh) do meio exercem influência significativa nos processos de mobilidade dos íons e das substâncias químicas.

Segundo Brownlow (1979), pode-se considerar que o Eh reflete a abundância de elétrons no meio: um grande número de elétrons disponíveis promoveria um ambiente redutor, enquanto que a ausência de elétrons disponíveis promoveria um ambiente oxidante. De forma similar, o pH representa a abundância de prótons: um grande número de prótons disponíveis promoveria um ambiente ácido, enquanto que a escassez de prótons disponíveis promoveria um ambiente básico.

Os valores de pH e Eh nos diversos meios são controlados por vários fatores, destacando-se: (i) os processos orgânicos de fotossíntese, respiração e decaimento; (ii) reações de oxidação-redução envolvendo Fe, S e C; (iii) o balanço entre CO_2 dissolvido e carbonato de cálcio nas águas naturais. Nas águas subterrâneas, os valores normais de pH (5 - 9) e Eh (4500 - 100 mV) são principalmente controlados pelas reações orgânicas e pela interação com os aquíferos (Brownlow, 1979).

A Figura 11 apresenta as posições aproximadas de alguns ambientes naturais em termos de Eh e pH, notando-se que a parte superior do diagrama representa condições oxidantes.

Tabela 06: Características químicas dos principais íons e substâncias dissolvidas nas águas subterrâneas (Custodio & Llamas, 1983).

| Íon | Características |
|---|---|
| Cl ⁻ | forma sais em geral muito solúveis, muito estáveis em solução e dificilmente precipitáveis. Não se oxida nem reduz em águas naturais. Em geral, associa-se com Na ⁺ . |
| SO ₄ ⁻² : | forma sais moderadamente solúveis a muito solúveis, com exceção dos de Sr (60 ppm) e Ba (2 ppm). Em meios redutores com abundante matéria orgânica pode sofrer uma redução bacteriana a S ou S ⁻² , mas, em geral, é estável. |
| HCO ₃ ⁻ e CO ₃ ⁻² | são íons determinantes nas medidas de alcalinidade das águas devido a sua capacidade de consumo de ácidos, criando uma solução tampão. Não são oxidáveis nem reduzíveis em águas naturais. Podem precipitar com muita facilidade como CaCO ₃ . |
| Na ⁺ | solubilidade muito elevada, sendo difícil de precipitar. |
| Ca ⁺⁺ | forma sais desde moderadamente solúveis a muito solúveis. É facilmente precipitável como CaCO ₃ . Sua química está fortemente associada aos íons HCO ₃ ⁻ e CO ₃ ⁻² em muitas águas naturais, podendo precipitar ou dissolver com facilidade devido a mudanças no pH e p _{parcial} de CO ₂ . |
| Mg ⁺⁺ | possui propriedades similares ao Ca ⁺⁺ porém é mais solúvel e um pouco mais difícil de precipitar. |
| Ferro | sua química é relativamente complexa pois podem existir nos estado de valência +2 e +3. A estabilidade dos íons Fe ⁺⁺ , Fe ⁺⁺⁺ , Fe(OH) ⁺⁺ , Fe(OH) ⁺ em relação aos precipitados ou colóides de Fe(OH) ₃ e Fe(OH) ₂ depende do pH, Eh e da composição da solução. Certas substâncias orgânicas e inorgânicas podem atuar formando complexos. |
| S ⁻² e H ₂ S | são facilmente oxidáveis a S ₂ , SO ₃ ⁻² ou SO ₄ ⁻² , podendo ser facilmente precipitados, visto que formam diversos sais pouco solúveis. São característicos de meios redutores. |
| Mn ⁺⁺ | apresenta um comportamento similar ao Fe, podendo ser encontrado nos estados de valência +2, +3, +4. |
| Al | o Al é dificilmente encontrado em solução, aparecendo, geralmente, fortemente retido nas argilas. Somente existe em quantidades importantes como Al ⁺⁺⁺ em águas muito ácidas ou como Al ₂ O ₄ ⁻ ou HAl ₂ O ₄ ⁻ em águas básicas. Pode também estar presente sob a forma coloidal como H ₂ Al ₂ O ₄ . |

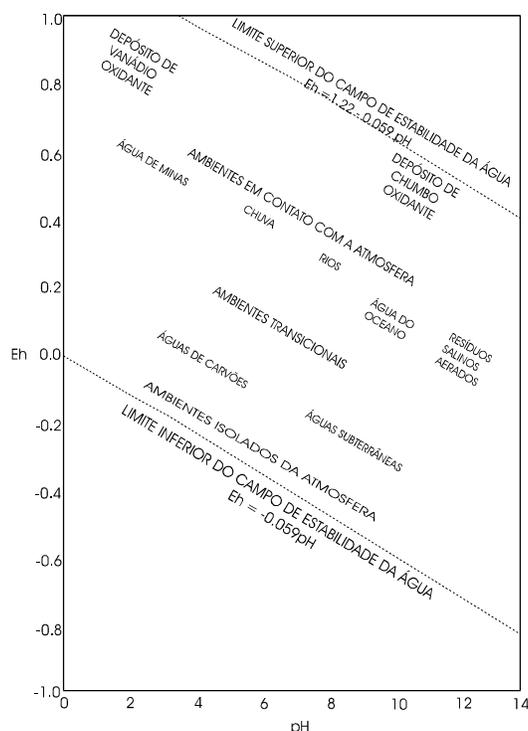


Figura 11: Posição aproximada de alguns ambientes naturais sob condições de Eh x pH (Brownlow, 1979).

Observa-se que o Eh em meio natural apresenta uma variação ampla de valores positivos, com características oxidantes (águas superficiais) até valores negativos, com características redutoras (águas subterrâneas profundas).

Exemplificando a aplicação de diagramas de Eh x pH, observa-se que o diagrama para o Fe (Figura 12) indica que a mudança de Fe^{++} para Fe^{+++} depende de ligeiras modificações no pH e no Eh do ambiente. O diagrama indica também que a oxidação do ferro dá-se de forma mais completa em solução alcalina, enquanto que as maiores concentrações de ferro dissolvido encontram-se, com freqüência, nas águas ligeiramente ácidas. Observa-se que as águas subterrâneas apresentam, geralmente, somente Fe^{++} dissolvido (às vezes FeOH^+). Tal relação é fortemente dependente do pH, uma vez que se os valores de pH forem elevados, não existirá Fe dissolvido.

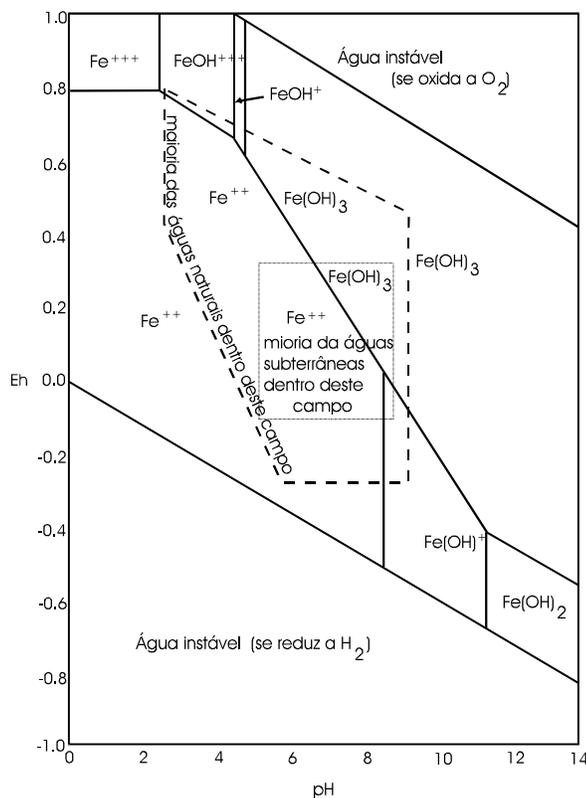


Figura 12: Diagrama de Eh x pH para o Fe (Custódio & Llamas, 1983).

Todos os parâmetros acima comentados são muito importantes na avaliação da qualidade das águas subterrâneas e, conseqüentemente, da sua poluição. Assim sendo, segundo Foster *et al.* (1993), as diferentes normas ou guias de potabilidade da água (Tabela 07) são elaborados visando subsidiar a população em geral na determinação do grau de poluição que pode ser tolerado e conseqüentemente, no planejamento e controle da poluição das águas subterrâneas. Os guias da Organização Mundial da Saúde - OMS sobre a qualidade da água potável baseiam-se em dois critérios: (i) sua importância para a saúde (efeito tóxico, cacinogênico, mutagênico), que é de primeira prioridade; (ii) aspectos organolépticos ou estéticos (sabor, cor, cheiro), que são de importância secundária, sempre que se garanta que o consumidor aceitará a água e não optará por uma fonte aparentemente melhor, mas de risco maior para a saúde. Muitos dos constituintes inorgânicos mencionados nas normas, destacando-se cloreto, ferro, manganês, sódio e sulfato, podem ser encontrados amplamente nas águas subterrâneas por contribuição natural e/ou devido à poluição.

Tabela 07: Normas de potabilidade para águas (CETESB, 1990).

| Param | Unid | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---------|-------|------|---------|------|---------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|------|
| pH | - | - | 6,5-8,5 | 5-9 | 6,5-8,5 | - | 9,5 | 6,5-8,5 | 6,5-8,5 | 6,5-9,5 | 6,5-8,5 | - |
| Cond. | µS/cm | - | - | - | - | - | - | - | - | 2000 | - | - |
| Cd | mg/L | 0,01 | 0,005 | 0,01 | 0,005 | 0,01 | 0,005 | 0,005 | 0,01 | 0,005 | - | 0,01 |
| Pb | mg/L | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,1 | 0,1 |
| Cr | mg/L | 0,05 | 0,05 | - | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | - | - |
| Nitrato | mg/L | 10 | 10 | 10 | 10 | - | 50 | 10 | 10 | 50 | 10 | - |
| Nitrito | mg/L | - | - | - | - | - | 0,1 | 1,0 | - | 0,1 | - | - |
| Ni | mg/L | - | - | - | - | - | 0,05 | - | - | 0,05 | - | - |
| K | mg/L | - | - | - | - | - | 12 | - | - | 12 | - | - |
| Cl | mg/L | 600 | 250 | 250 | 250 | - | - | 250 | 250 | - | 350 | - |
| Cu | mg/L | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,005 | - | 1,0 | 1,0 | - | 1,0 | - |
| Fe | mg/L | 1,0 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,1 |
| Mn | mg/L | 0,5 | 0,1 | 0,05 | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,1 | - |
| Mg | mg/L | - | - | - | - | - | 50 | - | - | 50 | 0,1 | - |
| Na | mg/L | - | - | - | 200 | - | 175 | - | - | 150 | - | - |
| STD | mg/L | 1000 | 1000 | - | 1000 | - | - | 500 | 500 | - | - | - |
| Sulfato | mg/L | - | 400 | 250 | 400 | - | 250 | 500 | - | 240 | 500 | - |
| Zn | mg/L | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | - | 5,0 | - | - | 5,0 | - |

Normas: **1.** Decreto Federal nº 79637 09.03.77 Portaria 56 BSB-13.3.77; **2.** Portaria 36 Ministério da Saúde 19.1.90; **3.** Decreto Estadual 12.486 20.10.78 NTA-60; **4.** Organização Mundial da Saúde - OMS (recom.); **5.** Organização Mundial da Saúde - OMS (recom. p/ Europa); **6.** Comunidade Econômica Européia - CEE; **7.** Canadá; **8.** EUA; **9.** Alemanha; **10.** URSS; **11.** Japão

A preocupação pela águas subterrâneas, segundo Foster *et al.* (1993) se relaciona principalmente com aquíferos não-confinados ou freáticos, sobretudo em lugares onde a zona não-saturada é delgada e o lençol freático pouco profundo. Expressivos riscos de poluição

podem ocorrer inclusive onde os aquíferos são semiconfinados ou quando os aquíferos superficiais não possuem a espessura necessária. Em geral, os abastecimentos de águas subterrâneas derivados dos aquíferos mais profundos e altamente confinados não serão afetados por um evento de poluição a partir da superfície, a não ser nos casos em que estiverem envolvidos poluentes persistentes (compostos orgânicos, por exemplo).

A partir do crescente interesse na utilização de águas subterrâneas para o abastecimento público e privado começaram a ser desenvolvidos estudos a respeito do grau de pureza das águas subterrâneas, percebendo-se que a composição destas está intimamente associada com a geologia local, refletindo a composição das rochas pelas quais passam, conforme já comentado. Um exemplo de tal relação são as águas subterrâneas de terrenos cársticos que, geralmente, apresentam alta quantidade de sais dissolvidos (carbonatos de Mg, Ca, Na,...), além de características corrosivas (alta concentração de CO₂). Observou-se ainda que uma parcela bastante significativa das águas subterrâneas também apresenta-se, da mesma forma que as águas superficiais, contaminada pela ação antrópica devido a diversas atividades, entre as quais cita-se (Foster *et al.*, 1993):

- urbanização com densidade populacional elevada e sistema de saneamento sem rede coletora de esgoto;
- inadequada disposição de efluentes líquidos industriais e de resíduos sólidos industriais e domésticos (lixões, fossas e esgotos);
- má disposição de resíduos advindos de atividades de mineração;
- aplicação de determinadas práticas de cultivos agrícolas, com o uso indiscriminado de pesticidas.

Contribuindo significativamente para a contaminação das águas subterrâneas, a mineração em geral, e a mineração de carvão em especial, é uma das atividades que produzem impactos ambientais negativos significativos, principalmente se o método de lavra empregado for inadequado ou se durante o desenvolvimento da mina não foram previstas atividades de recomposição do solo, tendo em vista seu uso posterior. O monitoramento sistemático das áreas degradadas pela mineração é um pré-requisito essencial para que os programas de recuperação inseridos no gerenciamento ambiental possam ser efetivamente implantados.

Gang & Langmuir (1974) estudaram os efeitos da drenagem ácida proveniente das atividades carboníferas nas águas superficiais e subterrâneas na Pensilvânia, USA. Tais autores observaram que:

- (i) os elementos Fe e Mn foram encontrados em concentrações elevadas em todas as amostras coletadas, ultrapassando os padrões de potabilidade para águas;
- (ii) as concentrações de Zn, Cr e Cd excederam os padrões em algumas amostras de águas subterrâneas coletadas;
- (iii) em geral, as concentrações dos elementos traços estudados apresentaram níveis mais elevados nas águas subterrâneas do que nas superficiais, indicando uma maior migração e enriquecimento nas primeiras.

Szczepanska & Twardowska (1987) analisando a composição química das águas de drenagem, superficiais e subterrâneas adjacentes a um depósito de rejeitos de carvão na Polônia reportaram mudanças negativas na qualidade destas águas devido à disposição destes rejeitos. A concentração dos sólidos totais dissolvidos nas águas estudadas aumentou de 6 a 14 vezes em comparação com águas naturais adjacentes ao depósito. As concentrações de sulfato aumentaram de 11 a 33 vezes e as de cloreto de 2,5 a 25 vezes. Além desses parâmetros, as concentrações de metais pesados, principalmente de Cu, Zn e Pb também tiveram um aumento significativo.

Bell *et al.* (1992) comentaram, brevemente, a influência de rejeitos de carvão nas águas subterrâneas de uma área localizada na Inglaterra, observando que as mesmas apresentavam altas concentrações de sulfato, cloretos, ferro e outros metais.

Huang & Lovell (1992) reportaram o efeito de cinzas pesadas norte-americanas sobre a qualidade das águas subterrâneas utilizando-se testes de lixiviação específicos para o estado de Indiana. Os resultados obtidos confirmaram o caráter não perigoso destas cinzas, com efeitos mínimos sobre a qualidade das águas subterrâneas.

Schubert (1979) apresentou os resultados de contaminação de águas subterrâneas obtidos a partir de estudos realizados durante três anos em um depósito de rejeitos de carvão disposto em Illinois, USA, para as fases de disposição inicial e de recuperação da área. As Tabelas 08 e 09 sumarizam os resultados obtidos.

Tabela 08: Valores médios de diversos parâmetros monitorados nos poços localizados anteriormente à fase de recuperação da área em estudo (Schubert, 1979).

| Poços | A* | B* | C* | D* | E* | F* | G* | H* |
|----------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| mín. pH | 2.3 | 6.2 | 3.2 | 4 | 6.7 | 4 | 6.84 | 7.1 |
| Alcal (mg/L) | 142 | 131 | 64 | 135 | 376 | 4.4 | 435 | 268 |
| Sulfato (mg/L) | 6330 | 329 | 1255 | 1064 | 856 | 3596 | 1719 | 433 |
| Ca (mg/L) | 490 | 88.5 | 438 | 249 | 304 | 435 | 500 | 137 |
| Mg (mg/L) | 246 | 41.9 | 80.4 | 108 | 96.5 | 149 | 279 | 70.1 |
| Na (mg/L) | 263 | 61 | 26.3 | 120 | 235 | 91 | 117 | 53.6 |
| K (mg/L) | 15.9 | 0.3 | 4 | 1.3 | 14.1 | 17.2 | 0.8 | 3.88 |
| Cd (mg/L) | 1 | < 0.01 | 0.09 | 0.01 | < 0.01 | < 0.01 | < 0.01 | < 0.01 |
| Cr (mg/L) | 0.46 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 |
| Cu (mg/L) | 1.22 | < 0.01 | 0.05 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 |
| Fe (mg/L) | 1367 | 0.24 | 119 | 2.61 | 6.89 | 933 | 0.21 | 0.039 |
| Máx. Fe (mg/L) | 6010 | 0.77 | 560 | 24.9 | 12.9 | 1840 | 0.35 | 0.2 |
| Mn (mg/L) | 24.2 | 0.45 | 9.28 | 7.26 | 0.55 | 16.9 | 0.16 | 0.26 |
| Máx. Mn (mg/L) | 62 | 0.74 | 18.6 | 51 | 0.8 | 41 | 0.29 | 1.26 |
| Ni (mg/L) | 1.52 | < 0.02 | 0.25 | 0.094 | 0.03 | 0.81 | 0.03 | < 0.02 |
| Zn (mg/L) | 59 | 0.02 | 6.64 | 0.734 | 0.096 | 28.4 | 0.097 | 0.192 |
| Máx. Zn (mg/L) | 252 | 0.05 | 23 | 10.4 | 0.115 | 40.5 | 0.104 | 1.95 |

* Localização dos poços agrupados da seguinte forma: **A.** poços distantes a menos de 30m da pilha nas direções norte, sul e oeste; **B.** poços distantes a menos de 30m da pilha na direção leste; **C.** poços localizados entre 30 e 60m da pilha nas direções oeste e sudoeste; **D.** poços localizados entre 60-190m da pilha na direção sul; **E.** poços localizados no material fino saturado disposto afastado do canal de drenagem; **F.** poços localizados no material fino saturado disposto próximo do canal de drenagem; **G.** poços localizados no aluvião; **H.** poços residenciais

Tabela 09: Valores médios de diversos parâmetros monitorados nos poços localizados posteriormente à fase de recuperação da área em estudo (Schubert, 1979).

| Poços | I* | J* | K* | L* | M* | N* | O* | P* | Q* |
|----------------|-------|-------|-------|--------|---------|--------|-------|--------|---------|
| mín. pH | 2.56 | 3.22 | 4.26 | 6.7 | 6.38 | 6.51 | - | - | 6.32 |
| Alcal (mg/L) | 42 | 203 | 186 | 212 | 498 | 539 | 88 | 484 | 212 |
| Sulfato (mg/L) | 21754 | 8012 | 3946 | 1414 | 853 | 1303 | 5800 | 475 | 600 |
| Ca (mg/L) | 421 | 477 | 411 | 376 | 233 | 339 | 468 | 202 | 202 |
| Mg (mg/L) | 919 | 646 | 575 | 205 | 129 | 263 | 469 | 123 | 104 |
| Na (mg/L) | 630 | 363 | 192 | 229 | 262 | 172 | 327 | 209 | 80 |
| K (mg/L) | 51.3 | 18.7 | 3.2 | 2.79 | 5.71 | 5.3 | 8.03 | < 0.5 | 3.27 |
| Cd (mg/L) | 3.06 | 0.904 | 0.051 | 0.006 | < 0.005 | 0.006 | 0.021 | 0.008 | < 0.010 |
| Cr (mg/L) | 0.817 | 0.336 | 0.012 | < 0.01 | < 0.02 | < 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.04 |
| Cu (mg/L) | 0.189 | 0.119 | 0.03 | 0.01 | 0.006 | 0.013 | 0.052 | < 0.01 | < 0.01 |
| Fe (mg/L) | 4172 | 1940 | 444 | 0.613 | 6.39 | 1.74 | 937 | 0.6 | 1.2 |
| Máx. Fe (mg/L) | 14170 | 11100 | 4800 | 2.03 | 30.1 | 11.27 | - | - | 12 |
| Mn (mg/L) | 82.7 | 60.1 | 90.6 | 2.11 | 4.59 | 3.14 | 30 | 0.2 | 0.2 |
| Máx. Mn (mg/L) | 329 | 194 | 645 | 2.34 | 10.8 | 12.6 | - | - | 1.68 |
| Ni (mg/L) | 6.56 | 3.39 | 1.26 | 0.04 | 0.02 | 0.06 | 0.97 | 0.06 | 0.01 |
| Zn (mg/L) | 322 | 136 | 22.5 | 0.02 | 0.019 | 0.105 | 34.6 | 0.23 | 0.083 |
| Máx. Zn (mg/L) | 1465 | 825 | 245 | 0.044 | 0.073 | 0.7 | - | - | 0.59 |
| Co (mg/L) | 1.9 | 1.06 | 1.17 | 0.027 | 0.025 | 0.038 | 0.36 | 0.04 | 0.034 |
| Pb (mg/L) | 0.393 | 0.254 | 0.125 | 0.07 | 0.045 | 0.093 | 0.13 | 0.03 | 0.042 |

* Localização dos poços agrupados da seguinte forma: **I.** poços localizados na base da pilha; **J.** poços localizado no till abaixo (< 5m) da pilha; **K.** poços localizados entre 5 e 30m da pilha; **L.** poços distantes a mais de 30m da pilha nas direções norte e oeste; **M.** poços localizados no material fino saturado; **N.** poços localizados no till disposto ao redor do material fino; **O.** poços localizados no material fino saturado disposto a menos de 5m do canal de drenagem; **P.** poços localizados no aluvião; **Q.** poços residenciais

Após a análise dos resultados, Schubert (1979) observou que a qualidade das águas subterrâneas nas proximidades da pilha de rejeitos de carvão (distante até 60 m), não apresentava melhorias mesmo na fase de recuperação sendo que, em determinados locais, a qualidade das águas piorou. A acidez e as concentrações da maioria dos metais somente foram elevadas nas proximidades da pilha de rejeito, caracterizando uma pequena pluma de contaminação. Assim sendo, com o aumento da distância da pilha de rejeitos (menores que 200m), os parâmetros medidos aproximaram-se dos níveis de referência da região.

Em determinadas regiões do sul do Brasil - estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, tem sido observados problemas ambientais decorrentes da deposição de rejeitos e cinzas de carvão, com a presença de quantidades significativas destes resíduos dispostos inadequadamente, acarretando acidificação e lixiviação dos metais pesados nos cursos d'água.

Os estudos conduzidos na década de 70 pelo IPH (1978) mostraram que diversos cursos d'água da região carbonífera de SC estavam contaminados por descarga indiscriminada de DAM.

Apesar de apresentar um comprometimento dos recursos hídricos menos crítico que SC, estudos realizados no estado do Rio Grande do Sul mostraram que a drenagem ácida da Mina de Candiota alterava o padrão de qualidade das águas a jusante da zona de lavra e dos mananciais subterrâneos adjacentes (Fiedler *et al.*, 1988; Martins *et al.*, 1987).

Além destes trabalhos, Machado *et al.* (1984; 1985 e 1987) apresentaram os resultados relativos à contaminação e vulnerabilidade das águas superficiais e subterrâneas nas áreas-piloto de Siderópolis (SC) e Candiota (RS). A metodologia de trabalho empregada consistiu na realização de trabalhos de campo e de laboratório, com a realização de (Machado, 1985): (i) cadastramento de nascentes e poços com nivelamento de pontos selecionados para elaboração do mapa piezométrico; (ii) determinações de pH, condutividade e temperatura em todos os pontos cadastrados; (iii) coleta de amostras d'água em determinados pontos anteriormente cadastrados, incluindo-se nascentes, poços, rios e lagoas; (iv) análise química das amostras coletadas, determinando-se: acidez, alcalinidade, sólidos totais, Ca^+ , Na^+ , Mg^{++} , K^+ , Cl^- , SO_4^- , HCO_3^- , CO_3^- , Fe^{++} , Fe^{+++} , Cd, Pb, Cu, Co, Cr, Al, Mn, Ni, Sr, Zn e V; (v) realização de testes de lixiviação em amostras de carvão, rejeitos de mineração, efluentes de rejeitos de lavador e cinzas, determinando-se pH, acidez, alcalinidade, Fe, Mn, Zn, Be, Cu, Pb, Cd e, em algumas amostras, As e B; (vi) instalação, na área de Siderópolis, de piezômetros com profundidade variando de 10 a 20 m, objetivando a determinação do sentido

e velocidade de deslocamento da água subterrânea através de traçadores radioativos. Após a aplicação desta metodologia e tratamento dos dados, constataram contaminação por Fe, Co, Mn, Ni, Zn, Al e Cu nas águas superficiais e por Fe, Cu, Zn, Pb, Mn, Cr, Al, Sr e Ni nas águas subterrâneas das áreas-alvo estudadas.

Na região de Charqueadas/São Jerônimo têm-se alguns trabalhos de cunho geral, destacando-se entre eles: (i) Luz (1991) que aborda a questão da disposição dos resíduos sólidos - cinzas de carvão, produzidas pela Usina Termelétrica de Charqueadas e chega à conclusão de que em condições adequadas de deposição em aterros controlados, as cinzas descartadas não comprometem os aquíferos adjacentes; (ii) Rohde (1995) que apresenta diversas caracterizações (física, hidrogeológica, químico-mineralógica, químico-toxicológica e radiológica) das cinzas leves e pesadas das Usinas Termoelétricas de São Jerônimo e Charqueadas.

Além destes, Teixeira *et al.* (1996) levantaram uma série de áreas de deposição inadequada de resíduos do processamento do carvão localizadas na região do Baixo Jacuí consideradas potencialmente poluidoras, cujas águas superficiais apresentaram altos teores de sólidos suspensos, pH ácido e metais dissolvidos provenientes dos efluentes de drenagem de mina e do beneficiamento de carvão.

2.6.3 Aplicação da geofísica no estudo da contaminação das águas subterrâneas

Os métodos geofísicos sempre foram amplamente utilizados no mapeamento geológico e em campanhas de prospecção visando a detecção de anomalias geofísicas que indicassem, de forma direta ou indireta, a presença de depósitos minerais, incluindo-se entre estes, petróleo e água subterrânea.

Principalmente nos últimos anos, com a crescente preocupação em relação aos problemas ambientais ocasionados pela má disposição de resíduos sólidos e líquidos, os métodos geofísicos começaram a ser testados e aplicados em estudos de contaminação de águas subterrâneas associadas a áreas de deposição de resíduos domésticos e industriais. Nestas áreas procura-se, a partir da aplicação da geofísica, mapear a extensão da pluma de contaminação, bem como, em determinadas situações, monitorar o avanço da mesma com o passar do tempo. Com a obtenção destes dados, é possível orientar, com uma segurança maior, uma subsequente campanha de perfurações e amostragem das águas subterrâneas, reduzindo-se seus riscos físicos e financeiros.

Com esta finalidade, os métodos eletromagnéticos indutivos, a eletroresistividade e a magnetometria tem sido aplicados na definição geológica do sítio em estudo ou na identificação direta da presença de zonas anômalas, complementados pela sísmica de refração e sísmica de reflexão rasa (Ellert *et al.* 1988).

Dentre os métodos acima citados, destacam-se os eletromagnéticos indutivos, os quais, devido à rapidez de execução dos trabalhos e da reduzida equipe necessária, permitindo a densificação do número de pontos analisados, melhoria na resolução global do levantamento e conseqüente delimitação mais precisa dos contornos da pluma, são os mais aplicados na investigação de zonas contaminadas.

Os métodos eletromagnéticos indutivos utilizam a intervenção de campos eletromagnéticos criados por correntes alternadas e/ou pulsantes de origem artificial ou natural. Segundo Ellert *et al.* (1988), a passagem de uma corrente elétrica alternada através de uma bobina cria ao seu redor um campo eletromagnético alternado indutivo, o qual gera correntes secundárias alternadas em corpos condutores localizados no raio de ação deste campo. Por sua vez, tais correntes secundárias geradas, criam um campo eletromagnético secundário. Uma bobina receptora estacionada onde o campo primário e o secundário exercem sua influência apresentará correntes induzidas resultantes (H_r) da soma destes dois campos.

Equipamentos hoje existentes no mercado, como o EM 31 e 34 da Geonics Limited, são construídos de forma que a corrente induzida na bobina receptora é proporcional à condutividade das rochas. Como os poluentes geralmente apresentam condutividades mais elevadas que a água subterrânea, estes agentes, ao migrarem através das litologias, podem ter porções retidas na zona insaturada ou atingir o lençol freático, alterando significativamente a condutividade destas zonas para valores mais altos do que o *background* para águas subterrâneas naturais, permitindo sua detecção (Ellert *et al.* 1988).

McNeill (1980) apresenta diversas aplicações dos métodos EM31 e EM34, considerando que tais métodos são úteis, por exemplo, na delimitação de regiões de *permafrost*, na localização de níveis de cascalho, no mapeamento de intrusões salinas, na detecção de cavidades em rochas carbonáticas e no mapeamento de plumas de poluição em águas subterrâneas. Este mesmo autor demonstra a aplicação do método EM 34 em um aterro sanitário localizado em Camp Borden, Ontario, observando que a pesquisa realizada foi eficaz no mapeamento da pluma salina das águas subterrâneas do local em estudo, reduzindo,

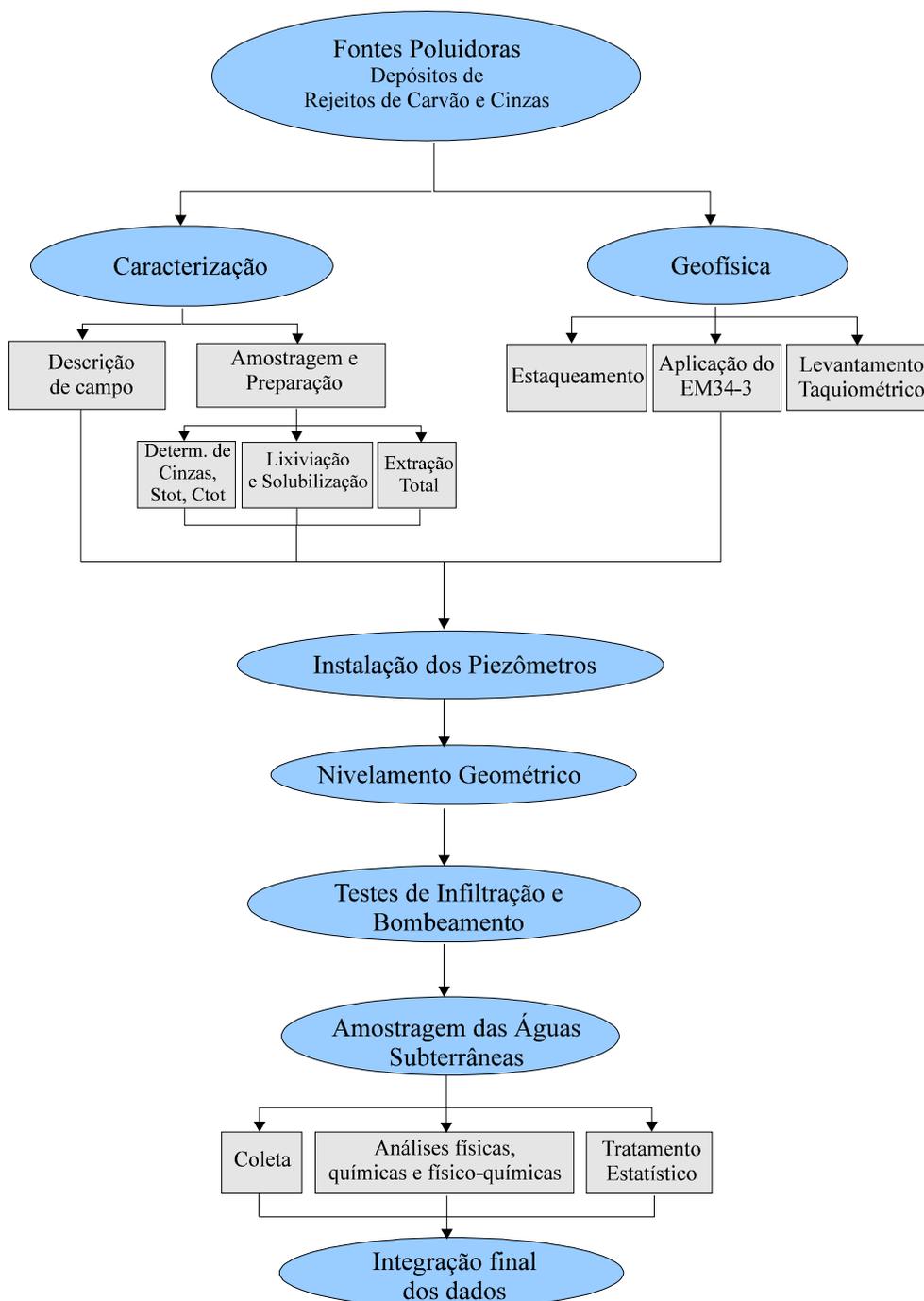
significativamente, o tempo de obtenção dos resultados com a aplicação do método eletromagnético quando comparado com a eletrorresistividade.

No Brasil, o método eletromagnético EM34-3 foi aplicado por Costa & Ferlini (1994), na detecção de plumas de poluição subterrânea nas seguintes áreas problema do estado do Rio Grande do Sul: (i) depósito municipal de lixo de Estância Velha; (ii) depósito de lodo de tratamento de efluentes líquidos de curtume em Estância Velha; (iii) depósito municipal de lixo da Zona Norte de Porto Alegre. Tais autores concluíram que o método aplicado para detecção e monitoramento de plumas de contaminação em águas subterrâneas mostra-se eficaz, permitindo a localização subsequente de poços de amostragem com exatidão em latitude, longitude e profundidade, o que otimiza o número de poços, a significância dos dados pesquisados e a interpretação da real situação ambiental da área estudada.

No estado de São Paulo, Ellert *et al.* (1988) empregaram o método eletromagnético EM31 num aterro de rejeitos urbanos e industriais localizado na cidade de São José dos Campos, objetivando a detecção da pluma de contaminação, com conseqüente locação adequada de piezômetros representativos para amostragens das águas subterrâneas. Da mesma forma que Costa & Ferlin (1994), estes autores comprovaram a eficácia do método empregado, otimizando a instalação dos poços de monitoramento, numa etapa posterior.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma abaixo apresentado, mostra, de forma esquemática, a metodologia empregada no presente estudo para avaliar a contaminação das águas subterrâneas em áreas de disposição inadequada de rejeitos de carvão e cinzas. No prosseguimento deste item, cada uma das etapas seguidas será discutida separadamente.



3.1 FONTES POLUIDORAS - DEPÓSITOS DE REJEITOS DE CARVÃO E CINZAS

3.1.1 Caracterização dos depósitos

A caracterização dos depósitos de rejeitos e cinzas de carvão foi feita com base em descrições de campo e em análises físico-químicas dos principais depósitos apresentados nas Figuras 13 e 14.

Cabe destacar que as análises físico-químicas foram realizadas somente nos depósitos mais significativos/críticos em termos de volume, aspecto geral, localização (proximidade de cursos d'água, banhados, ...) de cada área e, principalmente, possível influência destes depósitos nas águas subterrâneas a serem monitoradas.

As descrições de campo visaram caracterizar cada depósito de forma geral, principalmente, quanto ao tipo/aspecto do depósito e à granulometria predominante. Desta forma, as áreas de deposição foram analisadas quanto à espessura do depósito; proveniência dos resíduos; forma de deposição deste material (pilhas, aterros,...); situação topográfica; atuação de processos erosivos (sulcos, ravinamentos,...); cobertura vegetal; ocupação antrópica.

3.1.1.1 Amostragem e Preparação

Para a caracterização físico-química foram selecionados quatro depósitos de rejeitos de carvão e cinzas, nos quais foram coletadas amostras de forma composta e segundo as normas ISO 1988 e NBR 10007 (ABNT 1987), totalizando nove (9) amostras, conforme apresentado na Tabela 10.

Além destas, foi realizada a caracterização físico-química de mais sete (7) amostras coletadas durante a instalação dos piezômetros, realizada com trado mecânico (Tabela 11).

Posteriormente, tais amostras foram levadas ao laboratório para a realização do quarteramento e preparação para as análises químicas. O preparo consistiu em, primeiramente, moer todas as amostras em moinho de porcelana e numa etapa posterior, passar as amostras em gal de ágata até a granulometria de 0,074 mm.

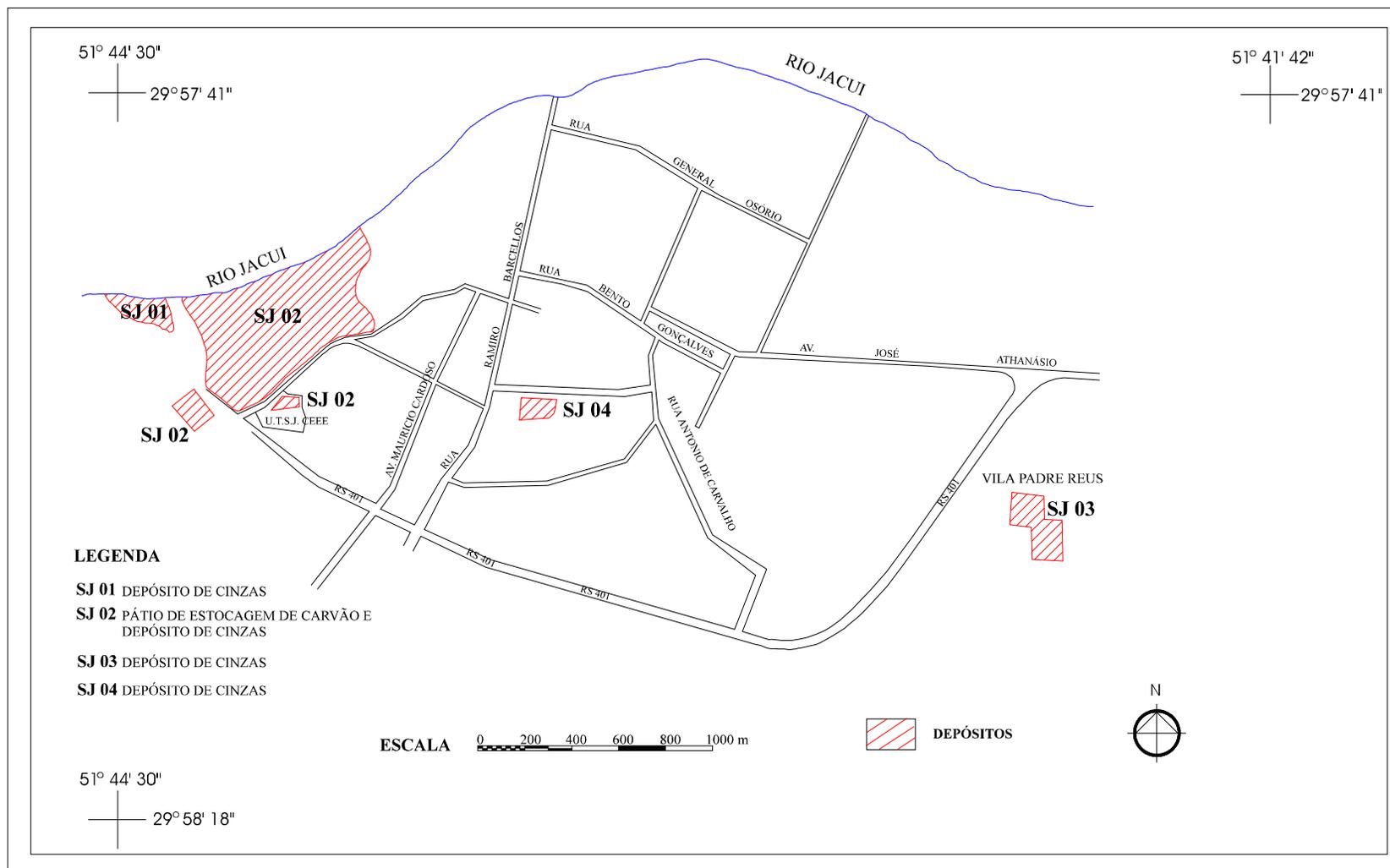


Figura 13: Localização dos depósitos de rejeitos de carvão e cinzas do Município de São Jerônimo (Teixeira *et al.*, 1996).

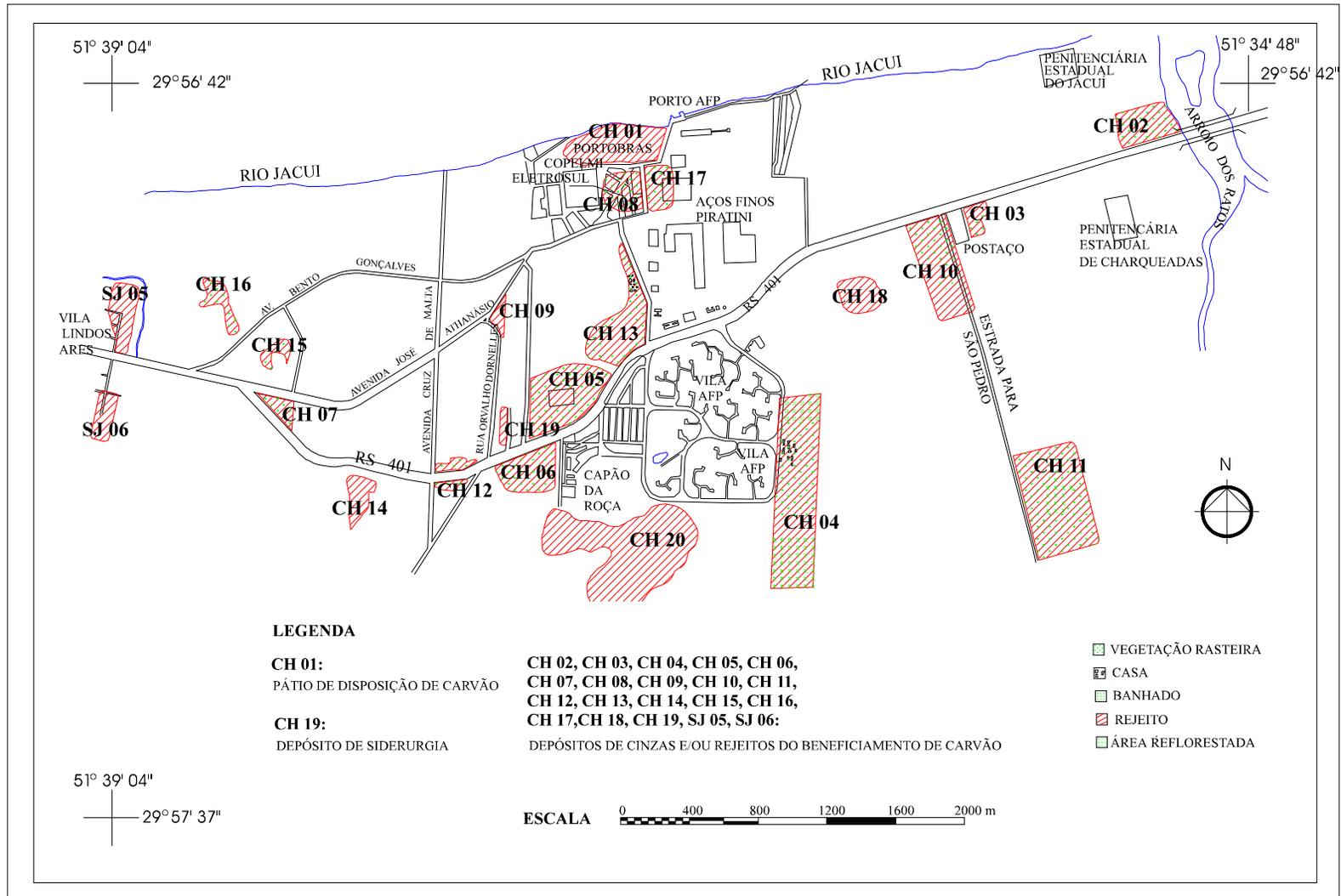


Figura 14: Localização dos depósitos de rejeitos de carvão e cinzas do Município de Charqueadas (Teixeira *et al.*, 1996).

Tabela 10: Amostras coletadas de rejeitos de carvão e cinzas.

| Depósito | Município | Data | Amostras | Descrição |
|----------|--------------|----------|----------|---------------------------|
| CH 13 | Charqueadas | 20/02/95 | CH 13A | raso (até 0,50m) |
| | | | CH 13B | raso (0,5 - 1,0m) |
| CH 20 | Charqueadas | 17/02/95 | CH 20A | raso |
| | | | CH 20B | pilhas (0,20 - 0,50m) |
| | | | CH 20C | raso (até 1,0m) |
| | | | CH 20D | raso (camada superficial) |
| SJ 02 | São Jerônimo | 27/12/95 | SJ 02A | carvão |
| | | | SJ 02B | cinzas - grossas |
| | | | SJ 02C | cinzas - finas |

Tabela 11: Amostras coletadas de rejeitos de carvão e cinzas - fase de instalação dos piezômetros.

| Depósito | Município | Data | Amostras | Descrição |
|----------|-------------|----------|----------|--|
| CH 20 | Charqueadas | 14/12/95 | P1 - A2 | 0,50 - 3,35m (rejeitos) |
| CH 20 | Charqueadas | 16/12/95 | P2 - A1 | 0 - 3,20m (rejeitos) |
| CH 20 | Charqueadas | 16/12/95 | P2 - A2 | 3,20 - 3,80m (rejeitos) |
| CH 20 | Charqueadas | 18/02/95 | P3 - A1 | 0 - 2,12m (rejeitos) |
| CH 20 | Charqueadas | 19/12/95 | P7 - A1 | 0 - 0,60m (cinzas misturadas com solo) |
| CH 13 | Charqueadas | 27/01/96 | P15 - A2 | 0,25 - 5,50m (cinzas) |
| CH 17 | Charqueadas | 29/01/96 | P16 - A2 | 0,25 - 4,15m (cinzas) |

3.1.1.2 Análises físicas, químicas e físico-químicas

Para a caracterização físico-química dos rejeitos de carvão e cinzas procederam-se às seguintes determinações: cinzas, enxofre total - Stot, carbono total - Ctot, pH inicial, metais (Cd, Co, Cu, Pb, Ni, Mn, Cr, Fe, Zn) obtidos a partir de extratos de resíduos (testes de lixiviação, solubilização e extração total).

As análises de cinzas e de enxofre total foram determinadas, respectivamente, pelas normas ISO 1171 e ASTM D-4239, utilizando-se a análise instrumental via Leco (SC-132), por combustão da amostra com detecção no infravermelho. O carbono total foi determinado empregando-se a norma ASTM D-5373 com utilização do Leco modelo CHN 600, por combustão da amostra com detecção no infravermelho.

O pH das amostras foi medido empregando-se somente a diluição do método da norma NBR 10005 (ABNT 1987) \Rightarrow 1g de sólido : 16 ml de água deionizada.

Para os testes de lixiviação foi empregada a norma NBR 10005 (ABNT 1987), cuja metodologia consiste em extrair o produto com água deionizada na proporção de 1:16 durante 24 horas com agitação contínua e constante, a pH 5, corrigindo, quando necessário, com ácido acético (0,5N). Como a maioria das amostras estudadas apresentava pH ácido, não

foi necessário corrigir este parâmetro. As soluções obtidas do lixiviado foram separadas por filtração com membrana de éster celulose 0,45 μm e preservadas em $\text{pH}<2$ com HNO_3 (Merck concentrado a 65%) para posterior análise dos metais.

Para os testes de solubilização foi empregada a norma NBR 10006 (ABNT 1987), cuja metodologia consiste em extrair o produto com água deionizada na proporção de 1:6 durante sete dias com agitação mecânica somente no início do processo. As soluções obtidas do solubilizado foram separadas por filtração com membrana de éster celulose 0,45 μm e preservadas em $\text{pH}<2$ com HNO_3 (Merck concentrado) para posterior análise dos metais.

A extração total foi realizada por digestão ácida, com ácido fluorídrico e perclórico, após as sucessivas adições de ácido nítrico e peróxido de hidrogênio até a completa eliminação da matéria orgânica.

As determinações das concentrações dos metais (Cd, Co, Cu, Pb, Ni, Mn, Cr, Fe, Zn) em extratos dos resíduos obtidos a partir dos testes de lixiviação, solubilização e extração total, foram realizadas por ICP-38S acoplado-se a este um nebulizador ultrassônico, pertencente à Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM.

Cabe destacar que os resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos de extração total, lixiviação e solubilização estão expressos, no item Resultados e Discussões, em diferentes unidades, dependendo da interpretação a ser realizada.

De forma genérica, os elementos em baixas concentrações são apresentados em $\mu\text{g/L}$ (equivalente a ppb), enquanto que os elementos em concentrações mais elevadas estão expressos em mg/L (equivalente a ppm).

A fim de proceder-se à comparação dos resultados obtidos nos três métodos, determinando-se os percentuais de lixiviação e solubilização dos elementos estudados, as concentrações determinadas nos extratos dos resíduos em mg/L ou $\mu\text{g/L}$ foram convertidas considerando-se a massa, padronizando-se, desta forma, as unidades em $\mu\text{g/g}$ para o cálculo dos percentuais. Os percentuais de lixiviação e solubilização foram calculados considerando-se como 100% a concentração total do elemento (obtida através da extração total).

Para fins de comparação com a norma NBR 10004 (ABNT, 1987), foram utilizados os valores de leitura (ICP), convertendo-se as concentrações obtidas em $\mu\text{g/L}$ (ppb) para mg/L (ppm).

3.1.2 Geofísica

3.1.2.1 Reconhecimento da área e Estaqueamento

A área escolhida para a realização do levantamento geofísico situa-se no Município de Charqueadas, compreendendo o depósito de rejeitos e cinzas de carvão CH 20 - Capão da Roça e seus arredores (Figuras 14 e 15).

A definição desta área para a aplicação do método geofísico é justificada por uma série de fatores: (i) delimitação precisa das áreas ocupadas por rejeitos e cinzas de carvão em campo, facilitando a definição de pontos brancos e potencialmente contaminados; (ii) tamanho significativo da área ocupada pelo depósito sendo considerado o maior depósito de toda a região - 28,7 ha; (iii) disposição dos resíduos diretamente sobre uma área alagada (banhado), com nível d'água raso (próximo à superfície), configurando uma situação bastante delicada em termos de contaminação para as águas subterrâneas; (iv) localização deste depósito nas proximidades de uma área com mata nativa - Capão da Roça; (v) ausência de ocupação antrópica (com exceção de algumas porções à nordeste e sudoeste da área), o que facilita o procedimento de aquisição dos dados geofísicos com a redução de interferentes - ruídos (construções, cercas, redes elétricas,...); (vi) acesso ao mapa de detalhe da área ocupada pelo depósito na escala 1:1000 (COPELMI, 1994); (vii) interesse do proprietário (Copelmi Mineração Ltda.) nos estudos desenvolvidos visando à recuperação desta área, na qual observa-se a presença de valetas de proteção em torno do depósito (limites leste e oeste), bem como tentativas de revegetação.

A partir da definição da área-alvo, o primeiro passo para a aplicação do método EM34-3 foi a colocação de estacas segundo uma malha regular de 80 x 80 metros, para posterior leitura de condutividade nos pontos previamente estaqueados. Na Figura 15 observa-se a localização das estações geofísicas (321 estações no total) dispostas segundo um sistema de coordenadas relativas amarradas a um ponto zero inicial escolhido aleatoriamente. Desta forma, as coordenadas de cada ponto representam a distância real no terreno de cada ponto em relação a linha base definida a partir do estabelecimento do ponto inicial 0/0 (Figura 15).

Sobre esta malha de pontos previamente definida, foi aplicado o método eletromagnético EM34-3, conforme descrito a seguir.

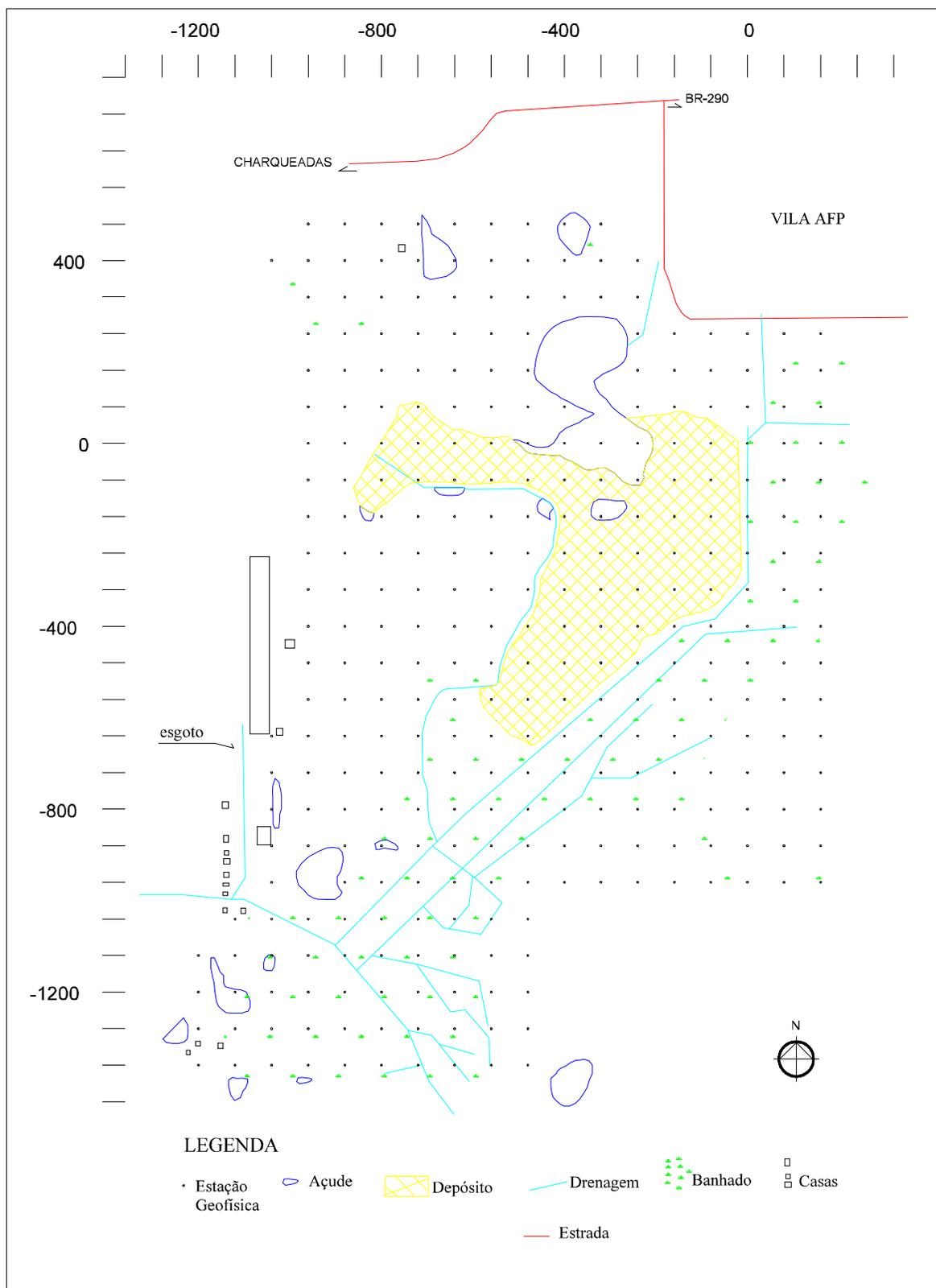


Figura 15: Mapa de detalhe do depósito CH 20 - Capão da Roça e arredores.

3.1.2.2 Aplicação do método eletromagnético EM34-3

O condutivímetro EM34-3 (McNeill 1980) utilizado é composto por duas bobinas, sendo uma receptora e uma transmissora, um transmissor, um receptor e três cabos de referência de diferentes comprimentos (10, 20 e 40 metros). A bobina transmissora emite um campo primário H_p , que induz corrente elétrica em subsuperfície, gerando um campo elétrico secundário H_s . A combinação destes dois campos é medida pela bobina receptora. Sob certas condições, definidas tecnicamente como “operações de baixa indução”, admite-se que a relação entre os módulos dos dois campos seja expressa por $H_s = k.H_p$, em que k depende da frequência do campo, da permeabilidade magnética do vácuo, do espaçamento entre as bobinas e da condutividade elétrica do meio (Costa & Ferlin, 1994).

Na prática, o equipamento permite a leitura direta da condutividade elétrica e a Figura 16 demonstra, esquematicamente, sua aplicação.

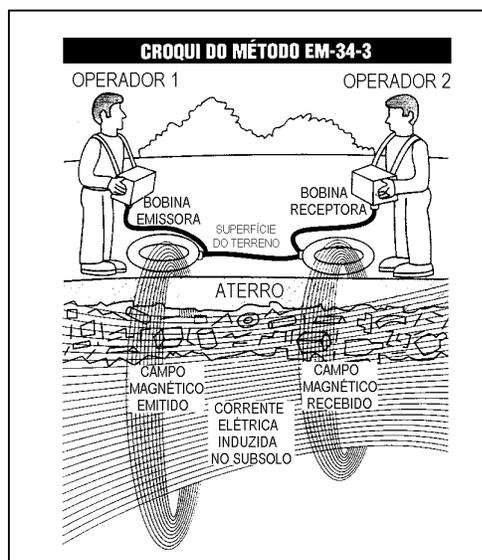


Figura 16: Croqui explicativo do método EM-34-3 (Costa & Ferlin, 1994).

A profundidade da investigação depende da distância entre as bobinas e do arranjo utilizado: dipolo (posição-plano das bobinas) vertical ou horizontal. As informações obtidas são significativas para as condições de espaçamento entre bobinas especificadas na Tabela 12.

Tabela 12: Posição, espaçamento das bobinas e profundidade alcançada.

| Posição das Bobinas | Espaçamento entre Bobinas | Profundidade alcançada |
|----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| vertical | 10 m | 7,5 m |
| vertical | 20 m | 15 m |
| vertical | 40 m | 30 m |
| horizontal | 10 m | 15 m |
| horizontal | 20 m | 30 m |
| horizontal | 40 m | 60 m |

Na área em estudo, utilizou-se o arranjo dipolo vertical, alcançando-se as profundidades de 7,5 m - 15 m - 30 m (Figuras 17 e 18).

Numa etapa posterior, de laboratório, os dados de condutividade obtidos foram adequadamente tratados e interpretados, utilizando-se recursos computacionais. Neste estudo foram utilizados os programas SURFER 5.0 FOR WINDOWS™ e STATISTIC 4.3 FOR WINDOWS™ para geração dos mapas geofísicos e no tratamento estatístico dos dados geofísicos, respectivamente.

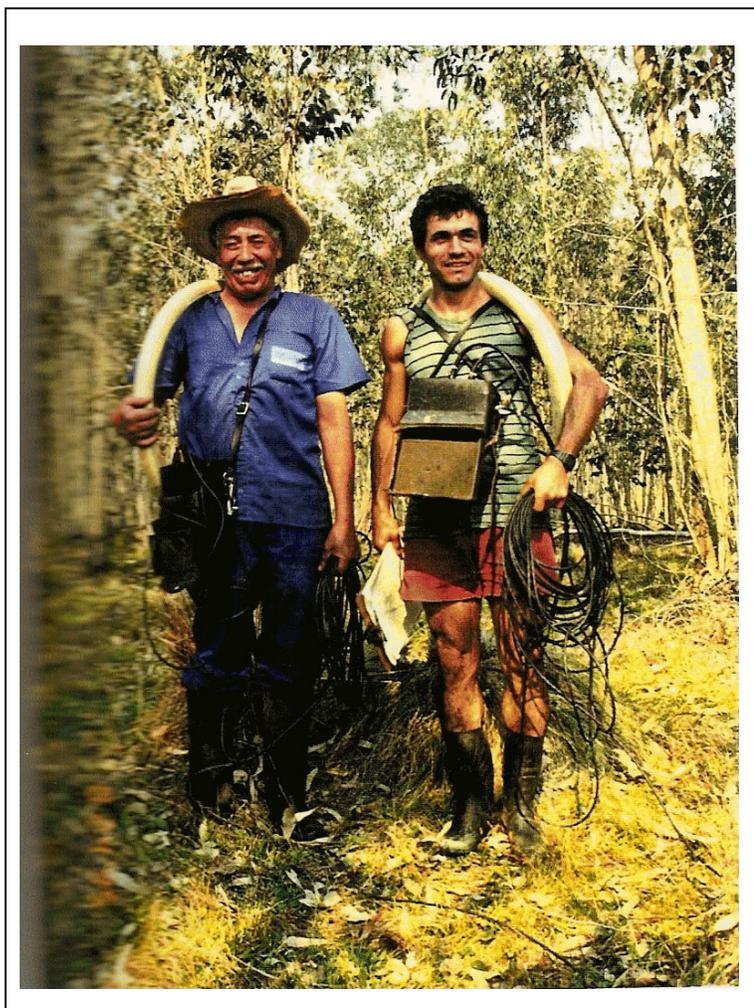


Figura 17: Condutímetro EM-34-3, composto, à esquerda, pela bobina receptora e, à direita, pela bobina transmissora e transmissor juntamente com os cabos de referência.



Figura 18: Detalhe da aplicação do método eletromagnético EM-34-3.

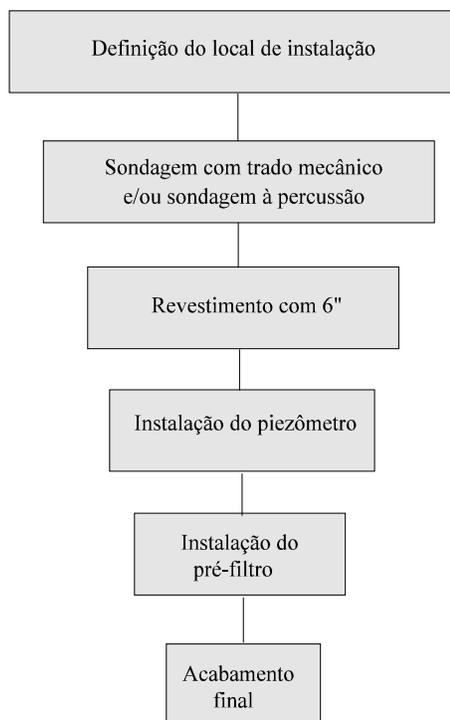
3.1.2.3 Levantamento Taquiométrico

Na área em que foi aplicada a geofísica - depósito de rejeitos e cinzas de carvão CH 20, procedeu-se também a um levantamento taquiométrico que consistiu na obtenção da cota de cada uma das estações geofísicas em que foram realizadas as leituras de condutividade. Para tanto, o material utilizado foi o seguinte: um teodolito Wild, um nível Berger (precisão de 2mm por km), um tripé de alumínio, uma bússola, uma mira de alumínio.

Numa etapa posterior, tais dados foram tratados e comparados com os resultados obtidos da geofísica, a fim de observar-se a influência da topografia do terreno sobre os dados geofísicos.

3.2 INSTALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS

Para a instalação dos piezômetros foi seguida uma sistemática de operação, resumida no fluxograma abaixo apresentado, cujos passos serão discutidos separadamente no prosseguimento deste item.



3.2.1 Definição do local de instalação

A partir da definição da área-alvo para este estudo, a locação dos 20 piezômetros (Tabela 13 e Figuras 19 e 20) foi feita com base nos resultados obtidos através da aplicação do método EM-34-3 para o depósito CH 20 (Capão da Roça) e, para as demais áreas, com base em dados hidrogeológicos e localização das fontes de contaminação.

3.2.2 Sondagem

Para a instalação dos piezômetros foram executadas sondagens com diâmetro nominal de 152 mm. Durante a operação de sondagem, foram intercalados o trado mecânico (Figura 21) e a sonda à percussão (Figura 22), dependendo do grau de compactação das camadas e da presença ou não de água. Em muitos locais, após os primeiros metros de perfuração, o furo era revestido com tubos de aço de diâmetro nominal de 127 mm para impedir o desmoronamento/fechamento do mesmo e utilizar a sonda à percussão. Concomitantemente à perfuração, foram retiradas amostras dos diferentes níveis litológicos do aquífero freático, visando, numa etapa posterior, a reconstituição estratigráfica dos furos, compondo-se, desta forma, o perfil litológico geral da área.

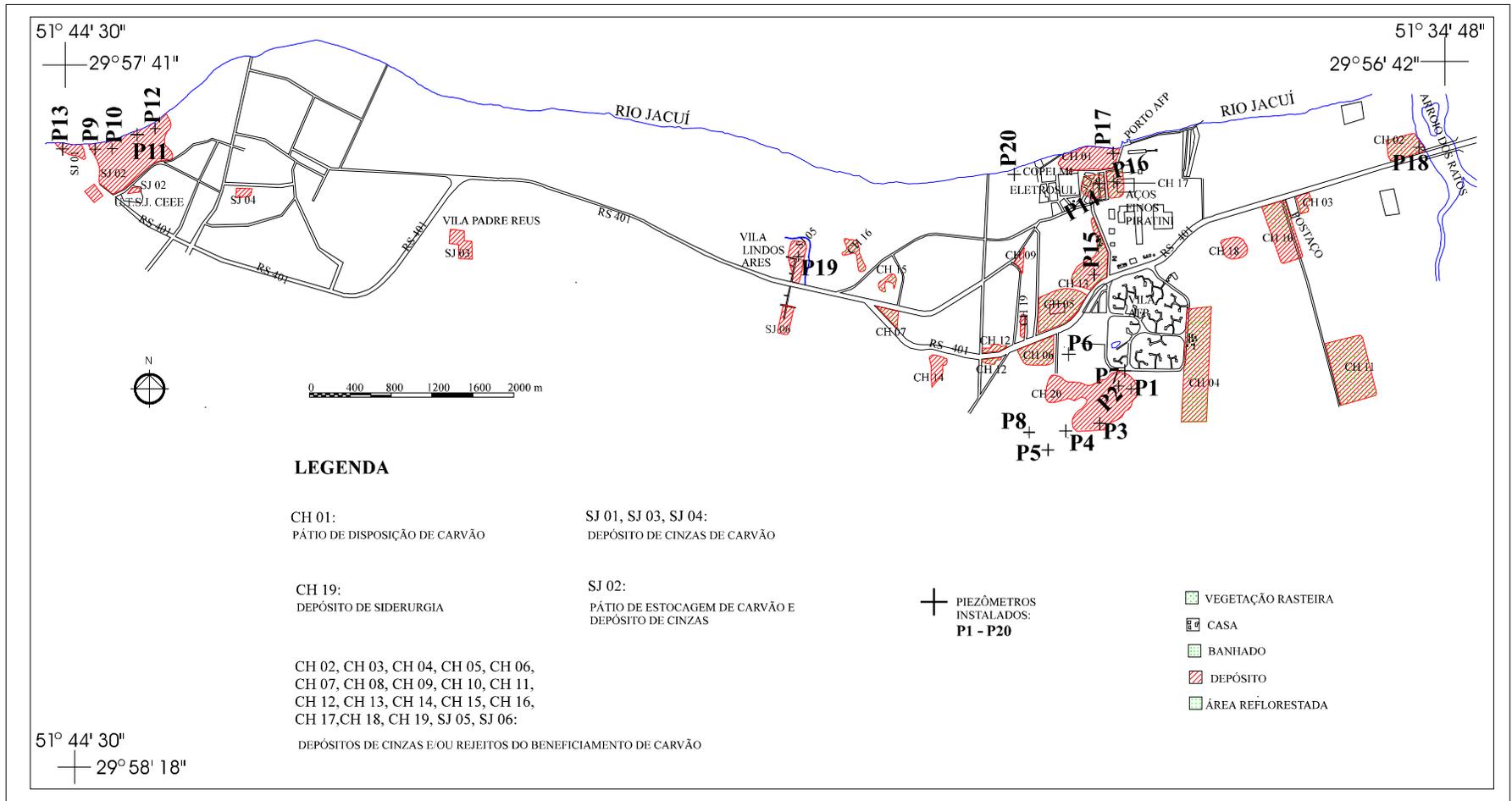


Figura 19: Localização dos piezômetros na Região de Charqueadas - São Jerônimo.

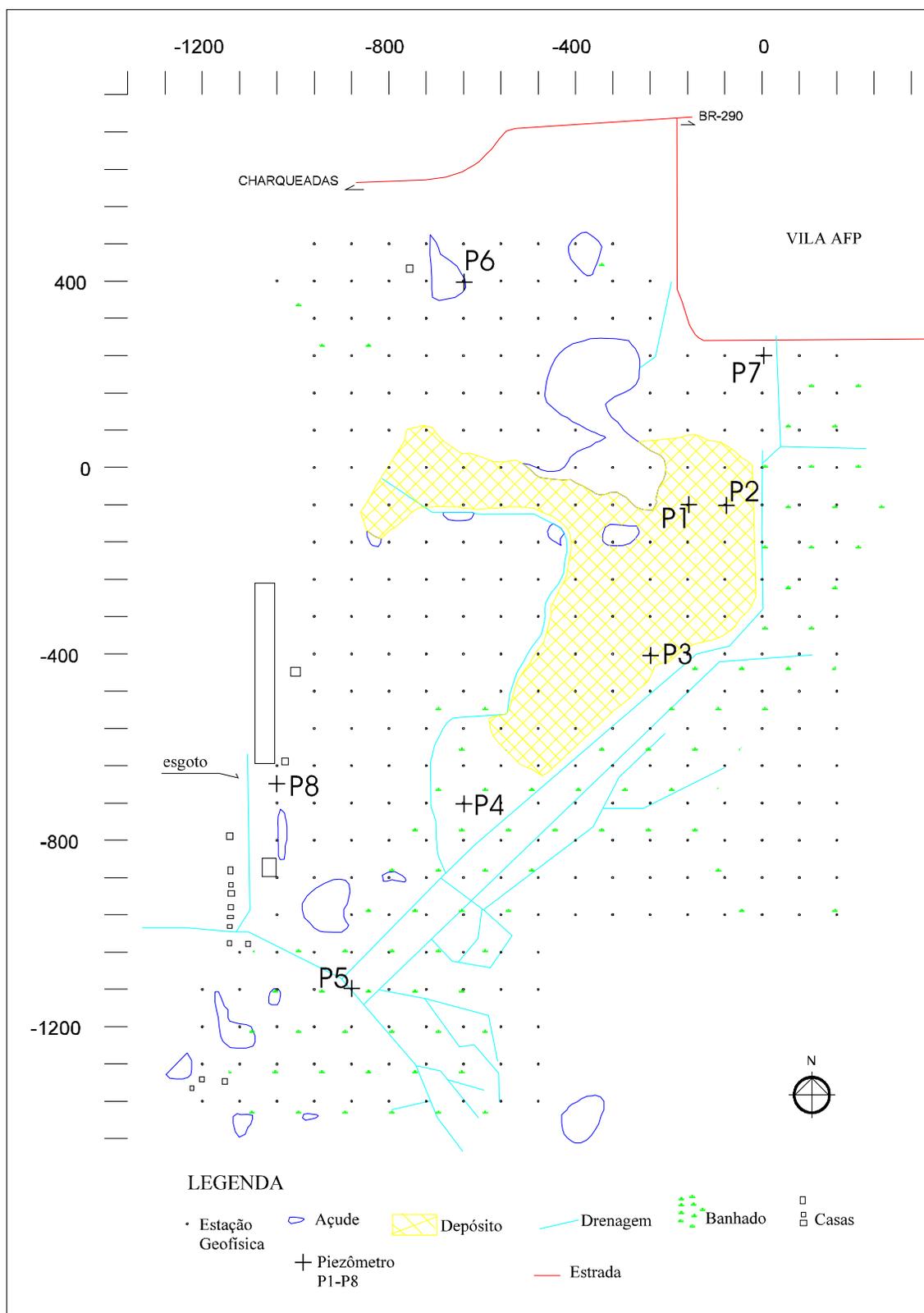


Figura 20: Mapa de detalhe da localização dos piezômetros no depósito CH 20 - Capão da Roça e arredores.

Tabela 13: Localização e coordenadas geográficas dos piezômetros.

| Piez | Localização | Coord X | Coord Y |
|------|--|--------------|---------------|
| P1 | CH 20 - Capão da Roça - Charqueadas | 29°58'19,2'' | -51°36'59,4'' |
| P2 | CH 20 - Capão da Roça - Charqueadas | 29°58'19,8'' | -51°36'59,4'' |
| P3 | CH 20 - Capão da Roça - Charqueadas | 29°58'32,4'' | -51°37'10,2'' |
| P4 | CH 20 - Capão da Roça - Charqueadas | 29°58'41,4'' | -51°37'21,6'' |
| P5 | CH 20 - Capão da Roça - Charqueadas | 29°58'52,2'' | -51°37'32,4'' |
| P6 | CH 20 - Capão da Roça - Charqueadas | 29°58'04,8'' | -51°37'19,2'' |
| P7 | CH 20 - Capão da Roça - Charqueadas | 29°58'09,0'' | -51°36'55,8'' |
| P8 | CH 20 - Capão da Roça - Charqueadas | 29°58'41,4'' | -51°37'35,4'' |
| P9 | SJ 02 - próximo à Usina Termoeletrica SJ | 29°57'55,2'' | -51°44'18,0'' |
| P10 | SJ 02 - próximo à Usina Termoeletrica SJ | 29°57'57,0'' | -51°44'14,4'' |
| P11 | SJ 02 - próximo à Usina Termoeletrica SJ | 29°57'55,2'' | -51°44'13,2'' |
| P12 | SJ 02 - próximo à Usina Termoeletrica SJ | 29°57'55,2'' | -51°44'09,6'' |
| P13 | SJ 02 - próximo à Usina Termoeletrica SJ | 29°57'58,8'' | -51°44'30,6'' |
| P14 | CH 08 - próximo à TERMOCHAR e PORTOBRÁS, corresponde à área V-2 de COPELMI (1994) | 29°57'03,0'' | -51°37'12,0'' |
| P15 | CH 13 - às margens da RS 401, corresponde à área I de COPELMI (1994) | 29°57'28,8'' | -51°37'06,6'' |
| P16 | CH 17 - próximo à Siderúrgica Aços Finos Piratini, corresponde à área V-I de COPELMI (1994) | 29°57'03,0'' | -51°37'08,4'' |
| P17 | próximo à PORTOBRÁS e ao Rio Jacuí, corresponde, aproximadamente, à área V-3 de COPELMI (1994) | 29°56'51,6'' | -51°37'04,8'' |
| P18 | CH 02 - às margens do Arroio dos Ratos, ao lado da ponte | 29°56'56,4'' | -51°35'15,0'' |
| P19 | SJ 02 - próximo ao Arroio Passo do Leão, na Vila Lindos Ares | 29°57'33,0'' | -51°39'11,4'' |
| P20 | às margens do Rio Jacuí, atrás da área industrial da COPELMI | 29°56'54,6'' | -51°37'36,0'' |

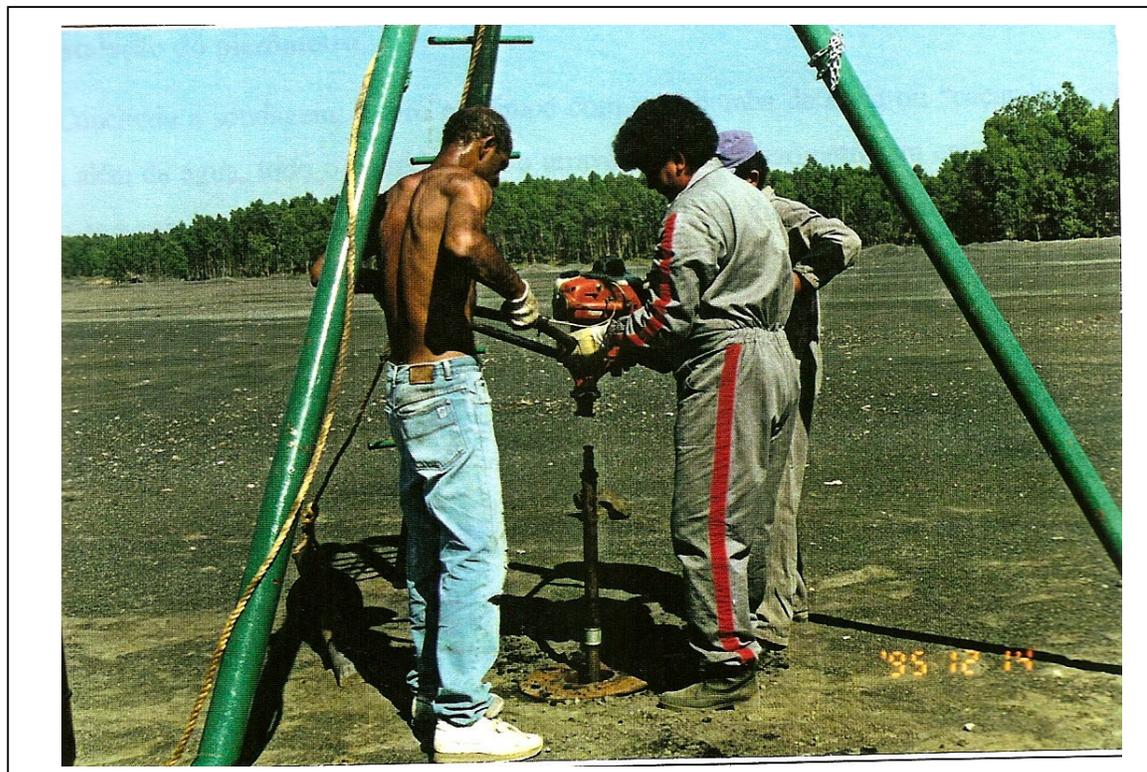


Figura 21: Operação de sondagem com trado mecânico.



Figura 22: Operação de sondagem utilizando sonda à percussão.

3.2.3 Instalação do piezômetro

Concluída a sondagem, o furo era limpo com uma bomba de areia ou “caçamba” que retirava, além da água, todo o material sólido atravessado. O piezômetro era então montado, juntando-se a parte ranhurada com os demais canos de PVC de diâmetro 100 mm, sendo que a parte final do piezômetro foi revestida com um geotêxtil (Figuras 23 e 24). Após a montagem, os piezômetros foram colocados no furo até a cota final da sondagem (Figura 24).

3.2.4 Pré-filtro

O espaço vazio entre o piezômetro (cano de PVC) e as litologias circundantes foi preenchido, na porção inferior, com um pré-filtro composto por areia grossa peneirada; na porção média com argila e, na porção superior, com cimento. Na seqüência, os revestimentos de aço, colocados na etapa de sondagem para impedir o desmoronamento do furo, foram sacados.



Figura 23: Canos de PVC utilizados para a montagem dos piezômetros onde observa-se em (a) os canos ranhurados colocados na porção final do piezômetro e em (b) os canos inteiros.

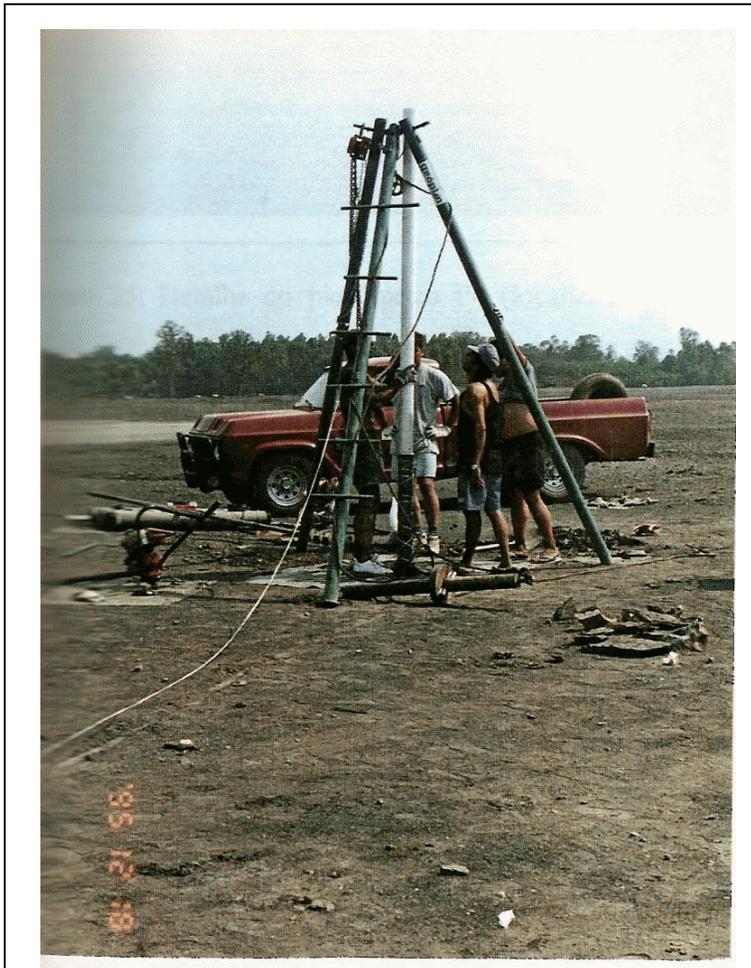


Figura 24: Colocação do piezômetro até a cota final da sondagem, onde observa-se, na porção final do piezômetro, o revestimento.

3.2.5 Acabamento

O acabamento foi executado com concreto, formando uma laje protetora em volta da boca do poço. Para maior garantia foram instalados tubos de aço com diâmetro ligeiramente superior ao cano de PVC, providos com tampa móvel, protegidos por cadeado e convenientemente identificados (Figura 25).

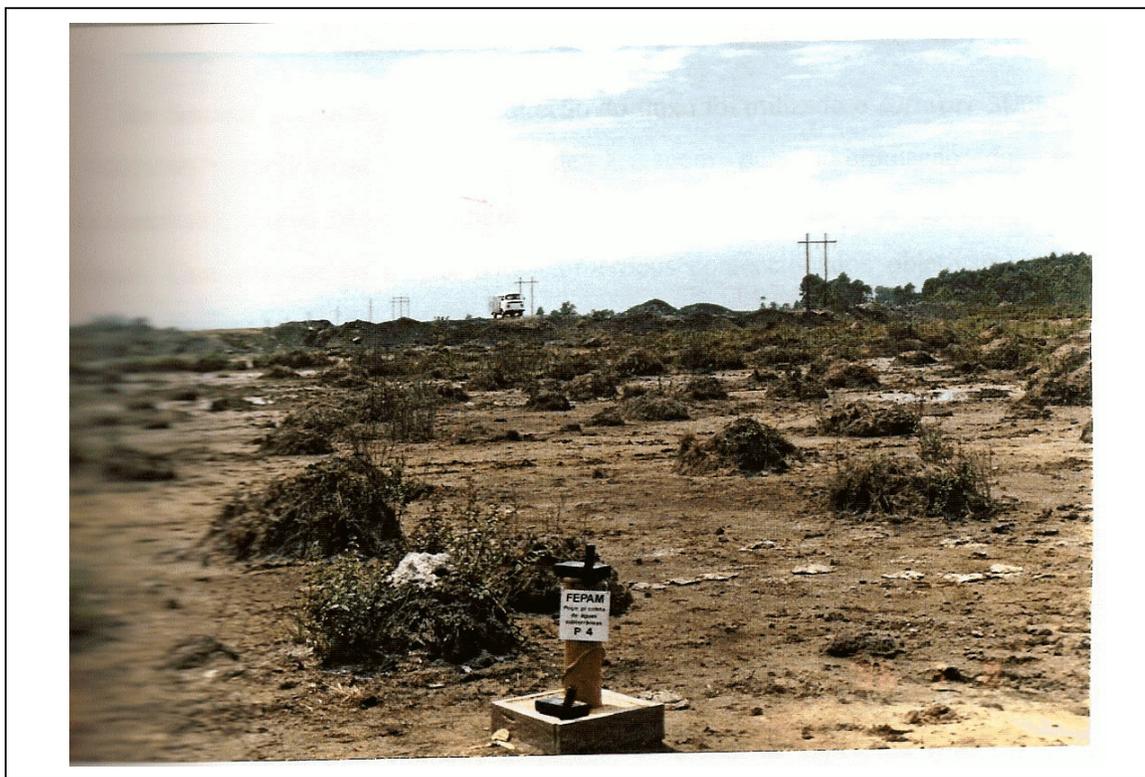


Figura 25: Detalhe do piezômetro P4 (localizado na porção sudoeste do depósito CH 20), mostrando o acabamento final com laje de concreto.

3.3 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO

O nivelamento geométrico realizado consistiu na determinação da cota da boca de cada um dos vinte piezômetros previamente instalados na região de Charqueadas-São Jerônimo a partir do transporte de Referência de Nível (RN) de São Jerônimo (RN = 3,580m) até os piezômetros, através de nivelamento e contra-nivelamento. Para tanto, o material utilizado foi o seguinte: um nível Berger (precisão de 2 mm por km), um tripé de alumínio, uma bússola, uma mira de alumínio, cartas topográficas do exército na escala 1:50000.

Numa etapa posterior, tais dados foram tratados e utilizados na confecção do Mapa Potenciométrico da região em estudo, sendo que o nível potenciométrico foi determinado utilizando-se a seguinte expressão:

$$\text{nível potenciométrico} = \text{cota da boca do piezômetro} - \text{nível d'água}$$

Cabe destacar que na definição da direção do fluxo foi utilizado o *software* SURFER 5.0 FOR WINDOWS™ (aplicou-se o método de krigagem para interpolação dos níveis potenciométricos) o qual não configura-se como um *software* específico de modelamento hidrológico. Uma vez que os mapas potenciométricos confeccionados objetivam dar uma noção geral da direção do fluxo da água na área em estudo, utilizando-se, para tanto, os dados disponíveis de cota da boca do poço e nível de água de cada piezômetro, o *software* utilizado foi considerado adequado, apesar de suas limitações.

3.4 TESTES DE INFILTRAÇÃO E BOMBEAMENTO

Os dados de infiltração foram colhidos através do método dos cilindros concêntricos (Figura 26), utilizando-se dois cilindros metálicos, de 3 mm de espessura e de 30 cm de altura, com diâmetro de 30 cm e de 50 cm, respectivamente, com uma borda biselada para facilitar sua penetração no solo (Cauduro e Dorfman , 1986).

Os locais para determinação dos ensaios foram escolhidos de acordo com o tipo de material presente (Tabela 14), visando caracterizar os diferentes comportamentos hidrogeológicos dos materiais observados na região em estudo.

Tabela 14: Ensaio de infiltração - locais das determinações.

| Data | Local | Material |
|-------------|----------------|-----------------------------|
| 20/09/96 | próximo ao P7 | cinza com cobertura vegetal |
| 20/09/96 | próximo ao P1 | rejeito exposto |
| 20/09/96 | próximo ao P16 | cinza com 0,25 m de rejeito |
| 21/09/96 | próximo ao P12 | cinza fina de fundo |
| 21/09/96 | próximo ao P5 | terreno natural |
| 21/09/96 | próximo ao P9 | cinza grossa de fundo |



Figura 26: Teste de infiltração realizado através do método dos cilindros concêntricos.

Posteriormente, foi ajustada aos dados obtidos a equação teórica da velocidade/taxa de infiltração básica, a qual pode ser considerada como um bom estimador da condutividade hidráulica, sendo definida por (Cauduro e Dorfman , 1986):

$$I = K \cdot t^n$$

onde:

I = taxa de infiltração básica (mm/h^1);

K = taxa de infiltração acumulada (mm/h) no primeiro minuto;

t = tempo

$n = m-1$, onde m é o coeficiente angular da reta da equação da taxa de infiltração básica

Os testes de bombeamento - método do piezômetro (Cauduro e Dorfman , 1986) foram realizados em sete piezômetros (P1, P5, P7, P9, P12, P15 e P17). Os piezômetros foram bombeados continuamente durante um período pré-estabelecido, por uma descarga estimada

¹ Embora nas determinações experimentais a unidade de medida comumente utilizada para a taxa de infiltração seja o cm/min ou o cm/h , em certas aplicações práticas costuma-se expressar esta grandeza em mm/h para torná-la coerente com outras grandezas, tais como armazenamento e transmissividade da água, habitualmente dadas em mm (Cauduro & Dorfman, 1986).

volumetricamente. Após o bombeamento, foi medido o rebaixamento residual e o tempo desde o início do bombeamento (Figura 27).

Posteriormente, foram estimados a transmissividade e o armazenamento do do estrato controlado pelo piezômetro, aplicando-se as seguintes equações através da utilização do software AQTESOLV™ - Aquifer Test Solver 1.0 (1989), pelo método de Cooper-Jacob:

$$(1) T = 2,303 Q / 4\pi \Delta s$$

$$(2) S = 2,246 T t_0 / r^2$$

onde:

T = transmissividade do aquífero (m²/min);

Q = descarga de bombeamento (m³/min);

4π = constante numérica;

Δs = rebaixamento por ciclo de papel logarítmico;

S = coeficiente de armazenamento (adimensional);

t₀ = interceptação da reta com o eixo dos tempos (min);

r = distância radial do poço (m).

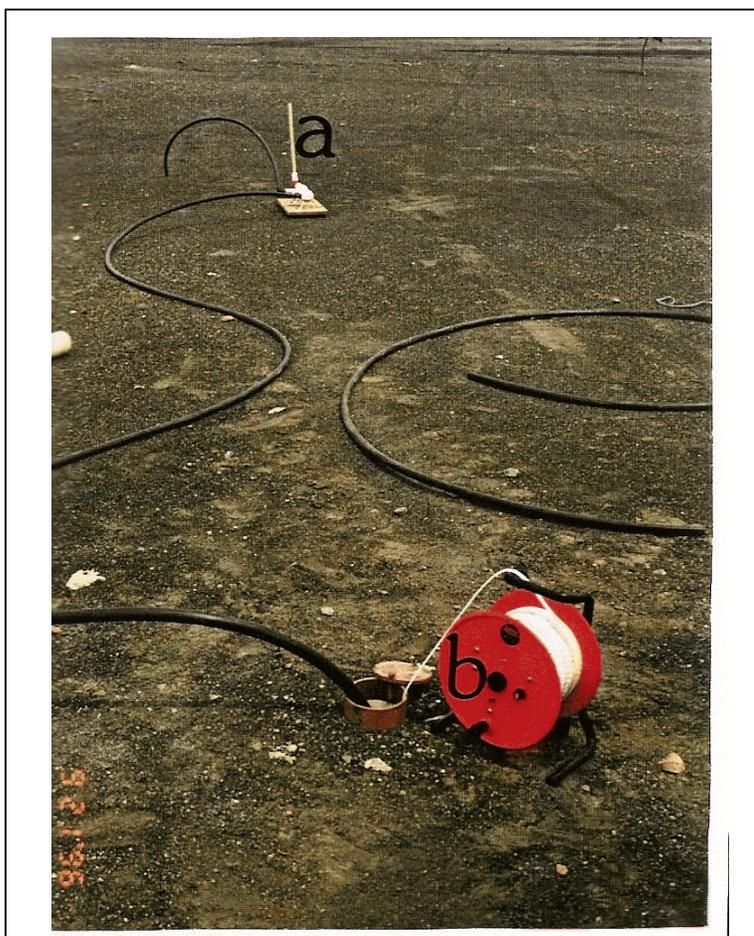


Figura 27: Teste de bombeamento do piezômetro, onde observa-se em (a) a bomba utilizada e em (b) o medidor de nível eletrônico.

3.5 AMOSTRAGEM DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

3.5.1 Procedimento de coleta

A campanha de amostragem das águas subterrâneas iniciou-se em abril de 1996 e estendeu-se pelo período de sete meses: abril, maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro de 1996 (período coincidente com o prazo hábil para conclusão da dissertação).

As amostragens foram realizadas segundo as normas ISO/DP 5667-11 e NBR 9898 (ABNT 1987). A coleta das águas subterrâneas (aquífero freático) foi realizada em 19 dos 20 poços de monitoramento instalados, visto que um dos piezômetros construído (P3) foi danificado sem possibilidade de recuperação no primeiro mês de coleta.

Mensalmente, a coleta foi realizada no período de uma semana. Nos dois primeiros dias procede-se ao esgotamento dos poços para que a água do aquífero seja renovada, utilizando-se dois equipamentos principais: bomba manual do tipo pistão de PVC (Figura 28) e garrafa coletora manual de PVC (Figura 29) para evitar possíveis contaminações por metais.



Figura 28: Bomba manual do tipo pistão de PVC com a qual é realizado o esgotamento dos piezômetros.

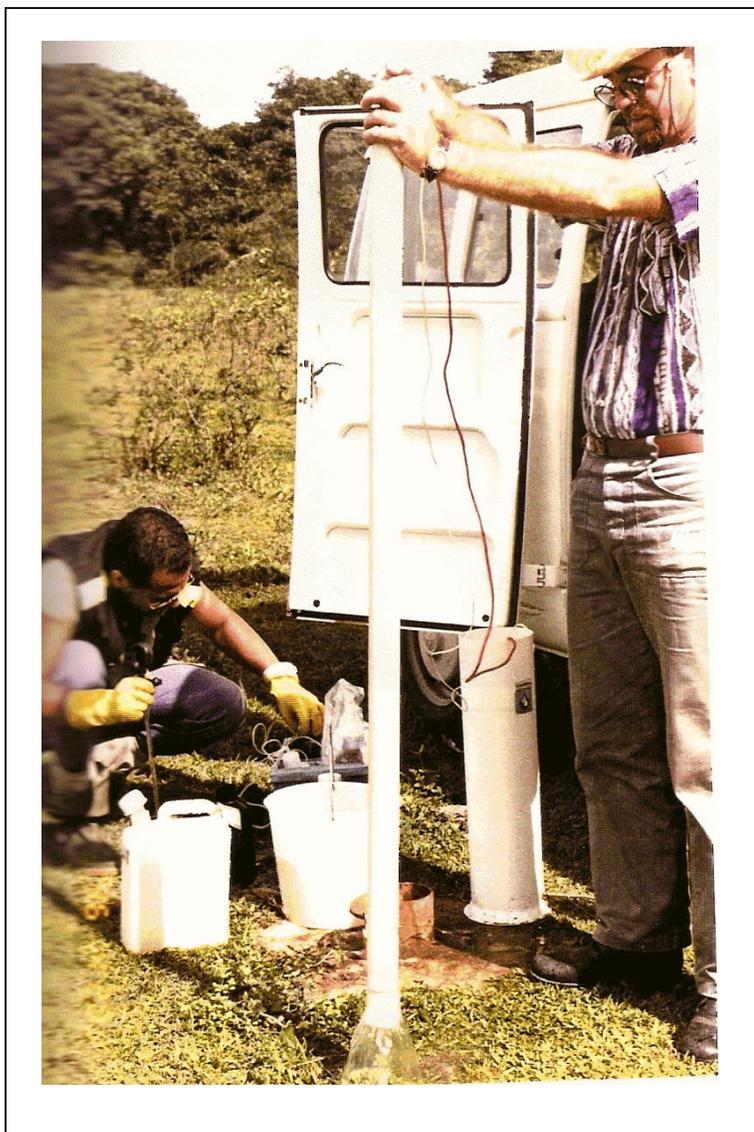


Figura 29: Garrafa coletora manual de PVC com a qual é realizado o esgotamento e amostragem dos poços.

Anteriormente ao esgotamento, procede-se à leitura do nível d'água estático com um medidor eletrônico de nível, em cada poço. No período restante, coleta-se o volume necessário de amostra de água para cada poço e procedem-se às leituras de diversos parâmetros (Eh, pH, TDS, OD, condutividade, temperatura da água, íon ferroso, ferro total, sulfeto) com equipamentos portáteis (Figuras 30 e 31), conforme exposto no item 3.5.2, a seguir apresentado. As amostras coletadas são devidamente identificadas (poço, data, análise, preservação) e, quando necessário, preservadas em campo (para metais: frasco de 11 preservado com 5ml HNO₃ concentrado da Merck).

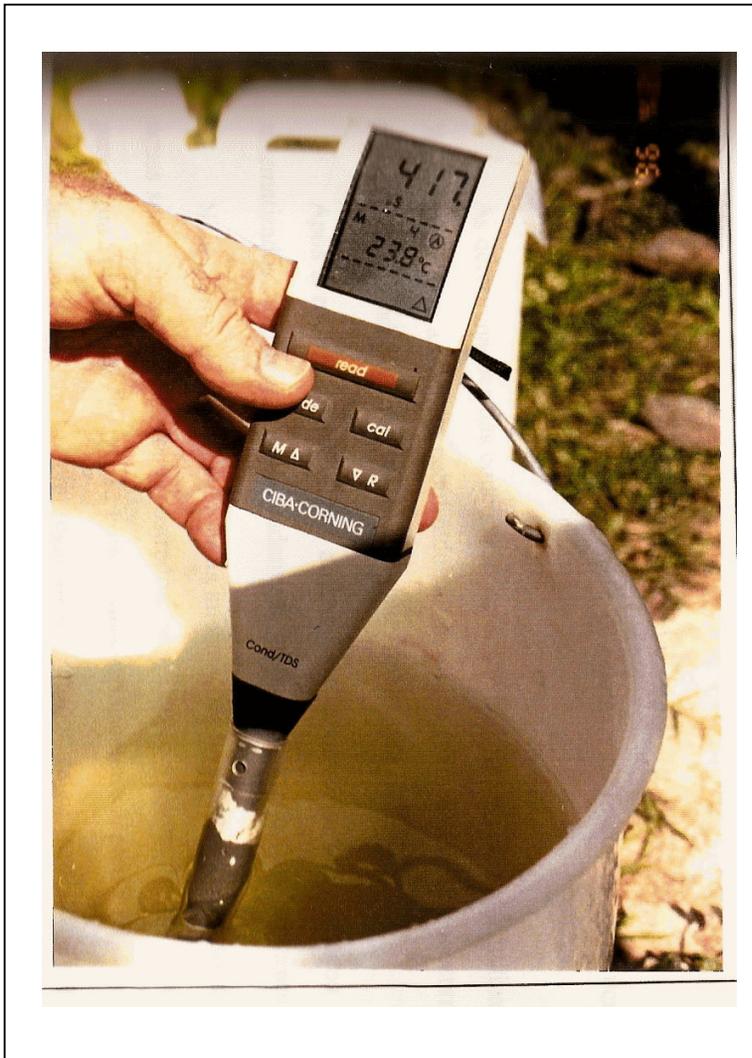


Figura 30: Equipamento portátil de campo utilizado para medição de condutividade, TDS e temperatura.

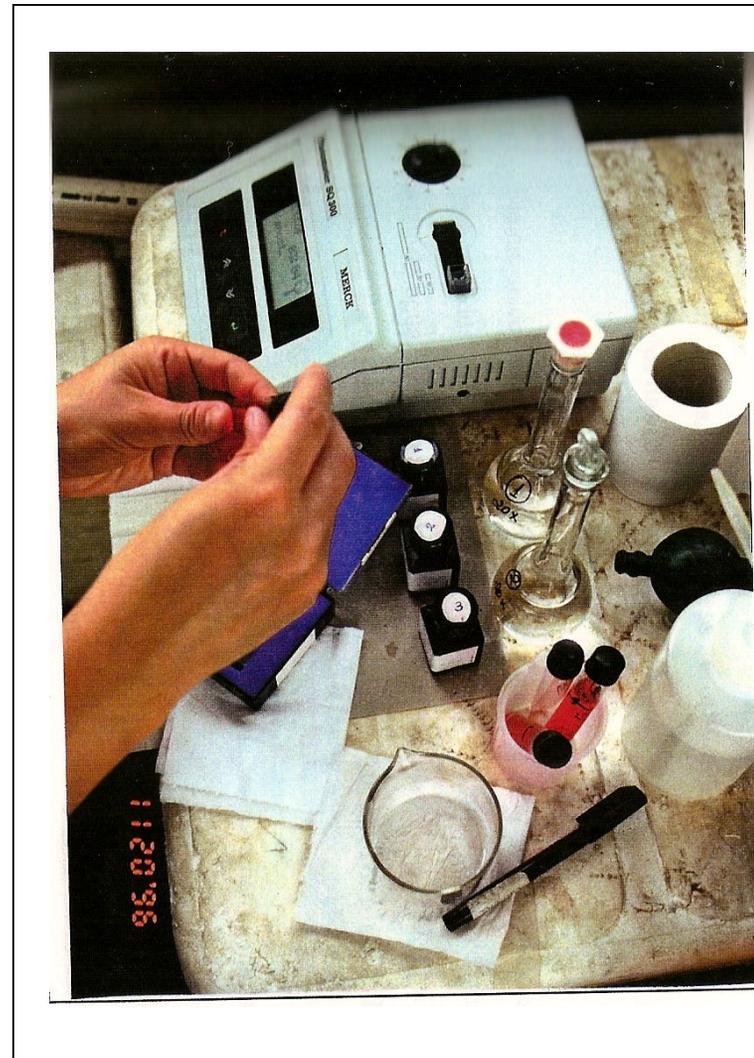


Figura 31: Equipamento portátil de campo - Photometer SQ 300 utilizado para leitura de íon ferroso, ferro total, sulfato,...

3.5.2 Parâmetros físicos, físico-químicos e químicos: metodologia de análise e tratamento dos dados

Foram selecionados os seguintes parâmetros físicos, físico-químicos e químicos a serem determinados nas águas subterrâneas: nível de água, oxigênio dissolvido (OD), temperatura da água, Eh, condutividade, sólidos totais dissolvidos (TDS), pH, resíduo seco, sulfato, sulfeto, Fe^{++} , Fe_{tot} , alcalinidade total, Cd, Co, Cu, Pb, Ni, Mn, Cr, Fe, Zn, Mo, Al, Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ .

A metodologia utilizada para a determinação destes parâmetros apresenta-se descrita na Tabela 15.

Os sete primeiros parâmetros (nível de água, OD, temperatura da água, Eh, condutividade, TDS, pH) foram determinados em campo, utilizando-se equipamentos portáteis (Figuras 30 e 31, Tabela 15). O sulfeto, Fe^{++} e Fe_{tot} também passaram a ser determinados em campo a partir do mês de julho.

As amostras coletadas para determinação de metais dissolvidos foram filtradas (filtrase aproximadamente 400 ml da amostra em membrana milipore 0,45 μm) e preservadas (5 ml HNO_3 concentrado da Merck para ajuste de pH até um valor menor que 2) conforme as técnicas estabelecidas pelo Standard Methods (1992).

Posteriormente, as amostras foram colocadas em frascos de polietileno de 100 ml (duas vias) para posterior leitura.

As determinações das concentrações dos metais foram realizadas utilizando-se o ICP-38S acoplado a este um nebulizador ultrassônico (para leitura de concentrações baixas), pertencente à Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM.

Após a realização das etapas de campo e laboratório, os resultados obtidos foram sistematizados em planilhas e adequadamente graficados para facilitar a interpretação.

Na tentativa de sintetizar todas as informações levantadas a respeito da qualidade das águas subterrâneas nos pontos amostrados, procedeu-se à determinação de um Índice Geral para Água Subterrânea - I.G.A.S., com valores representativos para a região de Charqueadas - São Jerônimo. Para tanto, empregaram-se métodos estatísticos, mais especificamente a Técnica de Análise Fatorial, pelo método de Componentes Principais, utilizando-se o software STATISTICA FOR WINDOWS 4.3™.

Tabela 15: Metodologia de análise dos parâmetros físico-químicos e químicos.

| Parâmetro | Norma | Descrição | Equipamento/ Limite de Detecção |
|---|--|---|---|
| Nível de água | | | Medidor eletrônico de nível |
| Oxigênio Dissolvido (OD) | Standard Methods 4500.0G | Oximetria | Oxímetro YSI 1,0mg O ₂ /L e 0,1mg O ₂ /L |
| Eh | Standard Methods 2580.B | Eletrodo | Mettler |
| Condutividade | Standard Methods 2510.B | Condutometria | Condutímetro 0,5 µS/cm |
| Sólidos Totais Dissolvidos (TDS) | NBR 10664 | Potenciometria | Condutímetro |
| pH | NBR 1589 CETESB L5-145 | Potenciometria | Potenciômetro Procyon e outros |
| Resíduo Seco | NBR 10664 | Gravimetria | Estufa 10 mg/L |
| Sulfato | Standard Methods 4500 - SO ₄ E | Turbidimetria (nefelometria com BaCl ₂) | Espectrofotômetro UV/V 5 mg/L |
| Sulfeto | Standard Methods | Azul de metileno | Espectrofotômetro UV/V 0,1mg/L |
| Ferro ⁺⁺ e Fetot | Standard Methods 3500 - Fe D | Absorciometria (método da O.fenantrolina) | Espectrofotômetro UV/V 0,1 mg/L |
| Alcalinidade total | Standard Methods 2320 - B | Volume de neutralização com indicador ou potenciométrica | 1 mg CaCO ₃ /L |
| Cd, Co, Cu, Pb, Ni, Mn, Cr Fe, Zn, Mo, Al, Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ | | | ICP-38S |
| Na ⁺ e K ⁺ | | | Espectrometria de Absorção Atômica em Chama |

As etapas seguidas foram as seguintes:

- análise descritiva das variáveis determinadas;
- composição da matriz de correlação;
- seleção das variáveis;
- composição da nova matriz de correlação com as variáveis selecionadas;

- aplicação da técnica de Análise de Componentes Principais;
- obtenção de um novo conjunto de variáveis sintéticas (fatores comuns) baseado nas interrelações dos dados originais;
- obtenção dos fatores e das cargas fatoriais das variáveis na composição dos fatores;
- composição final do Índice Geral de Águas Subterrâneas - I.G.A.S através do cálculo dos escores fatoriais.
- análise final dos resultados.

Cabe destacar ainda que os resultados obtidos nas determinações dos parâmetros físicos, físico-químicos e químicos foram comparados com o *background* da região (ponto branco P6) e ainda com os padrões de potabilidade da Organização Mundial da Saúde - OMS, uma vez que não existem padrões de potabilidade definidos para águas subterrâneas na legislação brasileira. A Resolução CONAMA nº 20 não se aplica ao trabalho realizado, pois refere-se ao enquadramento das águas superficiais segundo seus usos - irrigação, abastecimento público, piscicultura, recreação,, tema não abordado nesta dissertação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 FONTES POLUIDORAS - DEPÓSITOS DE REJEITOS DE CARVÃO E CINZAS

4.1.1 Caracterização dos depósitos

4.1.1.1 Descrição dos depósitos

Nesse item será apresentada a descrição geral dos depósitos de rejeitos de carvão e de cinzas (Figuras 13 e 14) que configuram-se como possíveis fontes poluidoras para as águas subterrâneas nos municípios de Charqueadas e São Jerônimo.

A Tabela 16 apresenta, de forma resumida, a constituição, a espessura média estimada dos depósitos estudados e a época de deposição para alguns destes depósitos.

Tabela 16: Características dos depósitos estudados em Charqueadas e São Jerônimo.

| Depósito | Constituição | Época de Deposição (anos) | Espessura média (m) |
|----------|---|------------------------------|------------------------|
| CH 01 | pátio de estocagem de carvão + rejeitos de carvão | | 1 a 3 |
| CH 02 | rejeitos de carvão | 1983-1986 ¹ | 0,50 |
| CH 06 | carvão + fina camada de rejeitos de carvão | até 1987 ¹ | 1 |
| CH 08 | dep. revegetado - antigo dep. de rejeitos de carvão | | 1 |
| CH 13 | cinzas + rejeitos de carvão | | 5,5 |
| CH 17 | cinzas + rejeitos de carvão | 1968-1971 ¹ | 4,5 |
| CH 20 | rejeitos de carvão + cinzas | 1970-1988 ¹ | 2 a 4 |
| SJ 01 | cinzas - UTSJ | | 1 |
| SJ 02 | pátio de estocagem do carvão + cinzas - UTSJ | ?-1996 | 2 a 4 |
| SJ 05 | cinzas - UTSJ + rejeitos | | 2 |

¹Rohde, 1995

Observou-se que diversas das áreas levantadas estão dispostas dentro do perímetro urbano dos municípios de Charqueadas e São Jerônimo, interagindo diretamente com a população assentada nas proximidades destes depósitos. Na realidade, grande parte das populações destes municípios foram assentadas sobre antigas áreas de disposição de rejeitos

de carvão e/ou de cinzas, conforme exemplificado por Rohde (1995) para as vilas Rosa, das Cinzas, Coqueiros, Cruz de Malta.

Além disso, estes municípios estão situados na porção terminal da bacia hidrográfica do *Rio Jacuí*, constituindo-se em uma região topograficamente plana e baixa, com nível d'água raso (próximo à superfície), propícia ao desenvolvimento de banhados. Observa-se que muitos depósitos foram assentados inadequadamente, diretamente ou próximos a estas áreas alagadas, podendo configurar uma situação comprometedora em termos de contaminação dos cursos d'água superficiais e dos aquíferos da região.

Os depósitos SJ 01 e SJ 02 do Município de São Jerônimo (Figura 13) são constituídos, conforme Tabela 16, de cinzas provenientes da Usina Termoeletrica de São Jerônimo-UTSJ (CEEE), sendo dispostas nas proximidades da usina, às margens do Rio Jacuí.

Atualmente, o depósito SJ 01 (Figura 32) encontra-se desativado para o descarte de cinzas e sua área tem sido utilizada para plantação de arroz, observando-se poucos resquícios da atividade anterior de descarte de cinzas onde as cinzas apresentam-se já misturadas com o solo.



Figura 32: Visão geral do depósito SJ 01, antiga área de descarte de cinzas.

O depósito SJ 02 abrange o pátio de disposição do carvão e as áreas de descarte de cinzas da UTSJ. No pátio, com capacidade de armazenagem de 40000 ton, o carvão é disposto sob a forma de pilhas - 2 a 3 m de altura, sem cobertura, para posterior aproveitamento para geração de energia elétrica (Figuras 33 e 34).

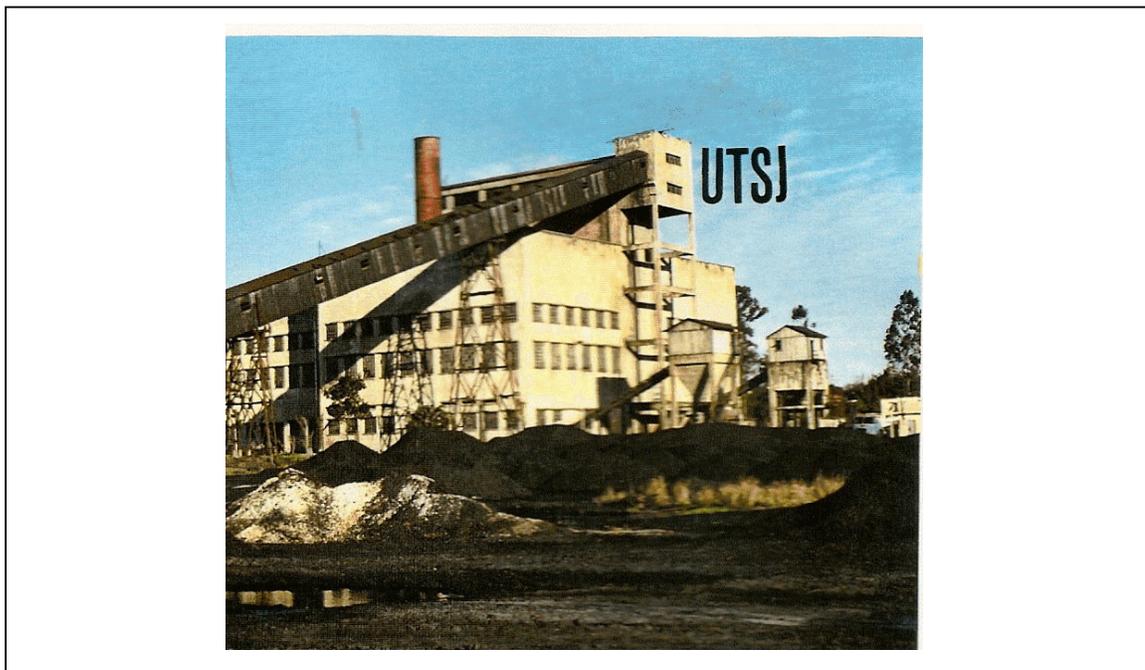


Figura 33: Pátio de estocagem do carvão onde observa-se, ao fundo, a UTSJ.



Figura 34: Detalhe das pilhas de carvão dispostas no depósito SJ 02.

As cinzas grossas geradas em maior proporção a partir da queima do carvão em grelhas são dispostas em bancadas extensas com cerca de 4 metros de altura com a superfície terraplanada (Figuras 35 e 36).



Figura 35: Área de descarte das cinzas grossas - depósito SJ 02.



Figura 36: Detalhe da área de descarte das cinzas grossas - depósito SJ 02, onde observa-se a altura de aproximadamente 4 metros da bancada.

As cinzas finas estão sendo depositadas em bacias (Figura 37), nas quais nota-se o aparecimento natural de vegetação de pequeno e médio porte incapaz de recobrir toda a superfície das áreas. Algumas tentativas de reflorestamento tem sido realizadas, não obtendo-se, até o presente, bons resultados.

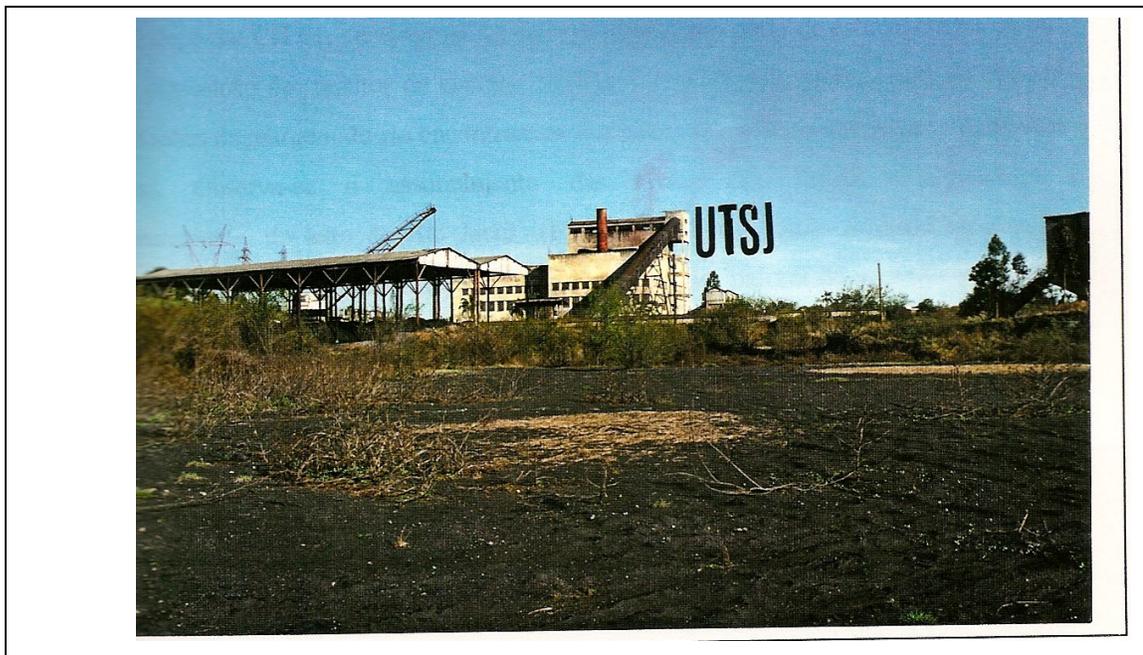


Figura 37: Área de descarte das cinzas finas no depósito SJ 02, observando-se, ao fundo a UTSJ.

Cabe destacar que, nas imediações deste depósito - SJ 02, as cinzas provenientes da Usina tem sido dispostas em outras áreas de propriedade da CEEE, sobre as quais assentaram-se, de forma irregular, populações de baixa renda. Estas áreas apresentam uma fina cobertura de solo e quase sempre estão destituídas de vegetação, o que dificultou sua delimitação e mapeamento adequados.

O depósito SJ 05 localiza-se na área de influência do Arroio Passo do Leão e é composto por cinzas da UTSJ (Tabela 16). Sobre este depósito e imediações há o desenvolvimento de ocupação antrópica de baixa renda, conformando a Vila Lindos Ares. Observa-se o crescimento natural de vegetação de pequeno e médio porte, bem como o plantio de hortaliças pelos moradores da vila. Em diversos locais nota-se a presença de sulcamentos e voçorocas. As áreas expostas tem servido como depósito de lixo para os moradores .

No Município de Charqueadas, os depósitos (Figura 14) constituem-se de rejeitos de carvão e/ou cinzas (Tabela 16) colocados nas partes mais baixas - banhados naturais de terraços aluvionares, assentando-se sobre a sedimentação quaternária do Rio Jacuí composta por argila (6-9 m), areia e cascalho fino (aproximadamente 10 m) sobrepostos à Fm. Rio do Rasto.

O depósito CH 01, pertencente à COPELMI, abrange o pátio de estocagem de carvão e áreas de disposição de rejeitos de carvão. Taludes formados pelo aterramento do depósito, nas imediações da margem do rio encontram-se erodidos com o desenvolvimento de ravinas e voçorocas. Observa-se o assoreamento das áreas mais baixas circundantes e, conseqüentemente, do leito do Rio Jacuí (Figura 38). Em algumas porções do depósito, próximas ao Rio Jacuí, nota-se o crescimento de vegetação natural de pequeno porte.



Figura 38: Depósito CH 01 - assoreamento dos baixios, às margens do Rio Jacuí.

O depósito CH 02 apresenta-se praticamente todo recoberto por vegetação natural de pequeno e médio porte (Figura 39). Nas partes próximas ao arroio, foi realizado um aterro sobre o depósito.



Figura 39: Detalhe do depósito CH 02, nas proximidades da ponte do Arroio dos Ratos.

O depósito CH 08, também de propriedade da COPELMI, apresenta-se, atualmente, totalmente revegetado com gramíneas (Figura 40), no qual os rejeitos depositados antigamente estão misturados e incorporados à camada de solo desenvolvida.

O depósito CH 13, de propriedade da COPELMI, apresenta uma fina camada de rejeitos de carvão - 0,25 m na sua superfície que recobre uma espessa camada de cinzas - 5,5 m. Este depósito encontra-se parcialmente coberto por vegetação natural - gramíneas, arbustos e árvores de pequeno porte. Na porção central deste depósito observa-se o desenvolvimento de atividade antrópica de baixa renda.

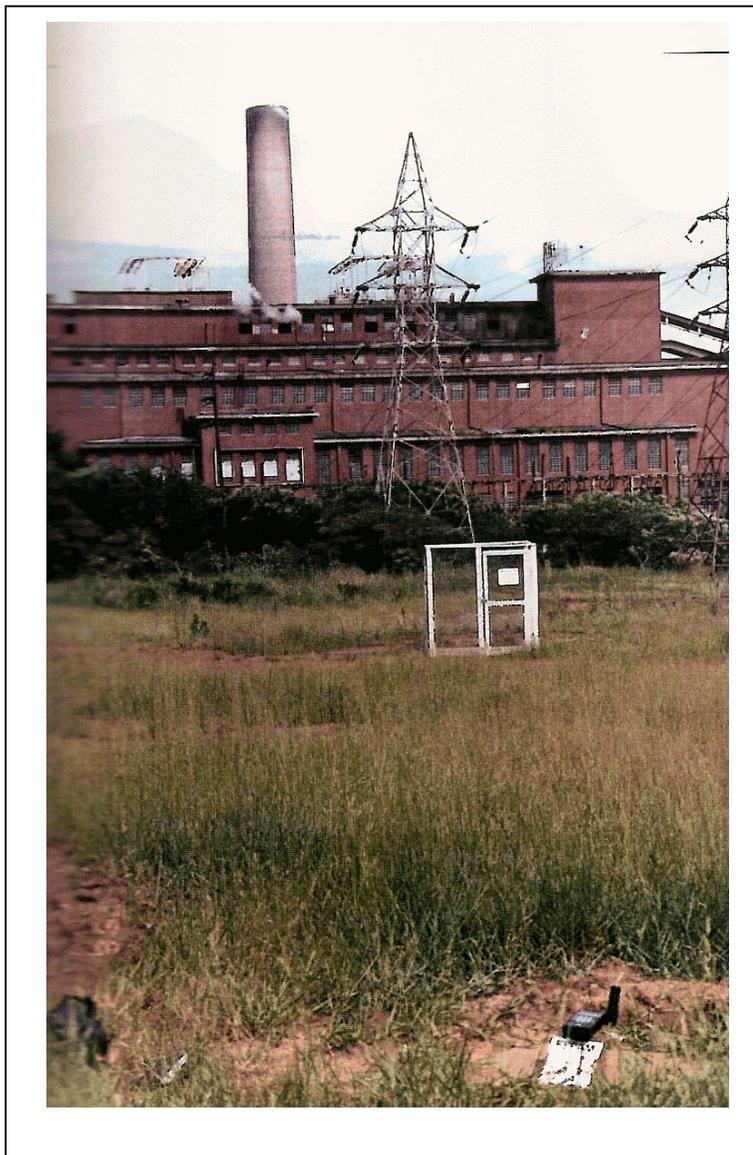


Figura 40: Detalhe do depósito CH 08, antiga área de deposição de rejeitos, atualmente revegetado.

O depósito CH 17, da COPELMI, apresenta uma fina camada de rejeitos de carvão - 0,25 m na sua superfície que recobre uma espessa camada de cinzas proveniente da Usina Termoelétrica de Charqueadas - TERMOCHAR, superior a 4 m (Figuras 41 e 42), terraplanada. Observam-se ainda algumas pilhas de carvão (1 m de altura) dispostas de forma irregular no depósito. Algumas porções deste depósito encontram-se recobertas por vegetação natural de pequeno e médio porte.

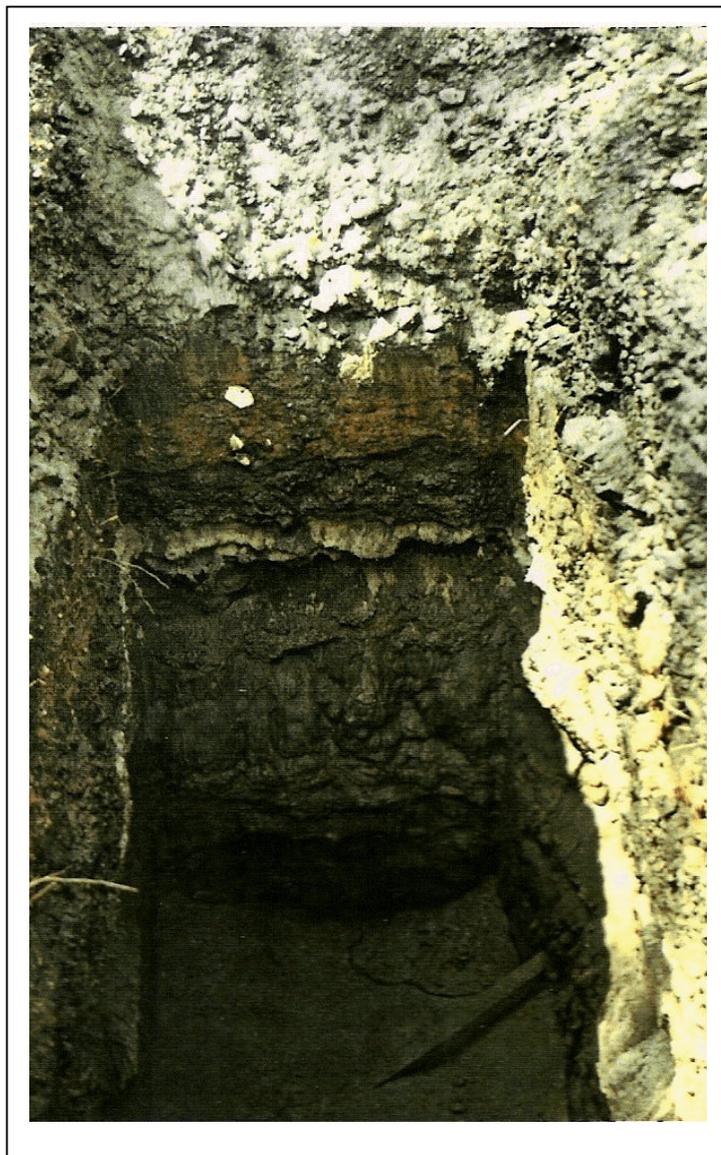


Figura 41: Depósito CH 17, de cinzas de carvão, em frente a Aços Finos Piratini.

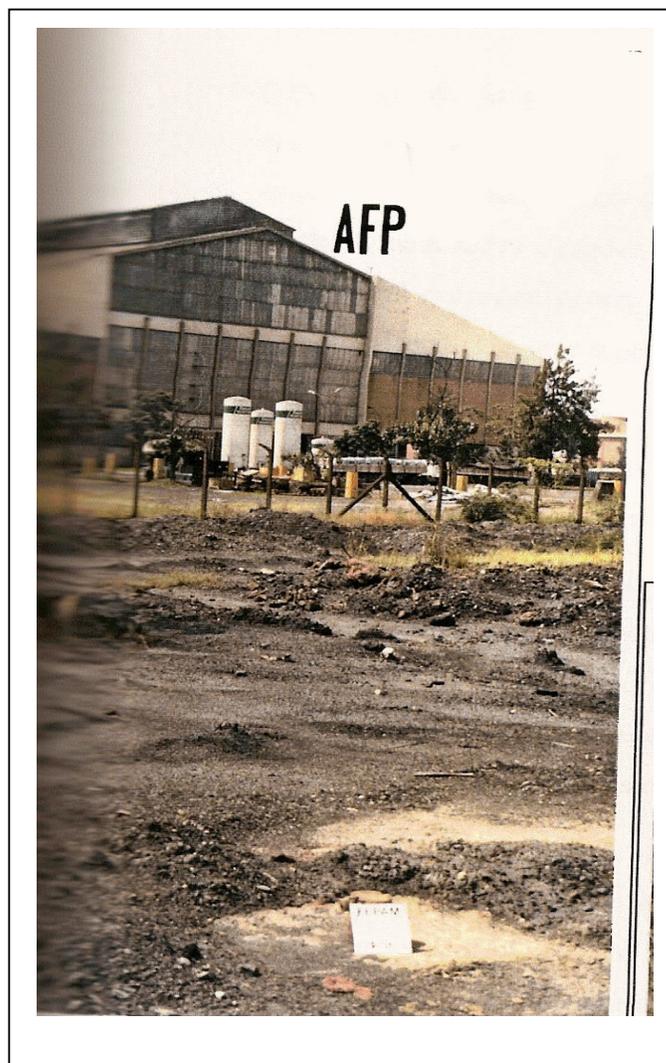


Figura 42: Detalhe do depósito CH 17, onde observa-se, no perfil escavado, a espessa camada de cinzas - superior a 4 metros ali disposta.

O depósito CH 20, de propriedade da empresa COPELMI, situa-se na localidade conhecida como Capão da Roça e constitui a maior área utilizada como depósito de rejeitos nos municípios de Charqueadas e São Jerônimo. O limite norte do depósito é ocupado por um lago, mata nativa e capões florestados com eucaliptos associados a arbustos nativos esparsos. Ao sul e à oeste ocorre a mesma seqüência de núcleos florestados com eucaliptos e à leste uma cerca de arame separa uma faixa de campo nativo baixo.

Segundo COPELMI (1994), este depósito situa-se em uma área topograficamente plana com lençol freático muito próxima à superfície - área de banhado. Assenta sobre sedimentos argilo-conglomeráticos fluviais e solo argiloso de caráter orgânico. O sentido de fluxo das águas subterrâneas é preferencialmente lateral, para sudoeste.

Sobre a camada depositada e terraplanada de rejeitos de carvão (provenientes do lavador de Charqueadas), não houve recobrimento da superfície exposta (Figura 43). Foram realizadas algumas tentativas infrutíferas de revegetação na porção SE do depósito. Somente as áreas de disposição de cinzas localizadas nas porções norte e nordeste do depósito foram revegetadas com eucaliptos (porção norte) e com vegetação natural (maricás, gramíneas, arbustos).

Nos limites leste e oeste foram interceptadas valetas de proteção (Figura 44) que captam as águas de escoamento em direção à face sul, onde atingem a drenagem natural da região. Nos limites leste e sul do depósito observam-se significativos danos à cobertura vegetal, onde a faixa de vegetação campestre nativa localizada entre o talude de deposição e a valeta de proteção foi totalmente destruída (Figura 45).

Cabe ressaltar a presença de um núcleo de vegetação nativa denominado Capão da Roça no limite norte do depósito - proximidades do lago, e que, pela Legislação Municipal é considerada área de conservação.

4.1.1.2 Análises físico-químicas dos depósitos

Os resultados das determinações de teores de cinzas, enxofre total -Stot, carbobo total - Ctot e pH inicial nas amostras de rejeitos de carvão e cinzas estudadas são apresentados na Tabela 17 e Figuras 46 e 47.



Figura 43: Visão geral do depósito CH 20, na localidade de Capão da Roça, com a superfície totalmente exposta.



Figura 44: Detalhe das canaletas de proteção construídas no depósito CH 20 - encontro das canaletas leste e oeste, onde observa-se a coloração vermelho-alaranjada da água captada.



Figura 45: Detalhe do depósito CH 20, onde observa-se a ausência de cobertura vegetal na área localizada entre o talude de deposição dos rejeitos e a canaleta de proteção.

Tabela 17: Resultados das determinações dos teores de cinzas, Stot, Ctot e pH inicial.

| Amostras | %Cinzas | % Stot (b.s.) | % Ctot* (b.s.) | pH |
|----------|---------|---------------|----------------|------|
| CH 20A | 74,6 | 0,55 | 12,66 | 3,69 |
| CH 20B | 74,5 | 0,66 | 13,79 | 3,77 |
| CH 20C | 78 | 0,72 | 9,97 | 3,6 |
| CH 20D | 77 | 0,49 | 11,59 | 4 |
| CH 13A | 70,2 | 0,81 | 16,85 | 3,49 |
| CH 13B | 75,1 | 0,83 | 13,46 | 3,56 |
| SJ 02A | 47,3 | 0,4 | 40,4 | 5,52 |
| SJ 02B | 87,7 | 0,05 | 13,7 | 7,28 |
| SJ 02C | 85,22 | 0,04 | 11,85 | 5,62 |
| P1 A2 | 74,4 | 2,79 | 11,51 | 2,74 |
| P2 A1 | 74,32 | 1,42 | 13,09 | 2,70 |
| P2 A2 | 79,55 | 3,29 | 8,52 | 2,80 |
| P3 A1 | 74,08 | 3,63 | 11,6 | 2,60 |
| P7 A1 | 95,19 | 0,10 | 3,28 | 8,57 |
| P15 | 96,91 | 0,02 | 1,86 | 8,88 |
| P16 | 95,17 | 0,16 | 2,79 | 5,10 |

*Teor de matéria orgânica b.s. = base seca

Observando-se os resultados obtidos constata-se que o pH (Figura 46) das amostras CH 20A, CH 20B, CH 20C, CH 20D, P1A2, P2A1, P2A2, P3A1, CH 13A e CH 13B coletadas nos depósitos CH 20 e CH 13 é ácido ($\leq 4,0$). Tal acidez, reportada em rejeitos de carvão por diversos autores em diferentes carvões é atribuída à presença de piritita nestes depósitos, a qual, sob condições favoráveis - presença de oxigênio e água, degrada-se e promove a geração de drenagem ácida.

Ainda com relação ao pH (Figura 46), observa-se que as amostras de cinzas apresentam, ao contrário dos rejeitos de carvão, características neutras a básicas ($7,28 < \text{pH} < 8,88$) como é o caso das amostras SJ 02B, SJ 02C, P7A1, P15 coletadas nos depósitos SJ 02, CH 20 (P7A1) e CH 13 (P15). Os altos teores de cinzas: 85,22-96,91% e baixos de Stot: 0,02-0,16% observados na Tabela 17 para estas amostras confirmam a constituição das mesmas (cinzas de carvão).

As diferenças de pH e teores de cinzas, Stot, Ctot observadas no depósito CH 13 e acima apresentadas para as amostras CH 13A e CH 13B (coletadas na camada mais superficial do depósito, de rejeitos de carvão) em relação a amostra P15 (coletada em profundidade, constituída por cinzas) são explicadas pela diferente constituição dos materiais coletados neste depósito, conforme descrito no item 4.1.1.1. A mesma explicação pode ser aplicada para os depósitos CH 20 (amostras de rejeitos de carvão: CH 20A, CH 20B, CH 20C, P1A2, P2A1, P2A2, P3A1 e de cinzas: P7A1) e SJ 02 (amostras de carvão: SJ 02A, cinzas pesadas: SJ 02B e cinzas leves: SJ 02C).

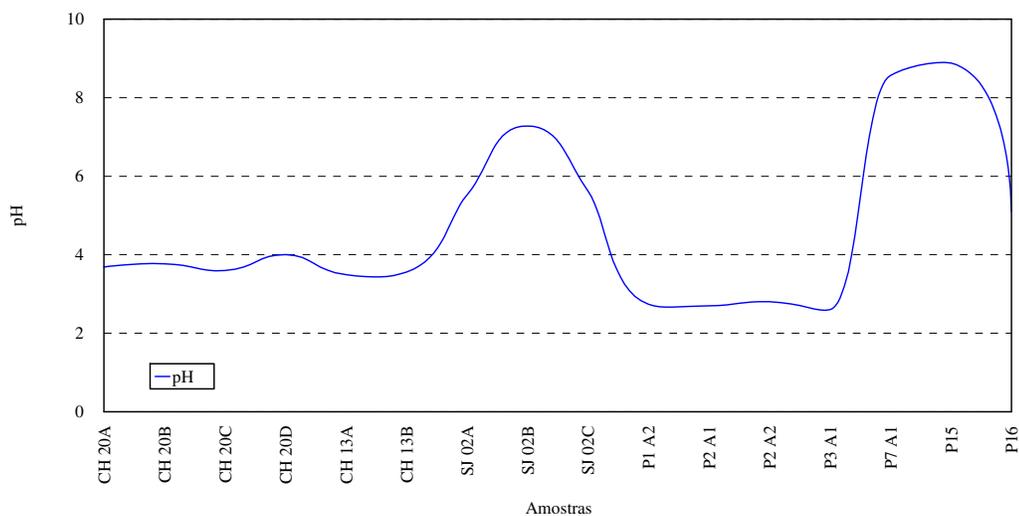


Figura 46: Valores de pH para as amostras de rejeitos de carvão e cinzas estudadas.

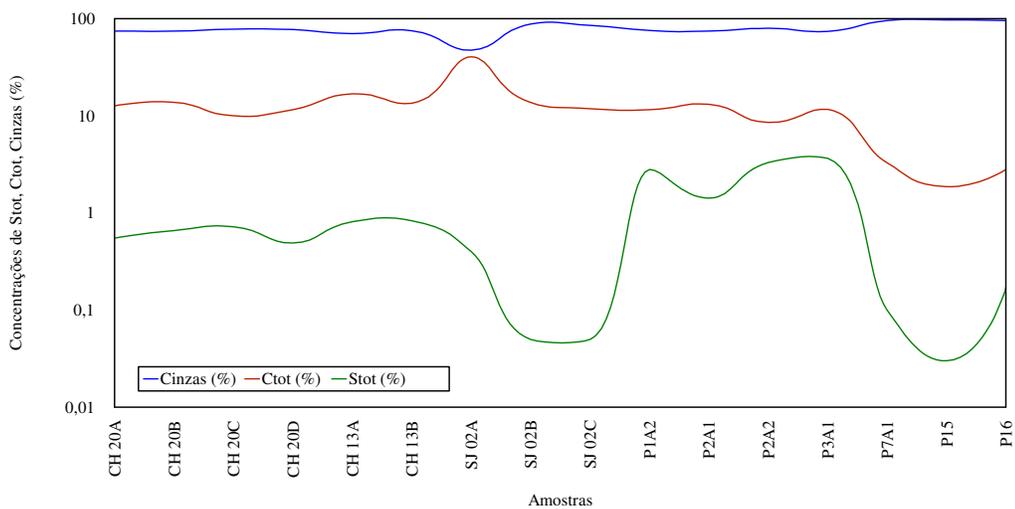


Figura 47: Teores de cinzas, Stot e Ctot para as diferentes amostras estudadas.

Cabe ressaltar ainda, as variações observadas no depósito CH 20 para o mesmo material - rejeitos de carvão, em diferentes profundidades. As amostras P1A2, P2A1, P2A2 e P3A1 foram coletadas em níveis mais profundos (Tabela 11, item 4.1.1.1), enquanto que as amostras CH 20A, CH 20B e CH 20C foram coletadas na superfície do depósito, em diferentes locais (Tabela 10, item 4.1.1.1). As amostras de níveis mais profundos apresentaram pH mais ácido e teores de Stot mais elevados (Tabela 17 e Figura 47) indicando

a presença de sulfetos, principalmente da pirita, cuja oxidação ainda está ocorrendo. Provavelmente nas amostras CH 20A, CH 20B e CH 20C o pH próximo ao neutro possa ser explicado pelo fato da oxidação dos sulfetos já ter ocorrido devido a atuação facilitada dos processos intempéricos na superfície destes depósitos.

Nas Figuras 48 a 55 e Tabelas 18 a 20 são apresentadas as concentrações e/ou percentuais dos metais Cd, Co, Cu, Pb, Ni, Mn, Cr, Fe e Zn obtidos a partir dos testes de extração total, lixiviação e solubilização realizados nas amostras de rejeitos de carvão e cinzas.

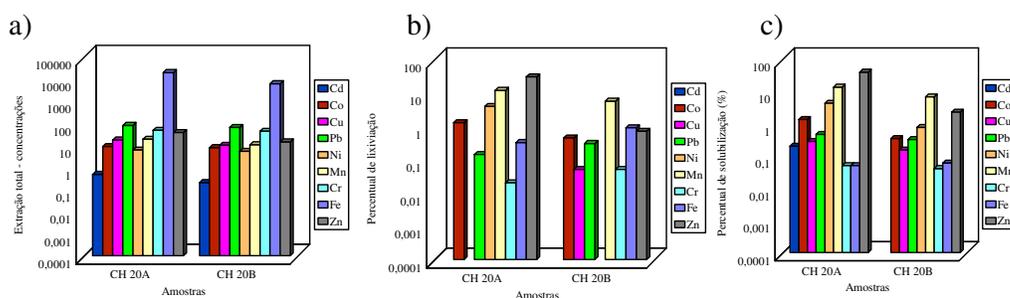


Figura 48: Comportamento dos elementos estudados nas amostras CH 20A e CH 20B: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b) lixiviação (%); c) solubilização (%).

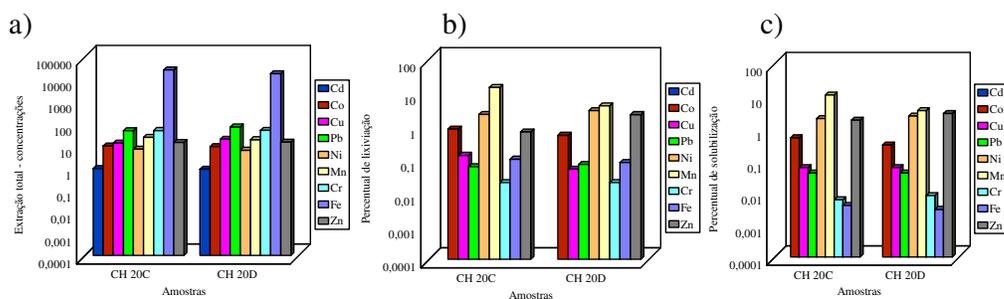


Figura 49: Comportamento dos elementos estudados nas amostras CH 20C e CH 20D: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b) lixiviação (%); c) solubilização (%).

a)

b)

c)

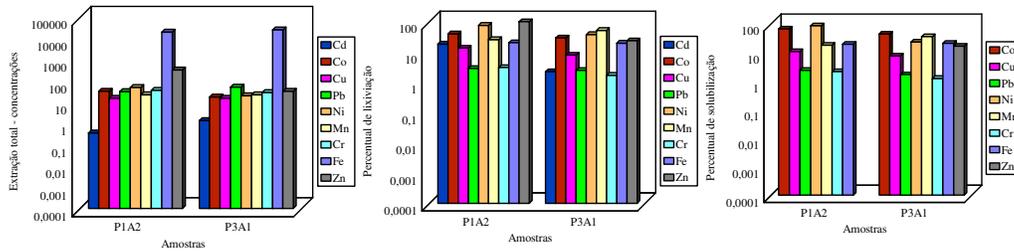


Figura 50: Comportamento dos elementos estudados nas amostras P1A2 e P3A1: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b) lixiviação (%); c) solubilização (%).

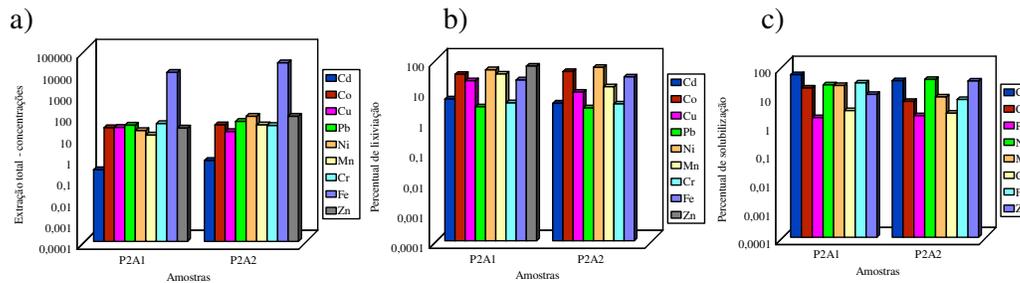


Figura 51: Comportamento dos elementos estudados nas amostras P2A1 e P2A2: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b) lixiviação (%); c) solubilização (%).

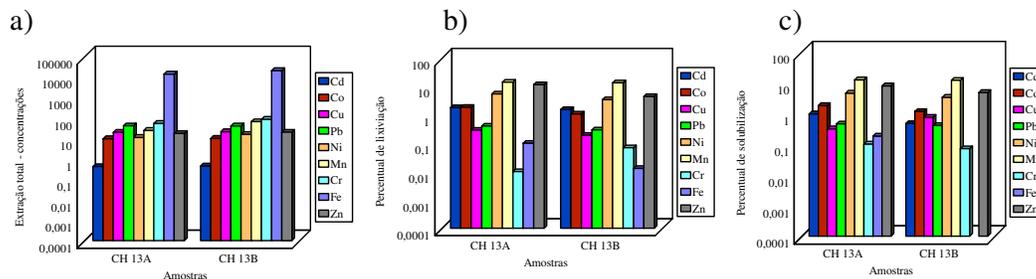


Figura 52: Comportamento dos elementos estudados nas amostras CH13A e CH13B: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b) lixiviação (%); c) solubilização (%).

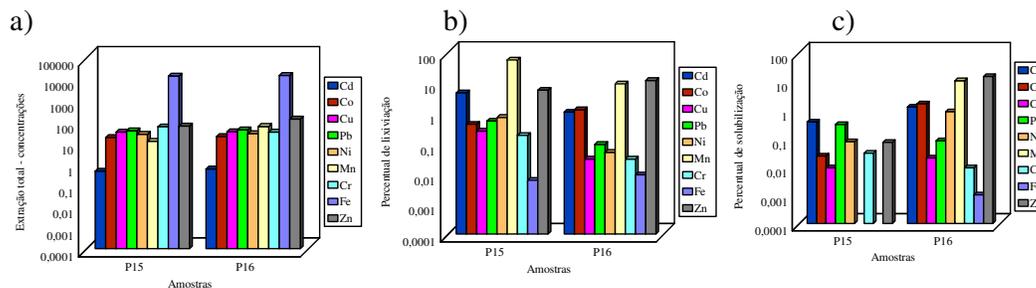


Figura 53: Comportamento dos elementos estudados nas amostras P15 e P16: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b) lixiviação (%); c) solubilização (%).

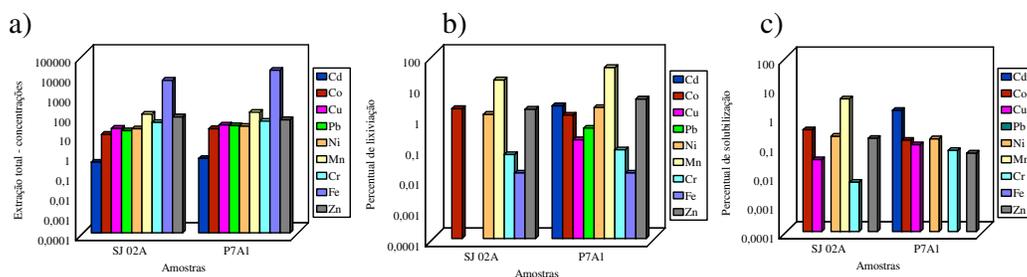


Figura 54: Comportamento dos elementos estudados nas amostras SJ01A e P7A1: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b) lixiviação (%); c) solubilização (%).

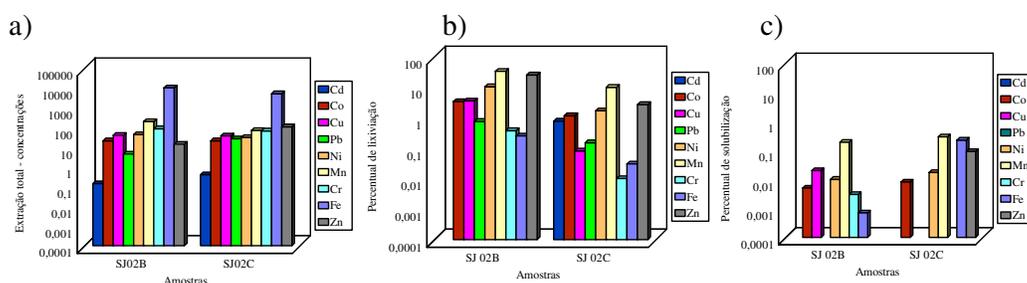


Figura 55: Comportamento dos elementos estudados nas amostras SJ01B e SJ01C: a) extração total ($\mu\text{g/g}$); b) lixiviação (%); c) solubilização (%).

Tabela 18: Concentrações dos elementos metálicos obtidas na extração total ($\mu\text{g/g}$).

| Amostras | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn |
|----------|--------|-------|--------|--------|--------|---------|--------|----------|--------|
| CH 13A | 0,417 | 9,52 | 19,71 | 41,22 | 11,04 | 24,5 | 54,05 | 14003,5 | 17,27 |
| CH 13B | 0,438 | 9,94 | 21,43 | 40,99 | 15,56 | 65,16 | 84,85 | 20473,8 | 20,15 |
| CH 20A | 0,478 | 8,72 | 17,15 | 78,77 | 6,09 | 18,86 | 46,77 | 19282,2 | 37,21 |
| CH 20B | 0,203 | 7,69 | 10 | 64,05 | 5,29 | 10,46 | 42,5 | 6057,9 | 13,96 |
| CH 20C | 0,862 | 8,99 | 12,22 | 44,98 | 6,46 | 22,1 | 45,65 | 25155,6 | 13,08 |
| CH 20D | 0,81 | 8,64 | 18,31 | 65,96 | 5,81 | 17,32 | 45,82 | 17097 | 13,72 |
| SJ 02A | 0,372 | 9,654 | 19,575 | 14,828 | 18,347 | 102,234 | 39,198 | 5304,701 | 73,574 |
| SJ 02B | 0,14 | 20,7 | 39,8 | 4,41 | 42,58 | 193,67 | 84 | 10024,25 | 14,11 |
| SJ 02C | 0,392 | 20,7 | 36,6 | 26,6 | 30,2 | 69,1 | 65,6 | 5060,2 | 106,2 |
| P1 A2 | 0,355 | 32,5 | 15,1 | 31,8 | 49,9 | 22,7 | 36,6 | 20010 | 611,73 |
| P2 A1 | 0,2325 | 22,3 | 23 | 28,8 | 16,2 | 10,1 | 34,2 | 9051,6 | 21,4 |
| P2 A2 | 0,63 | 30,5 | 14,8 | 43,4 | 76,8 | 30,5 | 27,8 | 25430 | 75,8 |
| P3 A1 | 1,3525 | 17,5 | 15,4 | 50,9 | 20,2 | 22,5 | 28,4 | 25512 | 33,1 |
| P7 A1 | 0,585 | 18,9 | 28,7 | 26,4 | 25,1 | 127,7 | 45 | 16799 | 52,9 |
| P15 | 0,443 | 17,3 | 30,8 | 35,4 | 24,4 | 111,3 | 55,2 | 13366 | 59,4 |
| P16 | 0,572 | 19,2 | 32,2 | 39,8 | 26,1 | 57,1 | 31,2 | 14298 | 128,4 |

Tabela 19: Percentuais dos elementos estudados - lixiviação (%).

| Amostras | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| CH 13A | 1,8 | 1,87 | 0,29 | 0,41 | 5,46 | 14,28 | 0,01 | 0,1 | 11,69 |
| CH 13B | 1,56 | 1,08 | 0,19 | 0,3 | 3,46 | 13,48 | 0,07 | 0,013 | 4,54 |
| CH 20A | 4,6 | 1,27 | 0 | 0,14 | 3,87 | 11,71 | 0,02 | 0,32 | 29,83 |
| CH 20B | 0 | 0,44 | 0,05 | 0,3 | 0 | 5,55 | 0,05 | 0,89 | 0,7 |
| CH 20C | 0 | 0,8 | 0,13 | 0,06 | 2,2 | 14,21 | 0,02 | 0,1 | 0,66 |
| CH 20D | 0 | 0,52 | 0,05 | 0,07 | 2,86 | 3,98 | 0,02 | 0,08 | 2,17 |
| SJ 02A | 0 | 1,79 | 0 | 0 | 1,17 | 15,55 | 0,056 | 0,014 | 1,7 |
| SJ 02B | 0 | 3,35 | 3,49 | 0,75 | 10,12 | 32,63 | 0,37 | 0,25 | 24,73 |
| SJ 02C | 0,76 | 1,15 | 0,08 | 0,15 | 1,66 | 9,71 | 0,01 | 0,03 | 2,68 |
| P1 A2 | 17,88 | 38,77 | 13,18 | 2,8 | 74,15 | 25,02 | 3,03 | 19,87 | 97,16 |
| P2 A1 | 4,92 | 31,21 | 19,3 | 2,64 | 44,13 | 31,78 | 3,59 | 20,53 | 58,41 |
| P2 A2 | 3,48 | 38,68 | 8,04 | 2,44 | 53,51 | 12,09 | 3,3 | 25,77 | 68,94 |
| P3 A1 | 2,22 | 28,51 | 7,72 | 2,43 | 36,83 | 50,22 | 1,67 | 19,27 | 23,08 |
| P7 A1 | 2,22 | 1,1 | 0,17 | 0,41 | 1,95 | 39,93 | 0,08 | 0,014 | 3,66 |
| P15 | 4,541 | 0,42 | 0,25 | 0,54 | 0,71 | 55,88 | 0,18 | 0,006 | 5,64 |
| P 16 | 1,05 | 1,26 | 0,03 | 0,09 | 0,05 | 9,05 | 0,03 | 0,009 | 11,68 |

Tabela 20: Percentuais dos elementos estudados - solubilização (%).

| Amostras | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| CH 13A | 0,96 | 1,77 | 0,31 | 0,45 | 4,51 | 12,2 | 0,1 | 0,18 | 7,76 |
| CH 13B | 0,46 | 1,14 | 0,73 | 0,4 | 3,3 | 11,85 | 0,07 | 0 | 4,7 |
| CH 20A | 0,2 | 1,35 | 0,28 | 0,46 | 4,24 | 13,41 | 0,05 | 0,05 | 39,02 |
| CH 20B | 0 | 0,34 | 0,15 | 0,32 | 0,76 | 6,74 | 0,04 | 0,06 | 2,23 |
| CH 20C | 0 | 0,5 | 0,06 | 0,04 | 1,96 | 10,72 | 0,006 | 0,004 | 1,75 |
| CH 20D | 0 | 0,3 | 0,06 | 0,04 | 2,39 | 3,46 | 0,008 | 0,003 | 2,83 |
| SJ 02A | 0 | 0,32 | 0,03 | 0 | 0,19 | 3,67 | 0,005 | 0 | 0,16 |
| SJ 02B | 0 | 0,005 | 0,02 | 0 | 0,01 | 0,19 | 0,003 | 0,0007 | 0 |
| SJ 02C | 0 | 0,008 | 0 | 0 | 0,017 | 0,291 | 0 | 0,222 | 0,09 |
| P1 A2 | - | 66,46 | 10,66 | 2,37 | 85,57 | 17,88 | 2,09 | 19,03 | 0 |
| P2 A1 | - | 50,22 | 17 | 1,55 | 22,24 | 20,79 | 2,73 | 25,87 | 10,14 |
| P2 A2 | - | 30,62 | 5,84 | 1,82 | 34,11 | 8,23 | 2,22 | 6,69 | 30,34 |
| P3 A1 | - | 44 | 7,46 | 1,65 | 22,72 | 35,91 | 1,21 | 20,59 | 16,61 |
| P7 A1 | 1,46 | 0,14 | 0,097 | 0 | 0,155 | 0 | 0,062 | 0 | 0,05 |
| P15 | 0,36 | 0,023 | 0,009 | 0,296 | 0,073 | 0 | 0,029 | 0 | 0,069 |
| P16 | 1,22 | 1,56 | 0,02 | 0,08 | 0,83 | 10,03 | 0,009 | 0,001 | 14,33 |

Cabe destacar que o método de extração total é aplicado para a obtenção das concentrações totais dos elementos dos materiais estudados, enquanto que os métodos de lixiviação/solubilização são realizados para obtenção da mobilidade geoquímica, ou seja, do percentual lixiviado ou solubilizado dos elementos em relação às concentrações totais presentes.

Desta forma, a partir da aplicação dos três métodos foi possível elaborar uma classificação de mobilidade dos metais para as amostras estudadas, comparando-se os percentuais de lixiviação e solubilização com as concentrações totais dos metais (Tabela 21).

Tabela 21: Ordem decrescente de mobilidade dos metais (lixiviação e solubilização) em comparação às concentrações totais dos metais (extração total).

| Amostra | Extração Total | Lixiviação | Solubilização |
|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| CH 20A | Fe>Pb>Cr>Zn>Mn=Cu>Co>Ni>Cd | Zn>Mn>Ni>Co>Fe>Pb>Cr>Cd>Cu | Zn>Mn>Ni>Co>Pb>Cu>Cd>Cr=Fe |
| CH 20B | Fe>Pb>Cr>Zn=Cu=Mn>Co>Ni>Cd | Mn>Fe>Zn>Co>Pb>Cu>Cr>Cd>Ni | Mn>Zn>Ni>Pb=Co>Cu>Fe>Cr>Cd |
| CH 20C | Fe>Pb=Cr>Mn>Cu>Co>Zn>Ni>Cd | Mn>Ni>Co>Zn>Cu>Fe>Pb>Cr>Cd | Mn>Zn=Ni>Co>Cu>Pb>Cr>Fe>Cd |
| CH 20D | Fe>Pb>Cr>Mn=Cu>Co>Zn>Ni>Cd | Mn>Ni>Zn>Co>Fe=Pb>Cu>Cr>Cd | Mn>Zn>Ni>Co>Cu>Pb>Cr>Fe>Cd |
| P1A2 | Fe>Zn>Ni>Co>Pb>Cr>Mn>Cu>Cd | Zn>Ni>Co>Mn>Cd>Fe>Cu>Pb=Cr | Ni>Co>Mn=Fe>Cu>Pb=Cr>Zn |
| P3A1 | Fe>Pb>Zn>Cr=Co>Mn=Ni>Cu>Cd | Mn>Ni>Co>Zn>Fe>Cu>Pb>Cd>Cr | Co>Mn>Ni=Fe>Zn>Cu>Pb>Cr |
| P2A1 | Fe>Cr>Pb>Cu=Co>Zn>Ni>Mn>Cd | Zn>Ni>Co>Mn>Cu>Fe>Cd>Cr>Pb | Cd>Cr>Pb=Ni>Co>Fe>Mn>Cu |
| P2A2 | Fe>Zn=Ni>Pb>Co>Mn>Cr>Cu>Cd | Ni>Co>Fe>Mn>Cu>Cd>Cr>Pb>Zn | Cd=Pb=Fe>Ni=Co>Cr>Mn=Cu |
| CH 13A | Fe>Pb=Cr>Mn=Cu>Zn>Co>Ni>Cd | Mn>Zn>Ni>Cd=Co>Pb>Cu>Fe>Cr | Mn>Zn>Ni>Co>Cd>Pb>Cu>Fe>Cr |
| CH 13B | Fe>Cr>Mn>Pb>Cu>Zn=Ni>Co>Cd | Mn>Zn>Ni>Cd>Co>Pb>Cu>Cr>Fe | Mn>Zn>Ni>Co>Cu>Cd=Pb>Cr>Fe |
| P7A1 | Fe>Mn>Cr=Zn>Ni=Pb=Cu>Co>Cd | Mn>Zn>Cd>Ni>Co>Pb>Cu>Cr>Fe | Cd>Ni>Co>Cu>Cr>Zn>Pb=Mn=Fe |
| P15 | Fe>Zn=Cr>Pb>Cu>Ni>Co>Mn>Cd | Mn>Zn=Cd>Ni>Pb>Co>Cu>Cr>Fe | Cd>Pb>Ni>Zn>Cr>Co>Cu>Mn=Fe |
| P16 | Fe>Zn>Mn>Pb>Cu>Ni=Cr>Co>Cd | Zn>Mn>Co>Cd>Pb>Ni>Cu=Cr>Fe | Zn>Mn>Co>Cd>Ni>Pb>Cu>Cr>Fe |
| SJ 02A | Fe>Mn>Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>Co>Cd | Mn>Co>Zn>Ni>Cr>Fe>Cd=Cu=Pb | Mn>Co>Zn>Ni>Cu>Cr>Cd=Pb=Fe |
| SJ 02B | Fe>Mn>Cr>Ni=Cu>Co>Zn>Pb>Cd | Mn>Zn>Ni>Co=Cu>Pb>Cr>Fe>Cd | Mn>Cu>Ni>Co>Cr>Fe>Cd=Pb=Zn |
| SJ 02C | Fe>Zn>Mn=Cr>Cu>Pb=Ni>Co>Cd | Mn>Zn>Ni>Co>Cd>Pb>Cu>Fe>Cr | Mn>Fe>Zn>Ni>Co>Cd=Cu=Pb=Cr |

A simples análise da Tabela 21 comprova que nem sempre o elemento presente em maior concentração no resíduo em estudo será, necessariamente, o mais móvel. Assim sendo, as maiores concentrações em todas as amostras são observadas para o elemento Fe, entretanto

este elemento foi, praticamente, o menos móvel para ambos os testes, de lixiviação e de solubilização. Os elementos Pb e Zn também aparecem em concentrações significativas nas amostras estudadas.

O Mn foi o elemento mais móvel seguido do Zn e do Ni, apresentando os maiores percentuais de lixiviação e solubilização. Entre os elementos menos móveis destacam-se o Fe, já comentado acima, e o Cr. Os demais elementos - Cd, Co, Pb e Cu apresentaram comportamento intermediário, com moderada a baixa mobilidade para a maior parte das amostras.

O alto percentual de lixiviação do Mn pode ser atribuído a sua freqüente associação geoquímica a carbonatos, facilitando sua liberação para o meio, reportada em diversos trabalhos (Eary *et al.*, 1990; Sanchez *et al.*, 1985; Teixeira *et al.*, 1994). Além desta associação, o Ni, juntamente com o Zn, apresentam-se associados, nos rejeitos de carvão, a sulfetos como a pirita e, secundariamente, à galena, os quais, pela atuação de processos intempéricos podem ser facilmente alterados promovendo a liberação destes metais (Raask, 1985; Querol *et al.*, 1995).

Observa-se ainda que, de uma forma geral, as amostras de rejeitos de carvão, principalmente aquelas coletadas em profundidade, apresentaram percentuais de lixiviação e solubilização maiores em relação às amostras de cinzas, sugerindo um potencial poluidor mais elevado para as amostras de rejeito (Tabelas 19 e 20). Apesar dos percentuais lixiviados e solubilizados de Ni, Mn e Zn para as amostras de rejeitos (P1A2, P2A1, P3A1) serem elevados, estes elementos mostraram um percentual ainda mais significativo para as amostras de cinzas. Provavelmente este fato pode ser associado, conforme já comentado, à facilidade de lixiviação/solubilização destes elementos devido a sua associação a sulfetos, óxidos ou carbonatos, além de sua concentração preferencial nas superfícies das partículas nas cinzas de carvão (Sanchez *et al.*, 1994; Teixeira *et al.*, 1992).

Em relação à toxicidade dos resíduos estudados, foram comparados alguns dos resultados apresentados nas Tabelas 22 e 23 com a norma NBR 10004 (ABNT, 1987) para classificação de resíduos, procedendo-se, nos gráficos apresentados (Figuras 56 a 62), às devidas transformações de unidades ($\mu\text{g/L}$ para mg/L) dos elementos determinados (Fe, Zn, Cr, Mn, Pb, Cu, Cd).

Tabela 22: Concentrações dos elementos estudados - lixiviação (µg/L).

| Amostras | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | LD: 0,273 | LD: 0,282 | LD: 0,247 | LD: 0,662 | LD: 0,464 | LD: 0,050 | LD: 0,135 | LD: 0,120 | LD: 0,780 |
| CH 20A | 1,36 | 6,94 | nd | 7,06 | 14,8 | 137,9 | 0,546 | 3841,2 | 696,4 |
| CH 20B | nd | 2,12 | 0,299 | 12,3 | nd | 36,3 | 1,43 | 3373,8 | 6,12 |
| CH 20C | nd | 4,52 | 0,992 | 1,88 | 8,86 | 196,5 | 0,61 | 1626,3 | 5,35 |
| CH 20D | nd | 2,83 | 0,574 | 2,78 | 10,4 | 43,4 | 0,655 | 858,5 | 18,7 |
| CH 13A | 1,25 | 11,1 | 3,55 | 10,6 | 37,7 | 218,7 | 3,31 | 3444,6 | 126,1 |
| CH 13B | 0,415 | 6,78 | 2,61 | 7,77 | 33,7 | 549 | 4,08 | 176,3 | 57,1 |
| SJ 02A | nd | 10,7 | 0,382 | nd | 13,5 | 991 | 1,4 | 46,9 | 78,4 |
| SJ 02B | nd | 14,5 | 29,02 | 0,68 | 89,7 | 1,316 | 6,51 | 524,6 | 72,7 |
| SJ 02C | 0,16 | 14,9 | 1,95 | 7,71 | 37 | 419,6 | 0,473 | 98,2 | 178 |
| P1 A2 | 3,96 | 787,57 | 124,28 | 55,73 | 2312,33 | 355,22 | 69,54 | 241216,67 | 697,9 |
| P2 A1 | 4,09 | 434,81 | 277,32 | 52,83 | 446,9 | 200,72 | 76,96 | 116155 | 19355,9 |
| P2 A2 | 1,98 | 740,81 | 74,37 | 66,42 | 2566,6 | 230,6 | 57,5 | 409462,87 | 2726,66 |
| P2 A1 | 2,86 | 312,03 | 74,61 | 77,67 | 465,04 | 709,6 | 29,71 | 307298,33 | 3499,9 |
| P7 A1 | 0,83 | 12,99 | 3,13 | 6,87 | 33,27 | 3185,06 | 2,41 | nd | 121 |
| P15 | 1,26 | 4,59 | 4,88 | 12,01 | 10,8 | 3886,7 | 6,19 | 48,4 | 209,1 |
| P16 | 0,4 | 15,2 | 0,617 | 2,33 | 8,83 | 322,9 | 0,613 | 89 | 938,8 |

Tabela 23: Concentrações dos elementos estudados - solubilização (µg/L).

| Amostras | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn |
|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | LD: 0,120 | LD: 0,100 | LD: 0,035 | LD: 1,22 | LD: 0,620 | LD: 0,208 | LD: 0,161 | LD: 0,310 | LD: 0,485 |
| CH 20A | 0,137 | 19,7 | 8,2 | 61,4 | 43 | 422,5 | 3,84 | 1530 | 1805,5 |
| CH 20B | nd | 4,37 | 2,46 | 34,6 | 6,7 | 117,5 | 2,92 | 658 | 52 |
| CH 20C | nd | 7,44 | 1,41 | 3,02 | 21,2 | 395 | 0,57 | 153 | 38,1 |
| CH 20D | nd | 4,38 | 1,86 | 4,32 | 23,2 | 99,8 | 0,678 | 76,1 | 64,9 |
| CH 13A | 0,713 | 28,1 | 10,4 | 30,8 | 83 | 497,5 | 9,38 | 2900 | 22,5 |
| CH 13B | 0,295 | 18,9 | 25,9 | 17,5 | 85,2 | 1287 | 10,1 | 2400 | 158 |
| SJ02A | nd | 5,24 | 1,02 | 22,3 | 6,05 | 626 | 0,41 | 2,35 | 20,1 |
| SJ02B | nd | 0,185 | 1,28 | nd | 0,75 | 61,8 | 0,42 | 12,7 | nd |
| SJ 02C | 0,111 | 1,4 | nd | nd | 2,89 | 48,5 | nd | 37,1 | 15 |
| P1 A2 | - | 3601 | 268 | 126 | 7115 | 676,5 | 127,5 | 634814,5 | 55308 |
| P2 A1 | - | 1861 | 651 | 100,3 | 682 | 350 | 155,5 | 390315 | 362 |
| P2 A2 | - | 3113 | 144 | 131,5 | 8735 | 418 | 103 | 567915 | 3820 |
| P3 A1 | - | 1284 | 191 | 140,5 | 764,5 | 1346,5 | 57,5 | 875515 | 916,5 |
| P7 A1 | 1,54 | 2,25 | 3,05 | 21,2 | 4,99 | nd | 6,05 | nd | 1,71 |
| P15 | nd | nd | 1,47 | nd | 8,47 | nd | 2,49 | nd | 15,01 |
| P16 | 1,14 | 50,3 | 1,33 | 5,34 | 36 | 955,5 | 0,491 | 42,3 | 3072 |

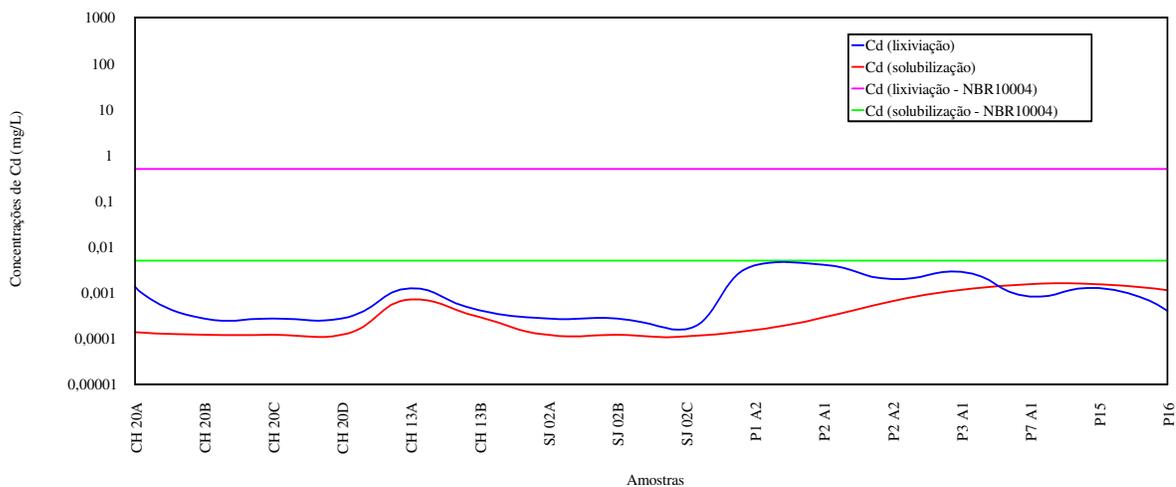


Figura 56: Comparação entre as concentrações do elemento Cd (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 1987).

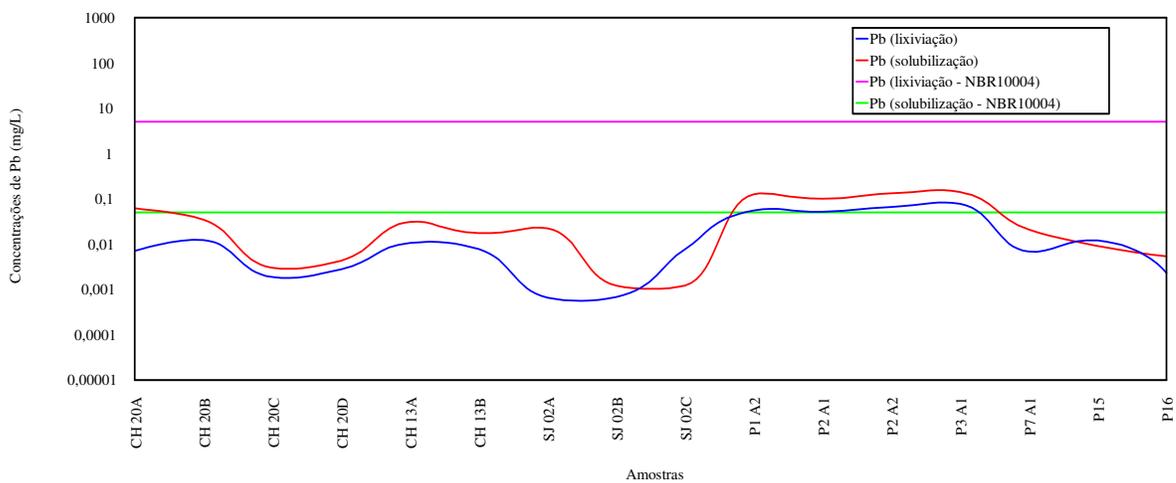


Figura 57: Comparação entre as concentrações do elemento Pb (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 1987).

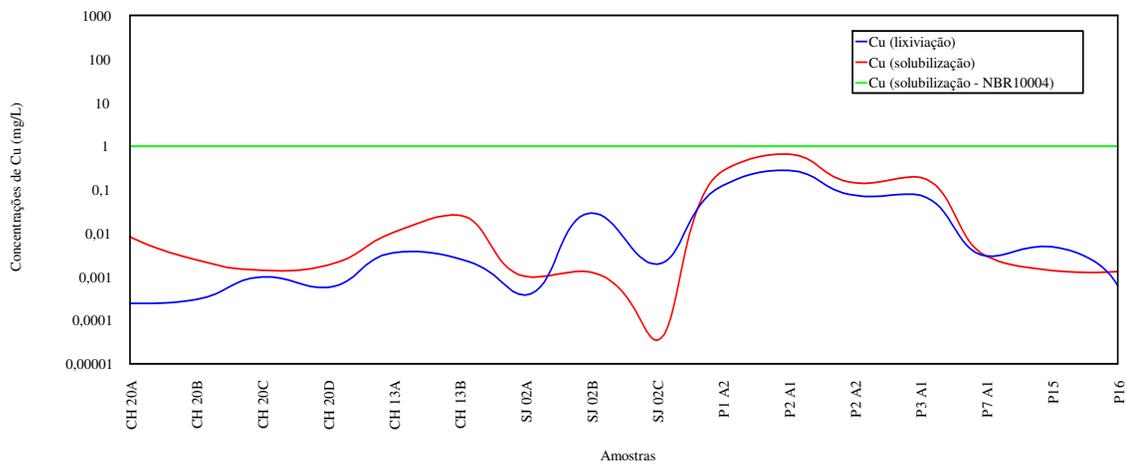


Figura 58: Comparação entre as concentrações do elemento Cu (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 1987).

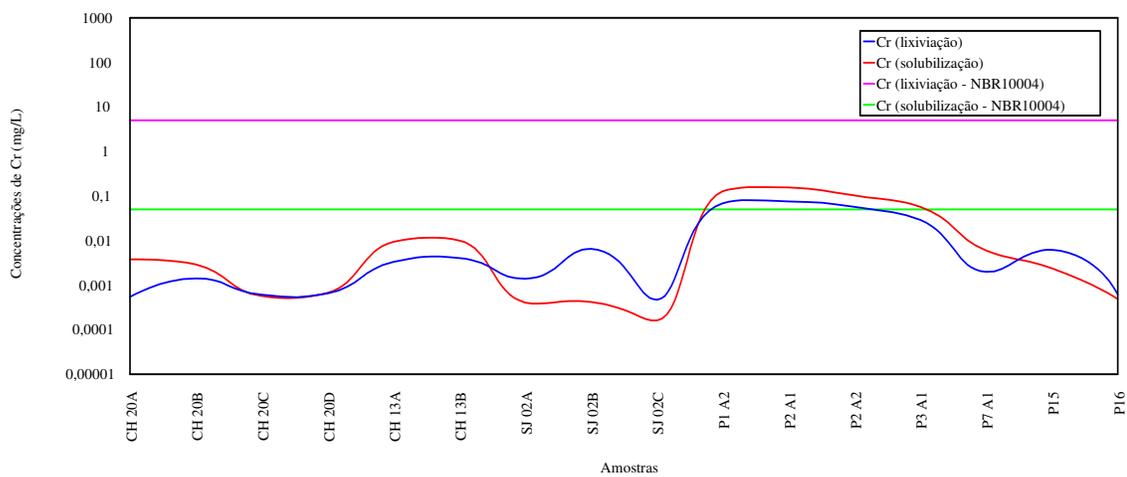


Figura 59: Comparação entre as concentrações do elemento Cr (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 1987).

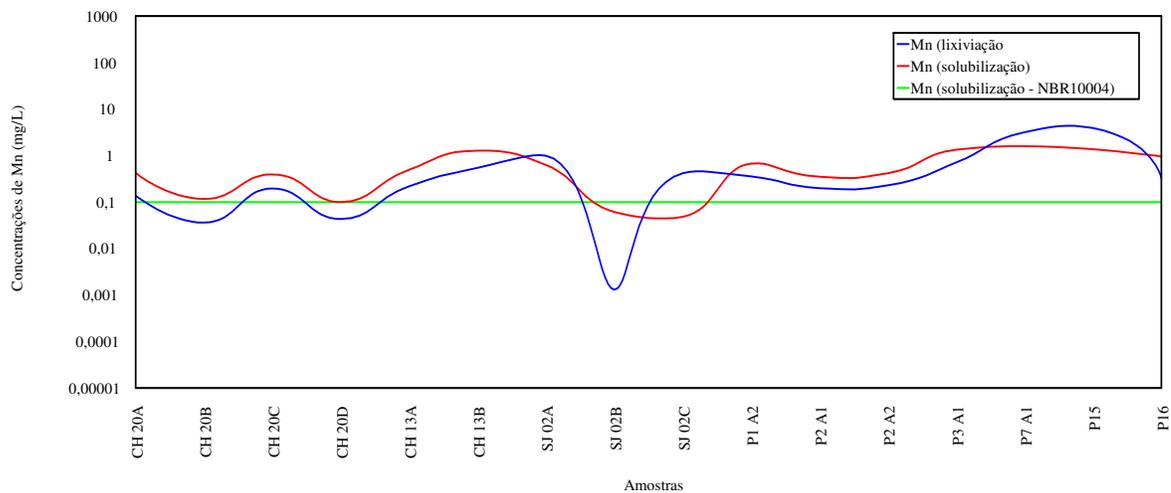


Figura 60: Comparação entre as concentrações do elemento Mn (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 1987).

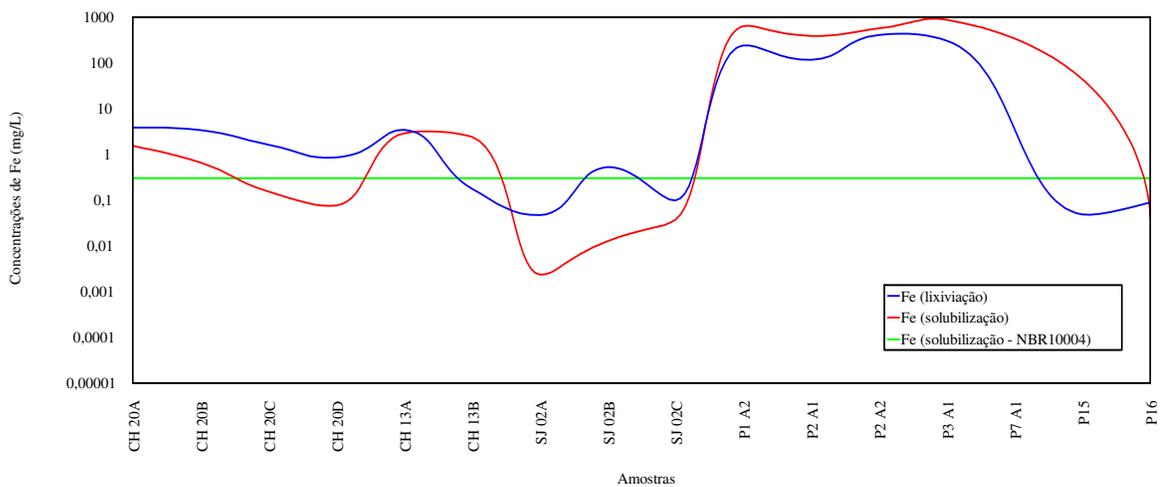


Figura 61: Comparação entre as concentrações do elemento Fe (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 1987).

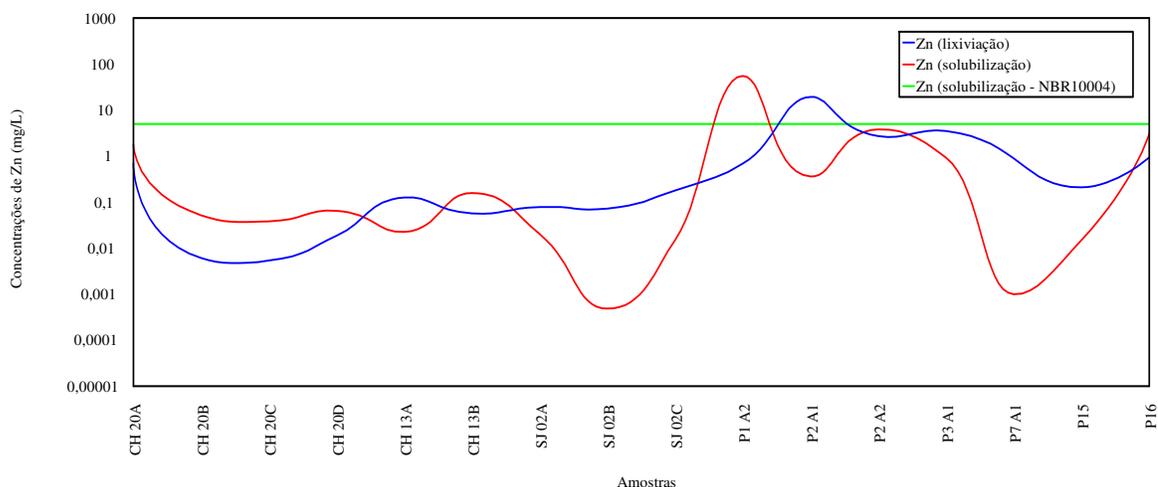


Figura 62: Comparação entre as concentrações do elemento Zn (lixiviação e solubilização) nas amostras estudadas e os limites permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 1987).

A partir da análise das Figuras 56 a 62, observa-se que os elementos Fe e/ou Mn são os que apresentaram concentrações acima do permissível pela NBR 10004 (ABNT, 1987) para todas as amostras, quando adotado o limite determinado para a solubilização também para a lixiviação. Nas amostras de rejeitos ambos os elementos predominaram enquanto que nas amostras de cinzas, geralmente, somente o Mn apresentou valores acima do recomendável. Com base nos testes de solubilização realizados, as amostras CH 20A, CH 20B, CH 20C, CH 13A, CH 13B, P1A2, P2A1, P2A2, P3A1, P7A1, P15 e P16 podem ser classificadas, para os elementos Fe e Mn, como Resíduos Classe II - não-inertes (NBR 10004).

As amostras P1A2, P2A1, P2A2 e P3A1, além de serem consideradas Resíduos Classe II - não-inertes pelos resultados acima comentados, são também enquadradas como Resíduos Classe I - perigosos, sendo classificadas, pelos resultados obtidos nos testes de lixiviação, da seguinte forma (NBR 10004):

- P1A2: resíduo tóxico TL D008 (p/ o Pb) e TL D009 (p/ o Cr);
- P2A1: resíduo tóxico TL D008 (p/ o Pb) e TL D009 (p/ o Cr);
- P2A2: resíduo tóxico TL D008 (p/ o Pb) e TL D009 (p/ o Cr);
- P3A1: resíduo tóxico TL D008 (p/ o Pb).

Cabe ressaltar, novamente, o potencial tóxico e poluidor mais elevado das amostras de rejeitos de carvão em relação às cinzas, quando comparam-se os resultados obtidos nos testes de lixiviação e solubilização com a norma NBR 10004 (ABNT, 1987), acima comentados.

4.1.2 Geofísica

4.1.2.1 Nível 7,5 metros

A aplicação do método EM34-3 na área em estudo permitiu a obtenção dos valores de condutividade elétrica para o nível mais raso, até 7,5 metros, conforme discriminado na Tabela 24.

A simples visualização dos dados (Figura 63b), sobretudo na representação em três dimensões, permitiu verificar que os valores mais elevados coincidem com a área do depósito. Os valores medidos situam-se entre 0,0 e 34,50 mS/m, com média 8,86 e desvio padrão 7,68 mS/m.

A análise individual das populações interna e externa ao depósito permite evidenciar diferenças entre elas, sendo a mais marcante verificada para os valores médios: enquanto na população interna está em torno de 23 mS/m, na externa é de apenas 6 mS/m, com valor máximo de 30 mS/m, pouco mais que a média obtida para o interior do depósito.

Do ponto de vista de anomalias detectadas indicando provável contaminação das águas subterrâneas até o nível 7,5 metros de profundidade percebe-se que a tendência de anomalia observada no mapa de condutividade (Figura 63b) confirma-se ao separarem-se do background os valores acima de 1,5 desvios-padrão da média. Examinando-se apenas as medidas externas ao depósito, observa-se serem anômalos os valores superiores a cerca de 13 mS/m. A análise do conjunto completo de dados mostra que os valores anômalos são aqueles superiores a cerca de 20 mS/m, ou seja, praticamente os valores internos ao depósito.

A Figura 64a sintetiza os resultados obtidos para o nível até 7,5 metros, apresentando os contornos da variação da condutividade e a localização dos valores anômalos detectados, superiores a 13 mS/m. Praticamente, a anomalia está restrita ao depósito. Na porção NE, alguns valores anômalos (estações 0/160 e -80/240) são explicados pela presença de cinzas de carvão no local. Ao sul do depósito, o ponto anômalo (-640/-720) indica o provável avanço da contaminação além dos seus limites, segundo a direção do fluxo das águas superficiais e subterrâneas no local (para SW). Ao sul da área estudada, diversos valores anômalos são

observados (em torno da estação -800/-1200), aparentemente sem conexão com o depósito. Entretanto, estes valores situam-se na área de confluência entre os canais (valetas de proteção) que margeiam as bordas do depósito e uma drenagem com direção transversal - NW (Figura 15, item 3.1.2.1). Uma possível explicação para a ocorrência dessas anomalias, afastadas do depósito cerca de 400 metros, seria admitir-se um transporte rápido dos contaminantes, via canal, com acumulação e transbordamento na barreira, representada pela drenagem transversal.

4.1.2.2 Nível 15 metros

A aplicação do método EM34-3 na área em estudo permitiu a obtenção dos valores de condutividade elétrica para o nível intermediário, até 15 metros, conforme discriminado na Tabela 24.

A análise visual (Figura 63c), principalmente da representação em três dimensões, revela, como no caso anterior, que os valores mais elevados coincidem com o depósito. A diferença, entretanto, entre os valores internos e externos ao depósito, não aparece tão nítida. As medições realizadas, no total, apresentam valor mínimo de 0,00 e máximo de 43,50 mS/m, com média de 19,56, desvio padrão de 8,67 mS/m.

Em termos de valores anômalos, indicando contaminação, na porção externa ao rejeito foram encontrados apenas três pontos: -80/-640, -560/-640 e -1120/-960, que superam 34 mS/m (acima de 1,5 desvios-padrão da média). O restante dos valores anômalos está situado internamente ao depósito (superiores a 32 mS/m).

A Figura 64b sintetiza os resultados obtidos para o nível até 15 metros, apresentando os contornos da variação da condutividade e a localização dos valores anômalos detectados, superiores a 32 mS/m. Tais valores anômalos concentram-se no interior do depósito, na parte NE, indicando para esta zona uma maior vulnerabilidade à contaminação, em profundidade, que pode ser explicada pela presença de um estrato mais arenoso, permeável, possibilitando a infiltração dos contaminantes até o nível intermediário. Outros valores anômalos, menos intensos, ocorrem dispersos no interior do depósito. Neste nível, não há evidência de contaminação externa ao depósito, provocada pelo mesmo. Os três valores anômalos detectados na porção SW (-1120/-960, -1120/-880, -1120/-800) certamente não podem ser associados ao depósito de rejeitos, entretanto, pelo estudo realizado, não foi possível detectar com precisão a fonte causadora deste aumento de condutividade do meio nos locais citados.

4.1.2.3 Nível 30 metros

A aplicação do método EM34-3 na área em estudo permitiu a obtenção dos valores de condutividade elétrica para o nível mais profundo, até 30 metros, conforme discriminado na Tabela 24.

Aparentemente, não há uma distinção nítida entre os valores externos e internos ao rejeito (Figura 63d). Os valores medidos variam entre 20,60 e 105,00 mS/m, com média 45,98 e desvio padrão 12,44 mS/m. A análise estatística dos 296 valores medidos neste nível mais profundo para o conjunto total de dados, sendo 46 internos ao depósito e 247 externos, revela que os parâmetros obtidos para o grupo externo são muito semelhantes aos obtidos unindo-se os dois grupos (todas as informações), o que significa que a introdução dos dados internos ao depósito não altera significativamente o comportamento da população externa.

Em termos de anomalias, elas se situam, para os três grupos (interno, externo e total), a partir de aproximadamente 64 mS/m.

A Figura 64c sintetiza os resultados obtidos para o nível até 30 metros, apresentando os contornos da variação da condutividade e a localização dos valores anômalos detectados, superiores a 64 mS/m. Foram detectados somente dois valores anômalos localizados no interior do depósito de rejeitos, na porção NE, os quais confirmam os resultados obtidos para os demais níveis, com uma maior infiltração dos contaminantes nesta parte da área. Nenhuma pluma provocada pelo depósito foi detectada na área externa ao mesmo.

4.1.2.4 Considerações Finais

O estudo geofísico detectou algumas áreas anômalas que sugerem a contaminação das águas subterrâneas, em especial do freático, a partir da deposição inadequada dos depósitos de rejeitos e cinzas de carvão.

Na parte externa ao depósito, os valores anômalos que podem ser relacionados ao depósito, foram detectados apenas com o arranjo de menor alcance, até 7,5m de profundidade, sugerindo a formação de uma pluma de contaminação incipiente a partir da extremidade sul do depósito.

Internamente ao depósito, os resultados obtidos sugerem uma forte contaminação do aquífero freático (nível até 7,5m), em quase toda sua extensão. Nos níveis mais profundos, com melhor definição no intermediário (até 15m), valores intensos concentram-se na parte NE do depósito, indicando uma infiltração dos contaminantes mais intensa, em profundidade,

neste local. É provável que se tenha um solo mais arenoso, permeável, na base do depósito, fato este a ser confirmado com as perfurações posteriores.

Os resultados observados sugerem que, nas áreas de disposição inadequada de rejeitos de carvão e cinzas, o monitoramento das águas subterrâneas deve ser realizado preferencialmente para o aquífero freático, até a profundidade de 7,5m. No caso específico do depósito CH 20, a profundidade de coleta das águas subterâneas na porção NE deste depósito deve ser mais profunda (até 15m).

Cabe ressaltar que a metodologia empregada apresentou bons resultados para a delimitação da área contaminada, não indicando, entretanto, os níveis de contaminação, ou seja, as concentrações dos elementos contaminantes em subsuperfície. Para tanto, foi necessário a realização de estudos de caracterização das águas subterrâneas para quantificar seu grau de contaminação. Desta forma, a instalação de “poços de monitoramento” na área em estudo, adequadamente locados, foi realizada para a completa e correta avaliação do grau de contaminação das águas subterrâneas, etapa desenvolvida no prosseguimento do trabalho.

Além disso, o método geofísico aplicado parece ser mais adequado para aplicação em áreas restritas, sem ocupação antrópica, uma vez que as atividades desenvolvidas - estaqueamento e medições de condutividade elétrica, dificilmente poderão ser desenvolvidas em grandes áreas, especialmente aquelas urbanizadas, devido aos interferentes que poderão surgir (construções, cercas, redes elétricas).

Este método, conforme já comentado, deve ser considerado como de caráter orientativo, sendo excelente na definição das áreas potencialmente contaminadas e, principalmente, do ponto branco a ser utilizado, especialmente em áreas que apresentem poucas informações geológicas e hidrológicas, uma vez que permite definir áreas de baixa condutividade elétrica e, conseqüentemente, com baixa concentração de íons.

Tabela 24: Valores de condutividade elétrica para todos os níveis (7,5; 15 e 30 metros) medidos em subsuperfície nas estações geofísicas a partir da aplicação do método EM34-3 na área em estudo.

| Coord X | Coord Y | Nível 7,5m | Nível 15m | Nível 30m | Coord X | Coord Y | Nível 7,5m | Nível 15m | Nível 30m |
|------------|------------|---------------|--------------|--------------|------------|------------|---------------|--------------|--------------|
| -80 | 240 | 15,3 | 25,2 | 41 | -720 | -80 | 27 | 32,7 | 57,7 |
| -80 | 160 | 14,6 | 26,2 | 46,3 | -720 | -160 | 3,68 | 13,3 | 39,2 |
| -80 | 80 | 13,2 | 31,7 | 59,5 | -720 | -240 | 2,73 | 10,2 | 32,1 |
| -80 | 0 | 31,2 | 41 | 66,5 | -720 | -320 | 2,64 | 9,1 | 29 |
| -80 | -80 | 29,2 | 38,7 | 67 | -720 | -400 | 2,74 | 10,3 | 36 |
| -80 | -160 | 29,1 | 34,1 | 59,3 | -720 | -480 | 4,85 | 18,4 | 50,1 |
| -80 | -240 | 23,9 | 32,5 | 58 | -720 | -560 | 5,8 | 23,3 | 54,5 |
| -80 | -320 | 29,7 | 37 | | -720 | -640 | 6,17 | 21,4 | 52 |
| -80 | -400 | 5 | 24 | 50 | -720 | -720 | 8,28 | 25,2 | 60 |
| -80 | -480 | 6,34 | 18,8 | 47 | -720 | -800 | 10,7 | 30,5 | 60 |
| -80 | -560 | 5,25 | 17,5 | 48 | -720 | -880 | 10,7 | | |
| -80 | -640 | 4 | 14,9 | 43,5 | -720 | -960 | 13,4 | 28,3 | 60 |
| -80 | -720 | 3,62 | 14,3 | 44 | -720 | -1040 | 2,8 | 26,8 | 56 |
| -80 | -800 | 3,49 | 12,3 | 40 | -720 | -1120 | 17,7 | 28,3 | 56,5 |
| -80 | -880 | 4,35 | 15,2 | 42,5 | -720 | -1200 | 14,3 | 27 | 56,7 |
| -80 | -960 | 3,69 | 12,2 | 36 | -720 | -1280 | 9,4 | 23,8 | 52,8 |
| -160 | 240 | 4,94 | 13,4 | 34,4 | -720 | -1360 | 13,9 | 29,3 | 58,5 |
| -160 | 160 | 11,1 | 19,6 | 44,6 | -800 | 480 | 3,24 | 14,2 | 36,5 |
| -160 | 80 | 26 | 31,3 | 62 | -800 | 400 | 3,62 | 14,8 | 42 |
| -160 | 0 | 30,3 | 40,2 | 62,7 | -800 | 320 | 6,68 | 20,7 | 46,5 |
| -160 | -80 | 28 | 34,2 | 67,8 | -800 | 240 | 6,7 | 16 | 42 |
| -160 | -160 | 34,5 | 42,1 | 60,8 | -800 | 160 | 2,87 | 11,3 | 36 |
| -160 | -240 | 27,6 | 33,3 | 57,5 | -800 | 80 | 5,38 | 17,2 | 41,5 |
| -160 | -320 | 24,5 | 29,8 | 56 | -800 | 0 | 21 | 30,2 | 55,5 |
| -160 | -400 | 31,7 | 33 | | -800 | -80 | 21,4 | 29,6 | 57 |
| -160 | -480 | 10,2 | 20,4 | 50 | -800 | -160 | 6,67 | 20,4 | 49,7 |
| -160 | -560 | 9 | 17,7 | 47 | -800 | -240 | 2,83 | 11,2 | 33,7 |
| -160 | -640 | 0 | 17,2 | 46 | -800 | -320 | 2,42 | 8,42 | 26,9 |
| -160 | -720 | 0 | 15,6 | 46 | -800 | -400 | 2,11 | 8,33 | 28,8 |
| -160 | -800 | 4,87 | 17,4 | 47 | -800 | -480 | 2,55 | 11,1 | 35,5 |
| -160 | -880 | 3,63 | 12,3 | 38,5 | -800 | -560 | 3,67 | 11,7 | 39,3 |
| -160 | -960 | 2,46 | 7,68 | 23,5 | -800 | -640 | 3,44 | 11,8 | 39,4 |
| -240 | 400 | 7 | 15,8 | 30,7 | -800 | -720 | 5,6 | 19,1 | 50,5 |
| -240 | 320 | 3,9 | 11,1 | 30,8 | -800 | -800 | 7,9 | 28,4 | 59,5 |
| -240 | 240 | 4,55 | 14,3 | 33,7 | -800 | -880 | 11,4 | 29,9 | 64,5 |
| -240 | 160 | 11,4 | 23,1 | 45 | -800 | -960 | 11,9 | 27,7 | |
| -240 | 80 | 9,5 | 26,2 | 53,3 | -800 | -1120 | 16,2 | 29,1 | 56 |
| -240 | 0 | 12,3 | 27,1 | 56,5 | -800 | -1200 | 16,4 | 30,7 | 59,5 |
| -240 | -80 | 20,2 | 29,9 | 58,4 | -800 | -1280 | 14,3 | 28,5 | 59,7 |
| -240 | -160 | 24,2 | 29,4 | 55,5 | -800 | -1360 | 16,3 | 29,9 | 55,7 |
| -240 | -240 | 23,5 | 29 | 56,8 | -880 | 480 | 3,13 | 13,3 | 40 |
| -240 | -320 | 24,8 | 31,3 | 58 | -880 | 400 | 4,8 | 19,7 | 50,7 |
| -240 | -400 | 25,8 | 34 | 58 | -880 | 320 | 8,37 | 24,6 | 52,6 |
| -240 | -560 | 7 | 19 | 47 | -880 | 240 | 4,2 | 15 | 39,8 |
| -240 | -640 | 6,2 | 16,6 | 45 | -880 | 160 | 2,37 | 9,2 | 31 |
| -240 | -720 | 5 | 16 | 46,5 | -880 | 80 | 2,78 | 11,9 | 34,6 |
| -240 | -800 | 4,25 | 15,6 | 43,5 | -880 | 0 | 5,12 | 14,7 | 32,8 |
| -240 | -880 | 2,85 | 10,1 | 31 | -880 | -80 | 3,93 | 14,7 | 40,6 |
| -240 | -960 | 2,23 | 6,65 | 22,2 | -880 | -160 | 3,75 | 14,8 | 43,5 |
| -320 | 480 | 13,6 | 11,8 | 30,2 | -880 | -240 | 3,25 | 12,1 | 36,8 |
| -320 | 400 | 3,96 | 11,2 | 28,8 | -880 | -320 | 2,56 | 8,8 | 29,5 |

Tabela 24 (cont.)

| Coord X | Coord Y | Nível 7,5m | Nível 15m | Nível 30m | Coord X | Coord Y | Nível 7,5m | Nível 15m | Nível 30m |
|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| -320 | 320 | 3,26 | 12,7 | 38 | -880 | -400 | 3,94 | 9,43 | 30,3 |
| -320 | 0 | 10,4 | 21,2 | 46,5 | -880 | -480 | 2,83 | 9 | 30 |
| -320 | -80 | 16,4 | 23,6 | 49,5 | -880 | -560 | 3,15 | 11,2 | 34,5 |
| -320 | -160 | 18,2 | 27,2 | 56,2 | -880 | -640 | 2,54 | 8,8 | 30,5 |
| -320 | -240 | 20,2 | 30,4 | 56,7 | -880 | -720 | 2,6 | 9,5 | 33 |
| -320 | -320 | 26,3 | 32,5 | 58,2 | -880 | -800 | 3 | 11,8 | 37,5 |
| -320 | -400 | 28,7 | 34,6 | 59 | -880 | -880 | 6,8 | 20,8 | 54,5 |
| -320 | -480 | 29,9 | 32,8 | 55,5 | -880 | -960 | 7,85 | 22,5 | 52 |
| -320 | -640 | 7,2 | 20,5 | 50 | -880 | -1040 | 10,2 | 22 | |
| -320 | -720 | 6,08 | 17,7 | 48,5 | -880 | -1120 | 8,5 | 25 | 55 |
| -320 | -800 | 4,42 | 14,8 | 45 | -880 | -1200 | 8,7 | 26,2 | 55,5 |
| -320 | -880 | 3,64 | 12,4 | 38 | -880 | -1280 | 11,3 | 27,6 | 58,5 |
| -320 | -960 | 2,62 | 8 | 27,3 | -880 | -1360 | 11,3 | 25,8 | 56 |
| -400 | 480 | 7,42 | 15 | 36,4 | -960 | 480 | 6,2 | 20,5 | 56 |
| -400 | 400 | 3,5 | 9,2 | 27,4 | -960 | 400 | 9,25 | 29,5 | 63 |
| -400 | 320 | 2,43 | 9,5 | 29,6 | -960 | 320 | 8,55 | 26 | 55,5 |
| -400 | 80 | 3,68 | 12,7 | 42,2 | -960 | 240 | 2,8 | 14,2 | 36,5 |
| -400 | 0 | 8,4 | 21,4 | 55,5 | -960 | 160 | 2 | 9,5 | 32,7 |
| -400 | -80 | 16,2 | 27,4 | 53,3 | -960 | 80 | 3 | 10,7 | 34,5 |
| -400 | -160 | 26,4 | 38,5 | 61,8 | -960 | 0 | 2,9 | 10,9 | 31,3 |
| -400 | -240 | 22,8 | 29,4 | 51,2 | -960 | -80 | 2,45 | 8,95 | 28,5 |
| -400 | -320 | 25 | 33,3 | 58 | -960 | -160 | 3,15 | 11,8 | 36 |
| -400 | -400 | 27,4 | 33,2 | 60 | -960 | -240 | 4 | 16,4 | 47,5 |
| -400 | -480 | 30,7 | 33,3 | 57,5 | -960 | -320 | 4,15 | 16 | 44,6 |
| -400 | -560 | 24,6 | 30,2 | 55 | -960 | -400 | 3,65 | 12,8 | 40 |
| -400 | -720 | 7,65 | 20 | 52 | -960 | -480 | 3,24 | 12,9 | 38,3 |
| -400 | -800 | 5,5 | 20 | 52 | -960 | -560 | 3,37 | 12,3 | 37,4 |
| -400 | -880 | 4,58 | 15,2 | 42 | -960 | -640 | 2,63 | 9,9 | 32,5 |
| -400 | -960 | 3,24 | 10,7 | 32,5 | -960 | -720 | 2,27 | 9,7 | 34 |
| -480 | 480 | 3,24 | 9,42 | 26,1 | -960 | -800 | 2,87 | 12,2 | 40,5 |
| -480 | 400 | 2,55 | 7,38 | 22,6 | -960 | -880 | 7,18 | 26,3 | 60 |
| -480 | 320 | 2,6 | 7,8 | 22,2 | -960 | -1040 | 8,07 | 25,8 | 58,5 |
| -480 | 240 | 3,45 | 9,9 | 33,3 | -960 | -1120 | 7,3 | 25,5 | |
| -480 | 160 | 3,95 | 12,5 | 32,1 | -960 | -1200 | 8 | 25,8 | 58,5 |
| -480 | 80 | 1,69 | 11 | 38,2 | -960 | -1280 | 8,3 | 25,2 | 57,5 |
| -480 | 0 | 12,3 | 24,2 | 52,8 | -960 | -1360 | 4,1 | 23,4 | 49 |
| -480 | -80 | 15,4 | 24,9 | 50,3 | -1040 | -640 | 5 | 20,8 | 54 |
| -480 | -160 | 5,52 | 18,3 | 48,6 | -1040 | -720 | 4,9 | 22,3 | 57 |
| -480 | -240 | 5,08 | 17,7 | 47,2 | -1040 | -800 | 8,5 | 29,3 | 70,5 |
| -480 | -320 | 6,05 | 21,3 | 51,4 | -1040 | -880 | 8,25 | 22,8 | 62 |
| -480 | -400 | 18,1 | 27,3 | 53,3 | -1040 | -960 | 8,15 | 25,1 | 60,5 |
| -480 | -480 | 27,9 | 34,1 | 56,3 | -1040 | -1040 | 9,8 | 25,6 | 46 |
| -480 | -560 | 25,4 | 31,7 | 56,5 | -1040 | -1120 | 12,1 | 28,7 | 56 |
| -480 | -640 | 30,4 | 36,5 | | -1040 | -1200 | 8,05 | | |
| -480 | -800 | 6,55 | 21,3 | 57 | -1040 | -1280 | 0 | 23,9 | 58 |
| -480 | -880 | 5,75 | 19,7 | 52 | -1040 | -1360 | 10,8 | 28 | 58 |
| -480 | -960 | 4,23 | 15,3 | 42 | -1120 | -800 | 8,8 | 43,5 | 105 |
| -480 | -1040 | 3,2 | 10,8 | 34,5 | -1120 | -880 | 12 | 38,3 | 75 |
| -480 | -1120 | 3,6 | 9,8 | 31 | -1120 | -960 | 10,5 | 34,8 | 80 |
| -480 | -1200 | 3,92 | 11,4 | 35,2 | -1120 | -1040 | 11,2 | 29,5 | 68 |
| -480 | -1280 | 3,3 | 11,7 | 37,8 | -1120 | -1120 | 11,1 | 29,3 | 62 |
| -480 | -1360 | 3,47 | 14,9 | 44,4 | -1120 | -1200 | 9,1 | 26 | 60 |
| -560 | 480 | 2,25 | 9,2 | 20,6 | -1120 | -1280 | 7,5 | 23 | |

Tabela 24 (cont.)

| Coord X | Coord Y | Nível 7,5m | Nível 15m | Nível 30m | Coord X | Coord Y | Nível 7,5m | Nível 15m | Nível 30m |
|------------|------------|---------------|--------------|--------------|------------|------------|---------------|--------------|--------------|
| -560 | 400 | 2,5 | 8,4 | 24,9 | -1120 | -1360 | 3,2 | 20 | |
| -560 | 320 | 2,62 | 8,42 | 24 | -1200 | -1040 | 9,3 | 27,3 | 62,5 |
| -560 | 240 | 3,15 | 9,46 | 29,8 | -1200 | -1120 | 10,1 | 29,2 | 68,5 |
| -560 | 160 | 2,8 | 9,4 | 26,5 | -1200 | -1200 | 6,25 | 21,2 | 54,7 |
| -560 | 80 | 2,73 | 11,4 | 38,3 | -1200 | -1280 | 4,3 | 14,9 | 42 |
| -560 | 0 | 19,3 | 26,2 | 52,1 | -1200 | -1360 | 2,85 | | |
| -560 | -80 | 19,8 | 28,8 | 59 | 0 | 240 | 10,2 | 19,4 | 45 |
| -560 | -160 | 5,08 | 0 | 43,6 | 0 | 160 | 16,8 | 26,6 | 54 |
| -560 | -240 | 4,22 | 14 | 38,4 | 0 | 80 | 12,1 | 27,8 | 57,5 |
| -560 | -320 | 2,96 | 0 | 33,5 | 0 | 0 | 11,1 | 24,7 | 63 |
| -560 | -400 | 3,58 | 12,7 | 42,6 | 0 | -80 | 9,7 | 23,1 | 53,5 |
| -560 | -480 | 6,25 | 20,3 | 53,6 | 0 | -160 | 9,8 | 26,2 | 54 |
| -560 | -560 | 29,4 | 36,1 | 57,8 | 0 | -240 | 7,9 | 13,5 | |
| -560 | -640 | 25,4 | 33,4 | 58,5 | 0 | -400 | 8,85 | 19,2 | 49 |
| -560 | -720 | 9,9 | 23 | | 0 | -480 | 4,13 | 14,8 | 45 |
| -560 | -880 | 6 | 21,7 | 52,5 | 0 | -560 | 3,98 | 13,9 | 42 |
| -560 | -960 | 7,04 | 22,8 | 51,5 | 0 | -640 | 3,33 | 11,9 | 37,5 |
| -560 | -1040 | 5,15 | 18,7 | 48 | 0 | -720 | 2,56 | 8,2 | 29 |
| -560 | -1120 | 4,83 | 16 | 43,3 | 0 | -800 | 2,32 | 6,7 | 25 |
| -560 | -1200 | 4,18 | 13,8 | 44,3 | 0 | -880 | 2,22 | 7,93 | 28,5 |
| -560 | -1280 | 6,18 | 18,6 | 50,6 | 0 | -960 | 2,88 | 11,2 | 36 |
| -560 | -1360 | 5,46 | 19,3 | 49,3 | 80 | 240 | 8,8 | 25,7 | 49,6 |
| -640 | 480 | 3,23 | 12,8 | 39,3 | 80 | 160 | 11,8 | 26,8 | 56 |
| -640 | 400 | 7,95 | 16,8 | 39,5 | 80 | 80 | 8,48 | 22,1 | 54,8 |
| -640 | 320 | 2,13 | 8,42 | 27,5 | 80 | 0 | 10,2 | 24,1 | 56,2 |
| -640 | 240 | 2,42 | 8,22 | 27,4 | 80 | -80 | 11,1 | 26,2 | 63 |
| -640 | 160 | 3,34 | 9,6 | 24,6 | 80 | -160 | 10,2 | 16,5 | |
| -640 | 80 | 4,25 | 13,7 | 38,3 | 80 | -240 | 7,4 | 15 | |
| -640 | 0 | 17,2 | 28,8 | 58,6 | 80 | -320 | 7,5 | 18 | 49 |
| -640 | -80 | 25 | 32,3 | 55,7 | 80 | -400 | 6,28 | 17,3 | 47,5 |
| -640 | -160 | 3,84 | 13,8 | 39,2 | 80 | -480 | 4,52 | 13,4 | 40,7 |
| -640 | -240 | 2,91 | 10,1 | 31,4 | 80 | -560 | 3,02 | 8,8 | 30,5 |
| -640 | -320 | 2,62 | 8,9 | 30,6 | 80 | -640 | 2,73 | 7,07 | 25,6 |
| -640 | -400 | 2,73 | 10,97 | 37,5 | 80 | -720 | 2,36 | 5,82 | 22,2 |
| -640 | -480 | 4,92 | 18,3 | 49,6 | 80 | -800 | 2,27 | 5,43 | 21,1 |
| -640 | -560 | 6,27 | 21,6 | 54,3 | 80 | -880 | 2,73 | 6,08 | 24,2 |
| -640 | -640 | 9,4 | 24,5 | 55,7 | 80 | -960 | 3,14 | 9,62 | 33,5 |
| -640 | -720 | 16,8 | 28,1 | 55 | 160 | 240 | 9,03 | 22,4 | 44,3 |
| -640 | -800 | 11,2 | 29 | 59 | 160 | 160 | 9,02 | 22,6 | 46 |
| -640 | -960 | 8,4 | 22,5 | 54,5 | 160 | 80 | 7,94 | 22,4 | 55 |
| -640 | -1040 | 8,08 | 20,9 | 52,8 | 160 | 0 | 8,47 | 22,7 | 56,5 |
| -640 | -1120 | 6,15 | 20,1 | 49,5 | 160 | -80 | 7,96 | 24,1 | |
| -640 | -1200 | 7,36 | 19,8 | 50,4 | 160 | -160 | 0 | 15 | |
| -640 | -1280 | 7,95 | 19,1 | 50,5 | 160 | -240 | 5,55 | 18,8 | 50 |
| -640 | -1360 | 8,8 | 21,9 | 50 | 160 | -320 | 6,6 | 19,1 | 50,8 |
| -720 | 480 | 13,4 | 20,2 | 46,7 | 160 | -400 | 4,6 | 16,1 | 41,8 |
| -720 | 400 | 8,3 | 20,2 | 42,8 | 160 | -480 | 2,84 | 10,1 | 34,3 |
| -720 | 320 | 12,8 | 19,2 | 42,8 | 160 | -560 | 2,27 | 7,97 | 27,8 |
| -720 | 240 | 4,23 | 11,4 | 32,7 | 160 | -640 | 2,43 | 6,76 | 23 |
| -720 | 160 | 3,47 | 12,2 | 36,2 | 160 | -720 | 1,79 | 5,54 | 21,7 |
| -720 | 80 | 17,3 | 24,2 | 43,8 | 160 | -800 | 1,92 | 5,84 | 22,9 |
| -720 | 0 | 26,6 | 33 | 60,7 | 160 | -880 | 2,62 | 7,93 | 28,4 |
| | | | | | 160 | -960 | 3,1 | 11,4 | 36,5 |

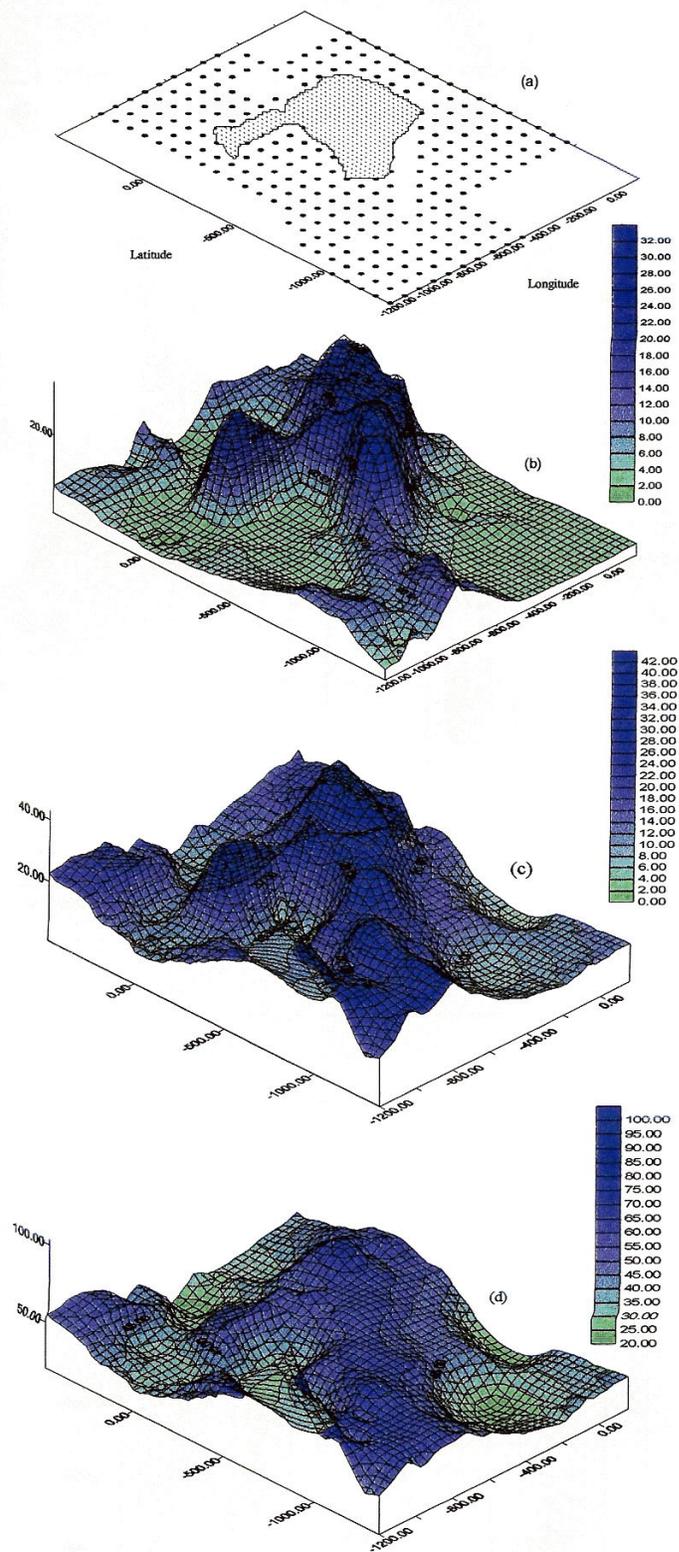
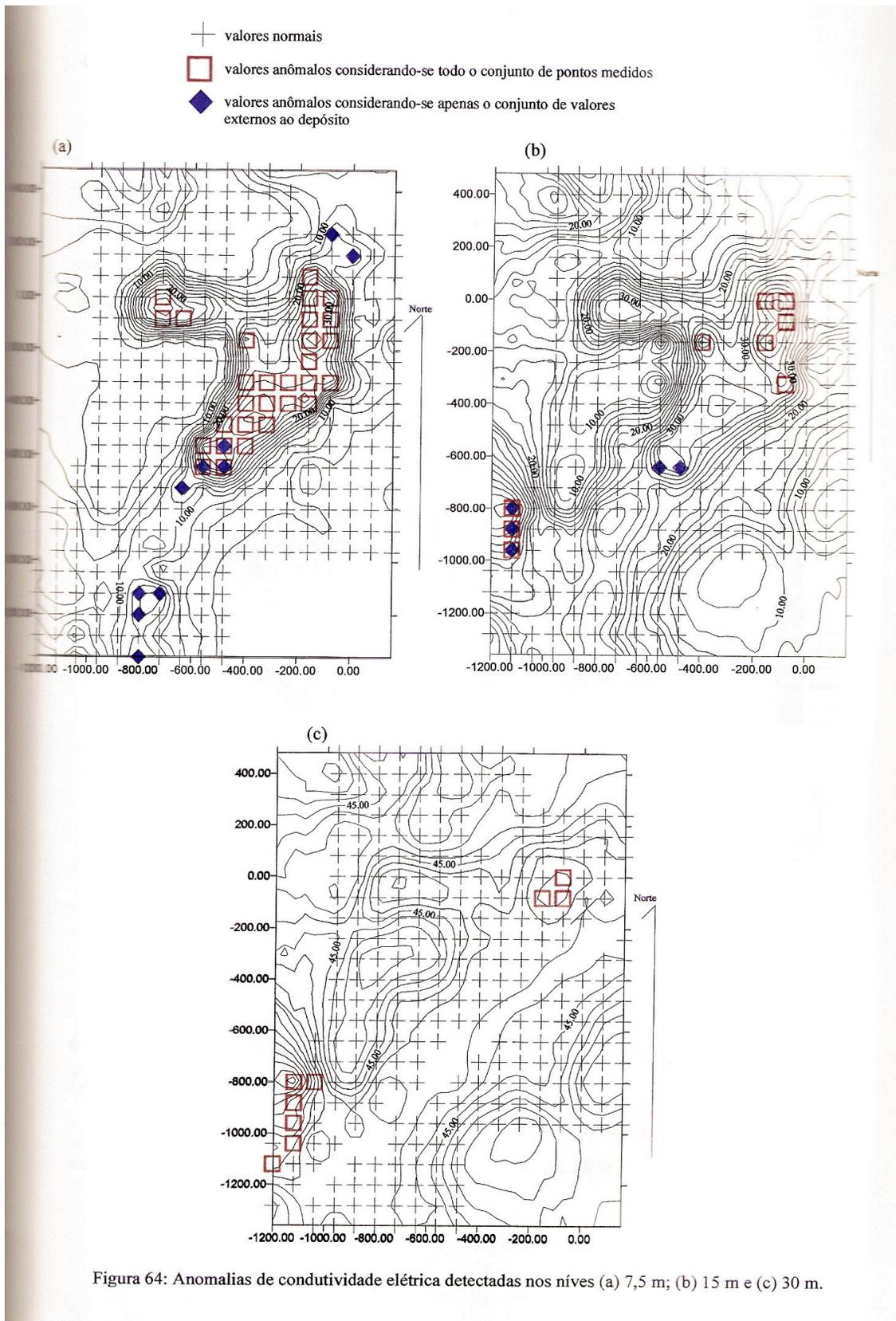


Figura 63: Variação da condutividade elétrica (mS) em profundidade:
 (a) malha de pontos e contorno do depósito CH 20;
 (b) representação em 3D - nível 7,5 m; (c) representação em 3D - nível 15 m;
 (d) representação em 3D - nível 30 m.



4.1.3 Levantamento Taquiométrico

A Figura 65 apresenta o modelado topográfico da área do depósito CH 20, na qual foi realizado o Levantamento Taquiométrico. Observa-se que as altitudes mais baixas coincidem com o depósito de rejeitos e com a área de banhado que circunda o mesmo, na parte sul da área (Figura 15, item 4.1.2.1). As porções mais elevadas localizam-se na parte norte da área, coincidindo com a área de vegetação nativa - Capão da Roça (item 4.1.1.1.).

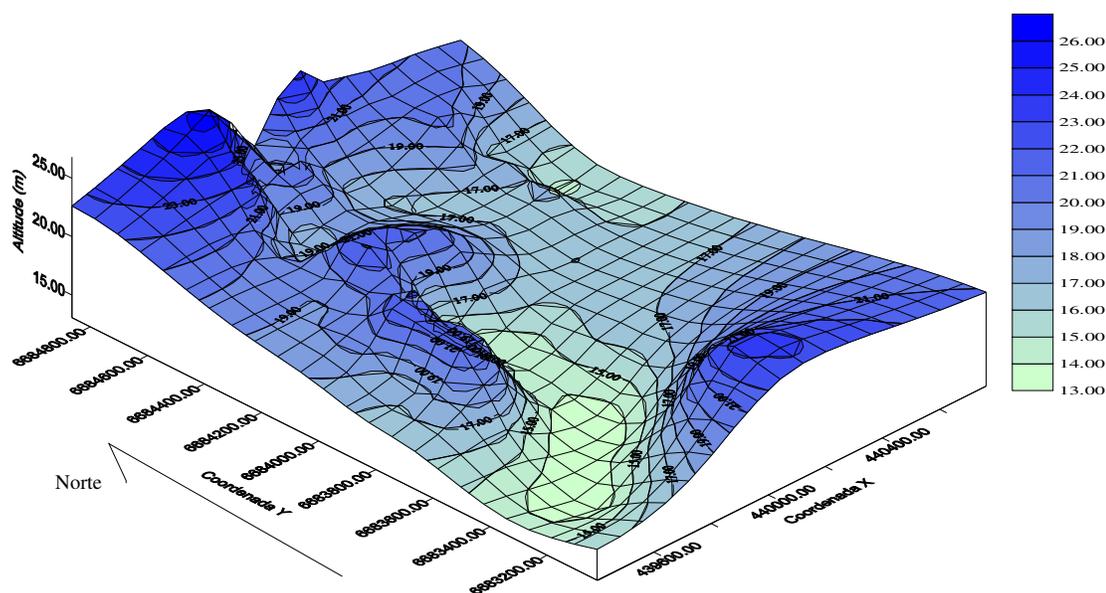


Figura 65: Representação das variações topográficas observadas no depósito CH 20.

As Figuras 66 a 68 correspondem às correlações existentes entre a topografia (Figura 65) e as condutividades elétricas medidas em profundidade, respectivamente para os níveis 7,5 m, 15 m e 30 m na área do depósito CH 20.

Identifica-se um elevado grau de dispersão dos pontos, observando-se que os valores medidos de condutividade elétrica, para os três níveis, não são afetados pela topografia.

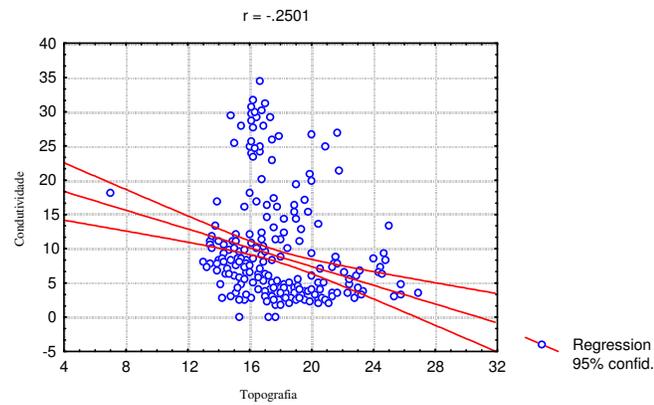


Figura 66: Correlação Topografia x Condutividade elétrica para o nível 7,5 m.

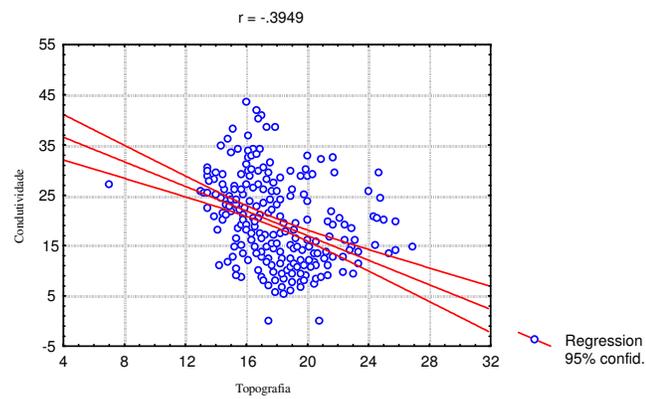


Figura 67: Correlação Topografia x Condutividade elétrica para o nível 15 m.

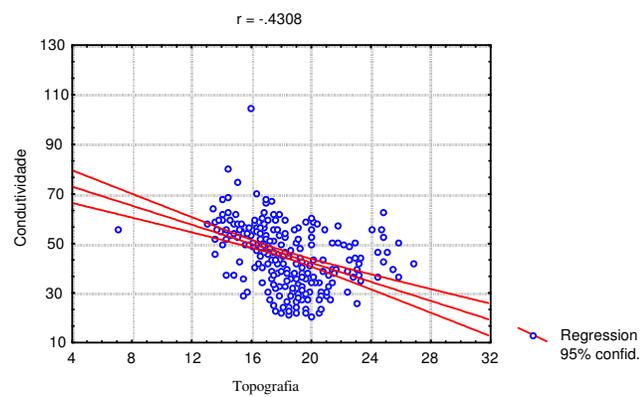


Figura 68: Correlação Topografia x Condutividade elétrica para o nível 30 m.

4.2 INSTALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS

A partir dos sedimentos coletados em cada piezômetro instalado, foi possível montar o perfil estratigráfico de cada um dos poços (Figura 69), a partir do qual verifica-se que a porção superior do aquífero freático da região é composto por um pacote argilo-siltico-arenoso, onde observa-se uma interdigitação dos sedimentos com a quantidade de areia aumentando gradativamente do topo da seqüência em direção à base, caracterizando uma seqüência grano-decrescente (da base para o topo).

Com base nas descrições litológicas dos furos onde foram instalados os piezômetros apresentadas na Figura 69, pode-se construir um perfil geral para a área estudada até a profundidade máxima de 8m, iniciando com uma camada de rejeitos ou cinzas de carvão (0,00 a 5,50m, com espessura média de 2,00m) seguida por um pacote argiloso ou argilo-siltico (0,00 a 6,45m com espessura média de 1,50m) e terminando com um pacote arenoso (0,00 a 8,10m com espessura média de 1,80m), com nível d'água médio de 2,00m. Cabe ressaltar que as espessuras das camadas referem-se somente às observadas nas perfurações realizadas, até a profundidade máxima de 8,00 m.

4.3 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO

A partir do nivelamento geométrico foi determinada a cota da boca de cada um dos piezômetros instalados na área de estudo (Tabela 25). Utilizando-se as cotas e as leituras dos níveis de água mensais, foram determinados os níveis potenciométricos nos piezômetros instalados (Tabela 25).

Sabendo-se que a água subterrânea movimenta-se de áreas de maior potencial para as de menor (conferir item 2.6.1), foi definida, na área de estudo na direção do fluxo da água subterrânea para o aquífero livre, conforme representado, de forma esquemática, nas Figuras 70 e 71.

Observa-se, pela análise da Figura 70, que as alterações no nível de água observadas em função da precipitação pluviométrica não chegaram a provocar alterações no comportamento geral do fluxo da água subterrânea, que não sofreu modificações significativas no período monitorado.

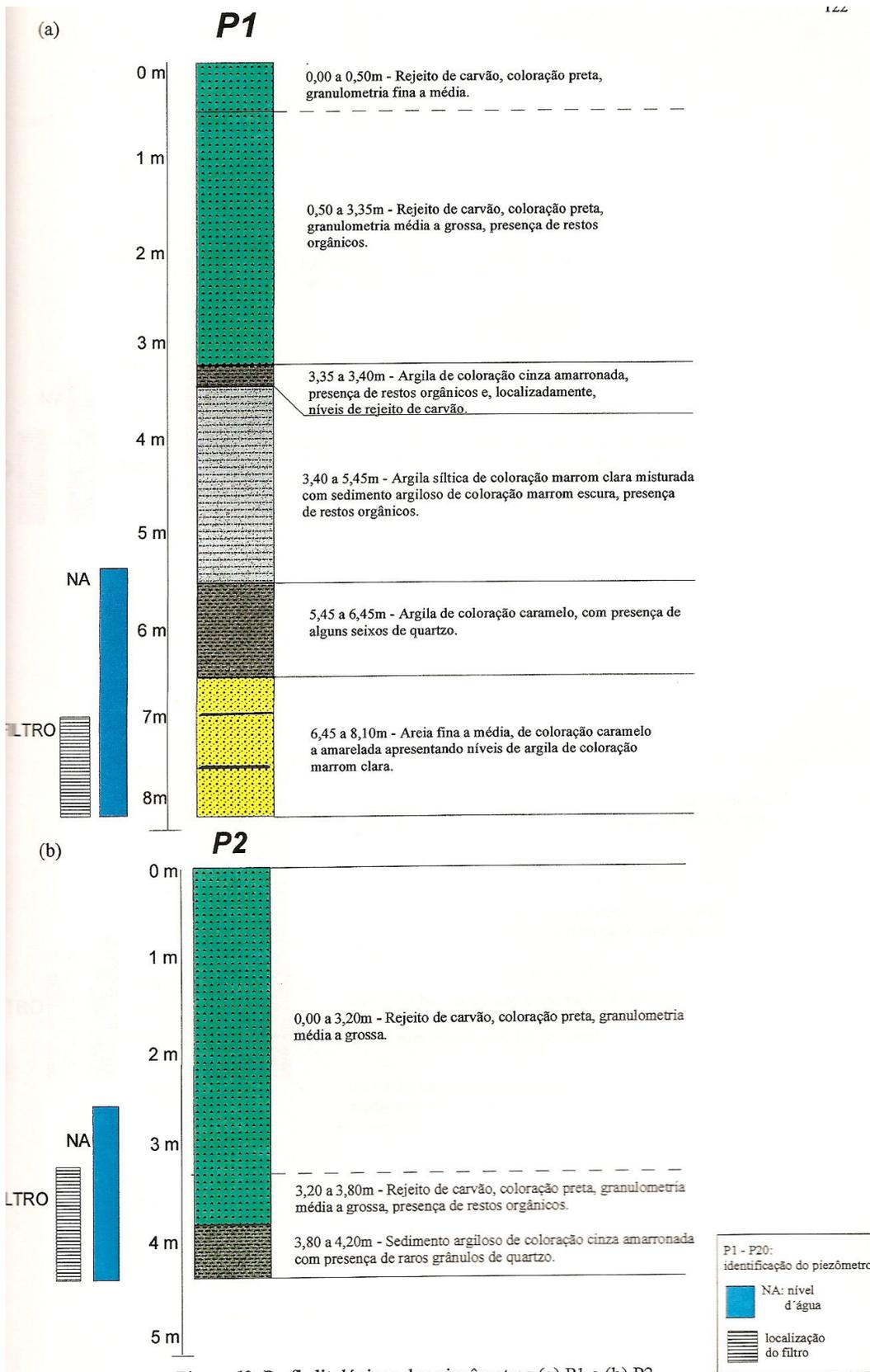


Figura 69: Perfis litológicos dos piezômetros (a) P1 e (b) P2.

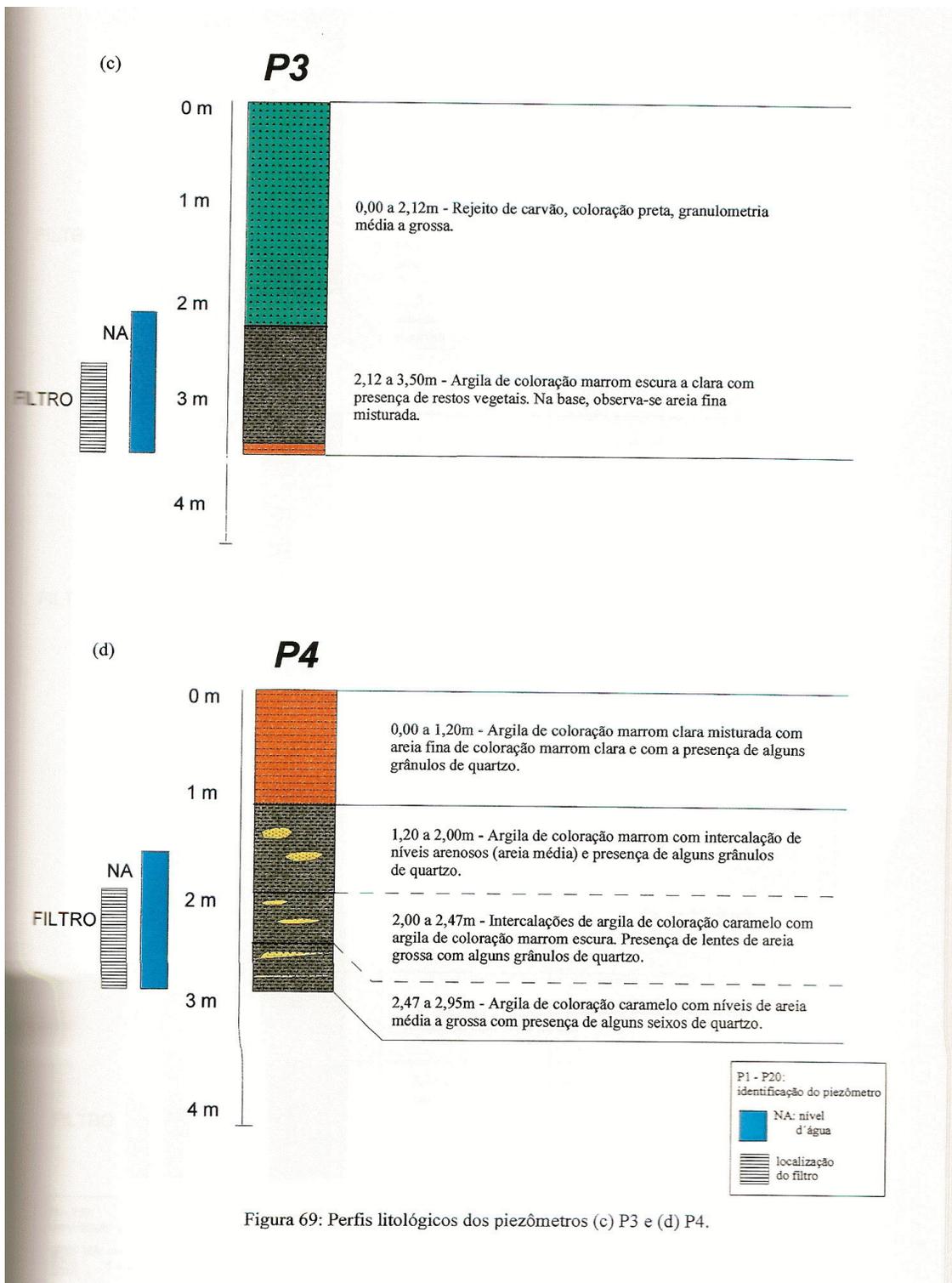


Figura 69: Perfis litológicos dos piezômetros (c) P3 e (d) P4.

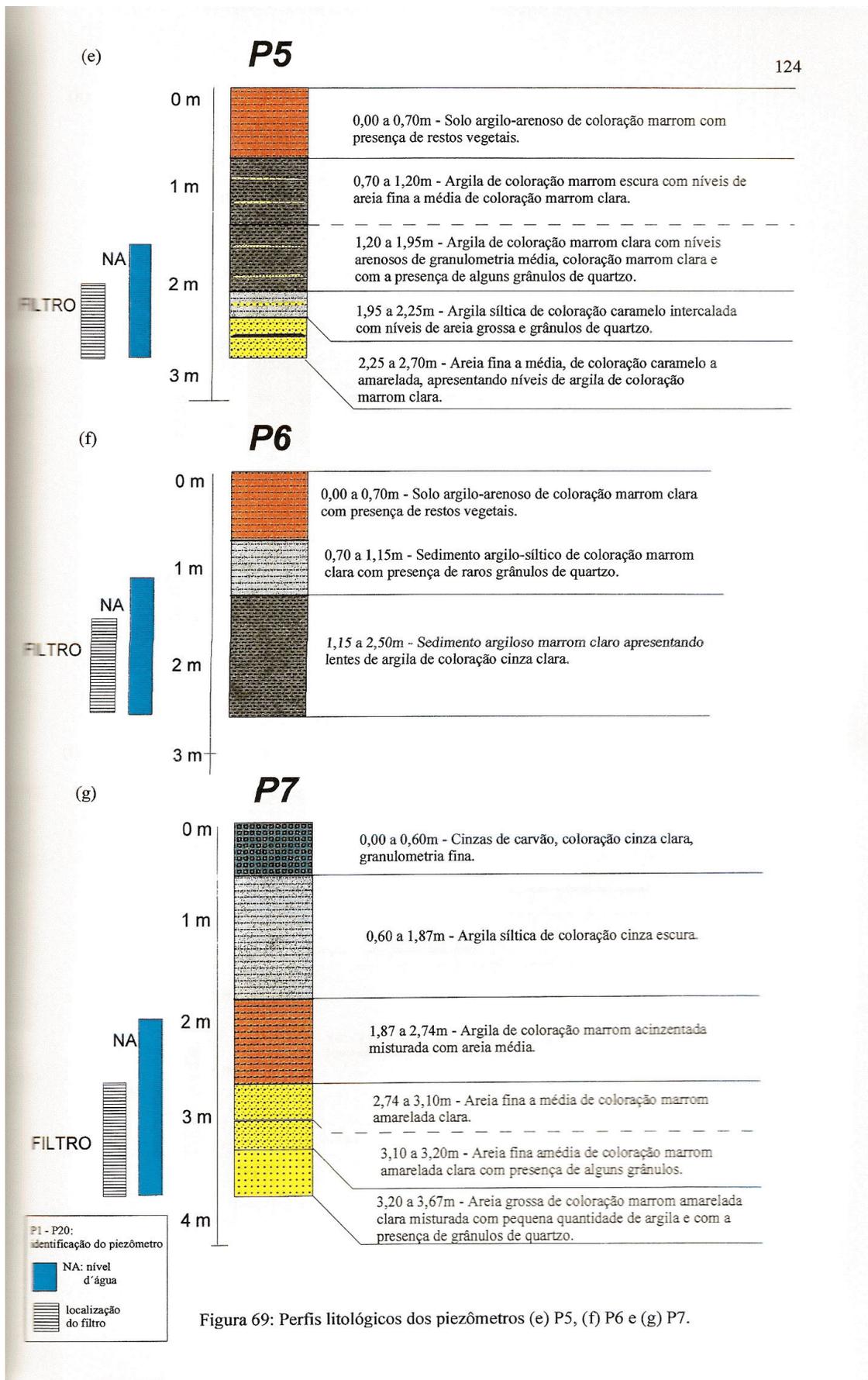


Figura 69: Perfis litológicos dos piezômetros (e) P5, (f) P6 e (g) P7.

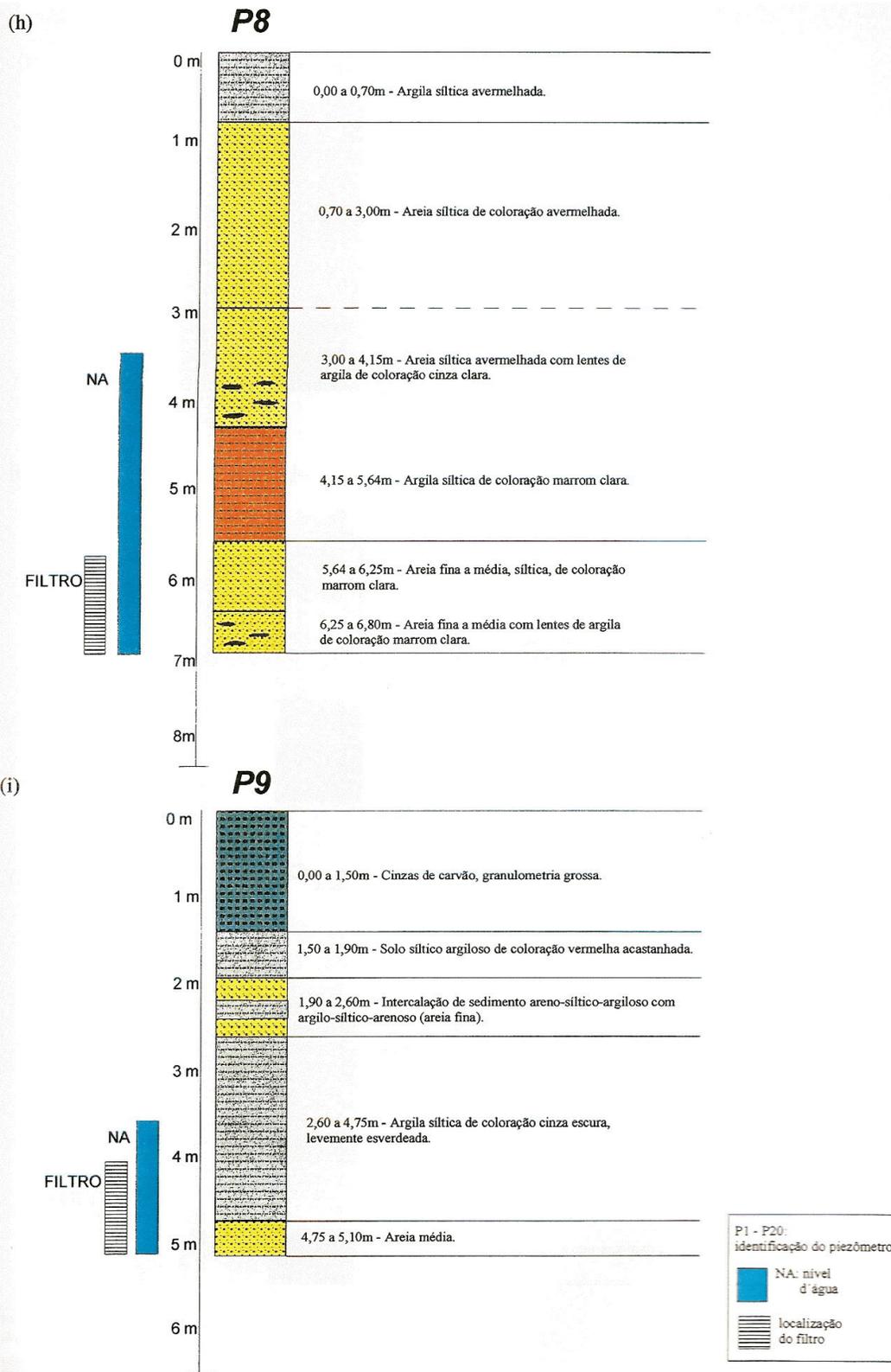


Figura 69: Perfis litológicos dos piezômetros (h) P8 e (i) P9.

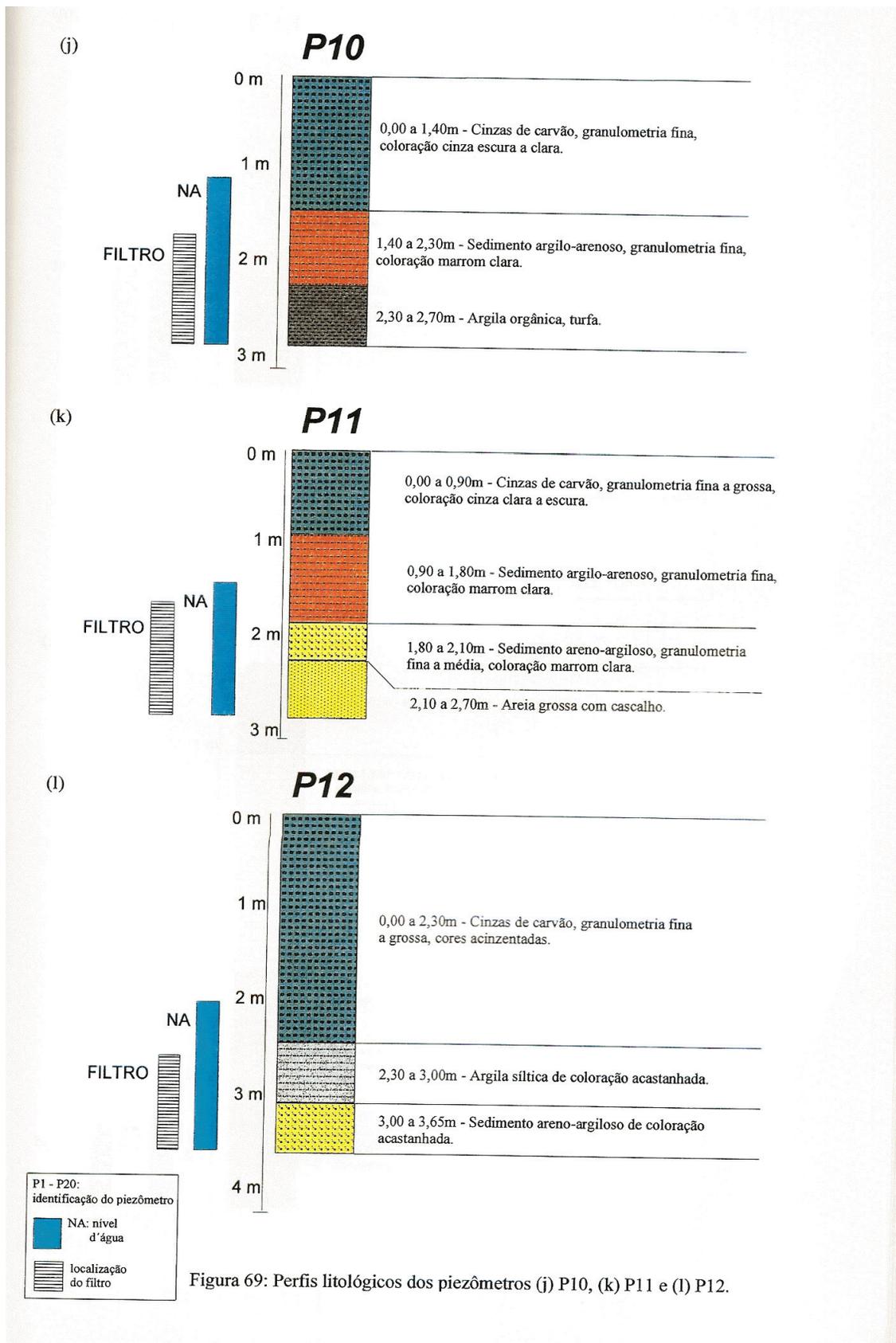


Figura 69: Perfis litológicos dos piezômetros (j) P10, (k) P11 e (l) P12.

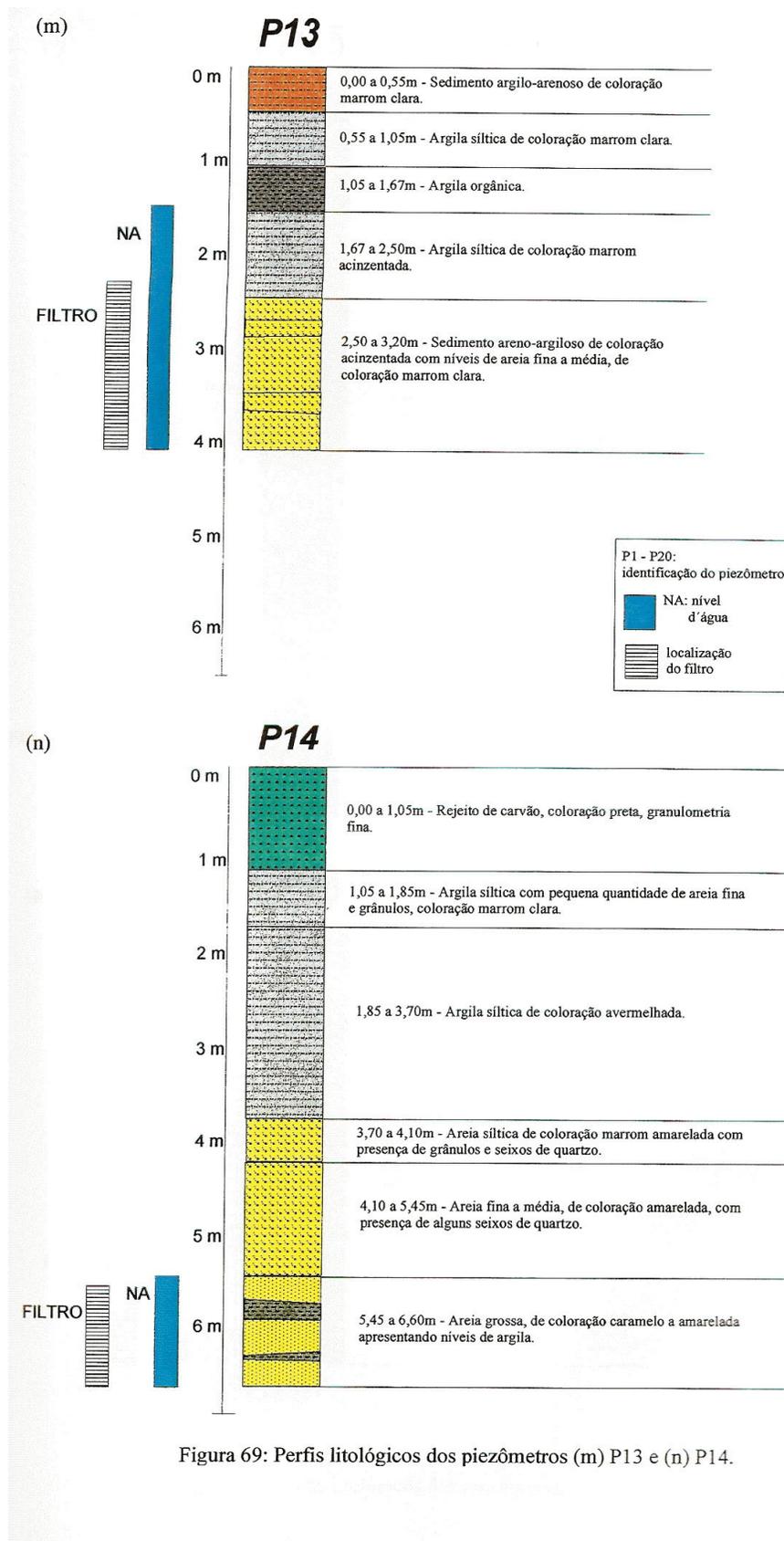
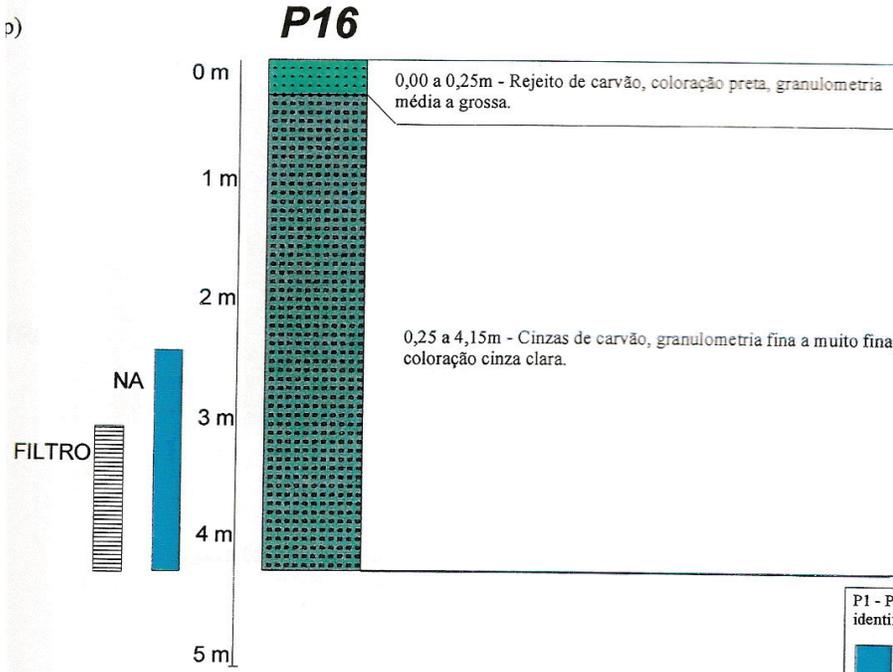
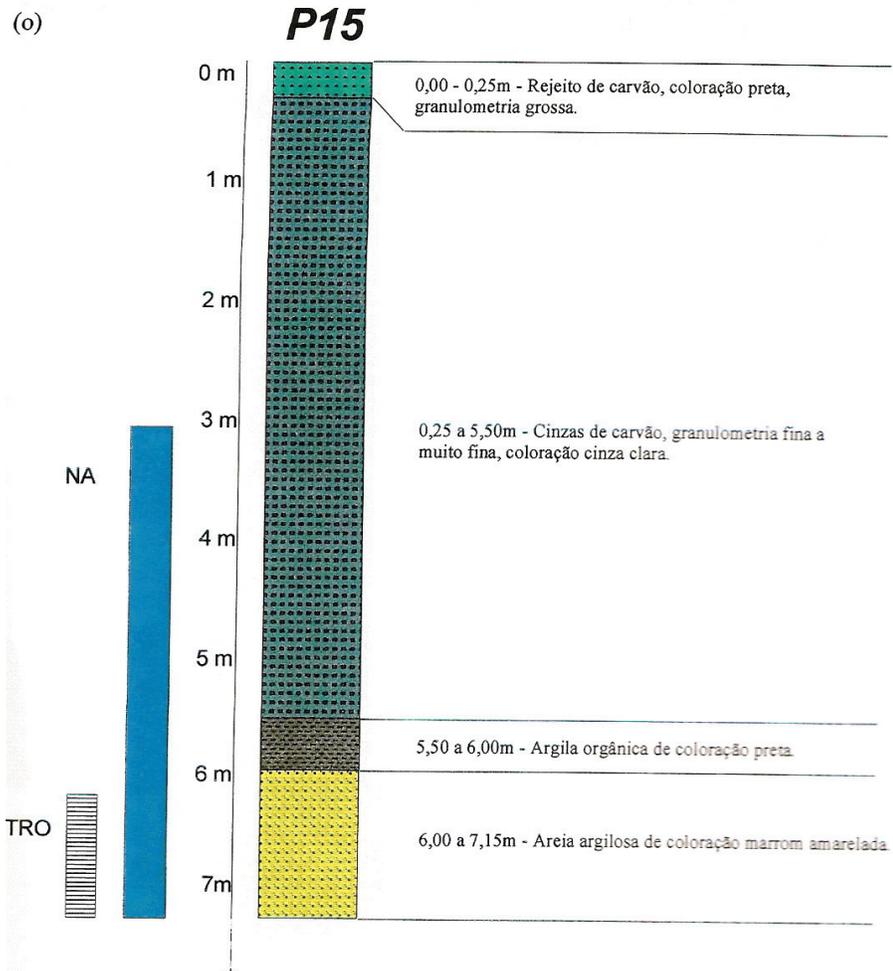


Figura 69: Perfis litológicos dos piezômetros (m) P13 e (n) P14.

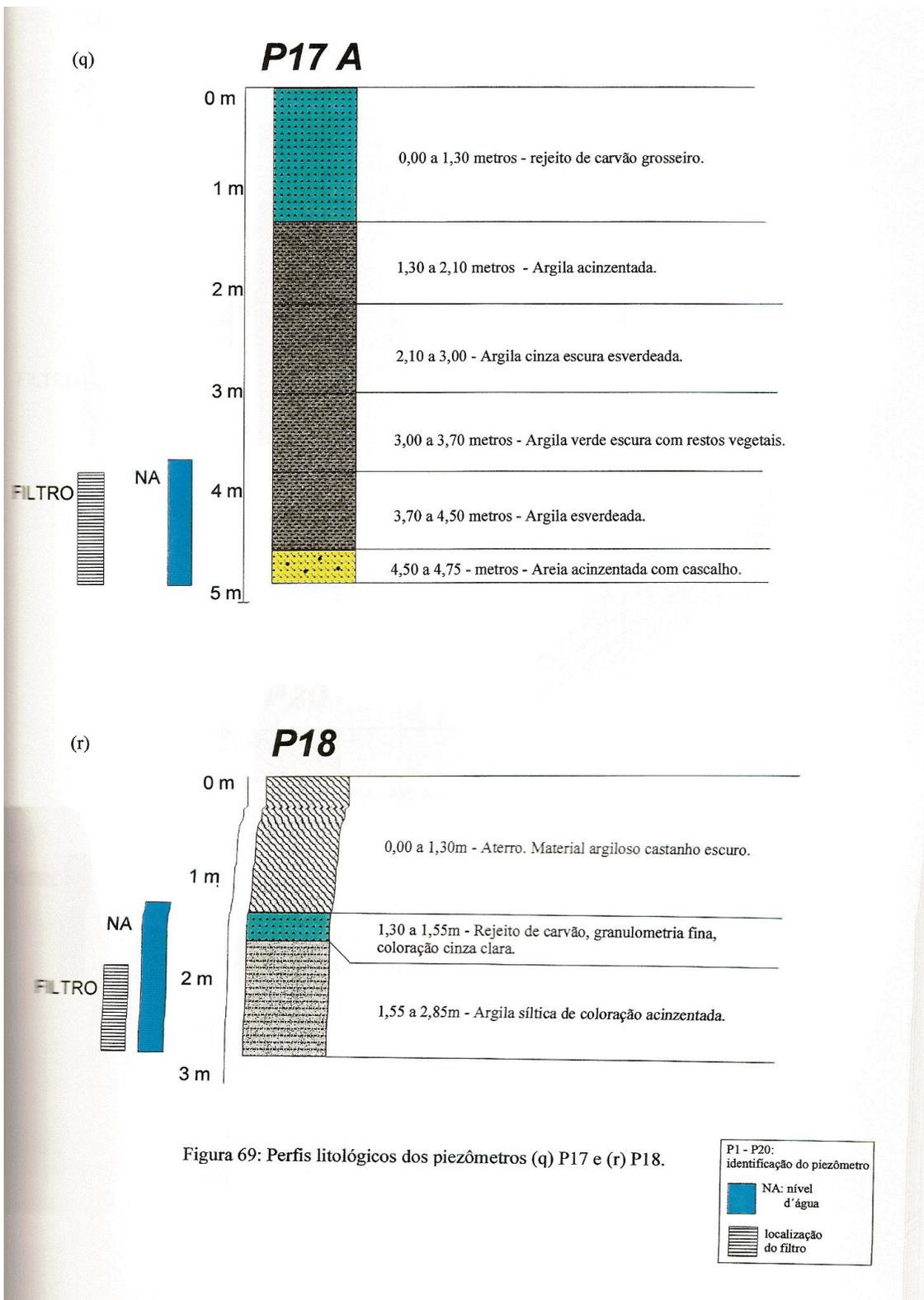


P1 - P20:
identificação do piezômetro

■ NA: nível d'água

▨ localização do filtro

Figura 69: Perfis litológicos dos piezômetros (o) P15 e (p) P16.



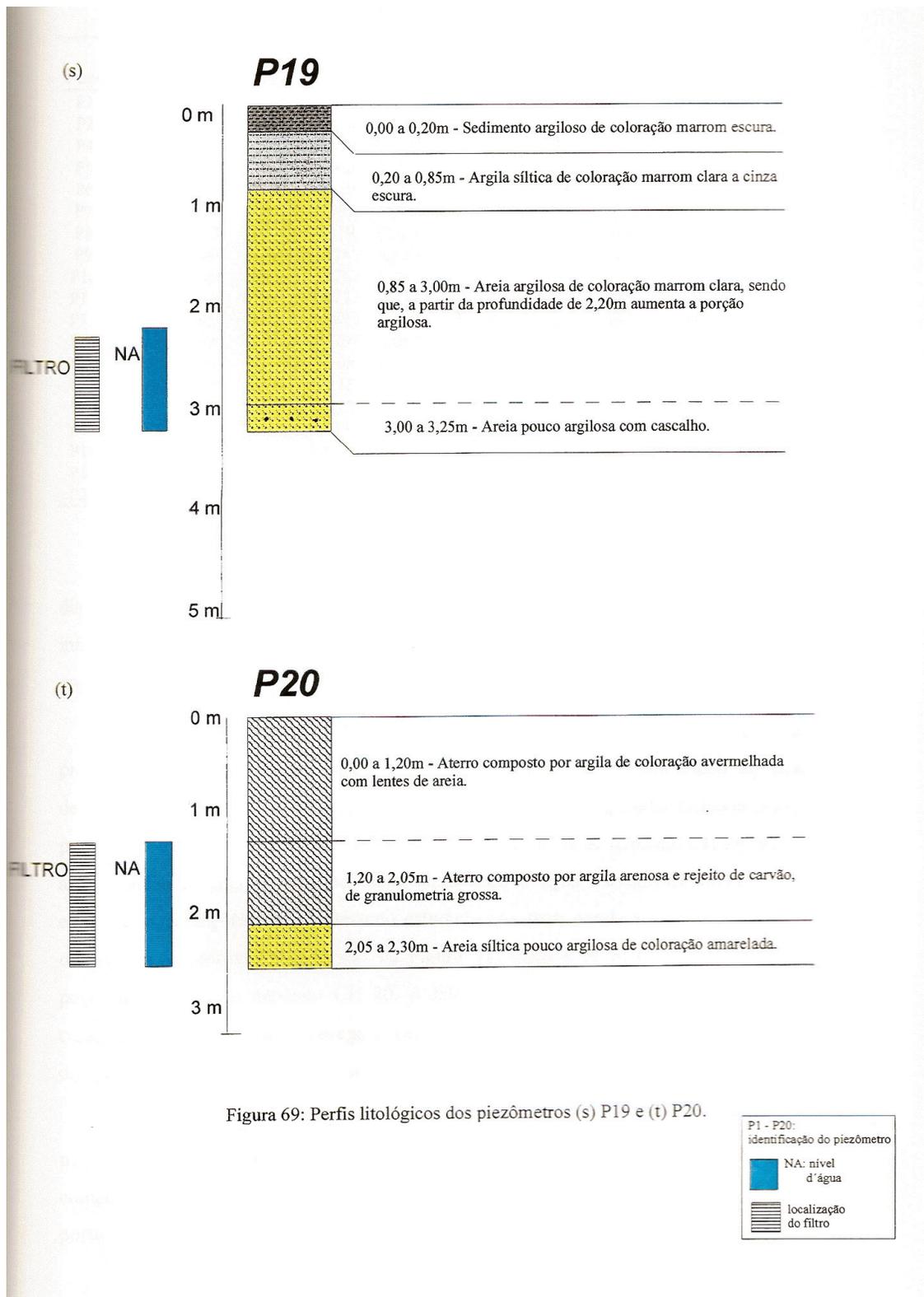


Figura 69: Perfis litológicos dos piezômetros (s) P19 e (t) P20.

Tabela 25: Níveis potenciométricos.

| Poço | Cota da Boca (m) | Nível Potenciométrico (m) | | | | | | |
|------|------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|----------|---------|
| | | abril | maio | junho | julho | agosto | setembro | outubro |
| P1 | 17,334 | 14,264 | 13,964 | 14,014 | 14,384 | 15,074 | 14,614 | 14,734 |
| P2 | 17,356 | 14,436 | 14,436 | 14,836 | 14,586 | 14,606 | 14,756 | 14,826 |
| P4 | 13,709 | 12,519 | 12,509 | 12,659 | 13,199 | 13,409 | 13,499 | 13,489 |
| P5 | 12,863 | 11,003 | 11,763 | 11,973 | 12,263 | 12,483 | 12,563 | 12,623 |
| P6 | 19,899 | 17,619 | 17,519 | 17,519 | 18,039 | 18,459 | 18,839 | 19,039 |
| P7 | 15,091 | 14,961 | 14,981 | 15,171 | 15,181 | 15,231 | 15,231 | 15,231 |
| P8 | 17,439 | 13,379 | 12,009 | 11,909 | 12,079 | 12,609 | 12,809 | 13,189 |
| P9 | 4,564 | 2,224 | 1,934 | 1,904 | 2,444 | 2,404 | 2,124 | 3,024 |
| P10 | 3,866 | 2,576 | 2,746 | 2,786 | 3,196 | 3,226 | 3,266 | 3,556 |
| P11 | 4,927 | 2,277 | 2,277 | 2,277 | 2,777 | 3,017 | 3,167 | 3,527 |
| P12 | 5,959 | 3,389 | 3,799 | 3,689 | 3,639 | 3,899 | 4,089 | 4,209 |
| P13 | 2,979 | 2,179 | 2,059 | 2,189 | 2,419 | 2,379 | 2,259 | 3,039 |
| P14 | 18,218 | 12,608 | 12,408 | 12,378 | 12,708 | 12,808 | 13,288 | 13,728 |
| P15 | 21,203 | 17,113 | 17,993 | 17,853 | 18,063 | 18,143 | 18,213 | 18,773 |
| P16 | 14,993 | 11,823 | 11,593 | 11,583 | 11,773 | 11,943 | 12,043 | 12,393 |
| P17 | 3,585 | 2,235 | 2,315 | 2,935 | 2,605 | 2,345 | 2,385 | 2,765 |
| P18 | 2,861 | 0,991 | 0,991 | 0,811 | 1,451 | 1,271 | 1,231 | 2,031 |
| P19 | 3,828 | 2,318 | 2,028 | 2,338 | 3,468 | 3,698 | 3,668 | 3,708 |
| P20 | 3,156 | 1,256 | 1,256 | 1,126 | 1,576 | 1,356 | 1,356 | 2,026 |

Regionalmente, a direção do fluxo das águas subterrâneas é norte-noroeste (N-NW), dispendo-se perpendicularmente ao Rio Jacuí, localizado no limite norte da área estudada. As inflexões observadas na porção sudeste da área (Figura 70) referem-se ao comportamento específico dos depósitos CH 20 (fluxo para SW) e CH 02 (fluxo para NE).

O primeiro - depósito CH 20 (Figuras 70 e 71) apresenta uma direção de fluxo preferencial das águas subterrâneas para SW, em direção ao Arroio Passo do Leão que deságua no Rio Jacuí. Cabe destacar que a feição de forma elipsoidal formada pelos níveis potenciométricos nas proximidades dos piezômetros localizados no depósito CH 20 (Figura 70), a qual indicaria uma direção de fluxo radial para a água subterrânea nesta região, não expressa as condições reais do terreno estudado. As reais condições de fluxo somente são observadas, conforme demonstrado na Figura 71, quando se individualiza dos demais os poços localizados no depósito CH 20. A falha observada pode ser atribuída às já citadas características do *software* empregado (item 3.3), que interpolou os níveis potenciométricos dos poços P15 e P6, de comportamento distinto.

O fluxo da água subterrânea para NE, demonstrado pelo nível potenciométrico do piezômetro P18 localizado no depósito CH 02, também pode ser atribuído a um comportamento local, indicando o controle da drenagem por um curso de água de menor porte - Arroio dos Ratos, afluente do Rio Jacuí.

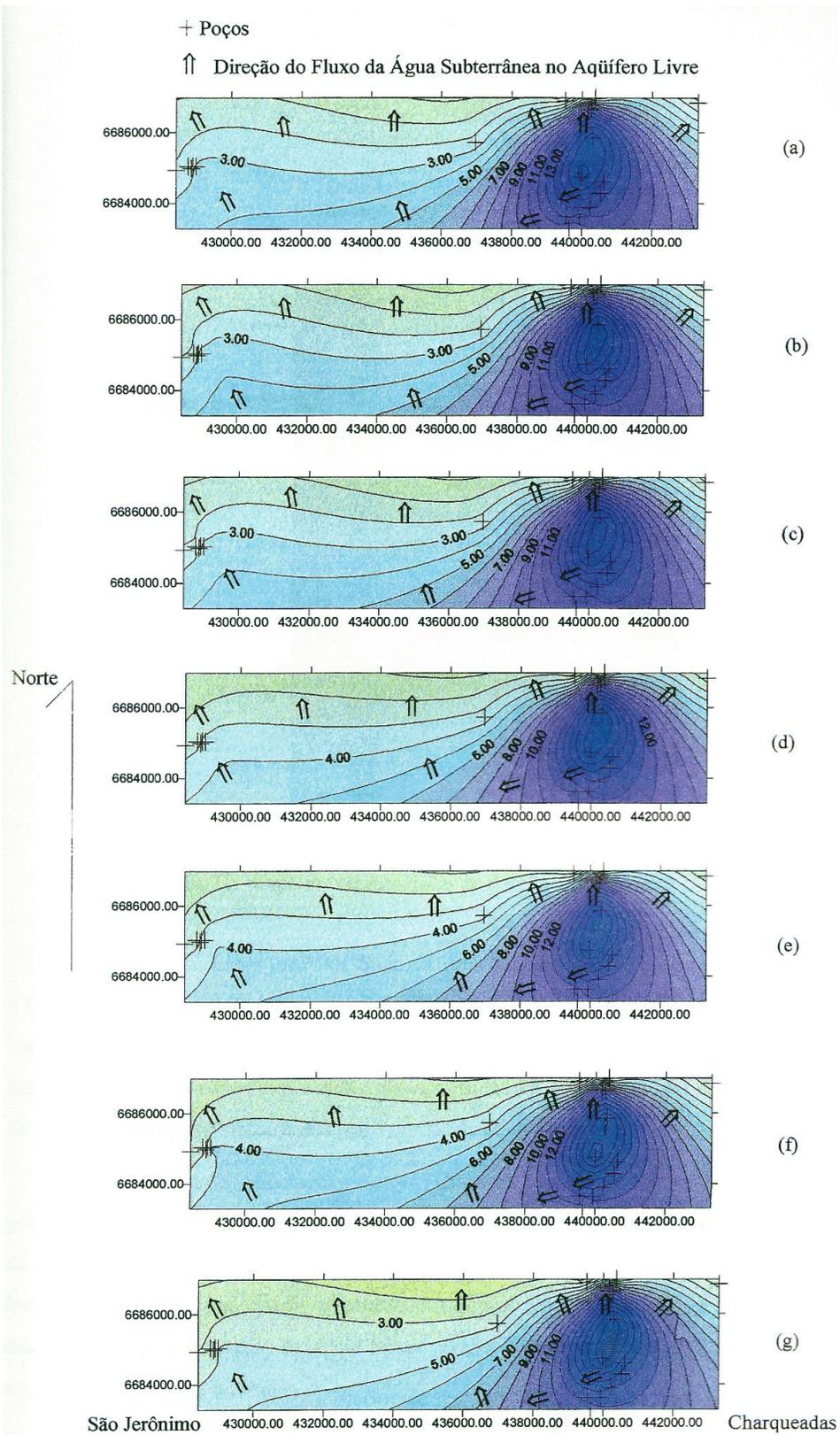


Figura 70: Mapas potenciométricos - representação esquemática para os meses monitorados: (a) abril; (b) maio; (c) junho; (d) julho; (e) agosto; (f) setembro; (g) outubro.

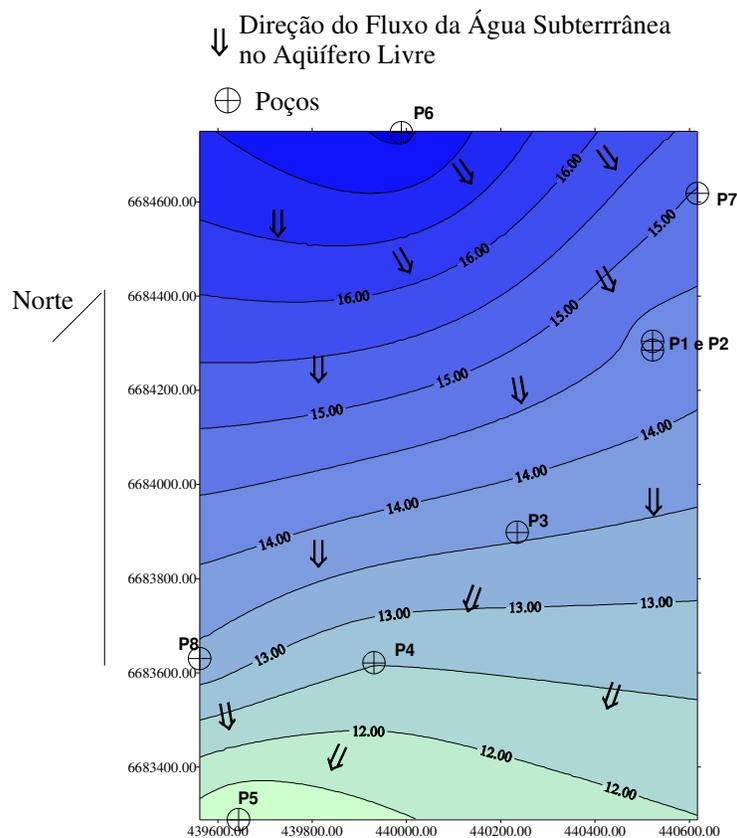


Figura 71: Mapa Potenciométrico de detalhe do depósito CH 20.

Os comportamentos locais de fluxo de água acima descritos para os depósitos CH 20 e CH 02 podem ser atribuídos à interação água superficial - água subterrânea existente nas bacias hidrográficas, nas quais, de forma geral, observa-se uma superposição aproximada das bacias de drenagem superficial e subterrânea, resultando, geralmente, no controle das zonas de descarga das águas subterrâneas pelos cursos de água superficiais.

Diante destas considerações, fica evidenciado, através da Figura 71, a condição de ponto branco para o poço P6, localizado na região com nível potenciométrico mais elevado da área, contrária à direção do fluxo das águas subterrâneas. Além disso, constata-se que a locação dos poços foi adequada, obedecendo à direção do fluxo das águas subterrâneas nos diferentes locais, procurando-se, desta forma, avaliar-se as reais condições de qualidade das águas subterrâneas monitoradas.

4.4 TESTES DE INFILTRAÇÃO E BOMBEAMENTO

A Tabela 26 apresenta a taxa de infiltração básica (mm/h) calculada a partir dos resultados obtidos nos testes de infiltração realizados na área em estudo (conferir item 3.4). Em anexo (Anexo A) são apresentados os resultados brutos dos ensaios de infiltração realizados.

Tabela 26: Taxa de infiltração básica (mm/h).

| Data | Local | Material | Taxa de infiltração básica (mm/h) |
|-------------|----------------|-----------------------------|--|
| 20/09/96 | próximo ao P7 | cinza com cobertura vegetal | 45,26 |
| 20/09/96 | próximo ao P1 | rejeito exposto | 36,38 |
| 20/09/96 | próximo ao P16 | cinza com 0,25 m de rejeito | 11,46 |
| 21/09/96 | próximo ao P12 | cinza fina de fundo | 88,62 |
| 21/09/96 | próximo ao P5 | terreno natural | 1,94 |
| 21/09/96 | próximo ao P9 | cinza grossa de fundo | 141,39 |

Analisando-se os resultados obtidos observa-se que a taxa de infiltração básica mais elevada ocorre na área contendo cinzas grossas provenientes da queima de carvão em grelhas na Usina Termoeletrica de São Jerônimo - UTSJ. Tal resultado pode ser atribuído às características físicas destas cinzas, principalmente à granulometria mais grossa das cinzas de fundo, com valores médios a altos de porosidade e permeabilidade, conforme citado por Rohde (1995), que estudou estas cinzas. A segunda taxa mais elevada foi observada, também, em uma área de cinzas da UTSJ, porém com uma granulometria mais fina.

A área contendo rejeitos de carvão apresentou uma taxa de infiltração menor que a de cinzas, sendo, porém, ainda considerada alta - 36,38 mm/h, principalmente se comparada ao baixo valor de 1,94 mm/h obtido em uma camada de argila no depósito CH 20.

Nota-se ainda um valor de infiltração básica pouco expressivo para as cinzas finas provenientes da Usina Termoeletrica de Charqueadas - TERMOCHAR e dispostas no depósito CH 17, onde localiza-se o P16. Tais cinzas, provenientes da queima de carvão pulverizado, apresentam granulometria fina.

A Tabela 27 apresenta os resultados obtidos a partir da realização dos testes de bombeamento no aquífero em estudo (conferir item 3.4). Em anexo (Anexo B) são apresentados os resultados brutos dos testes de bombeamento realizados.

Tabela 27: Resultados do teste de bombeamento.

| Data | Poço | Litologia* | Espessura no perfil (m) | Descarga (m ³ /min) | Transmis. - T (m ² /min) | Armaz. - S |
|----------|------|---|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 20/09/96 | P1 | Areia fina a média com níveis argilosos | 1,65 | 0,0066 | 0,000092 | 0,07935 |
| 20/09/96 | P7 | Areia fina a grossa | 1,00 | 0,0092 | 0,00100 | 0,1100 |
| 20/09/96 | P17 | Argila e areia | 0,75 | 0,0090 | 0,000863 | 0,10960 |
| 20/09/96 | P15 | Areia argilosa | 1,00 | 0,0066 | 0,000047 | 0,04147 |
| 21/09/96 | P5 | Areia fina a grossa e argila siltica | 0,75 | 0,0105 | 0,006182 | 0,000035 |
| 21/09/96 | P12 | Argila siltica e areia | 1,30 | 0,0097 | 0,000690 | 0,26480 |

* Conferir item 3.3

Em relação aos resultados de transmissividade obtidos (Tabela 27), observa-se que os valores mais altos (P7 e P5) foram obtidos em estratos arenosos, principalmente aqueles com granulometria média a grossa, mostrando valores elevados de condutividade hidráulica.

Os valores de armazenamento observados são, para a maioria dos poços, típicos de aquíferos freáticos. Exceção é feita para o poço P5, que, devido à presença de estratos argilosos observados nos primeiros metros do perfil litológico, conferem um caráter semi-confinante ao aquífero, explicando os baixos valores de armazenamento descritos. Os demais valores são típicos de horizontes arenosos e/ou argilosos.

Cruzando-se as informações obtidas nos testes de infiltração e de bombeamento, observa-se que, devido às altas taxas de infiltração apresentadas pelas cinzas de granulometria média a grossa (queima do carvão em grelhas) e pelos rejeitos de carvão, os contaminantes lixiviados e concentrados na fase aquosa serão, provavelmente, rapidamente infiltrados, migrando para os horizontes localizados imediatamente abaixo. Nestes horizontes, foi descrita a presença constante de estratos arenosos, os quais, devido às suas altas transmissividades transportarão rapidamente a carga recebida, promovendo a formação de plumas poluentes na direção do fluxo das águas subterrâneas. As camadas de argila observadas podem funcionar, de certa forma, como barreiras naturais à migração dos contaminantes devido aos seus baixos valores de condutividade hidráulica e transmissividade. Entretanto, uma vez alcançada a capacidade máxima de sorção dos argilominerais, estes horizontes passarão lentamente a transmitir a carga de contaminates que atingirá, facilmente, os níveis arenosos. Desta forma, o perfil litológico geral do aquífero freático na área em estudo não parece configurar um sítio geológico adequado para a deposição dos rejeitos de carvão e/ou de cinzas.

4.5 AMOSTRAGEM DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

4.5.1 Coleta de Águas Subterrâneas - Parâmetros Monitorados

Os resultados obtidos a partir da coleta das águas subterrâneas nos 19 poços monitorados na Região de Charqueadas - São Jerônimo (Figura 19, item 3.2.1) podem ser visualizados nas Tabelas 28 a 42 e Figuras 72 a 99. Conforme já citado no item 3.5.1, a coleta das águas subterrâneas (aquífero livre) foi realizada em 19 dos 20 poços de monitoramento instalados, visto que um dos piezômetros construído foi danificado (P3) sem possibilidade de recuperação no primeiro mês de coleta.

Para melhor interpretar os resultados expostos, cabe apresentar, novamente, a possível influência dos depósitos de rejeitos de carvão e cinzas na qualidade das águas subterrâneas, conforme sumarizado na Tabela 28.

Tabela 28: Descrição sucinta dos pontos de amostragem.

| Poços | Localização | Descrição |
|-------|-----------------------|--|
| P1 | CH 20 | Influência direta de rejeitos de carvão |
| P2 | CH 20 | Influência direta de rejeitos de carvão |
| P4 | CH 20 | Influência de rejeitos de carvão - direção da pluma de contaminação |
| P5 | CH 20 | Influência de rejeitos de carvão - direção da pluma de contaminação |
| P6 | proximidades do CH 20 | Branco (confirmado no item 5.3) |
| P7 | CH 20 | Influência de cinzas |
| P8 | CH 20 | Branco opcional (parte NW do CH 20 - área revegetada com eucaliptos) |
| P9 | SJ 02 | Influência direta de cinzas - UTSJ |
| P10 | SJ 02 | Influência direta de cinzas - UTSJ |
| P11 | SJ 02 | Influência direta de cinzas - UTSJ |
| P12 | SJ 02 | Influência direta de cinzas - UTSJ |
| P13 | SJ 01 | Influência de cinzas - UTSJ (área ocupada por plantação de arroz) |
| P14 | CH 08 | Depósito revegetado |
| P15 | CH 13 | Influência direta de rejeitos de carvão e de cinzas (predominante) |
| P16 | CH 17 | Influência direta de rejeitos de carvão e de cinzas (predominante) |
| P17 | CH 01 | Influência de rejeitos de carvão e de carvão |
| P18 | CH 02 | Influência de rejeitos de carvão |
| P19 | SJ 05 | Influência de cinzas |
| P20 | Beira do Rio Jacuí | Influência de rejeitos de carvão |

A Tabela 31 e a Figura 72 mostram as medições do nível de água para o período de abril a outubro efetuadas nos 19 poços estudados. Ressalta-se que na Figura 72 o zero (0) corresponde à superfície do terreno a partir da qual são medidos os níveis d'água estáticos. De forma geral, verifica-se que houve um aumento gradativo do nível d'água entre os meses de abril a outubro. O nível d'água da região no aquífero freático aumentou, aproximadamente, 0,50 metros no período compreendido entre abril-junho e julho-outubro, refletindo as

variações nas precipitações pluviométricas observadas na área em estudo. Na Figura 73 é apresentada a média anual de precipitação pluviométrica (mm) da região, obtida durante o período de 1985-1995 pelo DNAEE na Estação Pluviométrica de Charqueadas (Long.: -51°37'37" e Lat.: 29°57'00"), observando-se que o período chuvoso corresponde ao período de julho a outubro e a estiagem de abril a junho.

As Tabelas 32 a 45 resumizam os resultados dos parâmetros físico-químicos obtidos a partir do monitoramento realizado.

De forma genérica, o pH (Figura 74) das águas monitoradas foi mais elevado (6,05 - 7,36) nos meses de abril e maio, tornando-se ácido ($\approx 5,5$) nos demais meses amostrados para a maioria dos pontos estudados. O poço P2 apresentou sempre características ácidas ($\approx 4,0$), diferentemente dos demais. Observa-se que os valores de pH menores correspondem aos poços localizados em áreas que sofreram influência mais significativa de rejeitos de carvão (P2, P4, P17) nos meses em que a precipitação pluviométrica foi mais intensa, com taxa de lixiviação dos contaminantes, principalmente dos sulfetos - pirita, mais elevada.

A Figura 75 resume os resultados obtidos para as leituras de Eh, os quais mostraram grande variação no período amostrado. De forma geral, verifica-se que a maioria dos poços apresentou, para os meses de abril a setembro, um caráter redutor ou levemente oxidante (valores negativos de Eh ou positivos baixos), com baixas concentrações de íon ferroso (Figura 80). No poço P2, apesar do Eh apresentar caráter oxidante nas águas subterrâneas monitoradas, variando entre 112 e 317 mV (Figura 75), observam-se concentrações de íon ferroso elevadas para todas as coletas realizadas (abr/96 a out/96). Tal fato pode ser explicado pelo baixo pH observado neste local - extremamente ácido ($< 4,0$), o que não acarreta a oxidação do íon ferroso a férrico, conforme pode ser confirmado nos diagramas de equilíbrio de Eh x pH para o Ferro. Além do P2, os poços P1, P4, P17 e P20 apresentaram concentrações significativas de íon ferroso, embora menores que o P2, com o Eh apresentando caráter mais redutor.

O Oxigênio Dissolvido - OD (Figura 78) apresentou, de forma geral, concentrações baixas variando entre 1 e 3 mg/L de O₂, coerentemente com o esperado para amostras de águas subterrâneas de aquíferos freáticos. O poço P6, considerado o ponto branco no presente estudo, apresentou concentrações mais elevadas de OD, principalmente nos meses de maior precipitação pluviométrica (julho a agosto), revelando uma influência maior do ambiente superficial.

As Figuras 76, 77, 79, 80 e 82 mostram as concentrações de Condutividade, TDS, Sulfato, Fe^{++} e Resíduo Seco para os 19 poços amostrados. Observa-se que as concentrações não apresentaram variações significativas entre os meses estudados e que estes parâmetros mostraram comportamento semelhante para o mesmo local, obedecendo uma tendência geral (quando comparados com o branco da área - P6) de altas concentrações nos poços P1, P2, P4, P17 e P20; médias nos poços P9, P10, P11, P12, P16 e P19 e baixas nos poços P5, P7, P8, P13, P14, P15 e P18.

Comparando-se os resultados apresentados com a Tabela 28 observa-se que os poços com concentrações mais altas de SO_4^- , Fe^{++} , Condutividade, TDS e Resíduo Seco correspondem àqueles localizados em áreas contendo rejeitos de carvão, revelando, nitidamente, a influência dos sulfetos - pirita na contaminação destas águas. Em alguns casos, as concentrações destes parâmetros ultrapassaram os valores admissíveis de potabilidade das águas especificada pela OMS, conforme será discutido em maior detalhe no prosseguimento deste item. A Alcalinidade Total (Figura 83) baixa, principalmente nos poços de maior contaminação - P2 e P17, revela que as concentrações de CaCO_3 são insuficientes para promoverem aumento do pH nestes locais. A Alcalinidade Total foi mais elevada nos poços localizados em áreas contendo cinzas - P12, P13, P15 e P16.

O Sulfeto (Figura 84) mostrou-se, de forma genérica, com baixas concentrações, variando de valores não detectáveis até no máximo 1,00 mg/L. Estes resultados revelam que o enxofre presente nas águas está, na sua maioria, sob a forma de sulfatos.

Os elementos maiores Ca/Mg e K/Na mostraram comportamentos distintos, conforme pode ser visualizado nas Figuras 86 a 89.

Verifica-se certa semelhança de comportamento espacial entre os elementos Ca e Mg e os demais parâmetros físico-químicos (Sulfato, Fe^{++} , Condutividade, TDS, Resíduo Seco) observando-se altas concentrações nos poços localizados em áreas de rejeitos de carvão (Figuras 86 e 87). Provavelmente esta tendência geoquímica possa ser explicada pela presença destes elementos - Ca e Mg nos carbonatos e sulfatos, fases minerais presentes nos rejeitos de carvão.

Os cátions Na e K tiveram um comportamento espacial e temporal semelhante (Figuras 88 e 89), apresentando concentrações mais significativas nos poços P4, P16, P17 e P20, diferentemente da tendência geral observada para os demais parâmetros físico-químicos. Tal fato talvez possa ser atribuído às características geoquímicas destes elementos de associarem-se, preferencialmente, a argilas e feldspatos, fases minerais presentes em menores

quantidades nos rejeitos de carvão e em maiores nas cinzas e solos da região, melhor representados nos perfis litológicos dos poços acima citados (Figura 69, item 4.2).

Em relação aos demais elementos (Mn, Fe, Cu, Pb, Cr, Zn, Ni, Co, Cd, Mo) determinados (Figuras 90 a 99), pode-se dizer que, de forma geral, seguiram a tendência apresentada para os parâmetros físico-químicos e químicos já comentados, de altas concentrações nos poços que sofrem influência de rejeitos de carvão e intermediárias nos que sofrem influência de cinzas. Observa-se, entretanto, um comportamento espacial e temporal mais heterogêneo. A Tabela 44 resume estas considerações, apresentando as concentrações altas e intermediárias de cada elemento determinadas nos diversos poços, quando comparadas ao ponto branco da região - P6.

Tabela 44: Relação das concentrações dos elementos estudados com o branco da região - P6 nos diferentes poços amostrados.

| Elemento | Poços | |
|----------|-------------------------------|------------------------|
| | Alta Concentração | Média Concentração |
| Cd | P2 | - |
| Co | P1, P2, P17, P20 | P11, P15 |
| Cu | - | - |
| Pb | P2, P20 | - |
| Ni | P1, P2, P17 | P11 |
| Mn | P1, P2, P4, P9, P10, P17, P20 | P12, P13 |
| Cr | P2 | P17, P9, P10 |
| Fe | P2, P15, P17 | P9, P10, P11, P12, P20 |
| Zn | P1, P2, P4 | P10, P16, P17 |
| Mo | - | - |

Cabe destacar que, dentre os elementos estudados, o Mo foi o que apresentou as mais baixas concentrações, com praticamente todas as determinações abaixo do limite de detecção.

Os elementos Ni e Co (Figuras 96 e 97) mostraram distribuição espacial semelhante, com concentrações mais elevadas (quando comparadas ao ponto branco P6) nos locais de maior influência dos rejeitos de carvão - poços P2, P17 e P20.

Já os elementos Pb, Ni, Zn, Cu e Al (elemento maior) mostraram variações ao longo do tempo, com concentrações levemente mais elevadas para o período de estiagem (quando comparadas ao ponto branco P6). Este resultado, contrariamente ao verificado para os parâmetros físico-químicos, provavelmente pode ser explicado pela menor capacidade de recarga do aquífero nos períodos de estiagem, o que possibilita um contato maior das litologias com as águas subterrâneas em relação aos períodos chuvosos. Durante períodos de

elevada precipitação pluviométrica, observam-se maiores taxas de circulação e renovação das águas e, conseqüentemente, maiores taxas de diluição e migração dos contaminantes.

Observa-se que os elementos com concentrações elevadas (quando comparadas ao ponto branco P6) para o maior número de poços sob influência dos depósitos de rejeitos de carvão foram o Co, Ni, Mn, Fe, Zn e, secundariamente, Pb e Cr. Dentre estes elementos, o Mn, Ni e Zn foram reportados, no item 4.1.1.2 como os mais móveis nos depósitos estudados, coerentemente com suas altas concentrações observadas nas águas subterrâneas.

Com relação ao Fe, constata-se que, apesar de sua baixa mobilidade nas amostras estudadas, apresenta-se em altas concentrações nas águas subterrâneas monitoradas (quando comparadas ao ponto branco P6), principalmente nos poços sob influência de rejeitos de carvão. Tal fato pode ser explicado pelas altas concentrações totais deste elemento observadas nas amostras de rejeitos de carvão, as quais são até duzentas vezes maiores quando comparadas às concentrações dos demais elementos, tornando significativo o baixo percentual de lixiviação/solubilização determinado.

Quando comparam-se os valores obtidos para os diferentes parâmetros determinados com os valores admissíveis de potabilidade das águas especificados pela Organização Mundial da Saúde - OMS (Figuras 77, 79, 82, 83, 85, 87, 89-95, 98) observa-se que, para diversos parâmetros, as águas subterrâneas monitoradas apresentam-se acima dos padrões recomendados, conforme resumido na Tabela 30.

Os elementos Cu (limite = 1000 µg/ml), Zn (limite = 5000 µg/ml) e Na (limite = 200 mg/L), estão, em todos os poços monitorados, dentro dos limites estabelecidos. Os demais parâmetros determinados - íon ferroso, Eh, condutividade, OD, sulfeto, Co, Ni, Mo, K e Ca não são referidos pela OMS na bibliografia consultada (CETESB, 1990; Custodio & Llamas, 1983).

Novamente, verifica-se que os valores dos parâmetros determinados considerados acima dos padrões recomendados pela OMS correspondem, geralmente, às águas subterrâneas coletadas em poços localizados em áreas de influência de rejeitos de carvão - P1, P2, P17, P20.

Tabela 30: Comparação entre os parâmetros determinados nas águas subterrâneas com os valores admissíveis de potabilidade das águas especificados pela OMS.

| Parâmetro | Limite | Poços acima dos padrões recomendados pela OMS |
|-------------------------------|-----------|---|
| SO ₄ ²⁻ | 400 mg/L | P1, P2, P17, P20 |
| TDS | 1000 mg/L | P2, P17 |
| Resíduo Seco | 1500 mg/L | P2, P17, P20 |
| Cd | 5 µg/L | P2 |
| Pb | 50 µg/L | P2 (em todos os meses exceto em agosto), P5 - P6 - P8 - P20 (nos meses de abril, maio e junho), P14 (nos meses de abril e junho), P17 (nos meses de maio e junho) |
| Mn | 100 µg/L | P1, P2, P4, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P19, P20 |
| Cr | 50 µg/L | P2 (somente em outubro) |
| Mg | 50 mg/L | P2 (em agosto e outubro), P17 (somente em agosto) e P20 (somente em agosto) |
| Fe | 0,3 mg/L | todos os poços, em pelo menos um dos meses monitorados, esteve acima dos padrões recomendados |
| Al | 200 µg/L | todos os poços, em pelo menos um dos meses monitorados, esteve acima dos padrões recomendados |

Exceção é feita para os elementos Mn, Fe e Al, os quais apresentaram concentrações elevadas para praticamente todos os poços, incluindo, para o Al e Fe, o ponto branco - P6. Esta última consideração sugere que as águas subterrâneas do aquífero freático da região em estudo já apresentam, naturalmente, os elementos Al e Fe em concentrações um pouco mais elevadas na sua composição.

As altas concentrações de Mn podem ser relacionadas, conforme já comentado, ao alto percentual de lixiviação/solubilização deste elemento nos rejeitos de carvão e cinzas, devendo ser enfatizada a mobilidade significativa do Mn em meio aquoso devido à sua associação a carbonatos nos rejeitos de carvão e, nas cinzas, à superfície das partículas (Sanchez *et al.*, 1994).

A partir do que foi exposto neste item, observa-se que, entre os poços monitorados, o P2 (localizado no depósito CH 20) foi o que apresentou comportamento mais constante, com concentrações elevadas para a maior parte dos parâmetros determinados. Tal fato pode ser associado: (i) à influência direta dos rejeitos de carvão neste poço; (ii) à profundidade - 4,5 m deste poço, corroborando os resultados obtidos na geofísica (item 5.1.2) que mostrou ser o nível até 7,5 m o mais influenciado pelos depósitos dispostos em superfície; e (iii) ao pH ácido observado, facilitando a lixiviação dos metais presentes nas fases minerais, concentrando-os dissolvidos na fase aquosa.

A observação feita no item 4.1.1.2 de que as amostras de rejeitos de carvão apresentaram percentuais de lixiviação e solubilização mais elevados do que as de cinzas respalda as observações realizadas no decorrer deste item, de maiores concentrações dos parâmetros determinados para os poços sob influência de rejeitos de carvão. Estas altas

concentrações, principalmente do poço P2 podem ser explicadas pelo pH ácido a levemente ácido observado nestes poços, o que facilita a lixiviação dos metais das fases minerais, concentrando-os dissolvidos na fase aquosa. Já as concentrações intermediárias observadas para os poços sob influência de cinzas também podem ser relacionadas com as características neutras a básicas observadas neste poços, diminuindo a mobilidade dos elementos e conseqüentemente, promovendo menores taxas de lixiviação e solubilização.

Observa-se ainda que somente os poços P5, P7, P8 e P18 apresentaram valores compatíveis dos parâmetros determinados com os apresentados pelo ponto branco da região - P6. Assim, considera-se que todos os demais poços estão, em diferentes graus, sofrendo influência dos rejeitos de carvão e/ou de cinzas dispostos de forma inadequada, alterando a qualidade das águas subterrâneas do aquífero livre da área estudada.

Cabe ressaltar que a influência dos depósitos de rejeitos de carvão e cinzas observada nos poços acima comentados parece comprovar que os estratos argilosos presentes nos primeiros metros do perfil litológico na maior parte da área em estudo (ver item 4.2) não estão sendo efetivos no controle da migração dos contaminantes, conforme comentado no item 4.4. Provavelmente, o limite de saturação destas camadas argilosas já tenha sido alcançado, o que propicia a transmissão, de forma lenta, dos contaminantes para os demais horizontes, comprometendo o aquífero freático.

4.5.2 Aplicação de Métodos Estatísticos

A partir da análise descritiva das variáveis determinadas, obtendo-se a média, o desvio padrão, o mínimo e o máximo para cada variável, conforme pode ser visualizado na Tabela 46.

Pela análise da Tabela 46 fica claro o elevado grau de variabilidade dos dados brutos obtidos a partir do monitoramento das águas subterrâneas na Região de Charqueadas-São Jerônimo, os quais não apresentam-se homoganeamente distribuídos na área de estudo. Tal fato é atribuído aos diferentes graus de contaminação observados nos diversos poços monitorados, o que permite uma análise mais apurada da qualidade das águas subterrâneas e da possível influência dos depósitos de rejeitos de carvão e de cinzas.

Tabela 31: Coleta de águas subterrâneas - nível de água em cada poço monitorado.

| Poço | Profundidade | abr | mai | jun | jul | ago | set | out |
|------|--------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P1 | 7,50 | 3,07 | 3,37 | 3,32 | 2,95 | 2,26 | 2,72 | 2,6 |
| P2 | 4,20 | 2,92 | 2,92 | 2,52 | 2,77 | 2,75 | 2,6 | 2,53 |
| P4 | 3,30 | 1,19 | 1,2 | 1,05 | 0,51 | 0,3 | 0,21 | 0,22 |
| P5 | 2,95 | 1,86 | 1,1 | 0,89 | 0,6 | 0,38 | 0,3 | 0,24 |
| P6 | 2,50 | 2,28 | 2,38 | 2,38 | 1,86 | 1,44 | 1,06 | 0,86 |
| P7 | 3,67 | 0,13 | 0,11 | -0,08 | -0,09 | -0,14 | -0,14 | -0,14 |
| P8 | 6,80 | 4,06 | 5,43 | 5,53 | 5,36 | 4,83 | 4,63 | 4,25 |
| P9 | 4,80 | 2,34 | 2,63 | 2,66 | 2,12 | 2,16 | 2,44 | 1,54 |
| P10 | 3,25 | 1,29 | 1,12 | 1,08 | 0,67 | 0,64 | 0,6 | 0,31 |
| P11 | 2,80 | 2,65 | 2,65 | 2,65 | 2,15 | 1,91 | 1,76 | 1,4 |
| P12 | 3,80 | 2,57 | 2,16 | 2,27 | 2,32 | 2,06 | 1,87 | 1,75 |
| P13 | 3,00 | 0,8 | 0,92 | 0,79 | 0,56 | 0,6 | 0,72 | -0,06 |
| P14 | 6,60 | 5,61 | 5,81 | 5,84 | 5,51 | 5,41 | 4,93 | 4,49 |
| P15 | 7,15 | 4,09 | 3,21 | 3,35 | 3,14 | 3,06 | 2,99 | 2,43 |
| P16 | 4,15 | 3,17 | 3,4 | 3,41 | 3,22 | 3,05 | 2,95 | 2,6 |
| P17 | 5,00 | 1,35 | 1,27 | 0,65 | 0,98 | 1,24 | 1,2 | 0,82 |
| P18 | 2,85 | 1,87 | 1,87 | 2,05 | 1,41 | 1,59 | 1,63 | 0,83 |
| P19 | 3,25 | 1,51 | 1,8 | 1,49 | 0,36 | 0,13 | 0,16 | 0,12 |
| P20 | 2,30 | 1,9 | 1,9 | 2,03 | 1,58 | 1,8 | 1,8 | 1,13 |

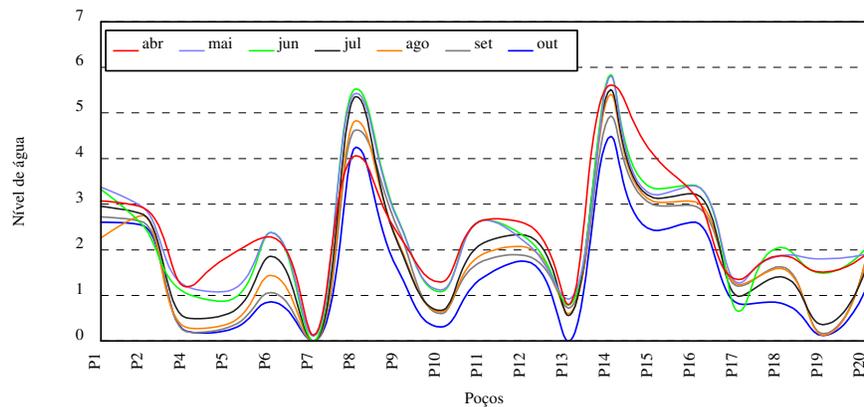


Figura 72: Variações do nível de água durante o período amostrado.

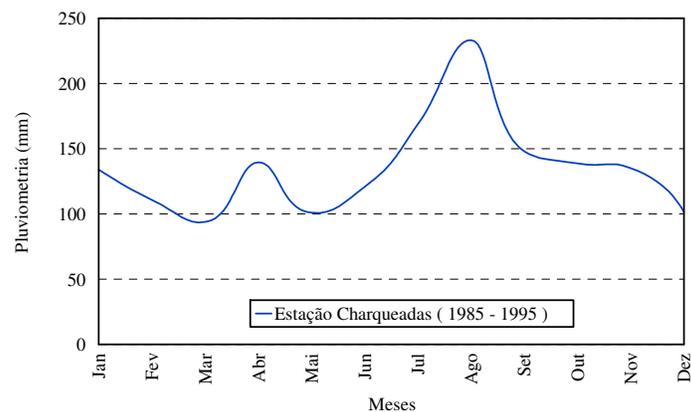


Figura 73: Precipitação média anual para a região.

Tabela 32: Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de abril.

| Período abr/96 | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------|-------|---------|---------|---------|------|----------|---------|---------|---------|--------|----------|
| Param. | OD | T | Eh | Cond | TDS | pH | Res.Seco | SO4-- | Sulfeto | Fe++ | Fetot | Alc.Tot. |
| Unidade | (mg/L) | °C | (mV) | (µS) | (mg/L) | | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| P1 | * | 26,30 | -35,00 | 875,00 | 439,00 | 6,00 | * | 269,00 | * | 16,06 | * | 55,08 |
| P2 | * | 25,90 | 295,00 | 4200,00 | 2130,00 | 3,89 | * | 3784,00 | * | 1273,00 | * | < 1,00 |
| P4 | * | 24,40 | -348,00 | 2200,00 | 1090,00 | 6,50 | * | 1240,00 | * | 39,38 | * | 150,98 |
| P5 | * | 24,00 | -223,00 | 144,50 | 72,30 | 6,10 | * | < 5,00 | * | 8,71 | * | 55,38 |
| P6 | * | 24,00 | -89,00 | 52,20 | 26,40 | 7,22 | * | * | * | * | * | * |
| P7 | * | 24,20 | 188,00 | 71,30 | 37,50 | 5,80 | * | < 5,00 | * | 0,19 | * | 24,62 |
| P8 | * | 23,20 | -99,00 | 152,70 | 78,80 | 6,05 | * | 6,40 | * | 24,85 | * | 40,10 |
| P9 | * | 24,70 | -78,00 | 744,00 | 373,00 | 7,17 | * | 222,00 | * | 28,40 | * | 90,26 |
| P10 | * | 22,30 | -143,00 | 793,00 | 407,00 | 7,14 | * | 285,00 | * | 29,06 | * | 61,79 |
| P11 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| P12 | * | 22,30 | -129,00 | 428,00 | 216,00 | 7,18 | * | 72,00 | * | 12,34 | * | 144,31 |
| P13 | * | 20,90 | -107,00 | 417,00 | 208,00 | 7,19 | * | < 5,00 | * | 18,66 | * | 178,46 |
| P14 | * | 20,90 | 136,00 | 276,00 | 138,00 | 6,76 | * | 19,40 | * | < 0,1 | * | 12,00 |
| P15 | * | 22,70 | -138,00 | 553,00 | 264,00 | 6,84 | * | 57,00 | * | 65,40 | * | 149,03 |
| P16 | * | 24,10 | -74,00 | 1450,00 | 693,00 | 7,00 | * | 360,00 | * | 2,40 | * | 353,64 |
| P17 | * | 24,50 | -46,00 | 2270,00 | 1130,00 | 6,68 | * | 1139,00 | * | 120,60 | * | 16,10 |
| P18 | * | 21,80 | -89,00 | 301,00 | 153,00 | 7,09 | * | 37,00 | * | * | * | 72,32 |
| P19 | * | 23,10 | 4,00 | 535,00 | 271,00 | 7,00 | * | 159,00 | * | 4,34 | * | 17,44 |
| P20 | * | 23,60 | -32,00 | 1990,00 | 990,00 | 6,97 | * | 989,00 | * | * | * | 32,51 |

* parâmetro não determinado
nd - não detectado

Tabela 33: Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de maio.

| Período mai/96 | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------|-------|---------|---------|---------|------|----------|---------|---------|---------|--------|----------|
| Param. | OD | T | Eh | Cond | TDS | pH | Res.Seco | SO4-- | Sulfeto | Fe++ | Fetot | Alc.Tot. |
| Unidade | (mg/L) | °C | (mV) | (µS) | (mg/L) | | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| P1 | 1,20 | 23,10 | 29,00 | 1266,00 | 632,00 | 6,85 | 1400,00 | 735,00 | * | 19,40 | * | 39,92 |
| P2 | 1,50 | 23,80 | 214,00 | 4140,00 | 2040,00 | 5,46 | 8400,00 | 5040,00 | * | 1381,00 | * | < 1,00 |
| P4 | 1,00 | 18,20 | -99,00 | 2220,00 | 1100,00 | 6,93 | 2700,00 | 1570,00 | * | 91,33 | * | 86,94 |
| P5 | 1,00 | 20,40 | -60,00 | 96,40 | 48,00 | 7,24 | 3800,00 | < 5,00 | * | 4,21 | * | 36,68 |
| P6 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| P7 | 2,20 | 21,20 | 140,00 | 60,20 | 29,70 | 7,26 | 160,00 | < 5,00 | * | 0,12 | * | 22,05 |
| P8 | 1,00 | 21,50 | 106,00 | 79,90 | 38,80 | 7,12 | 3200,00 | 6,00 | * | 14,00 | * | 24,00 |
| P9 | 1,00 | 23,10 | -4,00 | 771,00 | 386,00 | 7,05 | 670,00 | 324,00 | * | 39,77 | * | 62,17 |
| P10 | 1,20 | 22,00 | 5,00 | 738,00 | 369,00 | 7,06 | 5200,00 | 324,00 | * | 21,06 | * | 32,81 |
| P11 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| P12 | 1,00 | 26,00 | -108,00 | 416,00 | 198,00 | 7,06 | 700,00 | 102,00 | * | 11,72 | * | 107,84 |
| P13 | 1,20 | 21,50 | -73,00 | 446,00 | 222,00 | 7,21 | 330,00 | < 5,00 | * | 26,40 | * | 170,64 |
| P14 | 2,04 | 24,20 | 143,00 | 263,00 | 130,00 | 6,99 | 610,00 | 20,00 | * | * | * | 9,64 |
| P15 | 1,40 | 23,80 | -87,00 | 475,00 | 238,00 | 7,09 | 380,00 | 35,00 | * | 74,95 | * | 163,28 |
| P16 | 1,10 | 22,30 | -23,00 | 1444,00 | 708,00 | 7,13 | 3100,00 | 510,00 | * | 2,80 | * | 351,80 |
| P17 | 1,00 | 22,30 | -164,00 | 1849,00 | 891,00 | 6,90 | 2000,00 | 1045,00 | * | 87,90 | * | 65,62 |
| P18 | 1,60 | 18,30 | -14,00 | 215,00 | 110,00 | 7,36 | * | < 5,00 | * | * | * | * |
| P19 | 1,80 | 21,20 | -35,00 | 578,00 | 291,00 | 6,83 | 3800,00 | 270,00 | * | 2,83 | * | 9,61 |
| P20 | 1,30 | 22,30 | 33,00 | 1940,00 | 967,00 | 6,94 | * | 1280,00 | * | * | * | 35,32 |

* parâmetro não determinado
nd - não detectado

Tabela 34: Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de junho.

| Período | jun/96 | | | | | | | | | | | |
|---------|--------|-------|---------|---------|---------|------|----------|---------|---------|---------|--------|----------|
| Param. | OD | T | Eh | Cond | TDS | pH | Res.Seco | SO4-- | Sulfeto | Fe++ | Fetot | Alc.Tot. |
| Unidade | (mg/L) | °C | (mV) | (µS) | (mg/L) | | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| P1 | 4,50 | 21,60 | 15,00 | 1440,00 | 708,00 | 5,85 | 150,00 | 863,00 | * | 66,27 | * | 50,26 |
| P2 | 3,00 | 21,20 | 276,00 | 4290,00 | 2120,00 | 3,78 | 8140,00 | 5252,00 | * | 1477,00 | * | < 1,00 |
| P4 | 4,00 | 16,00 | 58,00 | 2520,00 | 649,00 | 6,79 | 3140,00 | 1990,00 | * | 382,70 | * | 31,24 |
| P5 | 1,00 | 17,50 | -60,00 | 96,40 | 48,00 | 7,24 | 110,00 | < 5,00 | * | 2,94 | * | 30,30 |
| P6 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| P7 | 4,40 | 18,10 | 201,00 | 62,60 | 29,10 | 7,00 | 160,00 | < 5,00 | * | 0,15 | * | 21,00 |
| P8 | 1,20 | 19,40 | 142,00 | 66,20 | 32,80 | 6,84 | 890,00 | 7,00 | * | 7,29 | * | 17,76 |
| P9 | 1,20 | 19,20 | -85,00 | 586,00 | 288,00 | 5,93 | 460,00 | 152,00 | * | 26,26 | * | 149,74 |
| P10 | 1,60 | 19,00 | 91,00 | 732,00 | 348,00 | 5,58 | 1010,00 | 345,00 | * | 5,91 | * | 28,32 |
| P11 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| P12 | 1,70 | 24,70 | -121,00 | 414,00 | 199,00 | 6,07 | 560,00 | 104,00 | * | 10,33 | * | 100,31 |
| P13 | 2,00 | 18,50 | -65,00 | 430,00 | 215,00 | 6,03 | 280,00 | < 5,00 | * | 23,18 | * | 169,49 |
| P14 | 2,20 | 21,70 | 248,00 | 279,00 | 139,00 | 4,65 | 470,00 | 20,00 | * | 0,29 | * | 8,78 |
| P15 | 1,10 | 20,90 | -93,00 | 566,00 | 280,00 | 5,99 | 40,00 | < 5,00 | * | 72,70 | * | 218,60 |
| P16 | 1,40 | 22,30 | -34,00 | 1464,00 | 740,00 | 6,39 | 2440,00 | 590,00 | * | 1,35 | * | 341,06 |
| P17 | 1,50 | 20,00 | 36,00 | 2610,00 | 1270,00 | 3,26 | 2410,00 | 1514,00 | * | 170,40 | * | < 1,00 |
| P18 | 2,50 | 17,70 | 95,00 | 159,20 | 75,60 | 6,37 | * | < 5,00 | * | * | * | 53,81 |
| P19 | 3,30 | 19,30 | 314,00 | 630,00 | 314,00 | 6,84 | 850,00 | 302,00 | * | 0,22 | * | 7,31 |
| P20 | 1,40 | 18,20 | 3,00 | 2000,00 | 955,00 | 7,00 | * | 1286,00 | * | * | * | 125,07 |

* parâmetro não determinado

nd - não detectado

Tabela 35: Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de julho.

| Período | jul/96 | | | | | | | | | | | |
|---------|--------|-------|---------|---------|---------|------|----------|---------|---------|---------|--------|----------|
| Param. | OD | T | Eh | Cond | TDS | pH | Res.Seco | SO4-- | Sulfeto | Fe++ | Fetot | Alc.Tot. |
| Unidade | (mg/L) | °C | (mV) | (µS) | (mg/L) | | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| P1 | 1,20 | 22,40 | 14,00 | 1099,00 | 547,00 | 5,60 | 991,70 | 520,00 | 0,04 | 48,11 | * | 45,03 |
| P2 | 1,20 | 22,20 | 220,00 | 5520,00 | 2750,00 | 3,80 | 8004,50 | 3300,00 | 0,04 | 1672,44 | * | 0,00 |
| P4 | 1,80 | 15,80 | -63,00 | 2470,00 | 1210,00 | 4,60 | 2608,70 | 1540,00 | < 0,02 | 103,75 | * | 3,86 |
| P5 | 2,00 | 16,70 | -103,00 | 58,70 | 28,90 | 5,58 | 776,50 | < 5,00 | 0,26 | 2,34 | * | 13,77 |
| P6 | 6,00 | 17,70 | 131,00 | 42,20 | 16,40 | 5,60 | 274,00 | < 5,00 | 0,14 | 1,09 | * | 4,44 |
| P7 | 3,00 | 18,50 | 140,00 | 59,50 | 29,70 | 4,30 | 123,50 | < 5,00 | 0,06 | 0,61 | * | 20,89 |
| P8 | 2,90 | 20,80 | -129,00 | 53,70 | 27,10 | 3,97 | 182,00 | 6,00 | 0,15 | 2,73 | * | 13,06 |
| P9 | 1,40 | 19,60 | -86,00 | 943,00 | 476,00 | 6,70 | 792,00 | 408,00 | 0,06 | 49,34 | * | 54,90 |
| P10 | 1,80 | 17,90 | -116,00 | 848,00 | 420,00 | 5,47 | 734,50 | 394,00 | < 0,02 | 0,89 | * | 36,79 |
| P11 | 3,80 | 20,40 | 74,00 | 386,00 | 193,00 | 5,82 | 836,50 | 97,00 | 0,30 | 4,18 | * | 70,11 |
| P12 | 2,00 | 24,10 | -137,00 | 386,00 | 193,00 | 6,00 | 465,20 | 76,00 | 0,14 | 2,08 | * | 90,80 |
| P13 | 1,60 | 18,10 | -66,00 | 379,00 | 191,00 | 5,84 | 293,70 | < 5,00 | < 0,02 | 20,08 | * | 157,88 |
| P14 | 3,90 | 22,20 | 191,00 | 261,00 | 126,00 | 4,40 | 274,00 | 16,00 | 0,11 | 0,84 | * | 7,57 |
| P15 | 2,00 | 22,50 | -78,00 | 467,00 | 250,00 | 5,46 | 367,50 | < 5,00 | 0,03 | 34,62 | * | 161,44 |
| P16 | 2,30 | 23,60 | -9,00 | 1623,00 | 811,00 | 6,00 | 1914,00 | 530,00 | 0,12 | 2,43 | * | 369,12 |
| P17 | 2,10 | 19,50 | -4,00 | 2420,00 | 1240,00 | 3,49 | 2393,50 | 1340,00 | 0,20 | 142,56 | * | 0,00 |
| P18 | 1,50 | 17,70 | 109,00 | 171,90 | 84,30 | 5,75 | 199,70 | < 5,00 | 0,05 | 1,58 | * | 63,06 |
| P19 | 2,80 | 17,70 | 78,00 | 550,00 | 276,00 | 6,17 | 464,50 | 145,00 | 0,06 | 0,48 | * | 136,26 |
| P20 | 3,90 | 19,50 | 98,00 | 1960,00 | 1000,00 | 5,10 | 2305,00 | 1170,00 | 0,28 | 9,45 | * | 12,69 |

* parâmetro não determinado

nd - não detectado

Tabela 36: Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de agosto.

| Período | ago/96 | | | | | | | | | | | |
|---------|--------|-------|---------|---------|---------|------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Param. | OD | T | Eh | Cond | TDS | pH | Res.Seco | SO4-- | Sulfeto | Fe++ | Fetot | Alc.Tot. |
| Unidade | (mg/L) | °C | (mV) | (µS) | (mg/L) | | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| P1 | 1,80 | 21,90 | 21,00 | 1235,00 | 615,00 | 5,78 | 905,20 | 525,00 | 0,03 | 73,66 | 73,66 | 45,40 |
| P2 | 2,00 | 21,30 | 155,00 | 7260,00 | 3570,00 | 3,93 | 10701,60 | 6200,00 | 0,15 | 2448,60 | 2461,90 | 0,00 |
| P4 | 2,02 | 16,60 | 186,00 | 2180,00 | 1050,00 | 4,85 | 1772,80 | 1190,00 | < 0,02 | 79,20 | 81,71 | 4,02 |
| P5 | 1,20 | 16,50 | -136,00 | 64,60 | 32,00 | 5,70 | 620,00 | < 5,00 | 1,00 | 9,33 | 9,94 | 22,46 |
| P6 | 6,00 | 16,90 | 208,00 | 97,00 | 47,60 | 4,62 | 135,50 | 8,00 | 0,07 | 0,59 | 0,66 | 6,37 |
| P7 | 2,80 | 18,70 | 170,00 | 54,20 | 27,50 | 5,23 | 99,50 | < 5,00 | < 0,02 | 0,31 | 0,44 | 22,41 |
| P8 | 2,00 | 19,30 | -78,00 | 56,80 | 28,20 | 5,49 | 123,50 | < 5,00 | 0,12 | 0,28 | 0,29 | 13,48 |
| P9 | 1,90 | 19,30 | -20,00 | 812,00 | 408,00 | 6,60 | 675,00 | 344,00 | < 0,02 | 27,03 | 27,23 | 42,,32 |
| P10 | 1,80 | 18,80 | 117,00 | 786,00 | 396,00 | 6,20 | 796,00 | 352,00 | 0,17 | 5,41 | 7,80 | 43,68 |
| P11 | 3,00 | 19,90 | 252,00 | 402,00 | 217,00 | 4,60 | 819,00 | 154,00 | 0,50 | 4,66 | 5,33 | 5,07 |
| P12 | 1,80 | 23,90 | 163,00 | 397,00 | 196,00 | 7,40 | 334,00 | 81,00 | 0,03 | 0,91 | 1,70 | 96,24 |
| P13 | 1,60 | 18,90 | -48,00 | 444,00 | 223,00 | 6,20 | 294,00 | < 5,00 | < 0,02 | 13,65 | 14,77 | 195,61 |
| P14 | 2,40 | 22,20 | 205,00 | 204,00 | 102,00 | 4,93 | 212,50 | < 5,00 | 0,07 | 0,68 | 0,71 | 10,55 |
| P15 | 2,20 | 23,60 | -120,00 | 586,00 | 293,00 | 6,14 | 422,50 | 13,00 | 0,04 | 84,68 | 85,00 | 172,93 |
| P16 | 1,50 | 22,60 | 12,00 | 1711,00 | 847,00 | 6,55 | 1965,80 | 615,00 | 0,18 | 5,35 | 8,48 | 370,01 |
| P17 | 1,20 | 19,40 | 52,00 | 2160,00 | 1080,00 | 4,10 | 2075,20 | 1050,00 | 0,06 | 115,00 | 117,50 | 0,00 |
| P18 | 1,60 | 17,60 | 163,00 | 156,90 | 78,20 | 6,08 | 189,20 | < 5,00 | 0,04 | 1,46 | 2,43 | 54,23 |
| P19 | 2,80 | 19,30 | 161,00 | 484,00 | 263,00 | 6,18 | 455,75 | 166,00 | 0,05 | 0,38 | 0,39 | 98,33 |
| P20 | 2,10 | 20,1 | 47,00 | 1970,00 | 990,00 | 6,01 | 2471,00 | 1100,00 | 0,57 | 45,80 | 46,26 | 44,56 |

* parâmetro não determinado

nd - não detectado

Tabela 37: Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de setembro.

| Período | set/96 | | | | | | | | | | | |
|---------|--------|-------|---------|---------|---------|------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Param. | OD | T | Eh | Cond | TDS | pH | Res.Seco | SO4-- | Sulfeto | Fe++ | Fetot | Alc.Tot. |
| Unidade | (mg/L) | °C | (mV) | (µS) | (mg/L) | | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| P1 | 1,00 | 21,90 | -86,00 | 1150,00 | 571,00 | 5,85 | 1081,50 | 535,00 | 0,02 | 110,36 | 111,00 | 4,85 |
| P2 | 1,40 | 21,30 | 112,00 | 8150,00 | 3930,00 | 3,91 | 1580,50 | 6700,00 | 0,11 | 2772,86 | 2773,00 | 0,00 |
| P4 | 0,90 | 17,70 | 109,00 | 1921,00 | 960,00 | 4,59 | 2030,50 | 1080,00 | 0,02 | 79,94 | 81,27 | 5,97 |
| P5 | 3,90 | 18,20 | -116,00 | 51,10 | 25,60 | 6,05 | 848,50 | 28,00 | 0,84 | 6,69 | 6,88 | 16,70 |
| P6 | 4,00 | 18,20 | 113,00 | 88,10 | 40,30 | 4,86 | 270,50 | 34,00 | 0,23 | 1,54 | 1,68 | 3,62 |
| P7 | 2,30 | 17,30 | 56,00 | 57,20 | 28,20 | 5,81 | 102,00 | < 5,00 | 0,03 | 0,39 | 0,42 | 21,80 |
| P8 | 2,20 | 18,70 | 54,00 | 48,80 | 23,30 | 5,19 | 145,00 | 12,00 | 0,15 | 2,91 | 2,92 | 10,82 |
| P9 | 1,60 | 18,20 | -78,00 | 831,00 | 433,00 | 6,02 | 723,25 | 420,00 | 0,03 | 23,27 | 23,28 | 55,40 |
| P10 | 1,00 | 18,70 | 21,00 | 852,00 | 409,00 | 6,03 | 768,00 | 362,00 | 0,15 | 12,78 | 13,12 | 54,18 |
| P11 | 2,00 | 18,90 | 200,00 | 550,00 | 269,00 | 4,69 | 711,50 | 223,00 | 0,23 | 3,99 | 4,49 | 1,38 |
| P12 | 1,20 | 24,10 | 76,00 | 409,00 | 201,00 | 6,27 | 396,20 | 90,00 | 0,08 | 1,65 | 2,57 | 85,53 |
| P13 | 1,20 | 17,50 | -163,00 | 391,00 | 194,00 | 6,37 | 302,00 | < 5,00 | 0,03 | 19,10 | 19,87 | 161,87 |
| P14 | 3,00 | 20,30 | 132,00 | 237,00 | 116,00 | 5,02 | 301,00 | 8,00 | 0,19 | 1,48 | 1,48 | 11,28 |
| P15 | 1,30 | 21,50 | -151,00 | 570,00 | 284,00 | 6,14 | 406,00 | 18,00 | 0,04 | 77,55 | 77,55 | 190,66 |
| P16 | 1,80 | 21,50 | -103,00 | 1692,00 | 855,00 | 6,51 | 1753,00 | 560,00 | 0,21 | 4,45 | 5,42 | 383,99 |
| P17 | 1,00 | 18,80 | 68,00 | 1753,00 | 870,00 | 4,86 | 1445,00 | 800,00 | 0,03 | 66,46 | 68,06 | 0,00 |
| P18 | 1,60 | 17,40 | 10,00 | 160,00 | 80,10 | 6,11 | 328,00 | < 5,00 | 0,14 | 2,61 | 3,15 | 70,98 |
| P19 | 2,80 | 18,20 | 104,00 | 469,00 | 235,00 | 6,16 | 445,75 | 148,00 | 0,12 | 0,85 | 0,85 | 78,53 |
| P20 | 1,40 | 19,5 | -66,00 | 1980,00 | 983,00 | 5,92 | 2573,00 | 1135,00 | 0,59 | 48,47 | 48,48 | 48,51 |

* parâmetro não determinado

nd - não detectado

Tabela 38: Coleta de águas subterrâneas - parâmetros físico-químicos - mês de outubro.

| Período | out/96 | | | | | | | | | | | |
|---------|--------|-------|---------|---------|---------|------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Param. | OD | T | Eh | Cond | TDS | pH | Res.Seco | SO4-- | Sulfeto | Fe++ | Fetot | Alc.Tot. |
| Unidade | (mg/L) | °C | (mV) | (µS) | (mg/L) | | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| P1 | 1,00 | 24,30 | 75,00 | 1773,00 | 893,00 | 6,04 | 1888,00 | 855,00 | 0,02 | 292,16 | 293,00 | 37,17 |
| P2 | 1,40 | 23,60 | 317,00 | 8480,00 | 4250,00 | 4,03 | 16949,00 | 6600,00 | 0,05 | 3096,89 | 3097,00 | 0,00 |
| P4 | 4,80 | 21,20 | 345,00 | 1272,00 | 638,00 | 4,70 | 1251,00 | 610,00 | 0,04 | 40,77 | 40,83 | 0,00 |
| P5 | 3,00 | 23,70 | 200,00 | 58,60 | 29,70 | 5,80 | 459,00 | 15,20 | 0,64 | 4,98 | 5,10 | 18,12 |
| P6 | 3,30 | 22,50 | 340,00 | 44,50 | 22,50 | 4,94 | 111,50 | 24,20 | 0,08 | 0,71 | 0,71 | 5,51 |
| P7 | 0,80 | 21,40 | 426,00 | 58,00 | 29,30 | 5,32 | 102,50 | 14,60 | 0,02 | 0,28 | 0,29 | 21,70 |
| P8 | 1,70 | 23,90 | 339,00 | 46,90 | 22,00 | 5,31 | 100,00 | 15,50 | 0,09 | 5,12 | 5,23 | 12,40 |
| P9 | 0,90 | 21,10 | -225,00 | 875,00 | 441,00 | 6,21 | 699,75 | 412,00 | 0,08 | 11,05 | 11,32 | 98,03 |
| P10 | 1,80 | 22,70 | -19,00 | 818,00 | 414,00 | 6,37 | 642,50 | 300,00 | 0,02 | 26,09 | 26,09 | 95,89 |
| P11 | 0,80 | 22,50 | 351,00 | 483,00 | 246,00 | 4,75 | 581,50 | 228,00 | 0,18 | 1,92 | 2,25 | 2,34 |
| P12 | 0,70 | 27,00 | -35,00 | 393,00 | 197,00 | 6,38 | 261,75 | 93,00 | < 0,02 | 0,34 | 0,78 | 83,89 |
| P13 | 1,20 | 20,80 | -232,00 | 387,00 | 195,00 | 6,49 | 294,50 | 12,50 | 0,14 | 21,91 | 23,74 | 154,10 |
| P14 | 2,20 | 21,60 | 390,00 | 203,00 | 102,00 | 4,98 | 127,75 | 29,50 | < 0,02 | 0,17 | 0,22 | 9,75 |
| P15 | 1,50 | 21,90 | -7,00 | 563,00 | 273,00 | 6,15 | 374,00 | 19,20 | 0,04 | 65,40 | 67,06 | 158,39 |
| P16 | 2,00 | 22,40 | 208,00 | 1734,00 | 865,00 | 6,62 | 1630,00 | 460,00 | 0,13 | 4,60 | 5,38 | 370,81 |
| P17 | 1,40 | 21,00 | 274,00 | 1531,00 | 767,00 | 5,58 | 1244,00 | 595,00 | 0,02 | 52,98 | 53,00 | 17,36 |
| P18 | 2,20 | 20,90 | 1,00 | 325,00 | 154,00 | 6,43 | 307,00 | 24,00 | 0,07 | 34,65 | 36,87 | 79,49 |
| P19 | 1,60 | 21,20 | 207,00 | 454,00 | 230,00 | 6,18 | 407,50 | 141,00 | 0,05 | 0,42 | 0,46 | 69,98 |
| P20 | 1,60 | 21,5 | 305,00 | 1750,00 | 881,00 | 5,65 | 1761,25 | 890,00 | 0,12 | 7,50 | 7,50 | 24,40 |

* parâmetro não determinado

nd - não detectado

Tabela 39: Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de abril.

| Per. | abr/96 | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Param. | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn | Mo | Al | Ca | Mg | Na | K |
| Unid. | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| L.D. | 0,145 | 0,34 | 0,367 | 2,24 | 1,77 | 0,315 | 0,262 | 0,063 | 0,442 | 1,07 | 1,85 | 0,0013 | 0,021 | | |
| P1 | 0,7455 | 29,75 | 2,87 | 25,15 | 3,18 | 555 | nd | 17 | 399 | nd | 87,65 | 155,5 | 8,08 | 27 | 11,35 |
| P2 | 7,855 | 67,35 | 7,895 | 141,5 | 172 | 3031 | 20,75 | 1273 | 2321 | nd | 120000 | 311 | 17,75 | 22,5 | 11,95 |
| P4 | 1,015 | 47,4 | 3,58 | 38,25 | 21,5 | 1903 | 8,07 | 50 | 290 | nd | 2546 | 438,5 | 29,95 | 53 | 26,5 |
| P5 | 0,611 | 65,8 | 6,785 | 202 | 2,175 | 984 | nd | 10,6 | 198,5 | nd | 1264 | 10,1 | 2,04 | 10,5 | 3,85 |
| P6 | 0,472 | 4,355 | 24,7 | 256,5 | nd | 177 | 3,155 | 16,4 | 97,6 | nd | 7450 | 5,585 | 3,54 | 4,05 | 1,7 |
| P7 | 0,417 | 1,435 | 2,35 | 27,65 | nd | 44,15 | nd | 0,5275 | 19,7 | nd | 133 | 1,845 | 0,543 | 8 | 3,5 |
| P8 | 0,506 | 1,76 | 17,95 | 129,5 | nd | 85,35 | 1,365 | 28,95 | 193 | nd | 3188,5 | 11,1 | 3,25 | 1,75 | 1,6 |
| P9 | nd | 8,47 | 1,365 | 25,95 | 7,28 | 2305,5 | 2,14 | 32,85 | 72,45 | nd | 161,5 | 107,5 | 12,85 | 20 | 7 |
| P10 | 0,828 | 6,76 | 5,74 | 46,8 | 2,425 | 2705 | 3,76 | 38,45 | 431,5 | nd | 2038 | 114 | 13,8 | 22,5 | 11,7 |
| P11 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| P12 | nd | nd | nd | 56,7 | nd | 550 | 1,67 | 13,2 | 33,2 | 3,375 | 684,5 | 66,05 | 6,27 | 11 | 8,5 |
| P13 | nd | nd | 1,22 | 30,45 | nd | 736,5 | 1,63 | 21,7 | 73,2 | nd | 159,5 | 17 | 8,335 | 21,5 | 3,35 |
| P14 | nd | nd | 9,235 | 80,05 | nd | 143,5 | 1,485 | 0,8915 | 80,55 | nd | 692,5 | 7,78 | 6,135 | 29,5 | 1,7 |
| P15 | 1,455 | 17,9 | nd | 32,1 | 11,05 | 666,5 | 2,37 | 93,5 | 122,5 | nd | 189,5 | 24,35 | 5,92 | 13,5 | 2,9 |
| P16 | 0,625 | 2,065 | 4,825 | 49,15 | 8,145 | 1160 | 6,63 | 5,08 | 630,5 | 1,235 | 7407,5 | 204 | 18,315 | 63,5 | 14 |
| P17 | 1,2 | 55 | 4,845 | 44 | 125 | 3500,5 | 7,22 | 132,5 | 356 | nd | 4257 | 260,5 | 26,5 | 114 | 10,05 |
| P18 | 0,5915 | nd | 1,33 | 56,3 | nd | 1121,5 | 2,175 | 45,35 | 48,4 | nd | 338 | 13,2 | 5,575 | 13 | 2,1 |
| P19 | 0,2065 | 88,4 | 11,5 | 141,5 | 12 | 533 | 4 | 4,5 | 88,6 | nd | 5169,5 | 62,05 | 12,85 | 13 | 4,6 |
| P20 | 0,4635 | 87,75 | 15,45 | 233 | 27,75 | 8135,5 | 5,38 | 52,95 | 217,5 | nd | 3219 | 297,5 | 34,5 | 81 | 11,75 |

* parâmetro não determinado

nd - não detectado

L.D. - Limite de Detecção

Tabela 40: Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de maio.

| Per. | mai/96 | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Param. | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn | Mo | Al | Ca | Mg | Na | K |
| Unid. | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/ml) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| L.D. | 0,145 | 0,34 | 0,367 | 2,24 | 1,77 | 0,315 | 0,262 | 0,063 | 0,442 | 1,07 | 1,85 | 0,0013 | 0,021 | | |
| P1 | 0,795 | 40,4 | nd | 21,05 | 4,25 | 536 | 1,425 | 20 | 1071 | nd | 79,3 | 263,5 | 9,69 | 26,5 | 13 |
| P2 | 8,385 | 50,6 | 6 | 133,5 | 179 | 3002,5 | 30,65 | 1381 | 985,5 | nd | 318500 | 312 | 18,15 | 21,5 | 10,5 |
| P4 | 1,77 | 83,25 | 2,315 | 46,4 | 64,6 | 3066,5 | 7,745 | 109 | 916,5 | nd | 3486 | 418 | 30,6 | 49 | 24 |
| P5 | 0,585 | 45,55 | 24,95 | 100,4 | nd | 1099,5 | 1,3 | 4,765 | 123,5 | nd | 1032,5 | 8,54 | 5,055 | 8 | 5,65 |
| P6 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| P7 | 0,08 | nd | 5,055 | 14,8 | nd | 34,9 | 0,2325 | 0,111 | 66,8 | nd | 88,6 | 1,635 | 0,289 | 8 | 3,45 |
| P8 | 0,093 | nd | 9,625 | 113 | nd | 40 | 1,3505 | 14,5 | 83,25 | nd | 1763,5 | 7,84 | 1,6 | 1,45 | 0,75 |
| P9 | 0,5265 | 0,3 | 4,09 | 41,2 | 3,64 | 2457 | 1,79 | 48,2 | 229,5 | nd | 654,5 | 104,5 | 12,25 | 20,5 | 5,85 |
| P10 | 0,243 | 4,39 | 9,405 | 50,1 | 3,53 | 2651,5 | 2,585 | 29,1 | 665,5 | 3,435 | 2874 | 113 | 12,65 | 19 | 11,05 |
| P11 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| P12 | nd | nd | nd | 11,9 | nd | 506,5 | nd | 11,95 | 22,1 | 7,015 | 239,5 | 61,85 | 6,03 | 10 | 8,05 |
| P13 | nd | nd | nd | 18,15 | nd | 976 | 1,295 | 27 | 63,5 | nd | 121,5 | 16,75 | 7,57 | 20 | 3,35 |
| P14 | nd | nd | 7,415 | 42,95 | nd | 143,5 | 0,615 | 0,804 | 58,6 | 1,39 | 482 | 7,325 | 5,54 | 28 | 1,5 |
| P15 | 0,851 | 12,4 | nd | 27,25 | 5,285 | 667,5 | 1,65 | 94,95 | 79,8 | 2,545 | 121,5 | 25,4 | 5,67 | 12,5 | 3,1 |
| P16 | nd | 2,525 | 2,685 | 22,8 | 9,61 | 1299 | 1,955 | 3,47 | 337,5 | 8,765 | 3728,5 | 219,5 | 20,1 | 66,5 | 14,5 |
| P17 | 2,44 | 2,56 | 4,25 | 76,75 | 29,25 | 2673 | 6,755 | 96,85 | 368 | 2,59 | 2475,5 | 169 | 26,315 | 125,5 | 10,25 |
| P18 | 0,636 | nd | 2,38 | 46,55 | nd | 972,5 | 3,465 | 29,15 | 104,5 | nd | 782 | 10,5 | 5,02 | 11 | 3,55 |
| P19 | nd | 78,75 | 7,96 | 87,75 | 13,6 | 562,5 | 2,89 | 3,265 | 90 | 0,965 | 3568 | 77,25 | 14 | 15,5 | 4,15 |
| P20 | 0,5355 | 47,3 | 42,6 | 90,7 | 20,45 | 7486 | 5,06 | 57,95 | 147 | nd | 2118 | 281,5 | 34,05 | 81 | 10,45 |

* parâmetro não determinado

nd - não detectado

L.D. - Limite de Detecção

Tabela 41: Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de junho.

| Per. | jun/96 | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Param. | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn | Mo | Al | Ca | Mg | Na | K |
| Unid. | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| L.D. | 0,145 | 0,34 | 0,367 | 2,24 | 1,77 | 0,315 | 0,262 | 0,063 | 0,442 | 1,07 | 1,85 | 0,0013 | 0,021 | | |
| P1 | 2,445 | 52,4 | 1,619 | 23,1 | 3,715 | 768,5 | 1,96 | 68 | 735 | nd | 83 | 271 | 13,95 | 25 | 12,05 |
| P2 | 8,525 | 40,65 | 6,948 | 137,5 | 175,5 | 2925,5 | 25,9 | 1480 | 1635,25 | nd | 219250 | 322 | 18,2 | 21,5 | 11,2 |
| P4 | 2,465 | 149 | 2,497 | 46,05 | 43,05 | 4526,5 | 5,51 | 79,5 | 603,25 | nd | 3016 | 403,5 | 31,15 | 40 | 17,6 |
| P5 | nd | 7,265 | 15,868 | 151,2 | nd | 406 | 1,056 | 7,682 | 161 | nd | 1148 | 3,17 | 1,42 | 6,55 | 1,8 |
| P6 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| P7 | nd | nd | 3,702 | 21,225 | 1,05 | 22,7 | nd | 0,316 | 43,25 | nd | 110 | 1,125 | 0,274 | 8 | 3,25 |
| P8 | nd | nd | 13,788 | 121,5 | nd | 22,75 | 0,6 | 21,075 | 138,125 | nd | 2476 | 5,35 | 1,045 | 1,35 | 0,5 |
| P9 | nd | nd | 2,728 | 33,575 | 5,46 | 1938 | 0,74 | 40,525 | 150,975 | nd | 408 | 77,35 | 10 | 15,5 | 4,8 |
| P10 | nd | nd | 7,573 | 48,45 | 2,978 | 2711 | nd | 33,775 | 548,5 | 2,425 | 2456 | 114 | 12,8 | 19 | 9,8 |
| P11 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| P12 | nd | nd | nd | 11,9 | nd | 427,5 | nd | 12,575 | 27,65 | 5,2 | 462 | 59,4 | 5,815 | 9,5 | 6,7 |
| P13 | nd | nd | 0,793 | 24,3 | nd | 727,5 | 0,756 | 23,2 | 68,35 | nd | 140 | 14,9 | 7,305 | 17,5 | 2,5 |
| P14 | nd | nd | 8,325 | 61,5 | nd | 120,5 | 0,865 | 0,848 | 69,575 | 2,64 | 587 | 6,62 | 5,52 | 24,5 | 1,6 |
| P15 | 0,4535 | 4,57 | nd | 29,675 | 8,468 | 789 | 1,19 | 94,225 | 101,15 | 1,86 | 155 | 28,45 | 5,675 | 11,5 | 4,85 |
| P16 | nd | nd | 3,755 | 35,975 | 8,878 | 1300,5 | 0,4215 | 4,275 | 484 | 8 | 5567 | 216,5 | 20,15 | 46,5 | 15,15 |
| P17 | 2,13 | 95,7 | 4,547 | 60,375 | 77,125 | 3617 | 5,61 | 171 | 362 | nd | 3366 | 246 | 34,1 | 84,5 | 8,95 |
| P18 | nd | nd | 1,855 | 51,42 | nd | 753 | 1,05 | 37,25 | 76,45 | 1,26 | 560 | 8,935 | 4,39 | 9,5 | 1,4 |
| P19 | nd | 80,15 | 9,73 | 114,62 | 12,8 | 552,5 | 1,34 | 3,878 | 89,3 | 1,87 | 4360 | 74,45 | 14,5 | 14 | 4,15 |
| P20 | 0,2515 | 33,15 | 29,025 | 161,85 | 24,1 | 7841,5 | 5,305 | 55,4 | 182,25 | nd | 2660 | 269,5 | 33,15 | 87 | 10,65 |

* parâmetro não determinado

nd - não detectado

L.D. - Limite de Detecção

Tabela 42: Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de julho.

| Per. | jul/96 | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Param. | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn | Mo | Al | Ca | Mg | Na | K |
| Unid. | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| L.D. | 0,015 | 0,406 | 0,16 | 2,06 | 0,347 | 0,185 | 0,096 | 0,0013 | 0,165 | 2,33 | 4,91 | 0,0688 | 0,0052 | | |
| P1 | 0,925 | 55,65 | 1,33 | 24,3 | 10,19 | 688 | 1,415 | 120 | 1463 | nd | 81 | 145,5 | 13,1 | 24 | 9 |
| P2 | 7,39 | 51,7 | 21,45 | 183 | 216 | 2659,5 | 26,3 | 2214 | 1336 | nd | 281550 | 367,5 | 19,2 | 23,5 | 11 |
| P4 | 1,39 | 105 | 1,33 | 27,8 | 89,65 | 3115 | 3,62 | 104 | 1325 | nd | 11935 | 284,5 | 29,95 | 51,5 | 20 |
| P5 | 0,132 | 6,725 | 15,868 | 16,45 | 2,595 | 250,5 | 0,0735 | 2,4 | 27,6 | nd | 142 | 2,515 | 0,8065 | 6,55 | 1,6 |
| P6 | 0,301 | nd | 1,33 | 17,7 | 6,24 | 21,8 | 0,3615 | 1,1 | 34,4 | nd | 478 | 0,949 | 0,4545 | 2,7 | 0,7 |
| P7 | 0,148 | nd | 1,7 | 2,875 | 1,05 | 19,45 | nd | 0,7 | 3,65 | nd | 10 | 0,9615 | 0,2505 | 7,75 | 4,3 |
| P8 | 0,3495 | nd | 0,766 | 20,25 | 2,48 | 18,45 | nd | 4,26 | 26,8 | nd | 108 | 3,515 | 0,8255 | 1,3 | 2,05 |
| P9 | 0,505 | 2,13 | 1,665 | 15,05 | 8,63 | 2715 | 1,46 | 51 | 22,6 | nd | 14 | 111,5 | 14,4 | 23,5 | 7,5 |
| P10 | 0,432 | 4,885 | 0,766 | 16,75 | 8,53 | 2513,5 | 1,22 | 16,35 | 87,7 | nd | 258 | 128 | 16,6 | 24 | 11 |
| P11 | 0,442 | 10,55 | 12,3 | 16,45 | 42,1 | 1525,5 | 0,752 | 5,625 | 148 | nd | 1708 | 49,15 | 5,65 | 8,85 | 5 |
| P12 | 0,192 | nd | 1,255 | 34,3 | 1,785 | 401,5 | 0,3725 | 4,995 | 10,8 | 3,935 | 800 | 53,75 | 5,875 | 10 | 7 |
| P13 | 0,0835 | nd | 0,733 | 12,3 | 3,365 | 589 | nd | 21 | 29,3 | nd | 400 | 14 | 8,055 | 19 | 3,1 |
| P14 | 0,367 | 0,4595 | 0,766 | 16,55 | 4,66 | 114,5 | nd | 0,86 | 34,4 | nd | 106 | 5,9 | 5,83 | 26,5 | 2,05 |
| P15 | 0,782 | 9,26 | 0,766 | 21 | 8,475 | 660,5 | 0,094 | 93,1 | 90,5 | nd | 56 | 21,75 | 6,185 | 13,5 | 4,55 |
| P16 | 0,539 | 2,675 | 0,766 | 18,15 | 8,165 | 1632 | 0,771 | 4,725 | 127 | 5,225 | 1044 | 202,5 | 21,55 | 64,5 | 16 |
| P17 | 2,235 | 72,1 | 0,766 | 17,45 | 55,3 | 3805 | 3,83 | 143 | 52,95 | nd | 133 | 253,5 | 29,55 | 104,5 | 10 |
| P18 | 0,249 | nd | 0,406 | 24,05 | 5,19 | 1041,5 | nd | 10,4 | 26,45 | nd | 195 | 8,915 | 4,865 | 11,5 | 1,4 |
| P19 | 0,339 | 27,6 | 0,766 | 9,615 | 9,78 | 173,5 | nd | 0,49 | 10,2 | nd | 137 | 97,4 | 7,5 | 5,25 | 5 |
| P20 | 0,8775 | 17,65 | 3,865 | 58,9 | 21,05 | 3450,5 | 1,65 | 68,5 | 57 | nd | 836 | 271,5 | 30,1 | 76 | 11,5 |

* parâmetro não determinado

nd - não detectado

L.D. - Limite de Detecção

Tabela 43: Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de agosto.

| Per. | ago/96 | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Param. | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn | Mo | Al | Ca | Mg | Na | K |
| Unid. | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| L.D. | 0,158 | 2,34 | 1,33 | 1,89 | 0,312 | 1,16 | 0,385 | 0,00613 | 0,352 | 0,413 | 5,69 | 0,0052 | 0,0063 | | |
| P1 | 0,7035 | 41,4 | nd | 17,45 | 10,19 | 810,5 | nd | 82,15 | 1463,5 | nd | 81,1 | 177 | 19,2 | 23,5 | 10,05 |
| P2 | 8,895 | 68,05 | nd | 200,5 | 206,5 | 3065 | 36,85 | 2214,5 | 1336 | nd | 248400 | 461,5 | 58,5 | 28 | 10 |
| P4 | nd | 115 | nd | 23,8 | 89,65 | 3338,5 | 1,235 | 87,05 | 1538,5 | nd | 11097,5 | 334,5 | 65 | 41 | 17,5 |
| P5 | nd | 3,98 | 5,825 | 15,9 | 2,595 | 251 | nd | 9,35 | 27,6 | nd | 242 | 2,445 | 0,707 | 6,1 | 1,6 |
| P6 | nd | nd | nd | 17,25 | 6,68 | 146,5 | nd | 0,6 | 34,4 | nd | 461,5 | 4,26 | 3,065 | 3,7 | 0,9 |
| P7 | nd | nd | 1,7 | 2,975 | 1,05 | 30 | nd | 0,4155 | 3,65 | nd | 9,27 | 0,9135 | 0,2545 | 7,45 | 3,95 |
| P8 | nd | nd | 2,275 | 20,25 | 2,48 | 24 | nd | 3,5 | 31,2 | nd | 108,7 | 4,75 | 0,7415 | 1,7 | 0,7 |
| P9 | nd | 1,265 | 1,665 | 19,68 | 8,63 | 1667,5 | nd | 28 | 173,3 | nd | 69,65 | 116 | 15,4 | 20 | 9,95 |
| P10 | nd | 4,08 | 1,86 | 22,45 | 8,53 | 1318,1 | nd | 16,35 | 112,5 | nd | 285 | 120 | 15,85 | 9,6 | 11 |
| P11 | nd | 22,55 | 8,6 | 26,4 | 39,15 | 974 | nd | 5,76 | 221,5 | nd | 1708,5 | 67,15 | 6,565 | 9,75 | 6,1 |
| P12 | nd | nd | 3,305 | 18,4 | 1,785 | 549,5 | nd | 4,995 | 10,8 | 3,72 | 80,25 | 63,9 | 6,14 | 10,4 | 7,3 |
| P13 | nd | nd | nd | 12,3 | 0,419 | 597,5 | nd | 14,3 | 29,3 | nd | 21 | 32,1 | 7,03 | 17,5 | 9,25 |
| P14 | nd | nd | nd | 16,55 | 3,65 | 159,5 | nd | 0,69 | 34,4 | nd | 106,5 | 6,885 | 4,665 | 21 | 1,3 |
| P15 | 0,35 | 9,47 | nd | 22,65 | 8,3 | 739,5 | nd | 108,5 | 82,4 | nd | 56,2 | 34,65 | 6,9 | 11 | 4,15 |
| P16 | nd | nd | nd | 20,2 | 7,405 | 1905,5 | 0,7585 | 5,61 | 168 | 5,035 | 1772,5 | 315,5 | 40,75 | 64,5 | 15 |
| P17 | 0,879 | 39,9 | nd | 28,8 | 88,05 | 2878 | 1,19 | 120,5 | 103 | nd | 618,5 | 221 | 79 | 99 | 11 |
| P18 | nd | nd | nd | 29,65 | 5,445 | 1012,5 | nd | 9,73 | 26,45 | nd | 103 | 8,875 | 4,53 | 10 | 1,45 |
| P19 | 0,46 | 45,15 | nd | 9,9 | 9,73 | 260,5 | nd | 0,39 | 4,97 | 0,65 | 80,45 | 97,85 | 9,675 | 6,45 | 4,4 |
| P20 | 1,62 | 43,15 | 3,865 | 58,9 | 21,65 | 6264 | 2,62 | 68,9 | 81,8 | nd | 836 | 294,5 | 93,5 | 84,5 | 10,45 |

* parâmetro não determinado

nd - não detectado

L.D. - Limite de Detecção

Tabela 44: Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de setembro.

| Per. | set/96 | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Param. | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn | Mo | Al | Ca | Mg | Na | K |
| Unid. | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| L.D. | 0,122 | 1,3 | 0,766 | 1,76 | 0,227 | 0,103 | 0,148 | 0,084 | 0,05 | 1,12 | 5,51 | 0,0013 | 0,0063 | | |
| P1 | nd | 58,7 | 0,939 | 24,3 | 8,24 | 802,5 | 0,975 | 120 | 983 | nd | 192,5 | 136 | 13,5 | 18 | 8,3 |
| P2 | 7,735 | 85,3 | 21,45 | 212 | 216 | 2732 | 41,9 | 2774 | 858,5 | nd | 281550 | 376,5 | 18,1 | 21,5 | 9,1 |
| P4 | nd | 108,5 | 3,035 | 30,8 | 92,8 | 3122 | 1,1465 | 85,2 | 1325,5 | nd | 22268,5 | 256,5 | 27,4 | 25,5 | 10,3 |
| P5 | 0,151 | 5,765 | 6,15 | 16,45 | 2,995 | 132 | nd | 6,7 | 22,9 | nd | 126,5 | 1,63 | 0,465 | 6 | 3 |
| P6 | 0,3735 | 3,915 | 1,485 | 16,7 | 6,24 | 105 | nd | 1,55 | 23,3 | nd | 478,5 | 3,18 | 2,605 | 3,5 | 0,8 |
| P7 | 0,247 | nd | nd | 2,175 | 2,42 | 24,9 | nd | 0,4 | 6,635 | nd | 10,2 | 0,8985 | 0,2645 | 8,5 | 3,95 |
| P8 | 0,37 | nd | nd | 25,5 | 2,995 | 25,35 | nd | 4,26 | 23,95 | 1,51 | 136,5 | 4,055 | 0,85 | 1,1 | 0,3 |
| P9 | 0,798 | 2,555 | 1,405 | 13,1 | 9,34 | 2125,5 | 0,458 | 23,3 | 22,6 | 1,195 | 14,95 | 123,5 | 13,7 | 14,5 | 9,55 |
| P10 | 0,725 | 5,785 | nd | 16,75 | 9,44 | 2749 | 1,31 | 14,35 | 87,7 | nd | 258,5 | 125 | 13,35 | 12 | 9,6 |
| P11 | 0,8305 | 27,3 | 55,75 | 15,4 | 42,1 | 1251,5 | 0,5395 | 5,625 | 137 | nd | 1828,5 | 73,85 | 7,795 | 10 | 7,35 |
| P12 | 0,3435 | nd | 1,255 | 20,45 | 1,49 | 339,5 | nd | 6,885 | 16,1 | 2,15 | 196,5 | 58,05 | 5,59 | 10 | 7,45 |
| P13 | 0,665 | nd | nd | 7,07 | 3,365 | 540,5 | nd | 19,2 | 31,75 | 1,925 | 40,25 | 19,65 | 7,025 | 13 | 4,8 |
| P14 | 1,125 | nd | nd | 23,6 | 7,17 | 137 | nd | 1,49 | 35,65 | nd | 221,5 | 6,34 | 5,295 | 15,5 | 1,45 |
| P15 | 1,14 | 9,06 | nd | 11,65 | 8,795 | 629 | nd | 93,1 | 99,3 | nd | 198 | 31,55 | 6,09 | 10 | 4,7 |
| P16 | 1,035 | 1,97 | nd | 18,15 | 10,6 | 1832 | 0,4455 | 4,49 | 127 | 5,07 | 1044,5 | 293,5 | 23 | 74 | 10,3 |
| P17 | 1,46 | 26,35 | nd | 17,45 | 55,3 | 1922,5 | 0,2325 | 77,4 | 52,95 | nd | 133 | 139 | 28,85 | 105,5 | 8,3 |
| P18 | 0,6 | nd | 4,465 | 24,05 | 3,645 | 962 | nd | 10,4 | 16,85 | nd | 195 | 9,21 | 5,155 | 10,5 | 1,45 |
| P19 | 0,595 | 44,5 | nd | 9,615 | 9,78 | 243,5 | nd | 0,86 | 10,2 | nd | 197 | 80,7 | 8,74 | 7 | 4,4 |
| P20 | 1,89 | 36,2 | 5,51 | 66,7 | 21,05 | 5273,5 | 2,04 | 78,4 | 49,7 | nd | 972 | 250,5 | 32,45 | 75,5 | 9,45 |

* parâmetro não determinado

nd - não detectado

L.D. - Limite de Detecção

Tabela 45: Coleta de águas subterrâneas - menores e maiores - mês de outubro.

| Per. | out/96 | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Param. | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn | Mo | Al | Ca | Mg | Na | K |
| Unid. | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (µg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| L.D. | 0,02 | 2,09 | 0,132 | 1,26 | 0,474 | 0,146 | 0,086 | 0,014 | 0,282 | 0,235 | 3,63 | 0,095 | 0,0076 | | |
| P1 | 2,865 | 121,5 | 1,87 | 39,15 | 37,6 | 1497 | 5,775 | 313,5 | 1903,5 | nd | 30,15 | 181,5 | 31,55 | 22,5 | 9 |
| P2 | 12,1 | 157 | 31,25 | 114,5 | 361 | 2993 | 81,7 | 3098 | 991,5 | nd | 356850 | 390,5 | 64,3 | 26,5 | 10 |
| P4 | 1,275 | 78,4 | 1,145 | 27,8 | 68,45 | 2015 | 2,36 | 44,65 | 1287,5 | nd | 11935,5 | 149 | 34,7 | 27 | 11 |
| P5 | 0,83 | 4,65 | 3,47 | 26,1 | 1,05 | 149 | 0,551 | 4,99 | 37,3 | 0,443 | 142 | 1,835 | 0,4795 | 6,1 | 2,1 |
| P6 | 0,45 | nd | 0,211 | 14,25 | 2,615 | 57,9 | 1,1845 | 3,13 | 37,45 | nd | 714,5 | 1,97 | 1,23 | 2,85 | 0,5 |
| P7 | 0,245 | nd | 0,7845 | 3,045 | nd | 17,45 | 0,668 | 0,2895 | 18,25 | 0,2685 | 8,5 | 0,836 | 0,2655 | 8,15 | 3,8 |
| P8 | 0,285 | nd | 0,489 | 12,6 | nd | 24,9 | 0,608 | 5,95 | 26,8 | 0,7475 | 84,8 | 2,935 | 0,806 | 1,15 | 0,2 |
| P9 | 0,625 | nd | 2,11 | 15,05 | 5,225 | 1906 | 1,0425 | 13 | 10,65 | nd | 8,925 | 126,5 | 18,05 | 21,5 | 12,5 |
| P10 | 0,805 | 3,57 | 0,3495 | 15,05 | 5,21 | 3103,5 | 1,535 | 27,65 | 27,95 | 0,5445 | 150 | 107,5 | 14,15 | 21,5 | 10 |
| P11 | 0,755 | 28,05 | 12,3 | 16,45 | 44,95 | 1273 | 1,135 | 2,665 | 148 | nd | 1403,5 | 62,05 | 7,205 | 13 | 6 |
| P12 | 0,365 | nd | nd | 13,8 | 2,3 | 582 | 0,9375 | 2,37 | 7,82 | 2,69 | 15,2 | 53,75 | 5,46 | 11 | 6 |
| P13 | 0,535 | nd | nd | 12,55 | 3,74 | 790,5 | 1,785 | 27,15 | 18 | nd | 156,5 | 21,35 | 7,69 | 16 | 5 |
| P14 | 0,57 | nd | nd | 14 | 4,66 | 141 | 1,107 | 0,18 | 34,3 | nd | 54,3 | 6,69 | 4,755 | 19,5 | 1,15 |
| P15 | 1,08 | 10,05 | nd | 21 | 8,475 | 657,5 | 2,31 | 83,35 | 90,5 | nd | 31,05 | 25,35 | 6,205 | 13 | 4,45 |
| P16 | 0,935 | nd | nd | 18,15 | 8,165 | 1985 | 2,41 | 4,725 | 88,4 | 5,6 | 533 | 275 | 38,4 | 77,5 | 15 |
| P17 | 1,135 | 18,3 | nd | 11,75 | 36,15 | 1579 | 11,435 | 53,5 | 49,35 | nd | 50,4 | 96,05 | 48,65 | 132 | 7,5 |
| P18 | 0,905 | nd | nd | 22,4 | 5,195 | 1155,5 | 2,175 | 40,1 | 68,1 | 0,956 | 626,5 | 11,8 | 5,57 | 12 | 1,4 |
| P19 | 0,505 | 46,9 | nd | 7,735 | 10,21 | 272,5 | 1,0465 | 0,15 | 20,35 | 0,427 | 137,5 | 68,95 | 9,445 | 6,95 | 3,8 |
| P20 | 0,99 | 15 | nd | 15,8 | 16,75 | 2161,5 | 2,535 | 7,6 | 57 | 0,6085 | 366 | 219 | 72,4 | 96 | 10 |

* parâmetro não determinado

nd - não detectado

L.D. - Limite de Detecção

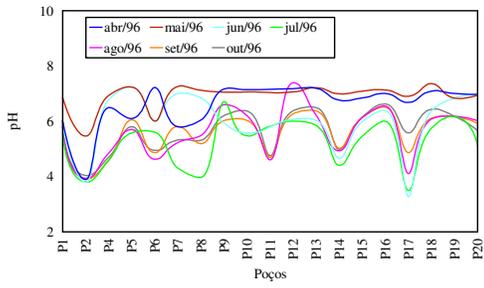


Figura 74: Valores de pH.

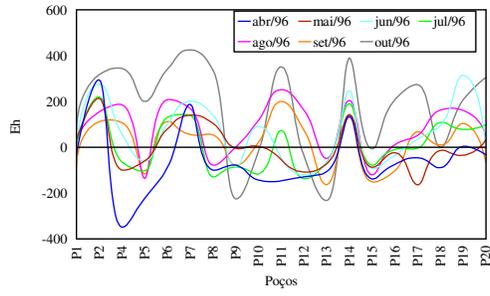


Figura 75: Valores de Eh (mV).

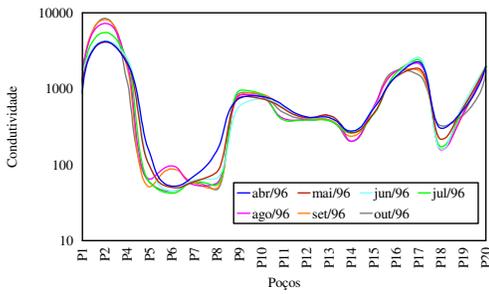


Figura 76: Valores de Condutividade (µS).

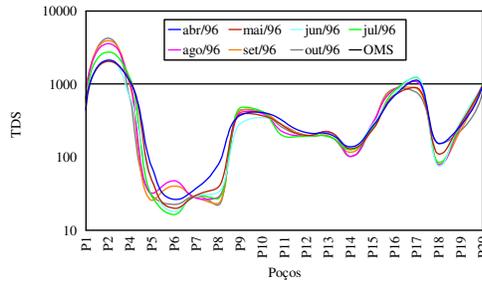


Figura 77: Valores de TDS (mg/L).

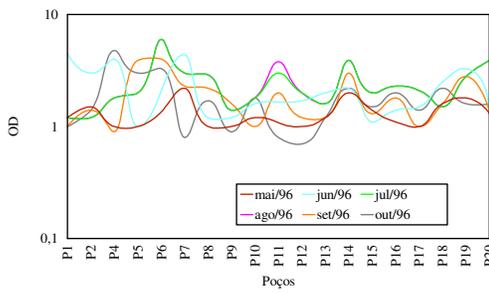


Figura 78: Concentrações de OD (mg/L O₂).

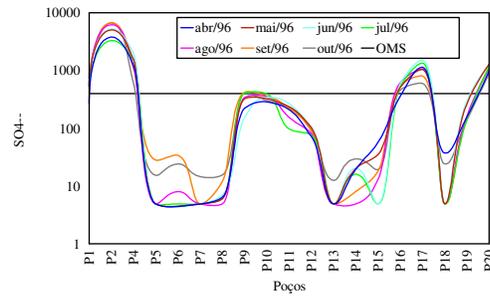


Figura 79: Concentrações de Sulfato (mg/L SO₄²⁻).

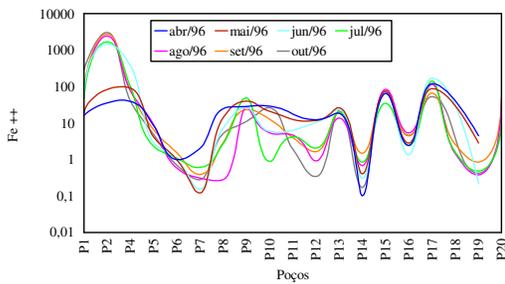


Figura 80: Concentrações de Fe⁺⁺ (mg/L Fe⁺⁺).

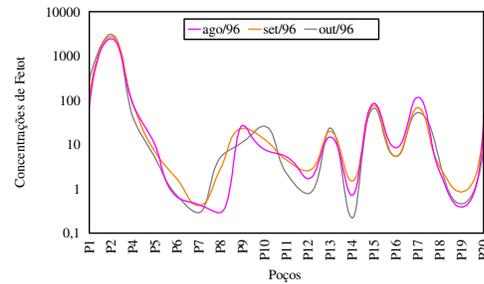


Figura 81: Concentrações de Fetot (mg/L Fetot).

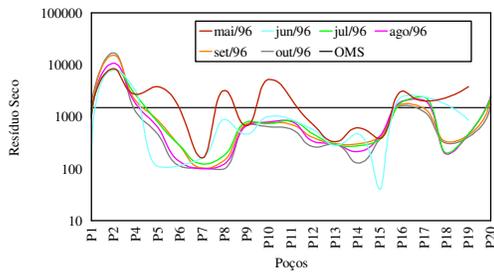


Figura 82: Valores de Resíduo Seco (mg/L).

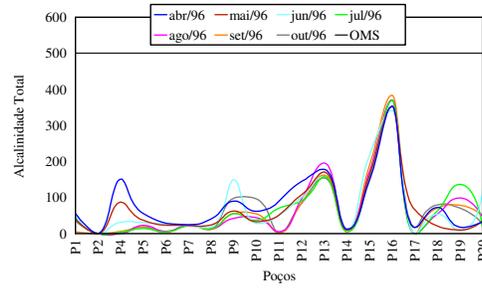


Figura 83: Valores de Alcalinidade Total (mg/L CaCO₃).

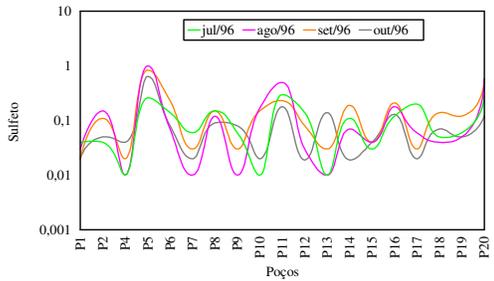


Figura 84: Concentrações de Sulfeto (mg/L HS⁻).

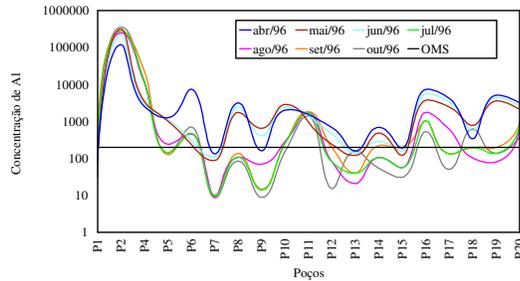


Figura 85: Concentrações de Alumínio (µg/L).

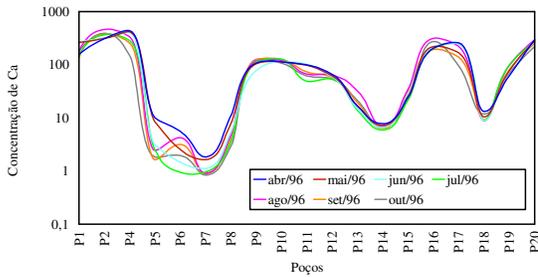


Figura 86: Concentrações de Cálcio (mg/L).

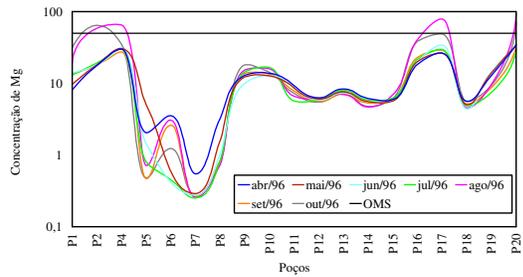


Figura 87: Concentrações de Magnésio (mg/L).

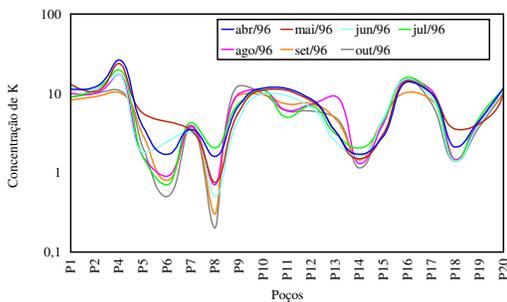


Figura 88: Concentrações de Potássio (mg/L).

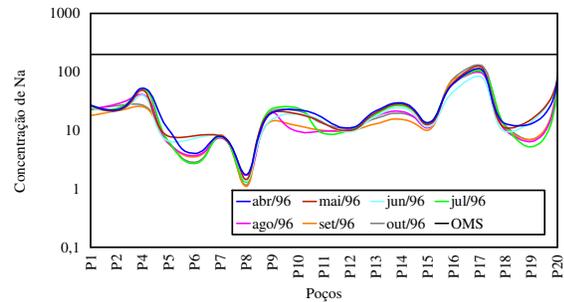


Figura 89: Concentrações de Sódio (mg/L).

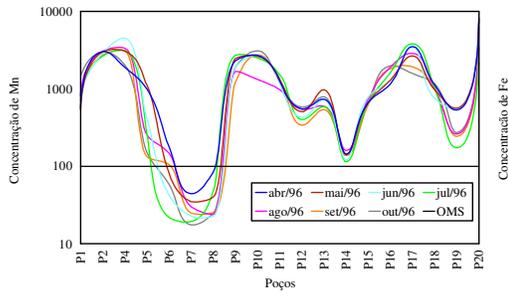


Figura 90: Concentrações de Manganês (µg/L).

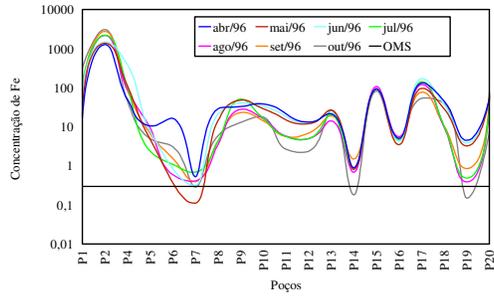


Figura 91: Concentrações de Ferro (mg/L).

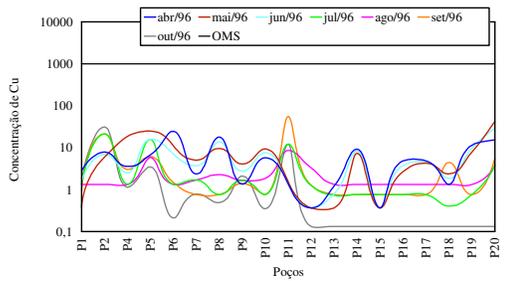


Figura 92: Concentrações de Cobre (µg/L).

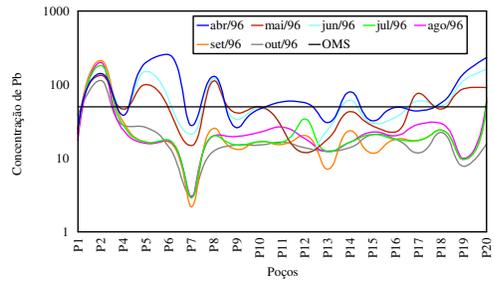


Figura 93: Concentrações de Chumbo (µg/L).

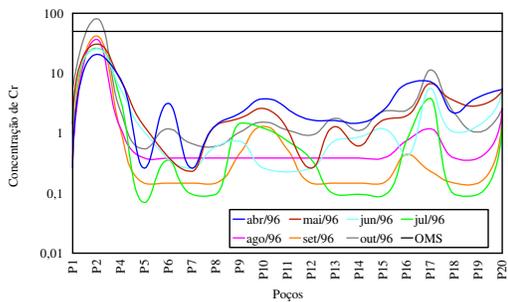


Figura 94: Concentrações de Cromo (µg/L).

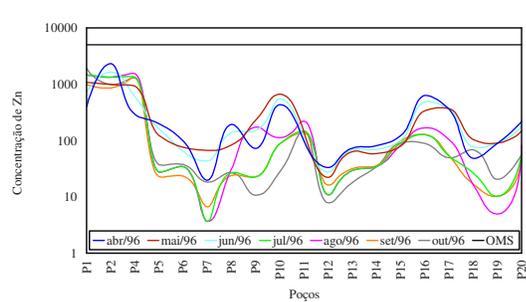


Figura 95: Concentrações de Zinco (µg/L).

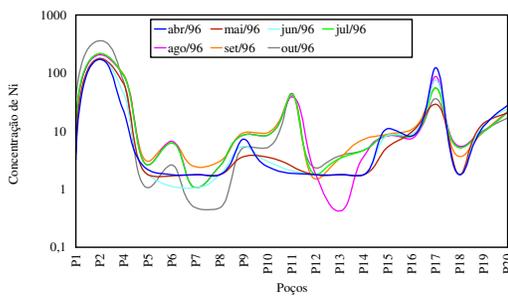


Figura 96: Concentrações de Níquel (µg/L).

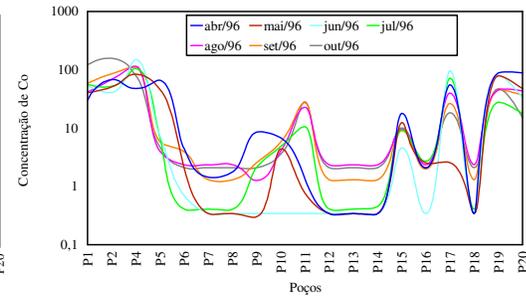


Figura 97: Concentrações de Cobalto (µg/L).

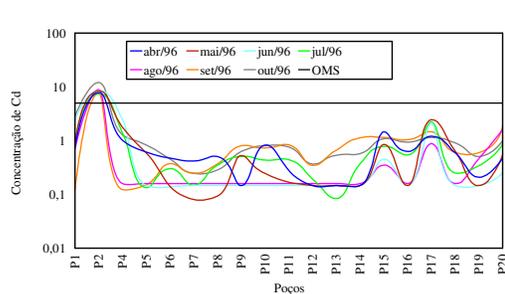


Figura 98: Concentrações de Cádmio ($\mu\text{g/L}$).

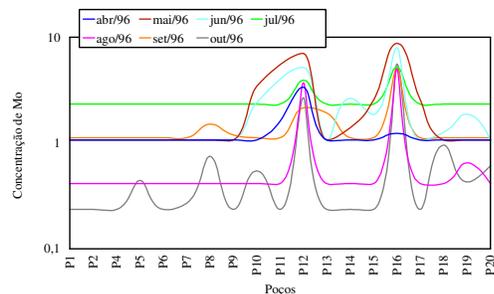


Figura 99: Concentrações de Molibdênio ($\mu\text{g/L}$).

Tabela 46: Resultados obtidos a partir da análise descritiva realizada nos 19 poços monitorados.

| Variáveis | Média | Mínimo | Máximo | Desvio padrão |
|---------------------------------|---------|---------|----------|---------------|
| OD (mg/L) | 1,99 | 0,7 | 6,00 | 1,05 |
| Temperatura (°C) | 20,94 | 15,8 | 27,00 | 2,47 |
| Eh (mV) | 44,59 | -348,00 | 566,00 | 156,45 |
| Condutividade (μS) | 1063,78 | 42,20 | 8480,00 | 1448,27 |
| TDS (mg/L) | 523,56 | 16,40 | 4250,00 | 712,54 |
| pH | 5,93 | 3,26 | 7,40 | 0,99 |
| Resíduo Seco (mg/L) | 1552,25 | 40,00 | 16949,00 | 2717,54 |
| SO ₄ (mg/L) | 55,81 | 0,05 | 6700,00 | 1126,00 |
| Sulfeto (mg/L) | 0,134 | 0,019 | 1,00 | 0,184 |
| Ferroso (mg/L) | 146,59 | 0,09 | 3096,89 | 499,078 |
| Alcalinidade (mg/L) | 71,43 | 0,00 | 383,99 | 89,51 |
| Cd ($\mu\text{g/L}$) | 1,04 | 0,08 | 12,10 | 1,93 |
| Co ($\mu\text{g/L}$) | 23,66 | 0,30 | 157,00 | 34,39 |
| Cu ($\mu\text{g/L}$) | 4,94 | 0,132 | 55,75 | 8,24 |
| Pb ($\mu\text{g/L}$) | 45,52 | 2,17 | 256,50 | 51,00 |
| Ni ($\mu\text{g/L}$) | 25,68 | 0,419 | 361,00 | 53,15 |
| Mn ($\mu\text{g/L}$) | 1444,81 | 17,45 | 8135,50 | 1588,315 |
| Cr ($\mu\text{g/L}$) | 3,59 | 0,074 | 81,70 | 9,58 |
| Fe (mg/L) | 134,52 | 0,002 | 2635,00 | 442,17 |
| Zn ($\mu\text{g/L}$) | 279,92 | 3,65 | 2321,00 | 458,91 |
| Mo ($\mu\text{g/L}$) | 1,54 | 0,233 | 8,77 | 1,49 |
| Al ($\mu\text{g/L}$) | 15,60 | 0,008 | 356,85 | 61,57 |
| Ca (mg/L) | 112,252 | 0,836 | 461,00 | 121,39 |
| Mg (mg/L) | 14,83 | 0,250 | 93,50 | 16,79 |
| Na (mg/L) | 27,63 | 1,10 | 132,00 | 29,72 |
| K (mg/L) | 6,96 | 0,200 | 26,5 | 5,04 |

Após a análise descritiva das variáveis, procedeu-se à confecção da matriz de correlação com todas as variáveis, conforme apresentado na Tabela 47.

Observa-se que praticamente todas as variáveis determinadas apresentaram correlações significativas, o que reflete a influência dos parâmetros físico-químicos (pH, Condutividade, TDS, Eh,...) sobre os demais.

Tabela 47: Matriz de correlação para as variáveis estudadas relativas à qualidade da água subterrânea nos 19 poços monitorados.

| | OD | T | Eh | Con | TDS | pH | Res | SO ₄ | Sulf | Fe ⁺⁺ | Alc | Cd | Co | Cu | Pb | Ni | Mn | Cr | Fe | Zn | Mo | Al | Ca | Mg | Na | K | |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| OD | | _* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T | _* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | * | | | | | | |
| Eh | *** | | | .. | .. | *** | .. | .. | | *** | *** | *** | .. | .. | .. | *** | .. | * | *** | .. | *** | *** | .. | .. | .. | _* | |
| Con | | | .. | | *** | *** | *** | *** | | *** | .. | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | *** | *** |
| TDS | | | .. | *** | | *** | *** | *** | | *** | .. | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | *** | *** |
| pH | _* | * | *** | *** | *** | | *** | *** | | *** | *** | *** | *** | .. | .. | *** | .. | *** | *** | *** | *** | * | *** | _* | _* | .. | .. |
| Res | | | .. | *** | *** | *** | | *** | | *** | .. | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | .. | _* | |
| SO ₄ | | | .. | *** | *** | *** | *** | | | *** | _* | *** | *** | .. | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | *** | *** |
| Sulf | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fe ⁺⁺ | | | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | _* | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | .. | * |
| Alc | _* | * | *** | .. | .. | *** | .. | _* | | _* | | _* | *** | _* | _* | *** | .. | .. | _* | | | | _* | .. | .. | .. | *** |
| Cd | | * | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | _* | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | .. | *** |
| Co | | | .. | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | * | *** | *** | *** | *** | *** |
| Cu | | | .. | *** | *** | .. | *** | .. | | *** | _* | *** | *** | | *** | *** | *** | *** | *** | *** | .. | | *** | .. | .. | .. | .. |
| Pb | | *** | .. | *** | *** | .. | *** | *** | | *** | _* | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | * | .. | .. |
| Ni | | | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | * | *** |
| Mn | _* | | .. | *** | *** | .. | *** | *** | | *** | .. | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | *** | *** |
| Cr | | * | * | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | .. | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | .. | *** | *** |
| Fe | | | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | _* | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | .. | * |
| Zn | | | .. | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | .. | *** | *** | .. | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | .. | *** |
| Mo | | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Al | | | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | _* | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | .. | .. |
| Ca | | | .. | *** | *** | _* | *** | *** | | *** | .. | *** | *** | .. | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | *** | *** |
| Mg | | | .. | *** | *** | _* | *** | *** | | *** | .. | *** | *** | .. | .. | *** | *** | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | *** | *** |
| Na | | | .. | *** | *** | .. | .. | *** | | .. | .. | .. | *** | .. | .. | * | *** | .. | .. | .. | | .. | *** | *** | *** | *** | *** |
| K | | | _* | *** | *** | .. | *** | *** | | * | *** | *** | *** | .. | .. | *** | *** | *** | *** | *** | *** | * | * | *** | *** | *** | *** |

*** Correlação significativa a 0,1% **Correlação significativa a 1% *Correlação significativa a 5% .. Não há correlação -Correlação negativa

Assim sendo, das vinte e seis variáveis existentes, foram selecionadas vinte e duas para a aplicação do I.G.A.S. Somente as variáveis OD, Sulfeto, Mo e Temperatura foram excluídas devido à baixa correlação existente destas variáveis com as demais (ver Tabela 47), apesar do OD e Temperatura apresentarem alta correlação entre si e com o Eh. No caso do Mo e Sulfeto, a baixa correlação observada pode ser explicada pelo número significativo de dados obtidos abaixo do limite de detecção do método de análise.

Após a seleção das variáveis, foi rodada a matriz de correlação, 26 x 26, a partir dos dados brutos, conforme representada na Tabela 47.

A partir da matriz de correlação, utilizando-se a técnica de Análise de Componentes Principais, foi obtido um novo conjunto de variáveis sintéticas (fatores comuns) baseado nas interrelações dos dados originais. Resultaram dois fatores associados às raízes características superiores a 1 (Tabela 48), que quantificam, em percentual, a contribuição de determinado fator em relação à variância total (Subbarao *et al.*, 1996). Neste caso, considerou-se apenas o Fator 1, visto que este apresenta a parte comum mais importante das variáveis analisadas, explicando 52,4% da variância total em relação às variáveis originais (Tabela 49).

Tabela 48: Raízes características.

| Fator | Raízes Características | % Variância Total explicada pelo Fator |
|--------------|-------------------------------|---|
| 1 | 11,528 | 52,400 |
| 2 | 3,068 | 13,949 |
| Total | 14,596 | 66,2349 |

A Tabela 49 apresenta as cargas fatoriais das variáveis na composição dos fatores, destacando-se o comportamento da Condutividade, TDS, Resíduo Seco, SO_4^- , Fe^{++} , Cd, Ni, Cr, Fe, Al e Ca, que mostraram percentuais elevados no Fator 1 (superiores a 78%) representando maiores contribuições neste fator. Observa-se que os elementos maiores Mg, Na e K apresentaram maiores percentuais no Fator 2, enquanto que o Mn distribuiu-se entre os Fatores 1 (0,53489) e 2 (0,606710).

Pela análise da Tabela 49 e da Figura 100 observa-se que, das variáveis que integram o Fator 1, as de maior influência são: Condutividade, TDS, Resíduo Seco, SO_4^- , Fe^{++} , Cd, Ni, Cr, Fe e Al, as quais apresentaram-se concentradas no Fator 1 (valores de 0,8-1,0 na Figura 100).

Os valores negativos das cargas fatoriais observadas no Fator 1 para as variáveis pH e Alcalinidade refletem o comportamento físico-químico das mesmas no meio, geralmente inverso ao das demais variáveis. Conforme já comentado, Na, K, Mn e Mg apareceram concentrados no Fator 2, com maior peso neste fator (0,6-0,8) em relação ao Fator 1 (0,4-0,6), demonstrando um comportamento específico em relação às demais variáveis.

Tabela 49: Cargas Fatoriais dos Fatores Principais.

| Variáveis | Fator 1 | Fator 2 |
|------------------|----------------|-----------------|
| Eh | 0,01786 | -0,031680 |
| Condutividade | 0,98201 | 0,079331 |
| TDS | 0,97973 | 0,069852 |
| pH | -0,44054 | 0,227028 |
| Resíduo | 0,89921 | -0,185147 |
| SO ₄ | 0,83899 | 0,015577 |
| Ferroso | 0,91420 | -0,346588 |
| Alcalinidade | -0,18720 | 0,372885 |
| Cd | 0,92267 | -0,244758 |
| Co | 0,66131 | 0,221321 |
| Cu | 0,34171 | -0,140751 |
| Pb | 0,55679 | -0,173708 |
| Ni | 0,94472 | -0,151345 |
| Mn | 0,53489 | 0,606710 |
| Cr | 0,89691 | -0,266794 |
| Fe | 0,91037 | -0,350598 |
| Zn | 0,66515 | 0,086595 |
| Al | 0,88464 | -0,380260 |
| Ca | 0,78807 | 0,546091 |
| Mg | 0,57683 | 0,633399 |
| Na | 0,29770 | 0,763656 |
| K | 0,48121 | 0,729943 |
| Variância total | 0,52401 | 0,139494 |

Através do cálculo dos escores fatoriais procedeu-se à composição final do Índice Geral de Águas Subterrâneas - I.G.A.S, conforme pode ser visualizado nas Figuras 101 a 103, as quais apresentam o I.G.A.S. obtido para cada poço monitorado durante o período de abril a outubro/96.

Observa-se que, quanto pior é a qualidade das águas subterrâneas no poço monitorado, mais positivo é o valor do I.G.A.S. Assim, o poço P2, localizado no depósito CH 20, sob influência de rejeitos de carvão, é o que apresenta, de forma destacada, os piores resultados em relação à qualidade das águas, coerentemente com os resultados apresentados e discutidos no item 4.5.1. Além do P2, o I.G.A.S. também foi elevado, em relação ao ponto branco P6, para os poços P4, P1, P17, P20 e P16.

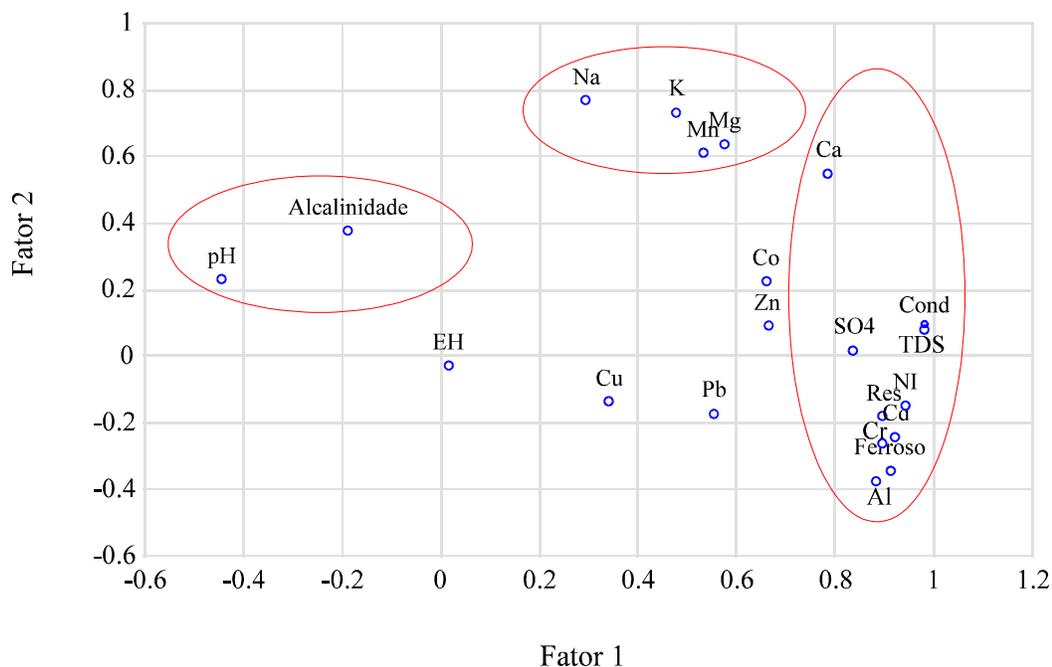


Figura 100: Gráfico de cargas fatoriais apresentando a distribuição das variáveis nos fatores.

Cabe destacar que os parâmetros que mais influenciaram no aumento do I.G.A.S. e conseqüentemente que melhor detectaram a contaminação das águas subterrâneas com decréscimo na qualidade, foram aqueles que obtiveram maior peso no Fator 1: Condutividade, TDS, Resíduo Seco, SO_4^- , Fe^{++} , Cd, Ni, Cr, Fe e Al.

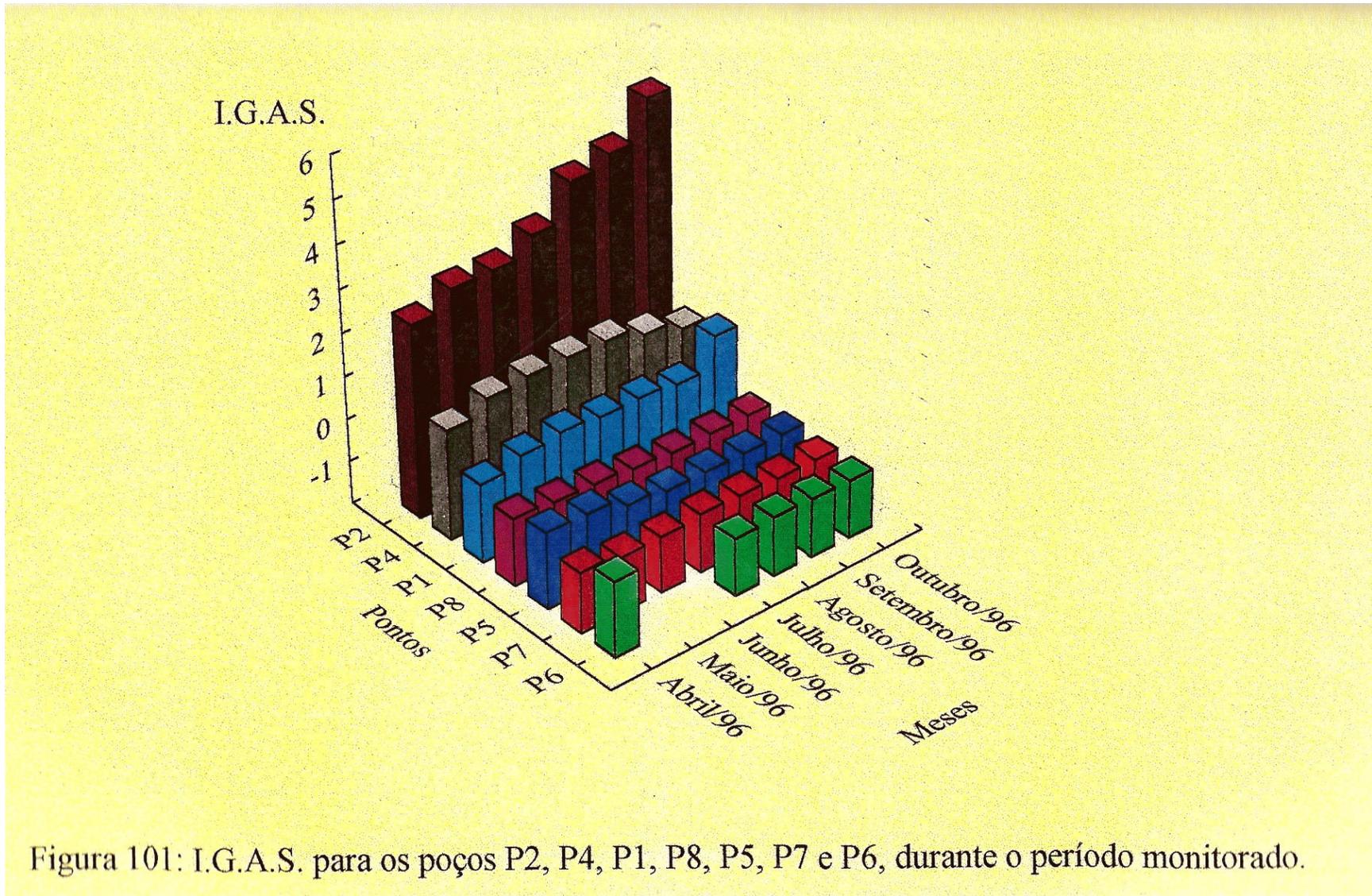
Observou-se ainda que os parâmetros físico-químicos pH, Condutividade, Sólidos Totais Dissolvidos - TDS, Resíduo Seco, SO_4^- e Fe^{++} , estão controlando o comportamento dos demais, principalmente dos metais, corroborando os resultados obtidos a partir da confecção da matriz de correlação, anteriormente discutidos. Assim, constata-se que a determinação destes parâmetros permite prever o comportamento dos demais, especialmente dos metais, podendo ser utilizados para caracterizar, de forma expedita, o grau de contaminação de uma área contendo rejeitos de carvão e/ou cinzas.

Observa-se que os poços localizados em áreas de disposição de rejeitos de carvão foram, sem dúvida, os que apresentaram maior I.G.A.S. e, conseqüentemente, piores resultados de qualidade das águas, confirmando os dados expostos no item 4.5.1. Em relação aos poços localizados nos depósitos de cinzas, verifica-se que o P16 apresentou um I.G.A.S. mais elevado do que os demais poços localizados em áreas de disposição de cinzas - P9, P10, P11, P12, P15, provavelmente devido às diferentes características físicas destas cinzas (carvão

pulverizado - TERMOCHAR) quando comparadas às demais (sistema de grelhas - UTSJ), conforme comentado nos itens 4.1.1.1 e 4.4.

Com relação às variações temporais sofridas, as mesmas são claramente observadas somente no poço P2, no qual percebeu-se um decréscimo na qualidade das águas (aumento no I.G.A.S.) em época de maior pluviosidade (a partir do mês de julho).

O valor mais alto do I.G.A.S. atribuído ao P6 no mês de abril pode ser explicado pelas concentrações mais elevadas de Al, de acordo com o que foi comentado no item 4.5.1, relacionando tais concentrações às características litológicas da região.



I.G.A.S.

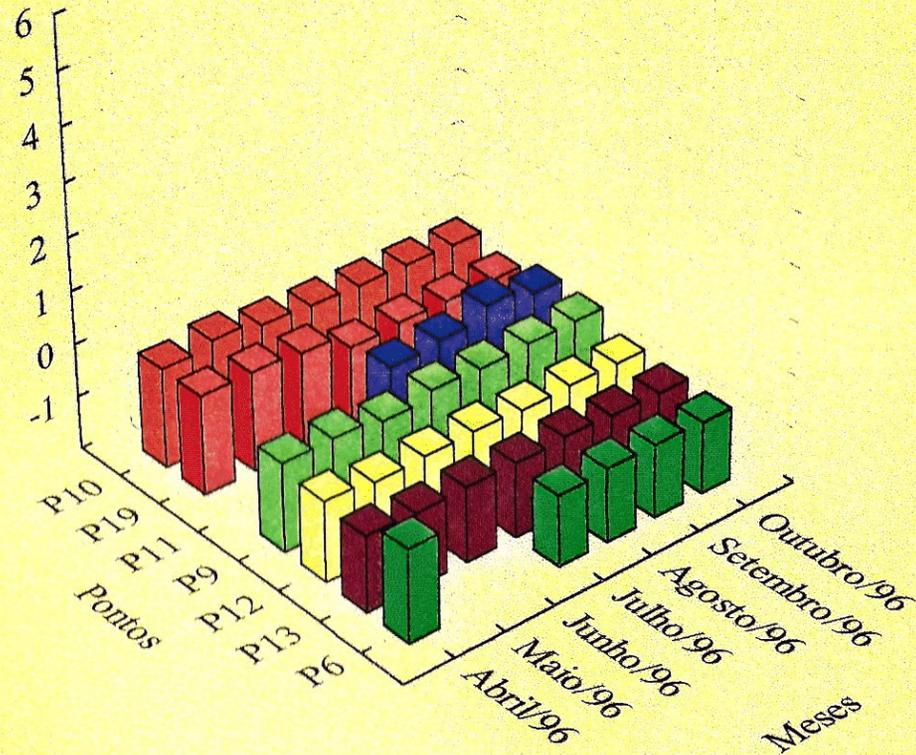


Figura 102: I.G.A.S. para os poços P10, P19, P11, P9, P12, P13 e P6, durante o período monitorado.

I.G.A.S.

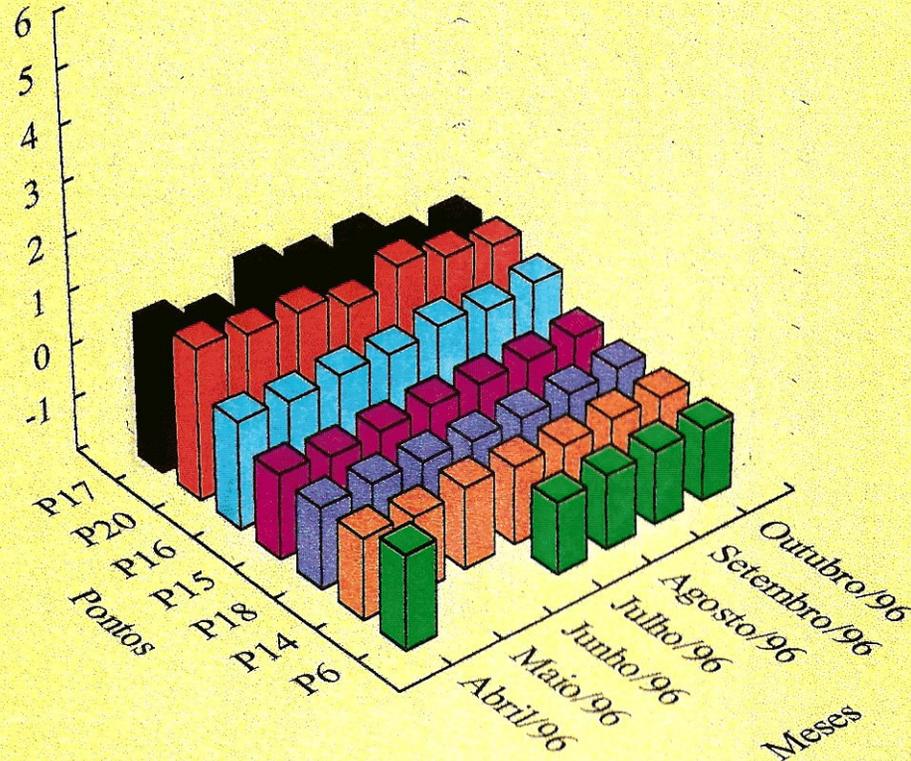


Figura 103: I.G.A.S. para os poços P17, P20, P16, P15, P18, P14 e P6, durante o período monitorado.

5 CONCLUSÕES

A partir das considerações feitas no decorrer deste trabalho são constatadas diversas situações inadequadas, do ponto de vista ambiental, na área estudada, as quais contribuem significativamente para a degradação do ambiente como um todo.

Fica clara a inoperância da fiscalização ambiental sobre a disposição dos rejeitos de carvão e cinzas, os quais, muitas vezes, são utilizados pelas próprias prefeituras dos municípios estudados para construção de aterros e instalação de centros educacionais e industriais. Soma-se a isso, a grande dificuldade existente na obtenção de dados confiáveis sobre a localização, área e volume dos depósitos e a época de deposição destes resíduos, o que ressalta, novamente, a falta de controle existente sobre a destinação final dos resíduos do processamento do carvão. Observa-se que as empresas responsáveis pela geração destes resíduos - mineradoras e termoeletricas, não foram, na época de deposição destes resíduos, adequadamente orientadas e fiscalizadas no sentido de evitar possíveis conseqüências negativas ao ambiente, baseando a escolha da área de descarte em decisões estritamente econômicas. Apesar de algumas exceções relacionadas a determinadas empresas de mineração, as quais tentaram desenvolver projetos de recuperação destas áreas, pouco tem sido feito no sentido de minimizar os efeitos negativos observados.

Do ponto de vista quantitativo, os resultados obtidos através da caracterização físico-química dos rejeitos de carvão e cinzas estudados mostraram, essencialmente, o maior potencial poluidor dos rejeitos de carvão em relação às cinzas, devido, principalmente, às seguintes características:

- pH ácido e altos teores de S_{tot} para os rejeitos de carvão, contrastando com o pH neutro a básico e os baixos teores de S_{tot} apresentados pelas cinzas;
- maiores percentuais de solubilização e lixiviação para os elementos estudados, especialmente Cd, Co, Cu, Pb, Cr e Fe para os rejeitos de carvão em relação às cinzas;
- classificação de praticamente todas as amostras de rejeitos de carvão, segundo à norma NBR 10004, como Resíduos Classe I - não inertes e, para algumas amostras (P1A2, P2A1, P2A2 e P3A1) como Resíduos Classe I - perigosos, sendo consideradas tóxicas para os elementos Pb e Cr.

Observou-se, também, que as maiores concentrações dos elementos determinados não corresponderam, necessariamente, às maiores mobilidades, sendo que, para as amostras

estudadas, o Fe, seguido de Pb e Zn apresentaram as maiores concentrações enquanto que o Mn, seguido de Zn e Ni apresentaram os maiores percentuais de lixiviação/solubilização e, conseqüentemente, maior mobilidade. Comprova-se, desta forma, a importância da realização de testes de lixiviação/solubilização neste tipo de resíduo, o que propicia a definição dos elementos mais móveis e, conseqüentemente, mais perigosos para o ambiente.

Além disso, constatou-se que existem variações nas propriedades físico-químicas de uma mesma área devido à heterogeneidade observada na constituição do perfil dos depósitos estudados - rejeitos misturados com cinzas, rejeitos misturados com solo,..., bem como no comportamento dos resíduos nas diferentes profundidades amostradas, as quais influenciaram nos resultados físico-químicos obtidos. Assim, fica demonstrada a necessidade de proceder-se à descrição de perfis litológicos para as diversas áreas estudadas, a fim de que possam ser detectadas as possíveis heterogeneidades existentes, e conseqüentemente, os diferentes comportamentos dos materiais estudados frente aos processos geológicos atuantes.

Cabe destacar, ainda, os altos percentuais de solubilização/lixiviação dos elementos Ni, Mn e Zn para as cinzas estudadas, confirmando que, apesar do menor potencial poluidor em relação aos rejeitos de carvão, estes resíduos não configuram-se como inertes, afetando, ainda que em menor proporção, o ambiente.

Ressalta-se que o crescimento espontâneo de vegetação natural nos depósitos de cinzas de carvão bem como o desenvolvimento de uma camada de solo, sugerem que tais depósitos são mais facilmente recuperáveis do que os depósitos de rejeitos de carvão, devido, provavelmente, ao pH mais elevado das cinzas, o que favorece a revegetação destas áreas.

O método geofísico EM-34-3 aplicado no depósito de rejeitos de carvão e cinzas CH 20 configurou-se como sendo uma técnica complementar e orientativa no estudo da contaminação de águas subterrâneas em áreas de deposição de rejeitos de carvão e cinzas. Tal método mostrou-se extremamente útil na definição da profundidade preferencial para instalação dos piezômetros na área estudada, uma vez que os resultados de condutividade elétrica em profundidade obtidos demonstraram ser o nível até 7,5 metros o mais provavelmente contaminado, com maiores valores de condutividade. Posteriormente, os piezômetros foram instalados e monitorados e os resultados obtidos confirmaram as considerações preliminarmente obtidas pela geofísica, tais como:

- contaminação do aquífero freático, com graus de contaminação maiores nos poços localizados sobre os depósitos de rejeitos de carvão, como, por exemplo, no poço P2;

- migração dos contaminantes na direção do fluxo das águas subterrâneas, definindo uma pluma incipiente de poluição, no caso do depósito CH 20, na direção SW;
- definição do ponto branco da região - P6.

Observou-se que todos os poços monitorados, exceto P5, P7, P8 e P18 e P6 (ponto branco) apresentaram diferentes graus de contaminação, sofrendo influência dos depósitos acima mencionados e alterando a qualidade das águas subterrâneas do aquífero freático da área estudada.

Os poços P1, P2, P17 e P20, sob influência de rejeitos de carvão, além de estarem contaminados em relação ao branco da região, apresentaram valores para os parâmetros estudados acima dos padrões de potabilidade para águas recomendados pela Organização Mundial de Saúde - OMS.

O poço P2, que sofre influência direta de rejeitos de carvão, apresentou os resultados mais negativos em termos de qualidade de água, tanto através da análise individual dos resultados (através dos gráficos e tabelas) quanto da análise estatística realizada (Análise Fatorial).

O tratamento estatístico aplicado, juntamente com a análise dos dados brutos, permitiram concluir que os parâmetros que melhor detectaram a contaminação das águas subterrâneas, com decréscimo na qualidade, foram: Condutividade, Sólidos Totais Dissolvidos - TDS, Resíduo Seco, SO_4^- , Fe^{++} , Cd, Ni, Cr, Fe, Al e Ca. Observou-se ainda que os parâmetros físico-químicos pH, Condutividade, Sólidos Totais Dissolvidos - TDS, Resíduo Seco, SO_4^- e Fe^{++} , estão controlando o comportamento dos demais, principalmente dos metais. Desta forma, a partir dos resultados obtidos para tais parâmetros pode-se prever o comportamento dos demais, principalmente dos metais. Esta observação permite sugerir que, em situações de definição imediata da situação problema, tais parâmetros possam ser utilizados com segurança para detecção da contaminação em áreas de deposição de rejeitos de carvão e cinzas, obtendo-se uma avaliação rápida das condições ambientais da área em estudo.

Cabe destacar a importância da definição do perfil litológico geral da área em estudo, obtido, neste trabalho, a partir da descrição dos furos realizados para a instalação dos piezômetros, uma vez que diversos resultados podem ser melhor explicados através da correta descrição litológica da área.

Assim sendo, a presença constante de estratos arenosos nos perfis litológicos descritos explicou, de certa forma, a migração rápida dos contaminantes no aquífero estudado, bem como permitiu sugerir que as camadas de argila observadas nos primeiros metros do perfil litológico na maior parte da área em estudo não estão sendo efetivas no controle da migração dos contaminantes, comprometendo o aquífero freático estudado. Além da presença dos estratos arenosos, a migração rápida dos contaminantes no aquífero pode ser atribuída às altas taxas de infiltração observadas para as cinzas de granulometria média a grossa (queima do carvão em grelhas) e rejeitos de carvão, indicando que os contaminantes lixiviados e concentrados na fase aquosa serão, provavelmente, rapidamente infiltrados, migrando para os horizontes localizados imediatamente abaixo. A partir destas considerações, constata-se que as áreas estudadas nos municípios de Charqueadas e São Jerônimo não compreendem um sítio geológico adequado para disposição de resíduos do processamento do carvão, a menos que sejam tomadas as devidas precauções, como, por exemplo, a impermeabilização da base dos depósitos.

A definição da direção do fluxo d'água subterrânea obtida a partir da confecção dos mapas potenciométricos evidenciou a condição de ponto branco para o poço P6, bem como mostrou que a locação dos poços foi adequada, obedecendo à direção do fluxo das águas subterrâneas nos diferentes locais. Desta forma, foi possível, no trabalho realizado, avaliar as reais condições de qualidade das águas subterrâneas monitoradas.

Por último, observa-se que os objetivos propostos no início deste trabalho foram plenamente alcançados, propiciando o esclarecimento técnico-científico de diversas questões relacionadas com a disposição de rejeitos de carvão e cinzas e sua influência nas águas subterrâneas, contribuindo para o equacionamento dos problemas ambientais identificados. A metodologia empregada mostrou-se eficaz na detecção da contaminação das águas subterrâneas promovida pela disposição inadequada dos resíduos do processamento do carvão, podendo ser otimizada e largamente aplicada em áreas afins pelos setores interessados na exploração e utilização do carvão, bem como por aqueles envolvidos com a conservação do ambiente.

6 RECOMENDAÇÕES

Durante o desenvolvimento deste trabalho, principalmente na etapa experimental, de campo, foi observada a inadequabilidade de diversas situações ambientais, já explicitadas no item anterior, as quais demonstram, de certa forma, a ineficiência de certos setores da sociedade. Mediante estes fatos, recomenda-se:

- implementar um sistema efetivo de controle e fiscalização ambiental sobre a disposição de resíduos do processamento do carvão, principalmente de rejeitos de carvão, regulamentando as áreas e exigindo-se, a partir do desenvolvimento de estudos técnico-científicos e econômicos, a recuperação ambiental das áreas já degradadas e a adequação ambiental das novas áreas;
- incentivar as pesquisas de caracterização físico-química dos resíduos produzidos, incluindo determinações de radioatividade, principalmente em termoelétricas, visando, numa etapa posterior, a proposição de soluções alternativas para o descarte das cinzas geradas, como, por exemplo, a utilização destas na indústria cimenteira ou na construção civil;
- fortalecer procedimentos de controle sobre a disposição destes resíduos, solicitando, por exemplo, o cadastramento das empresas responsáveis pela geração dos resíduos, bem como o preenchimento de formulários específicos que contenham, de forma resumida, o local da destinação final e a quantidade a ser descartada;
- divulgar os trabalhos existentes referentes à caracterização destes resíduos, aos problemas a eles associados e às formas de destinação e recuperação das áreas já degradadas, bem como a medidas preventivas às situações ambientalmente prejudiciais, fornecendo subsídios para os setores envolvidos - empresas de mineração, termoelétricas e prefeituras gerenciarem os problemas identificados;
- desenvolver programas de incentivos técnico-financeiros às empresas que adotarem medidas preventivas e ou minimizadoras dos problemas ambientais potenciais ou já existentes;
- ampliar os estudos desenvolvidos a partir da aplicação da metodologia utilizada para detecção de contaminação de águas subterrâneas em outras áreas de mineração e processamento de carvão do estado;
- propor uma integração maior da sociedade com os problemas ambientais identificados através de planos de educação ambiental, almejando a melhoria da qualidade de vida da

população local e, a partir de seu engajamento social, uma cobrança mais efetiva dos setores poluentes e fiscalizadores;

- incentivar os projetos de cunho ambiental desenvolvidos pelas universidades, visando qualificar o setor científico na proposição de soluções para os problemas ambientais observados nas mais diversas áreas;
- promover a integração da universidade com os setores estatais e privados, fortalecendo a parceria estado-empresa-universidade na tentativa de minimizar e até, mesmo, prevenir, a disposição inadequada de resíduos potencialmente poluentes, repassando os conhecimentos adquiridos pela universidade para a sociedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1987. **Amostragem de resíduos: NBR 10007**. Rio de Janeiro, 25p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1987. **Lixiviação de resíduos: NBR 10005**. Rio de Janeiro, 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1987. **Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores: NBR 9898**. Rio de Janeiro, 34p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1987. **Resíduos sólidos: Classificação: NBR 10004**. Rio de Janeiro, 63p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1987. **Solubilização de resíduos: NBR 10006**. Rio de Janeiro, 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1989. **Águas - Determinação de resíduos (sólidos) - método gravimétrico: NBR 10664**. Rio de Janeiro, 14p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1989. **Soluções aquosas - Determinação de pH com eletrodos de vidro: NBR 1589**. Rio de Janeiro, 5p.
- ANDRADE, A. 1985. **Caracterização das cinzas volantes do carvão de Candiota**. Porto Alegre. 152p. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. 1996. **Standard test methods for instrumental determination of carbon, hydrogen and nitrogen in laboratory samples of coal and coke: D 5373-93**. ASTM, West Conshohocken, vol. 05.05, p. 453-456.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. 1996. **Standard test methods for sulfur in the analysis sample of coal and coke, using high temperature tube furnace combustion methods: D 4239-94**. ASTM, West Conshohocken, vol. 05.05, p. 360-368.
- BELL, A.V.; BAAECHLER, F.E.; PARKER, R. 1992. Management of coal coarse waste: a state-of-art review. In: Environ. Issues and Waste Manag. Energy and Mineral Production, Singhal *et al.* (eds.). **Proc...**Balkema, Rotterdam. p.367-378.
- BREGER, I. 1958. Geochemistry of coal. **Econ. Geol.** 53:823-841.
- BROWNLOW, A.H. 1979. **Geochemistry**. USA: Prentice-Hall.
- BUGGEY, L.; ATKIN, B.P.; CLOKE, M.; MILES, N.J. 1995. The analysis of trace elements in coal. In: Eighth Intern.Conf. on Coal Science, Pajares, J.A. & Tascón, J.M.D. (eds.). **Proc...** Elsevier, Spain. II: 151-153.

- CAICEDO, N.L. 1993. **Água Subterrânea**. In: Hidrologia: ciência e aplicação, Tucci, C.E.M. (org.). 1993. ABRH: Edusp. 943p.
- CAUDURO, F.A. & DORFMAN, R. 1986. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem**. Porto Alegre, PRONI: IPH-UFRGS. 216p.
- CETESB, 1990. Compilação de Padrões Ambientais [folheto].
- CHADWICK, M.; HIGHTON, N.H. & LINDMAN, N. 1987. **Environmental impacts of coal mining and utilization**. Oxford, Inglaterra, Pergamon. 332p.
- COLES, D.H.; RAGAINI, R.C.; ONDOV, J.M.; FISCHER, G.L.; SILBERMAN, D.; PRENTICE, B.A. 1979. Chemical studies of stack fly ash from a coal fired power plants. **Environ. Sci. Technol.**, 13(4): 455-459..
- CONZEMIUS, R.J.; WELCOMER, T.D.; SVEC, H.J. 1984. Elemental partitioning in ash depositories and material balances for a coal burning facility by spark source mass spectrometry. **Environ. Sci. Techn.** 18(1):12-18.
- COPELMI MINERAÇÃO LTDA. 1994. **Estudo Ambiental da Mina de Charqueadas**. Porto Alegre, volumes I e II.
- COPELMI MINERAÇÃO LTDA. 1994. **Estudo Ambiental da Mina de Charqueadas - Área III - Mapa de Vegetação, Solos e Tomadas Fotográficas**.
- COPELMI. 1993. **Produção mineral**, p.11-21.
- CORRÊA DA SILVA, Z.C. 1987. Jazidas de carvão no Rio Grande do Sul, Brasil. In: III Simp. Sul-Bras. Geol. **Anais...** Curitiba, v.2, p.677-687.
- CORRÊA DA SILVA, Z.C.; GUERRA-SOMER, M.; MARQUES-TOIGO, M. 1991. Field Trip 6A. In: XII International Congress of Carboniferous and Permian Stratigraphy and Geology and 43rd ICCP Annual Meeting. [Field Report]
- CORRÊA DA SILVA, Z.C.; HAGEMANN, H.W.; PÜTTMANN, W.; WOLF, M. 1985. Características petrográficas e geoquímicas de alguns carvões gonduânicos do Brasil. In: II Simp. Sul-Bras. Geol. **Anais...** Florianópolis, p.419-431.
- COSTA, A.F.U. & FERLIN, C.A. 1994. Aplicação de métodos geofísicos para detecção de contaminação das águas subterrâneas. **Revista ECOS**, Porto Alegre, 2: 25-30.
- CPRM. 1986. Projeto a Borda Leste da Bacia do Paraná: Integração Geológica e Avaliação Econômica. **Rel. final**, vol.I - texto.
- CRIEPI. 1985. Emission and environmental effects of trace elements from coal fired power station. Central Institute of Electric Power Industry, Tokyo, Japan [private communication].
- CURTIS, W.R. 1972. Chemical changes in streamflowing surface mining in eastern Kentucky. In: 4th Prep. Pap. Symp. Coal Mine Drain. **Proc...**USA, p.19-31.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R. 1983. **Hidrologia Subterrânea**. Barcelona: Omega S.A. 2359p.

- DNPM. 1987. **Perfil analítico do carvão**. Boletim n.6.
- DNPM. 1994. Informativo Anual da Indústria Carbonífera.
- DRESSEN, D.R.; GLADNEY, E.S.; OWENS, J.W.; PERKINS, B.L.; WIENKE, C.L.; WANGEN, L.E. 1977. Comparison of levels of trace elements extracted from fly ash and levels found in effluent water from coal fire plants. **Environ. Sci. Technol.**, 11(10): 1017-1019.
- EARY, L.E.; RAI, D.; MATTIGOT, S.V. AND AINSWORTH, C.C. 1990. Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues : II Review of the minor elements. **J. Environ. Quality**, 19 :202-214.
- EGEMEN, E. & YURTERI, C. 1994. Release of metal ions from fly ash deposits: a case study. **SWEMP 94**. p.529-540.
- ELLERT, N.; GREENHOUSE, J.; MONIER-WILLIAMS, M. 1988. A Geofísica no Estudo da Poluição das Águas Subterrâneas. **AMBIENTE - Revista CETESB de Tecnologia**, São Paulo, 2 (2):94-100.
- FERRARO, L.W. & HASENACK, H. 1995. Avaliação das variáveis climáticas de superfície do Baixo Jacuí, RS. Projeto PADCT/CIAMB - Energia e meio ambiente - a questão do carvão no Rio Grande do Sul. UFRGS, Centro de Ecologia. Porto Alegre. [Relatório de Andamento]
- FIEDLER, H. & SOLARI, J. 1988. Caracterização do impacto ambiental da mina de Candiota sobre as águas superficiais da região. In: Enc. Nac. Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia. **Anais...**, SP, 13, 483-498.
- FIEDLER, H. 1987. **Caracterização do carvão de Candiota e implicações ambientais do seu processamento**. 140p. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.
- FOSTER, S.; VENTURA, M.; HIRATA, R. 1993. **Poluição das águas subterrâneas: um documento executivo da situação da América Latina e Caribe com relação ao abastecimento de água potável**. São Paulo: Instituto Geológico. 55p.
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. 1979. **Groundwater**. Englewood Cliffs, Prentice-Hall Inc. 604p.
- FÚLFARO, V.J.; GAMA JR., E.; SOARES, P.C. 1980. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. São Paulo, Paulipetro. [Rel. interno].
- GANG, M.W. & LANGMUIR, D. 1974. Controls on heavy metals surface and ground waters affected by coal mine drainage: Clarion River - Redbank Creek Watershed, Pennsylvania. In: Fifth Symp. on Coal Mine Drainage Research. **Proc...** Louisville. p. 39-69.
- GLUSKOTER, M.J.; RUCH, R.R. & SHIMP, N.F. 1974. Occurrence and contribution of potentially volatile trace elements in coal (circular 499). Illinois State Geological Survey, Urbana.
- GOLDSCHMIDT, V.M. 1954. **Geochemistry**. Oxford, Claredon.

- GONZALEZ CAÑIBANO, J. & LEININGER, D. 1987. The characteristics and use of coal wastes. In: Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Rainbow (ed.). **Proc....**Elsevier, Amsterdam. p.111-122.
- GONZALEZ CAÑIBANO, J.; FERNANDEZ VALCARE, J.A.; FALCON, A.; IBARZABAL, J.L.; RODRÍGUEZ ORTIZ, J.M.; HINOJOSA, J.A. 1990. Static leaching of coal mining wastes. In: Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Rainbow (ed.). **Proc....**Balkema, Rotterdam. p.165-175.
- HAYWARD, K.A. 1986. Water quality implications of coal storage pile drainage. In: Third Annual Pittsburgh Coal Conf. **Proc...** Pennsylvania. p.145-157.
- HEYSTEE, R.J. & ALLAN, R.E. 1992. Final closure for a coal ash landfill: geoenvironmental considerations. In: Environ. Issues and Waste Manag. in Energy and Minerals Production, Singhal *et al.* (ed.). **Proc....** Balkema, Rotterdam. p.627-637.
- HUANG, W.H. & LOVELL, C.W. 1992. Use of bottom ash in highway construction. Environ. Issues and Waste Manag. in Energy and Minerals Production, Singhal *et al.* (ed.). **Proc....** Balkema, Rotterdam. p.1411-1419.
- IBGE - FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 1986. **Projeto RADAMBRASIL**, Levantamento de Recursos Naturais. Rio de Janeiro, vol. 33.
- IPH. 1978. **Estudo da mineração do carvão sobre os recursos hídricos da Bacia Carbonífera de SC**. Projeto prevenção e controle da poluição no sul do estado de SC. Acordo 04/77 Governo de Est.SC/SUDESUL/ FATMA/SEM, 170p.
- ISO. 1975. **Hard Coal Sampling**: 1988. Genebra, 90p.
- ISO. 1981. **Solid Mineral Fuels Determination of Ash**: 1171. Genebra, 2p.
- ISO. 1990. **Water Quality - Sampling - Part 11**: Guidance on the Sampling of Groundwaters: ISO/DP 5667-11 (document ISO/TC 147/SC 6 N 153). Londres, 12p.
- JOHNSTON, H.M. & EAGLESON, K.E. 1991. Chemical characteristics of Ontario Hydro coal fly ash: a review. Ontario Hydro Research Division. [Report 89-155-K].
- KLEIN, D.H.; ANDREN, A.W.; CARTER, J.A.; EMERY, J.F.; FELDMAN, C.; FULKERSON, W.; LYON, W.S.; OGLE, J.C.; TALMI, Y.; VAN HOOK, R.I.; BOLTON, N. 1975. Pathways of thirty-seven trace elements through coal-fired power plant. **Environ. Sci. Technol.**, 9(10):973-979.
- KLEINMAN, R.; CRERAR, P. & PACELLI, R. 1981. Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. **Mining Engineering**.
- LUZ, E.D., DA. 1991. **Projeto Piloto de disposição controlada de cinzas de carvão** - considerações e análise dos impactos decorrentes sobre aquíferos. Relatório interno - Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A. - ELETROSUL. 45p.
- MACHADO, J.F.L. 1985. Mineração de carvão: contaminação e vulnerabilidade dos mananciais. In: II Simp.Sul-Bras.Geol. Florianópolis, **Anais...** v.1. p.539-553.

- MACHADO, J.F.L. 1987. Estudos Geoquímicos e geohidroquímicos relacionados com a poluição hídrica por carvão mineral: considerações e proposta metodológica. In: Cong.Bras.Geoq. Porto Alegre, **Anais...** v.2. p.155-164.
- MACHADO, J.L.F.; PERUFFO, N. & LUNA, J.E.S. 1984. Projeto Estudo da Vulnerabilidade à Contaminação dos Mananciais Subterrâneos decorrente da Extração do Carvão Mineral. **Rel.final**, texto - v.I. CPRM. 301p.
- MARTINS, A.F. & ZANELLA, R. 1987. Análise de águas de superfície e de profundidade da região de Candiota, RS, determinação da concentração de elementos traços de relevância ambiental, elementos menores e macroelementos. In: Cong.Bras.Geoquímica. **Anais...** POA, 1(2):217-223.
- MCNEILL, J.D. 1980. **Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers**. Geonics Limited, TN-6, 15p.
- MEIJ, R.; KOOIJ, V.D.J.; SLOOT, V.D.H.A.; KOPPIUS-ODINK, J.M.; CLEMENT, L.J. 1985. Emissions and control of particulates of coal-fired power plants in the Netherlands. 870-85 MOL Arnhem, The Netherlands, N.V. Kema, 34p.
- MOORE, W. J. 1991. **Inorganic Contaminants of Surface Water** - Research and Monitoring Priorities. New York: Springer-Verlag. 334p.
- NATUSCH, D.F.S.; BAUER, C.F.; MATUSIEWICZ, H.; EVANS, C.A.; BAKER, J.; LOU, A.; LINTON, R.W.; HOPKE, P.K. 1975. Characterization of trace elements in fly ash. In: Intern. Conf. on Heavy Metals in the Environ. **Proc...** Toronto, 2(2): 553-575.
- NICHOLLS, B.D. 1968. **The geochemistry of coal bearing strata**. In: Coal and Coal Bearing Strata, Murchison, D. & Weston, T.S. (eds.). Edinburgh, Oliver and Boyd, p.269-307.
- NORTHFLEET, A.; MEDEIROS, R.A.; MÜHLMANN, H. 1969. Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná. **Boletim Técnico** da PETROBRÁS, 12 (3): 291-346.
- PALMER, C.A. & FILBY, R.H. 1984. Distribution of trace elements in coal from the Powhatan No.6 mine, Ohio. **Fuel**, 63:318-328.
- PICCOLI, A.E.M.; HOLTZ, M.; SARTURI, J.A.D.; MUNARO, P.; GRANITOFF, W. 1985. Estratigrafia da Bacia Carbonífera de Charqueadas-Santa Rita, RS. **Pesquisas** - Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre. 17: 269-310.
- PICCOLI, A.E.M.; LOPES, R.C. & CAMOZZATO, E. 1986. Análise Paleoambiental das Jazidas de Carvão do Estado do Rio Grande do Sul. **Acta Geológica Leopoldensia**, X (22): 35-54,
- PIRES, M. & TEIXEIRA, E.C. 1992. Geochemical distribution of trace elements in Leão coal, Brazil. **Fuel**, 71: 1093-1096.
- PIRES, M. 1990. **Caracterização e modelamento das emissões atmosféricas da Usina Termoeletrica Jacuí I**. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

- QUEROL, X.; FERNÁNDEZ-TURIEL, J.L.; LÓPEZ-SOLER, A. 1995. Trace elements in Spanish subbituminous coals and their behaviour during coal combustion. In: Eighth Intern.Conf. on Coal Science, Pajares, J.A. & Tascón, J.M.D. (eds.). **Proc...** Elsevier, Spain. II: 159-162.
- RAASK, E. 1985. The mode of occurrence and concentration of trace elements in coal. **Prog. Energy Combust. Sci.** 5:1-29.
- RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A.G.; VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K; MAGALHÃES, P.C.; CLEARY, R. 1989. **Engenharia Hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH: UFRJ.
- ROHDE, G.M. 1995. **Epistemologia das Ciências Ambientais**: as Cinzas de Carvão no Baixo Jacuí, RS. 255p. Porto Alegre. Curso de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.
- SALOMONS, W. 1995. Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention. **Journal of Geochemical Exploration**, 52: 5-23.
- SANCHEZ, J.; TEIXEIRA, E.C.; FERNANDES, I.; PESTANA, M.H.D. AND MACHADO, R. 1994. Estudos da concentração e da mobilidade dos elementos metálicos nas cinzas da Usina termoeleétrica de Candiota. **Geochim. Brasil**. 8(1):41-50.
- SANCHEZ, J.C.D. 1987. Emissão de elementos-traço provenientes da combustão de carvão em caldeira de grande porte. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.
- SANCHEZ, J.C.D.; PINTÁUDE, D.A. & FLORES, A. 1985. Contribuição ao estudo da matéria mineral nos carvões da jazida carbonífera de Charqueadas, RS. **Acta Geológica Leopoldensia**, 21: 103-120.
- SANFORD, R.M. & LANGE, F.W. 1960. Basin-study approach to oil evaluation of Paraná miogeosyncline, south Brazil. **AAPG Bull.**, 44: 1316-1370.
- SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA, A.A. 1974. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: XXVIII Cong.Bras.Geol. **Anais...** Porto Alegre, 1: 41-67.
- SCHUBERT, J.P. 1979. Groundwater Contamination Problems resulting from Coal Refuse Disposal. In: First International Mine Drainage Symposium. **Proc...** São Francisco, EUA, p. 757-780.
- SINGER, P.C. & STUMM, W. 1970. Acidic mine drainage: rate-determining step. **Science** 167(3921): 1121-1123.
- SLEEMAN, W. 1990. Environmental effects of the utilization of coal mining wastes. In: Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Rainbow (ed.). **Proc....**, Balkema, Rotterdam. p.65-76.
- SMITH, I.M. 1987. Trace elements from coal combustion emissions. IEA CR/01, London.IEA Coal Research, 87p.

- SOLARI, J.A.; FIEDLER, H. & SCHNEIDER, L.C. 1989. Modelling of the distribution of trace elements in coal. **Fuel**, 68: 536-539.
- STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. 1992. Eaton, A.D. *et al.* (eds.).
- SUBBARAO, C; SUBBARAO, N.V.; CHANDU, S.N. 1996. Characterization of groundwater contamination using factor analysis. **Environmental Geology**, 28(4):175-180.
- SWAINE, D.J. 1990. **Trace Elements in Coal**. London: Butterworths and Co. Ltda..
- SZCZEPANSKA, J. & TWARDOWSKA, I. 1987. Coal mine spoil tips as a large area source of water contamination. In: Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Rainbow (ed.). **Proc....** Elsevier, Amsterdam. p.267-280.
- TEIXEIRA, E.C.; SANCHEZ, J.C.D.; BINOTTO, R.B. *et al.* 1995. Avaliação da Poluição Hídrica e Atmosférica em Áreas de Mineração e Processamento do Carvão do Baixo Jacuí, RS. Relatório Parcial FINEP/PADCT/GTM convênio n° 65.93.0322.00. FEPAM, Porto Alegre.
- TEIXEIRA, E.C.; BINOTTO, R.B.; SANCHEZ, J.C.D.; JABLONSKI, A. FERNANDES, I.D.; SIMCH DA SILVA, J.C.; ROSSI, G. 1996. Mapping and characterization of coal processing waste disposal sites from Baixo Jacui Region, RS, Brazil. In: Fourth Intern. Symp.on Environ. Issues and Waste Manag. Energy and Mineral Production, Ciccu, R. (ed.). **Proc...** S.Margherita di Pula, Cagliari, Italy. p.231-238.
- TEIXEIRA, E.C.; SAMAMA, J. AND BRUN, A. 1992. Study of the concentration of trace elements in fly ash resulting from coal combustion. **Environ.Technol.** 13(10):995-1000.
- THEIS, T.L. & WIRTH, L. 1977. Sortive behavior of trace metals on fly ash in aqueous systems. **Environ. Sci. Technol.** 11(12):1096-1100.
- TORREY, S. 1978. **Trace Contaminants from Coal**. Park Ridge, Noyes Data Corporation. 294p.
- TUCKER, M.E. 1991. **Sedimentary Petrology** - an an introduction to the origin of sedimentary rocks. Oxford: Brackwell Scientific Publications. 260p.
- TWARDOWSKA, I. & SZCZEPANSKA, J. 1990. Transformations of chemical composition of pore solutions in coal mining wastes. In: Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Rainbow (ed.). **Proc....**Balkema, Rotterdam. p.177-185.
- TWARDOWSKA, I.; SZCZEPANSKA, J.; TEJSZERSKI, J. 1990. Prognosis of contaminants leaching from colliery spoils and its effect on the aquatic environment. In: Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Rainbow (ed.). **Proc....**Balkema, Rotterdam. p.153-163.
- WARD, C.R. 1984. **Coal Geology and Coal Technology**. New York: Springer-Verlag.
- WHITE, I.C. 1908. Relatório sobre as reservas de carvão e rochas associadas no sul do Brasil. **Relatório final**. Comissão dos Estados das Minas de Carvão de Pedra do Brasil. Rio de Janeiro, parte 1, p.1-300.

ZALÁN, P.V.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; WOLF, S.; ASTOFOLI, M.A.M.; VIERA, I.S.; APPI, NETO, E.V.S.; CERQUEIRA, J.R.; V.T.; ZANOTTO, O.A.; PAUMER, M.L.; MARQUES, A. 1986. Análise da Bacia do Paraná. **Rel. interno** da PETROBRÁS. Rio de Janeiro, 5 vols.

ZALÁN, P.V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; MARQUES, A.; ASTOFOLI, M.A.M.; VIERA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A. 1990. **Bacia do Paraná**. In: Raja Gabaglia, G.P. & Milani, E.J. (Coord.). Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. PETROBRÁS. 168p.

ANEXO A: Resultados dos Ensaio de Infiltração

| Material/Local: cinza grossa de fundo/próximo ao P9 | | | | |
|--|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Tempo de Infiltração (minutos) | Altura d'água (cm) | | Altura d'água (cm) | |
| | Leitura | Leitura Ajustada | Leitura | Leitura Ajustada |
| 0 | 43,9 | | | |
| 1 | 46,5 | | | |
| 2 | 47,3 | | | |
| 3 | 47,8 | | | |
| 4 | 48,4 | | | |
| 5 | 49,0 | 44,5 | | |
| 10 | | 48,3 | | |
| 15 | 43 | 50,8 | | |
| 20 | 46,6 | | | |
| 30 | 52,1 | 42,8 | | |
| 45 | 43,0 | 48,7 | 41 | 49,7 |
| 50 | 50 | 43,2 | 48 | 40,2 |
| 75 | 43,0 | 51,8 | 40 | 48,8 |
| 90 | 51,0 | 46,6 | 48 | 39,6 |
| 95 | 43 | 44,7 | 37 | 43,7 |
| 110 | 50,10 | | 44,10 | |

$$L_{mm} = 19 \cdot t_{min}^{0,71}$$

$$I_{mm/h} = 804,40 t_{min}^{-0,29}$$

$$r = 0,44334$$

$$r^2 = 0,4867$$

$$k = 141,396 \text{ mm/h}$$

| Material/Local: cinza fina de fundo/próximo ao P12 | | | | |
|---|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Tempo de Infiltração (minutos) | Altura d'água (cm) | | Altura d'água (cm) | |
| | Leitura | Leitura Ajustada | Leitura | Leitura Ajustada |
| 0 | 43,0 | | | |
| 1 | 44,0 | | | |
| 2 | 44,8 | | | |
| 3 | 45,4 | | | |
| 4 | 45,9 | | | |
| 5 | 46,3 | | | |
| 10 | 48,0 | | | |
| 20 | 50,8 | 42,5 | | |
| 30 | | 45,5 | | |
| 45 | 42,3 | 49,7 | | |
| 60 | 46,8 | 41,3 | | |
| 75 | | 45,8 | | |
| 90 | | 44,0 | | |

$$L_{mm} = 10,40 \cdot t_{min}^{0,71}$$

$$I_{mm/h} = 443,04 \cdot t_{min}^{-0,24}$$

$$r = 0,99$$

$$r^2 = 0,9966$$

$$k = 88,62 \text{ mm/h}$$

| Material/Local: terreno natural/próximo ao P5 | | | | |
|--|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Tempo de Infiltração (minutos) | Altura d'água (cm) | | Altura d'água (cm) | |
| | Leitura | Leitura Ajustada | Leitura | Leitura Ajustada |
| 0 | 43,0 | | | |
| 1 | 43,3 | | | |
| 2 | 43,3 | | | |
| 3 | 43,3 | | | |
| 4 | 43,3 | | | |
| 5 | 43,3 | | | |
| 10 | 43,3 | | | |
| 20 | 43,4 | | | |
| 30 | 43,4 | | | |
| 45 | 43,5 | | | |
| 60 | 43,5 | | | |

$$L_{\text{mm}} = 2,60 \cdot t_{\text{min}}^{0,14}$$

$$I_{\text{mm/h}} = 21,84 \cdot t_{\text{min}}^{-0,86}$$

$$r = 0,89$$

$$r^2 = 0,79$$

$$k = 1,94 \text{ mm/h}$$

| Material/Local: cinza com cobertura vegetal/próximo ao P7 | | | | |
|--|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Tempo de Infiltração (minutos) | Altura d'água (cm) | | Altura d'água (cm) | |
| | Leitura | Leitura Ajustada | Leitura | Leitura Ajustada |
| 0 | 46,8 | | | |
| 1 | 47,9 | | | |
| 2 | 48,3 | | | |
| 3 | 48,5 | | | |
| 4 | 48,8 | | | |
| 5 | 49,1 | | | |
| 10 | 50,3 | | | |
| 20 | 52,0 | 46,7 | | |
| 30 | | 48,4 | | |
| 45 | | 50,8 | | |
| 60 | 47,5 | 52,8 | | |
| 75 | 50,0 | | | |
| 90 | 52,30 | | | |

$$L_{\text{mm}} = 9,30 \cdot t_{\text{min}}^{0,61}$$

$$I_{\text{mm/h}} = 340,33 \cdot t_{\text{min}}^{-0,39}$$

$$r = 0,9956$$

$$r^2 = 0,9913$$

$$k = 45,26 \text{ mm/h}$$

| Material/Local: rejeito exposto/próximo ao P1 | | | | |
|--|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Tempo de Infiltração (minutos) | Altura d'água (cm) | | Altura d'água (cm) | |
| | Leitura | Leitura Ajustada | Leitura | Leitura Ajustada |
| 0 | 44,8 | | | |
| 1 | 45,8 | | | |
| 2 | 46,1 | | | |
| 3 | 46,3 | | | |
| 4 | 46,5 | | | |
| 5 | 46,6 | | | |
| 10 | 47,5 | | | |
| 20 | 48,8 | | | |
| 30 | 50,3 | 44,7 | | |
| 45 | | 47,0 | | |
| 60 | | 49,0 | | |
| 75 | | 50,7 | | |
| 90 | | 52,4 | | |

$$L_{mm} = 8 \cdot t_{min}^{0,59}$$

$$I_{mm/h} = 283,20 \cdot t_{min}^{-0,41}$$

$$r = 0,99065$$

$$r^2 = 0,98140$$

$$k = 36,38 \text{ mm/h}$$

| Material/Local: cinza com 0,25 m de rejeito/próximo ao P16 | | | | |
|---|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Tempo de Infiltração (minutos) | Altura d'água (cm) | | Altura d'água (cm) | |
| | Leitura | Leitura Ajustada | Leitura | Leitura Ajustada |
| 0 | 43,8 | | | |
| 1 | 44,4 | | | |
| 2 | 44,6 | | | |
| 3 | 44,7 | | | |
| 4 | 44,8 | | | |
| 5 | 44,9 | | | |
| 10 | 45,0 | | | |
| 20 | 45,4 | | | |
| 30 | 45,8 | | | |
| 45 | 46,3 | | | |
| 60 | 46,9 | | | |
| 75 | 47,5 | | | |
| 90 | 48,1 | | | |

$$L_{mm} = 5,60 \cdot t_{min}^{0,41}$$

$$I_{mm/h} = 137,76 \cdot t_{min}^{-0,58}$$

$$r = 0,9838$$

$$r^2 = 0,9679$$

$$k = 11,4636 \text{ mm/h}$$

ANEXO B: Resultados dos Testes de Bombeamento

| Piezômetro: P1 | | | |
|-----------------------|-------|--------------|------|
| t (min) | h (m) | Δ (m) | t/t' |
| 0 | 2,70 | 0 | |
| 4 | 5,22 | 2,52 | |
| 4,5 | 5,175 | 2,48 | 9,0 |
| 5 | 5,15 | 2,45 | 5,00 |
| 5,5 | 5,12 | 2,42 | 3,67 |
| 6 | 5,095 | 2,40 | 3,00 |
| 7 | 5,04 | 2,34 | 2,33 |
| 8 | 4,99 | 2,29 | 2,00 |
| 9 | 4,945 | 2,25 | 1,80 |
| 10 | 4,895 | 2,20 | 1,67 |
| 15 | 4,675 | 1,98 | 1,36 |
| 20 | 4,48 | 1,78 | 1,25 |
| 30 | 4,125 | 1,43 | 1,15 |
| 40 | 3,75 | 1,05 | 1,11 |
| 50 | 3,58 | 0,88 | 1,09 |
| 60 | 3,42 | 0,72 | 1,07 |
| 70 | 3,28 | 0,58 | 0,06 |
| 80 | 3,17 | 0,47 | 1,05 |
| 90 | 3,07 | 0,37 | 1,05 |
| 100 | 3,00 | 0,30 | 1,04 |
| 110 | 2,83 | 0,23 | 1,04 |

$$Q = 0,0066 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$r = 0,05 \text{ m}$$

$$b = 10 \text{ m}$$

| Piezômetro: P7 | | | |
|-----------------------|-------|--------------|------|
| t (min) | h (m) | Δ (m) | t/t' |
| 0 | 1,40 | | |
| 0,92 | 2,56 | 1,16 | |
| 1,92 | 2,53 | 1,13 | 1,92 |
| 2,5 | 2,50 | 1,10 | 1,58 |
| 3,0 | 2,475 | 1,08 | 1,44 |
| 3,5 | 2,45 | 1,05 | 1,36 |
| 4,0 | 2,43 | 1,03 | 1,30 |
| 5,0 | 2,39 | 0,99 | 1,23 |
| 6,0 | 2,37 | 0,97 | 1,18 |
| 7,0 | 2,365 | 0,96 | 1,15 |
| 12,0 | 2,33 | 0,93 | 1,08 |
| 17,0 | 2,245 | 0,90 | 1,06 |
| 27,0 | 2,225 | 0,83 | 1,04 |
| 37,0 | 2,16 | 0,76 | 1,03 |
| 47,0 | 2,09 | 0,64 | 1,02 |
| 57,0 | 2,02 | 0,62 | 1,02 |
| 67,0 | 1,965 | 0,57 | 1,01 |

| Piezômetro: P17 | | | |
|------------------------|-------|--------------|------|
| t (min) | h (m) | Δ (m) | t/t' |
| 0 | 1,64 | | |
| 2 | 3,80 | 2,16 | |
| 2,5 | 3,795 | 2,15 | 5,00 |
| 3 | 3,79 | 2,15 | 3,00 |
| 3,5 | 3,78 | 2,14 | 2,33 |
| 4 | 3,775 | 2,14 | 2,00 |
| 5 | 3,76 | 2,12 | 1,67 |
| 6 | 3,755 | 2,12 | 1,50 |
| 7 | 3,75 | 2,11 | 1,40 |
| 8 | 3,74 | 2,10 | 1,33 |
| 9 | 3,73 | 2,09 | 1,29 |
| 10 | 3,725 | 2,09 | 1,25 |
| 15 | 3,68 | 2,04 | 1,15 |
| 20 | 3,64 | 2,00 | 1,11 |
| 30 | 3,585 | 1,95 | 1,07 |
| 40 | 3,52 | 1,88 | 1,05 |
| 50 | 3,48 | 1,84 | 1,04 |
| 60 | 3,44 | 1,80 | 1,03 |

$Q = 0,009 \text{ m}^3/\text{min}$
 $r = 0,05 \text{ m}$

| Piezômetro: P15 | | | |
|------------------------|-------|--------------|------|
| t (min) | h (m) | Δ (m) | t/t' |
| 0 | 3,20 | 0 | |
| 2,3 | 4,93 | 1,73 | |
| 3 | 4,91 | 1,71 | 4,29 |
| 3,5 | 4,90 | 1,70 | 2,92 |
| 4 | 4,90 | 1,70 | 2,35 |
| 4,5 | 4,90 | 1,70 | 2,05 |
| 5 | 4,89 | 1,69 | 1,85 |
| 6 | 4,88 | 1,68 | 1,62 |
| 7 | 4,87 | 1,67 | 1,49 |
| 8 | 4,86 | 1,66 | 1,40 |
| 9 | 4,85 | 1,65 | 1,34 |
| 10 | 4,84 | 1,64 | 1,30 |
| 15 | 4,80 | 1,60 | 1,18 |
| 20 | 4,77 | 1,57 | 1,13 |
| 25 | 4,725 | 1,53 | 1,10 |
| 30 | 4,96 | 1,48 | 1,08 |
| 40 | 3,94 | 0,64 | 1,06 |
| 50 | 3,59 | 0,39 | 1,05 |
| 60 | 3,56 | 0,36 | 1,04 |
| 70 | 3,52 | 0,32 | 1,03 |

$Q = 0,0066 \text{ m}^3/\text{min}$
 $r = 0,05 \text{ m}$

| Piezômetro: P5 | | | |
|-----------------------|-------|--------------|------|
| t (min) | h (m) | Δ (m) | t/t' |
| 0 | 0,70 | | |
| 1,42 | 2,78 | 2,08 | |
| 1,75 | 2,76 | 2,06 | 5,30 |
| 2,25 | 2,74 | 2,04 | 2,71 |
| 2,75 | 2,69 | 2,02 | 2,07 |
| 3,25 | 2,66 | 1,94 | 1,78 |
| 4 | 2,62 | 1,96 | 1,55 |
| 5 | 2,58 | 1,92 | 1,40 |
| 6 | 2,54 | 1,88 | 1,31 |
| 7 | 2,52 | 1,84 | 1,25 |
| 8 | 2,52 | 1,82 | 1,22 |
| 9 | 2,52 | 1,82 | 1,19 |
| 10 | 2,52 | 1,82 | 1,17 |
| 15 | 2,52 | 1,82 | 1,10 |

$$Q = 0,0105 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$r = 0,05 \text{ m}$$

| Piezômetro: P12 | | | |
|------------------------|-------|--------------|------|
| t (min) | h (m) | Δ (m) | t/t' |
| 0 | 2,28 | | |
| 1,03 | 3,52 | 1,24 | |
| 1,50 | 3,63 | 1,35 | 3,19 |
| 2 | 3,62 | 1,34 | 2,06 |
| 2,50 | 3,61 | 1,33 | 1,70 |
| 3 | 3,60 | 1,32 | 1,52 |
| 3,50 | 3,60 | 1,32 | 1,42 |
| 4 | 3,595 | 1,32 | 1,35 |
| 6 | 3,58 | 1,30 | 1,21 |
| 10 | 3,54 | 1,26 | 1,11 |
| 15 | 3,51 | 1,23 | 1,07 |
| 20 | 3,46 | 1,18 | 1,05 |
| 25 | 3,43 | 1,15 | 1,04 |
| 30 | 3,40 | 1,12 | 1,04 |
| 40 | 3,34 | 1,06 | 1,03 |
| 50 | 3,29 | 1,01 | 1,02 |

$$Q = 0,0097 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$r = 0,05 \text{ m}$$