

**Secretaria de Estado da Indústria, do Comércio e Assuntos do Mercosul  
SEIM**

**Minerais do Paraná S.A.  
MINEROPAR**

**ESTUDOS GEOFÍSICOS DE DETALHE EM ÁREAS  
PRÉ-SELECIONADAS PARA INSTALAÇÃO DE ATERROS  
SANITÁRIOS NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA  
Convênio IAP / MINEROPAR nº 02.04.102**

**Curitiba  
Fevereiro de 2005**

**GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ**

Roberto Requião de Mello e Silva  
Governador

**SECRETARIA DE ESTADO DA INDÚSTRIA, DO COMÉRCIO  
E ASSUNTOS DO MERCOSUL**

Luís Guilherme Gomes Mussi  
Secretário

**MINERAIS DO PARANÁ S.A. - MINEROPAR**

Eduardo Salamuni  
Diretor Presidente

Rogério da Silva Felipe  
Diretor Técnico

Manoel Collares Chaves Neto  
Diretor Administrativo Financeiro

**EQUIPE DO PROJETO**

Sérgio Maurus Ribas  
Geólogo - Gerente do Projeto

Clóvis Roberto da Fonseca  
Técnico de Mineração

Manoel de Cristo e Genésio Pinto Queiróz  
Auxiliares Técnicos

**APOIO**

Oscar Salazar Júnior  
Geólogo

Tiago de Bittencourt Rossi  
Estagiário

# ESTUDOS GEOFÍSICOS DE DETALHE EM ÁREAS PRÉ-SELECIONADAS PARA INSTALAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA

## SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO .....	1
2 – MÉTODOS DE TRABALHO .....	3
3 – DESCRIÇÃO DAS SUB-ÁREAS A-134 A, B, C, D – MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA .....	5
4 – RESULTADOS OBTIDOS .....	10
5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES:.....	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	12

## ANEXOS

- FOTOGRAFIAS
- RELATÓRIO DO LABORATÓRIO DE PESQUISAS EM GEOFÍSICA APLICADA - LPGA / DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA - UFPR.  
**(Ensaio Geofísico a Sul da Região Metropolitana de Curitiba - RMC)**

# **ESTUDOS GEOFÍSICOS DE DETALHE EM ÁREAS PRÉ-SELECIONADAS PARA INSTALAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA**

## **1 – Introdução**

A Região Metropolitana de Curitiba inclui 26 municípios e uma superfície de 15.383 km<sup>2</sup> que se estende de São Paulo a Santa Catarina. Nesta região a cartografia das zonas urbanizadas, áreas de preservação de mananciais, unidades de conservação, área de influência dos mananciais do carste e áreas de aluviões dos principais rios, são considerados como critérios restritivos à instalação de atividades potencialmente poluidoras. Esses critérios são eliminatórios na delimitação das áreas possíveis para instalação de aterros sanitários. Levando-se em consideração os parâmetros sócio-econômicos e políticos limitantes do empreendimento pretendido (ex: distância do centro atendido, uso e ocupação do solo, densidade populacional da área, distância do núcleo populacional, acessos e infraestrutura, aceitação da população), restam poucas áreas possíveis para a instalação de Aterros Sanitários (vide figura1).

O grande volume de lixo produzido na Região Metropolitana de Curitiba -RMC inviabiliza o uso de aterros menores e dispersos na região, porque isto aumentaria o risco de impactos ambientais de difícil controle. A escolha de locais apropriados para instalação de aterros sanitários exige a execução de estudos geológicos e geotécnicos detalhados, uma vez que é preciso preservar a qualidade dos mananciais superficiais e subterrâneos, evitar locais situados próximos a núcleos populacionais e situações em que os ventos dominantes levem a poluição atmosférica até eles, entre outros requisitos. Por outro lado, a aptidão do terreno deve ser compatibilizada com a distância econômica de transporte. É imprescindível a seleção de locais para a instalação de aterros sanitários de vida útil com capacidade para receber os resíduos sólidos urbanos da RMC por período superior a 20 (vinte) anos, de acordo com critérios sócio-econômicos de viabilização para aterros.

Este relatório apresenta os estudos geofísicos de detalhe executados em áreas pré-selecionadas para instalação de aterros sanitários no município de Araucária. O trabalho foi desenvolvido em parceria técnica com a Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba – COMEC, em convênio de prestação de serviços técnicos com o Instituto Ambiental do Paraná – IAP (contrato nº 02.04.102).

## Áreas pré-selecionadas para instalação de aterro sanitário na Região Metropolitana de Curitiba

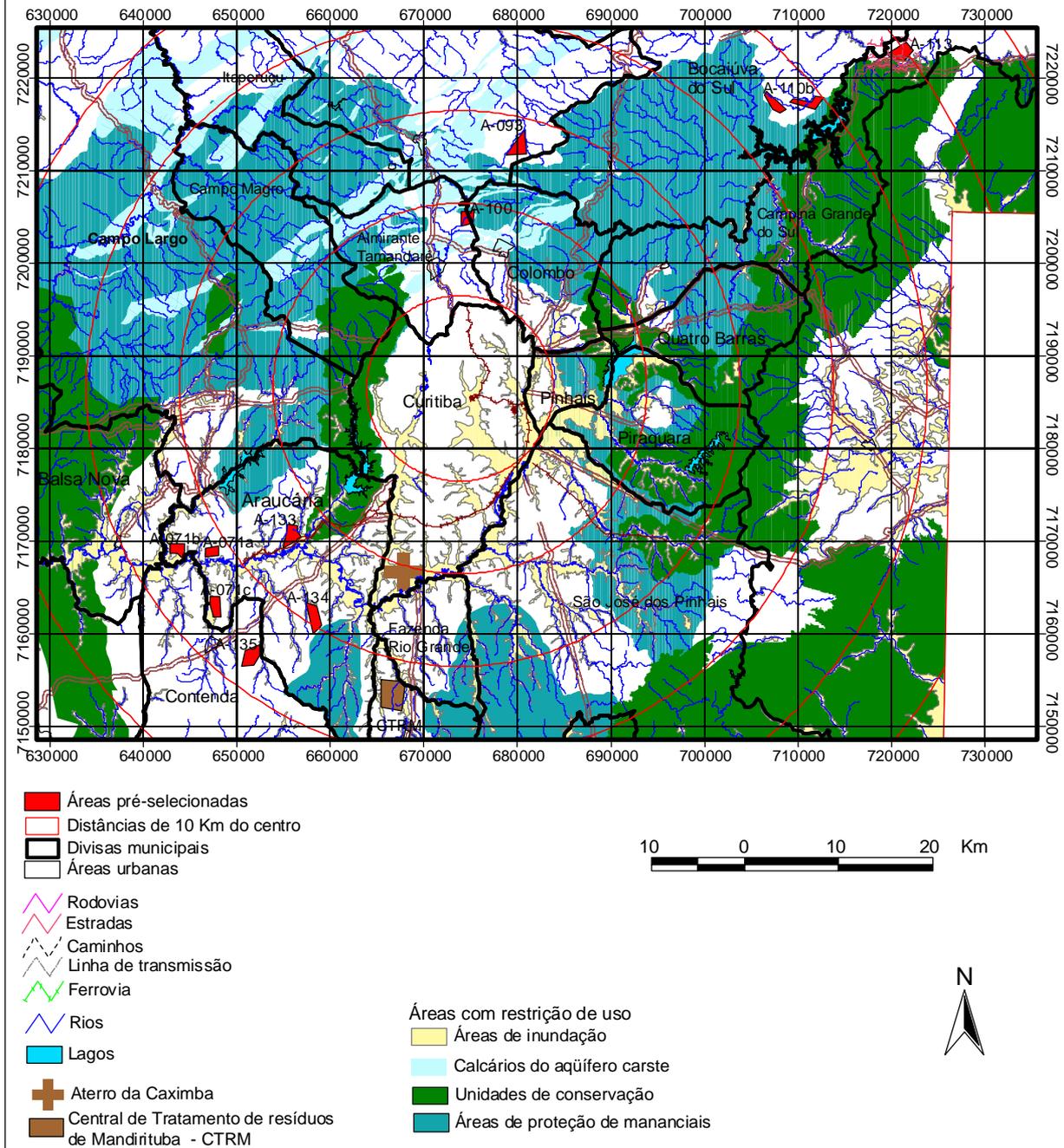


Figura 1 – Áreas pré-selecionadas para instalação de aterros sanitários e principais áreas com restrições de uso na Região Metropolitana de Curitiba.

## 2 – Métodos de trabalho

Após a definição do porte do empreendimento e dos critérios a serem observados para análise do meio físico e priorização de áreas (Ribas, 2003 a), foram realizados estudos de pré-seleção de áreas para instalação de aterros sanitários na Região Metropolitana de Curitiba (Ribas, 2003 b). As áreas foram avaliadas segundo suas características de infraestrutura, uso e ocupação, geologia, solos, hidrografia e hidrogeologia.

O método utilizado é o de combinação de critérios, que permite uma análise comparativa das alternativas estudadas. Cada critério recebe um peso em relação aos demais e são atribuídos valores numéricos para cada tipo de informação do sítio, com os valores mais elevados indicando melhores condições para o critério avaliado. Desse modo, no final, pode-se comparar os valores totais obtidos por cada área nomeando as que melhor atendem as condições pré-estabelecidas. Por este método foram selecionados e priorizados 11 (onze) possíveis locais nos diversos municípios da RMC, submetidos à avaliação da COMEC.

Após a análise efetuada pelo Departamento de Planejamento da COMEC, de acordo com o **Parecer Técnico N°06/2003**, foram selecionados quatro locais aptos à instalação de Aterro Sanitário, denominados:

- **área 02** - correspondente à A-135, no município de Contenda;
- **área 03** – correspondente à A-071 (c), no município de Araucária;
- **área 04** - correspondente à A-134, também no município de Araucária;
- **área 06** – correspondente à A-113, no município de Campina Grande do Sul.

No decorrer dos trabalhos a área 03 (A-071 c) foi descartada em vistoria de campo com os Diretores da COMEC e MINEROPAR, por englobar pequenas propriedades rurais com construções de bom padrão e muitos capões de mata nativa. Dos três locais restantes foram priorizadas: a área 04 (A-134), no município de Araucária, e a área 06 (A-113), no município de Campina Grande do Sul.

Em trabalhos de campo com o consultor Prof Dr Lázaro Valentim Zuquete as áreas prioritizadas foram mais bem delimitadas resultando na definição de três sub-áreas a norte da RMC (figura 4) e cinco sub-áreas a sul (figura 5), denominadas como:

- **A-113 (a) e A-113 (b)** - município de Campina Grande do Sul;
- **A-113 (c)** - município de Bocaiúva do Sul;
- **A-134 (a), A-134 (b), A-134 (c) e A-134 (d)** – município de Araucária;
- **A-135** – município de Contenda.

Juntamente com o Instituto Ambiental do Paraná - IAP a Minerais do Paraná S.A. - MINEROPAR investiu em levantamentos geofísicos de detalhe nas sub-áreas A-134 a, b, c e d, por meio da contratação do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA) da Universidade Federal do Paraná – UFPR. Os trabalhos realizados constaram de caminhamento elétrico/IP (imageamento elétrico 2-D/IP) em duas linhas (L1 e L2) num total de 3.000 metros, e 11 sondagens elétricas vertical/IP (SEV), distribuídas nas quatro áreas.

Os trabalhos realizados são descritos no relatório do Laboratório de Geofísica Aplicada – LPGA em anexo e representados nas figuras a seguir. O trabalho, no entanto, ensejou uma forte refutação da comunidade local. Assim sendo, apesar dos estudos técnicos terem avançado, decidiu-se por orientação da própria Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba – COMEC que a mesma estaria, a princípio, descartada.

### **3 – Descrição das sub-áreas A-134 a, b, c, d – Município de Araucária**

As sub-áreas priorizadas distam cerca de 35 Km em linha reta do centro de Curitiba e localizam-se nas bacias hidrográficas dos rios Campo Redondo e Guajuvira, afluentes da margem esquerda do rio Iguaçu. Próximas a BR 476 (Curitiba – Lapa), com distâncias de até 4 Km, servidas por estradas de terra com boas condições de tráfego, não necessitando investimentos neste aspecto. A área pré-selecionada inicialmente foi mais bem delimitada, resultando em quatro sub-áreas com os seguintes tamanhos:

- A-134 a – 0,75 Km<sup>2</sup> - 30,0 alq
- A-134 b – 0,94 Km<sup>2</sup> - 37,8 alq
- A-134 c – 1,19 Km<sup>2</sup> - 47,5 alq
- A-134 d – 0,88 Km<sup>2</sup> - 35,3 alq

As áreas selecionadas distam cerca de 35 Km em linha reta do centro de Curitiba e localizam-se nas bacias hidrográficas dos rios Campo Redondo e Guajuvira, afluentes da margem esquerda do rio Iguaçu. Próximas a BR 476 (Curitiba – Lapa), com distâncias de até 4 Km, servidas por estradas de terra com boas condições de tráfego. A localidade de Campo Redondo, no meio das áreas, apresenta casas de médio a alto padrão, escola especial, sistema de água da SANEPAR, comércio incipiente e barracões de estocagem de produtos da lavoura (figura 2).

A lavoura na região é dominada pelo plantio de soja pelos maiores agricultores, em terras planas que permitem mecanização, seguida do milho, batata e em menor escala o feijão. Os agricultores de menor porte cultivam hortaliças (beterraba, repolho, alface, pimentão, batata doce, ...) e frutas (pêssego, nectarina, ameixa,...).

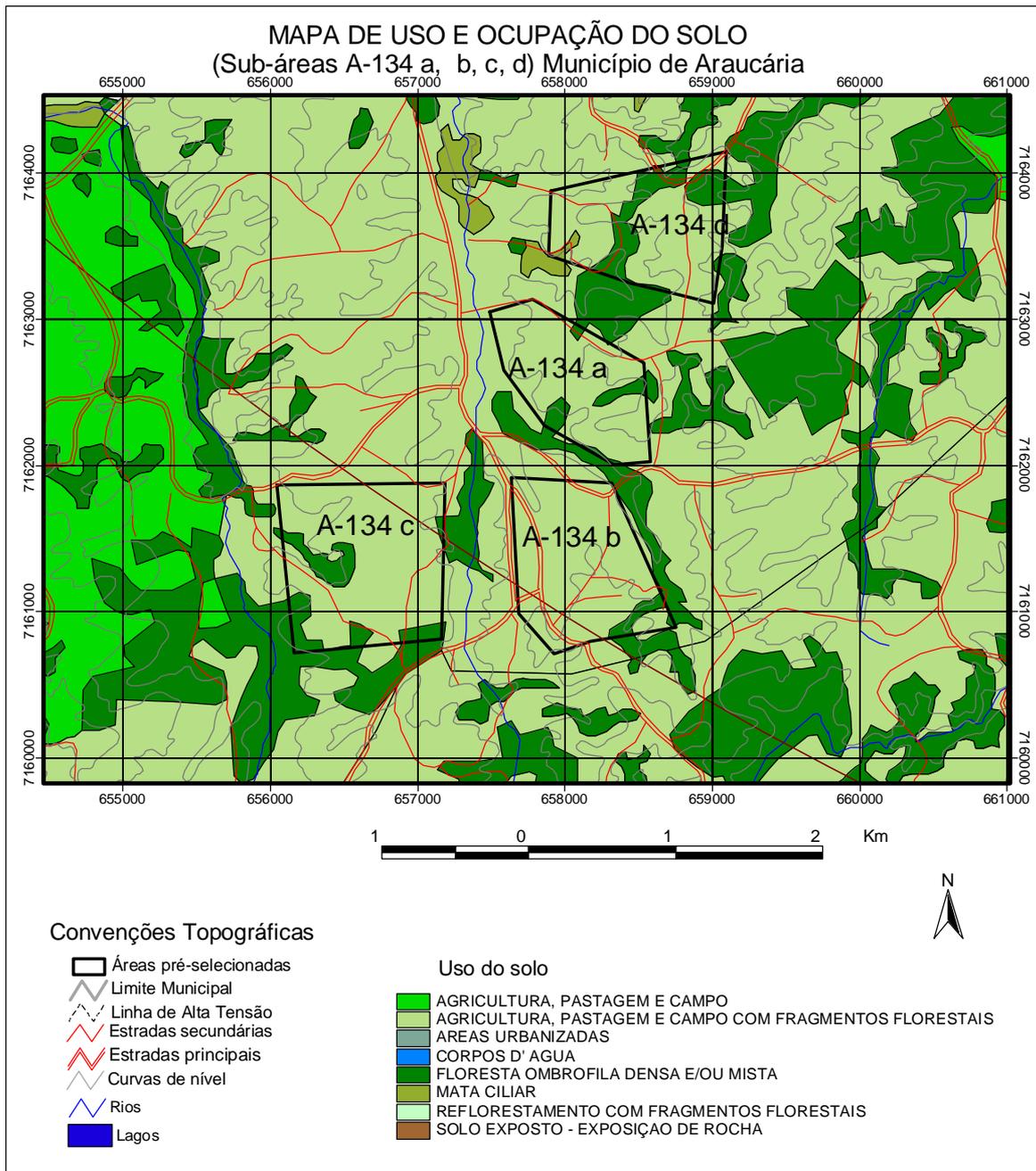


Figura 2 – Mapa de uso e ocupação do solo nas sub-áreas A-134 a, b, c, d, Município de Araucária

O relevo é suave ondulado a ondulado, com vertentes amplas de perfil convexo, terminando em vales abertos, normalmente preenchidos por sedimentos e com zonas de hidromorfismo. As planícies de inundação com depósitos aluvionares ocorrem somente ao longo dos rios Campo Redondo e Guajuvira, nos limites das áreas. A erosão que se processa é principalmente a laminar do solo quando desprotegido de vegetação, evidenciada pela carga de sedimentos nas drenagens em épocas chuvosas. Não foram observados ravinamentos e solapamentos de solo.

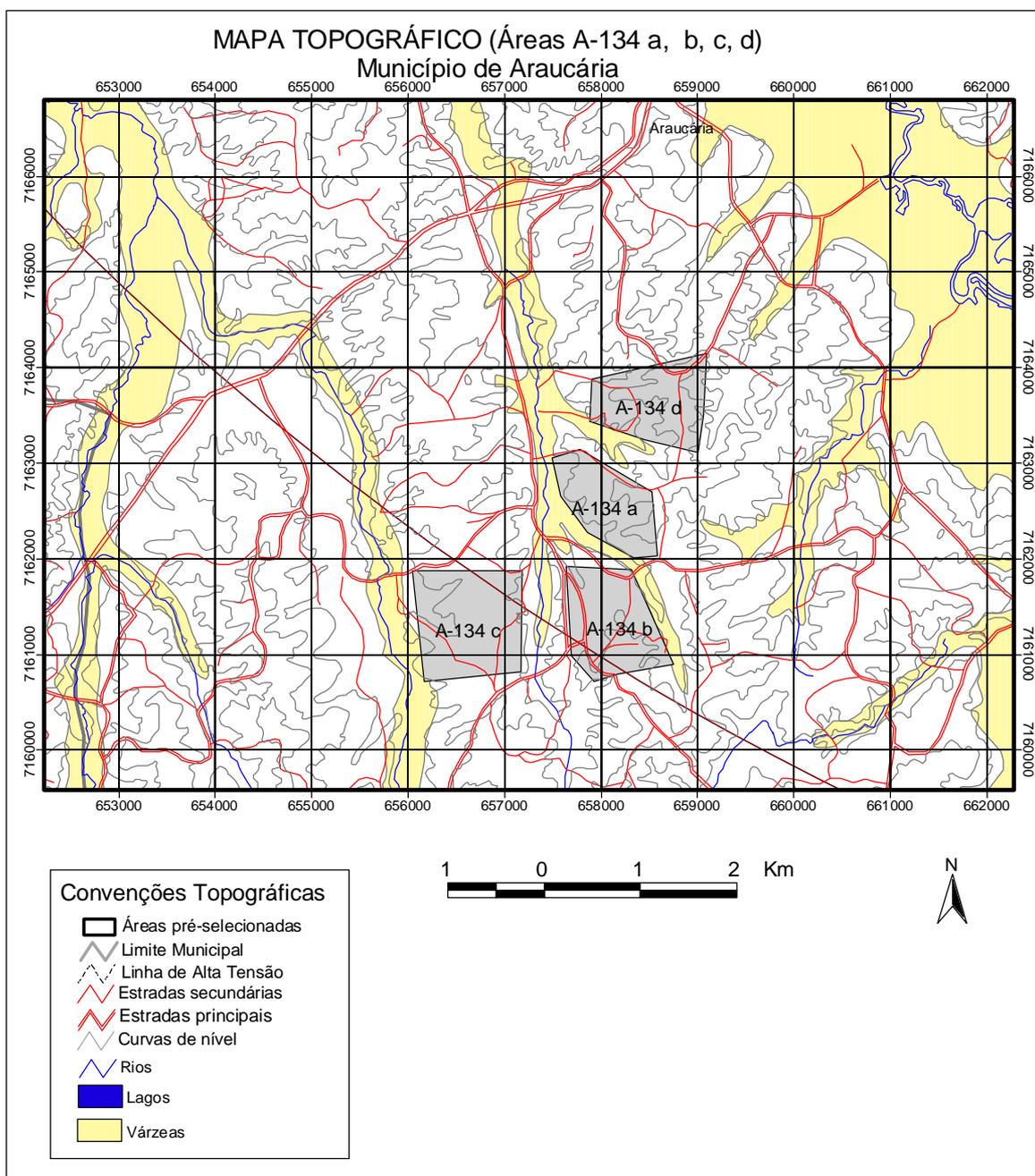


Figura 3 – Mapa topográfico das sub-áreas A-134 a, b, c, d, município de Araucária, a sul da Região Metropolitana de Curitiba.

O substrato rochoso é composto por gnaisses graníticos e migmatitos anfibolíticos e quartzo-feldspáticos, intemperizados que originam latossolos espessos (> 10 m), arenosos a pouco argilosos, escarificáveis e com boa capacidade de suporte de carga. São comuns pequenos afloramentos de rochas quartzosas, mais duras, no topo das colinas, que podem gerar problemas de escavabilidade, que devem ser mapeados.

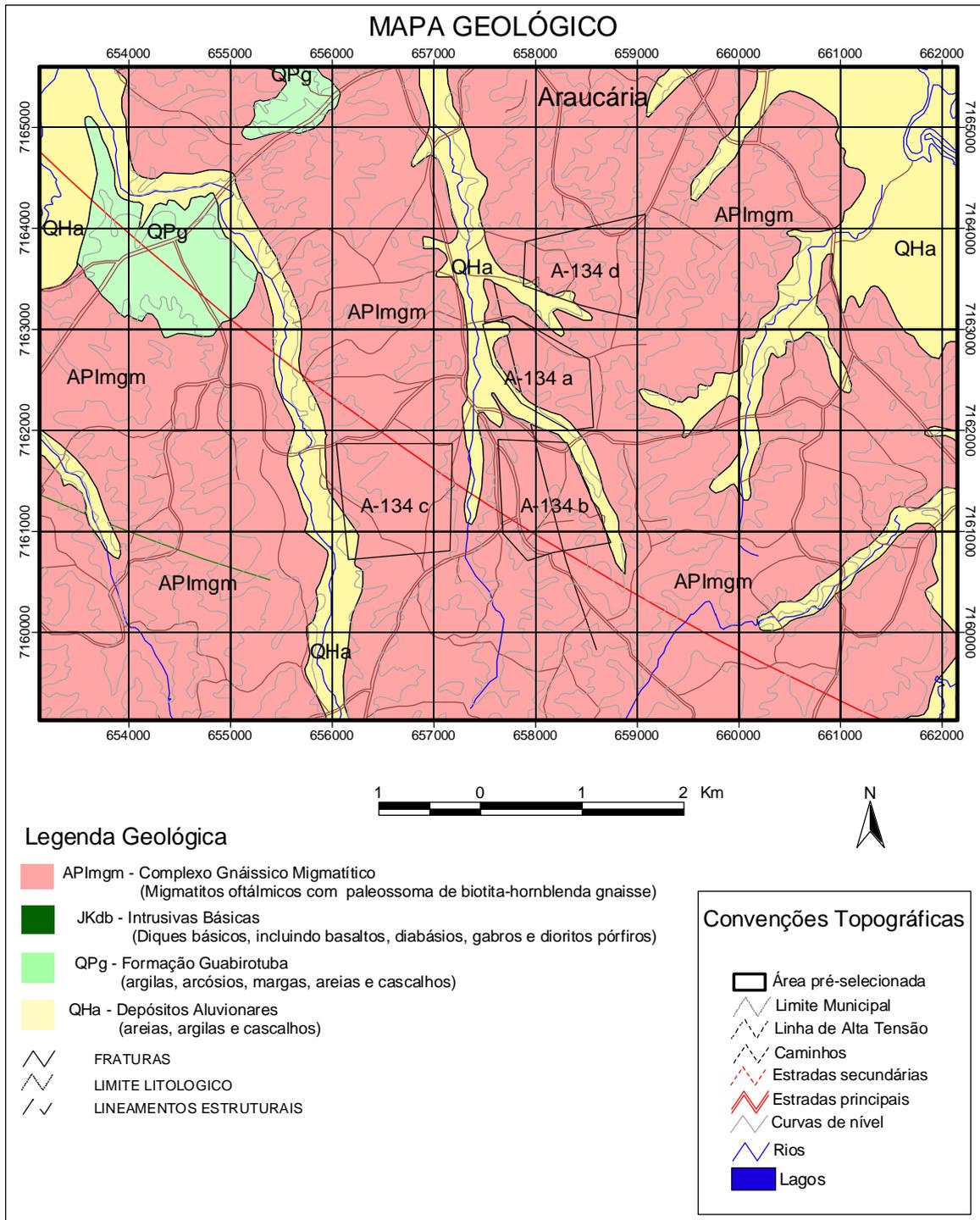


Figura 4 - Mapa geológico das sub-áreas priorizadas no município de Araucária (sub-áreas A-134 a, b, c, d)

Os solos são predominantemente residuais (maduro ou jovem e saprólito), com porções de solos transportados (colúvios), reconhecidos por apresentarem um nível de seixos de quartzo na base. São solos que em geral são bastante profundos na região, recobrendo espessos saprólitos, que juntamente com a rocha alterada apresentam

normalmente profundidades superiores a 10 metros, necessitando investigações de detalhe para comprovação. A rocha alterada ou saprólito apresenta erosão por ravinamento quando retirada a vegetação e a camada superficial do solo de recobrimento, processo de fácil controle com adequada proteção.

Predominam na região solos classificados como: latossolos vermelho-amarelo álicos, de textura argilosa, e solos hidromórficos gleyzados, textura argilosa em relevo plano de várzeas nos limites das sub-áreas delimitadas (figura 5).

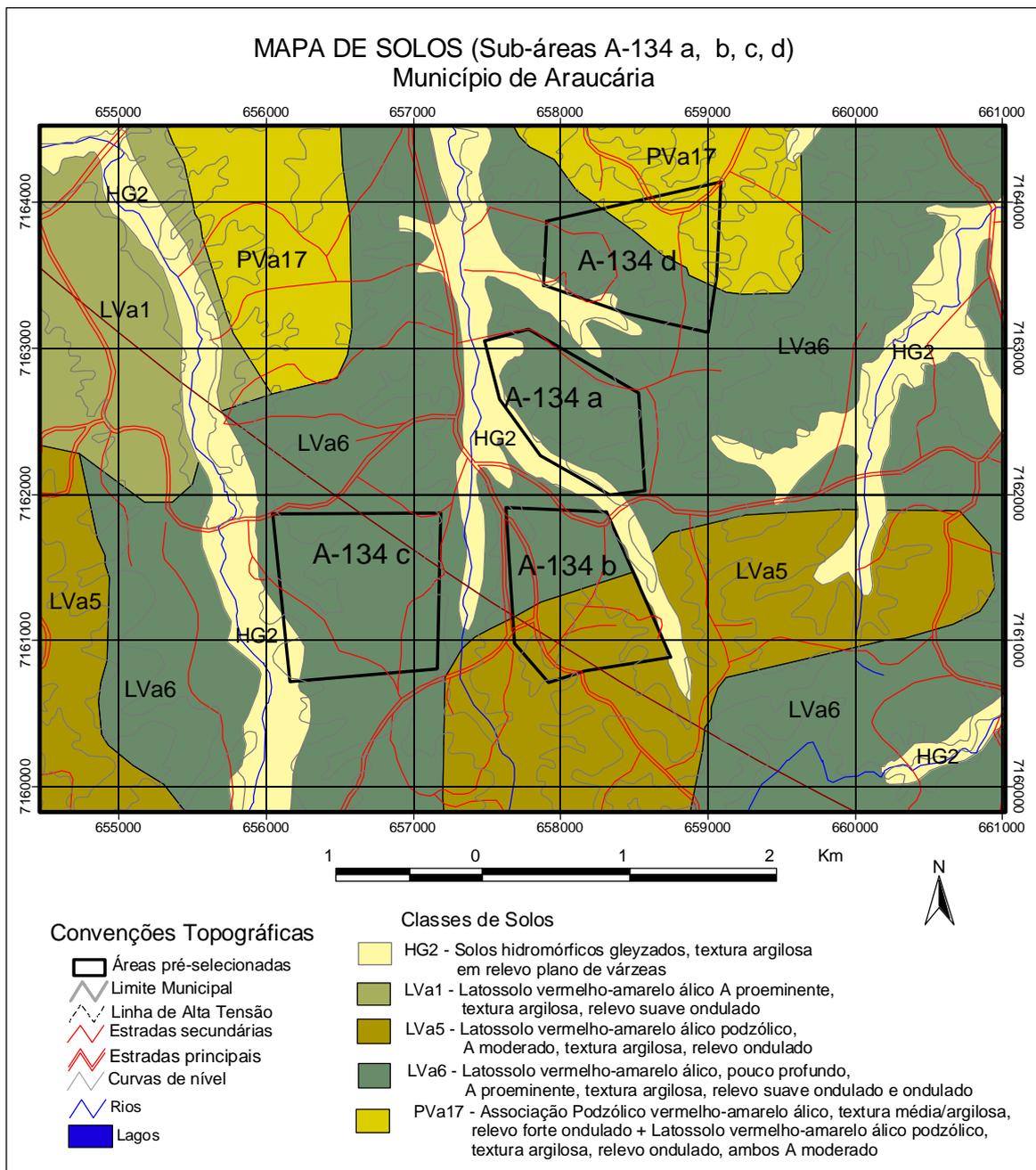


Figura 5 – Mapa de solos das sub-áreas pré-selecionadas no município de Araucária (sub-áreas A-134 a, b, c, d)

## 4 – Resultados obtidos

Os resultados obtidos nos levantamentos geofísicos nas linhas L1 e L2 são apresentados em pseudoseções de resistividade e cargabilidade aparentes e modelos de profundidade correspondentes. Na linha L1 (área A-134c) observa-se a definição de um estrato superficial de baixa resistividade, interpretado como resposta do conjunto solo-regolito (melhor detalhado na SEV-1) *versus* níveis profundos com maiores valores interpretados com resposta do embasamento cristalino resistivo. A SEV-1 mostrou em profundidade o perfil: até 4,0 m - solo argiloso parcialmente saturado; de 4,0 a 5,6 m - solo não saturado; a 5,6 m – início do lençol freático; de 5,6 até 92,5 m – solo + regolito saturado; a 92,5 m – topo da rocha sã. Interpretados também uma fratura percolada por água em torno da estação 750 metros e um corpo polarizável (com magnetita ou sulfetos disseminados) em torno da estação 1000 metros. As zonas com baixa cargabilidade (tonalidades azuis no perfil) devem refletir locais com armazenamento de água.

As pseudoseções da linha L2 (áreas A-134a e A-134b) mostram comportamento semelhante ao anterior, com níveis superficiais de baixa resistividade (solo argiloso parcialmente saturado) e núcleos profundos de altas resistividades, separados por uma fratura.

O comportamento das sondagens elétricas verticais (SEVs) e das curvas de cargabilidade aparente são muito semelhantes, refletindo a homogeneidade geológica da região. A profundidade máxima dos solos saturados, ou parcialmente saturados, foi de 7 metros (SEV-3, área A-134c), enquanto nas demais a profundidade média foi de 2,5 metros. As espessuras dos solos não saturados foram as seguintes: 1,0 m (SEV-7), 2,0 m (SEV-1, SEV-2 e SEV-9), 6,0 m (SEV-6), 11,0 m (SEV-10) e 17,0 m (SEV-11).

As profundidades máximas do topo do lençol freático foram registradas nas SEV-11 (18,0 m) e SEV-10 (12,0 m) enquanto nas demais as profundidades oscilaram entre 2,0 e 8,0 m, média de 4,9 m. A profundidade máxima do topo da rocha sã foi registrada na SEV-1 (92,0 m) e a mínima na SEV-3 (19,0 m), enquanto a média das demais foi de 46,0 m. Os resultados são sumarizados na tabela abaixo.

*Tabela 1 – Dados obtidos nos trabalhos de geofísica executados nas sub-áreas A-134 a, b, c, d. (Fonte: Stevanato et all, 2004)*

<b>Sondagens Elétricas Verticais</b>	<b>Nível D'água (m)</b>	<b>Topo Rochoso (m)</b>	<b>Observações</b>
SEV-1	5,60	92,50	Topo de morro A-134c
SEV-2	5,30	57,70	“
SEV-3	6,70	19,30	“
SEV-4	3,00	33,60	“
SEV-5	4,20	43,60	Fundo de vale A-134c
SEV-6	7,80	43,20	Meia encosta A-134a
SEV-7	1,75	74,50	Topo de morro A-134a
SEV-8	5,50	63,30	Meia encosta A-134b
SEV-9	3,75	40,60	Topo de morro A-134b
SEV-10	12,4	24,30	Topo de morro A-134d
SEV-11	17,7	36,40	Meia encosta A134-d

Segundo relato de Eduardo Salamuni: “Ao que pese as condições físicas do terreno apropriadas para recebimento de resíduos sólidos, a forte oposição dos moradores, na prática inviabiliza o empreendimento no local. Tal oposição pode ser ilustrada com a reunião pública no local, onde a direção da MINEROPAR esteve presente como convidada, assim como a direção da COMEC, ficando patente que a resistência dos moradores locais inviabilizaria, através dos mecanismos existentes na legislação, a implantação de aterro sanitário na localidade de Campo Redondo”.

## **5 - Conclusões e Recomendações:**

- As áreas A-134 a, b, c, d, em Araucária apesar de consideradas aptas com relação ao meio físico para instalação de Aterro Sanitário, estão inviabilizadas pela forte rejeição da população local;
- É consenso a necessidade de um esforço preliminar de convencimento da população dos municípios e seus governantes, acerca dos benefícios econômicos e sociais advindos do recebimento e destinação do lixo proveniente de outros municípios no esquema de consórcio intermunicipal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Apresentação de projetos de aterros de resíduos sanitários sólidos urbanos - Procedimento - NBR 8419, abril de 1992
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Resíduos Sólidos - Classificação - NBR 10.004 - Setembro de 1987
- GUIMARÃES, LUCY TEIXEIRA - Utilização do Sistema de Informação Geográfica (SIG) para identificação de áreas potenciais para disposição de resíduos na Bacia do Paquequer, município de Teresópolis - RJ. [Rio de Janeiro] 2000 xiii, 172 p. (Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2000)
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM.- Lixo Municipal : Manual de Gerenciamento Integrado, (IPT. Publicação, 2163) São Paulo: IPT/CEMPRE, 1996
- MELO, A.L.de O.; CALIJURI,M.L.; DUARTE, I.C.d'A.; AZEVEDO, R.F. e LORENTZ, J.F. – Principais metodologias para avaliação e seleção de áreas para aterros sanitários. Geotecnia nº 96 – Novembro de 2002, p 49 – 62.
- RIBAS, S.M. Definição de Critérios para Seleção de Áreas para instalação de Aterros Sanitários na Região Metropolitana de Curitiba, MINEROPAR – Relatório Interno, maio de 2003 a
- RIBAS, S.M. – Pré-seleção de Áreas para Instalação de Aterros Sanitários na Região Metropolitana de Curitiba – Relatório de Etapa, MINEROPAR – Relatório Interno, julho/2003 b.
- RODHE, G.M. - Método de Seleção de Áreas para Aterros Sanitários - Porto Alegre: CIENTEC, (Boletim Técnico, 13), 1989
- SOUZA, N.C.D.C. – Mapeamento geotécnico regional da folha de Aguaí: com base na compartimentação por formas de relevo e perfis típicos de alteração, 1992, dois volumes, mapas (Dissertação – Universidade de São Paulo, USP – São Carlos, Escola de Engenharia).
- SOUZA, N.C.D.C.; ZUQUETTE, L.V. - "Critérios de avaliação geotécnica de unidades de terreno no planejamento urbano", In: Anais do 7<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, v.2, pp.101-108, Poços de Caldas, São Paulo, ABGE, set. 1993
- STEVANATO, R.; FERREIRA, F.J.F. E WOSNIAK, R. Ensaios Geofísicos a Sul da Região Metropolitana de Curitiba – RMC (Caminhamento Elétrico e Sondagem Elétrica Vertical), Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA / Universidade Federal do Paraná – UFPR, Dept<sup>o</sup> de Geociências. Relatório Final, agosto/2004. np
- WEBER, E; HASENACK, H – Avaliação de áreas para instalação de aterro sanitário através de análises em SIG com classificação contínua dos dados. Anais, Salvador / BA. Produção técnica e científica de usuários Idrisi e CartaLinx. Banco de Dados.  
(internet: <http://delmonio.ecologia.ufrgs.br/idrisi/artigos>).

ZUQUETTE, L.V. - Análise e proposta metodológica sobre cartografia geotécnica para condições brasileiras, Tese de Doutorado, 3 volumes, EESC-USP, São Carlos, 1987

ZUQUETTE, L.V.; GANDOLFI, N. - "Mapeamento geotécnico da região de Campinas (SP, Brasil) e sua importância para o planejamento regional", Geociências, v.11, nº.2, pp.191-206, 1992

## FOTOGRAFIAS



Foto 01 - Área A-134, Município de Araucária, vista geral do ponto At-56, priorizada para estudos geofísicos de detalhe, visando a instalação de Aterro Sanitário.



Foto 02 - Área A-134, Município de Araucária, priorizada para estudos geofísicos de detalhe, visando a instalação de Aterro Sanitário.



Foto 03 - Área A-134a, Município de Araucária, investigada com estudos geofísicos de detalhe (SEVs e imageamento elétrico), visando a instalação de Aterro Sanitário.



Foto 04 - Área A-134c, realização de sondagem elétrica vertical - SEV



Foto 05 - Área A-134c, realização de sondagem elétrica vertical – SEV, em convênio com a FUNPAR/UFPR.



Foto 06 - Área A-134c, imageamento elétrico - leitura de cargabilidade e resistividade em perfil



Foto 07 - Área A-134c, imageamento elétrico detalhe da leitura de cargabilidade e resistividade



Foto 08 - Área A-134c, equipamentos e equipe do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA da UFPR.

## MINEROPAR – Minerais do Paraná S.A.



### Ensaio Geofísicos a Sul da Região Metropolitana de Curitiba-RMC (Caminhamento Elétrico e Sondagem Elétrica Vertical)

Curitiba  
2004



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
Setor de Ciências da Terra  
Departamento de Geologia  
Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada



## **MINEROPAR – Minerais do Paraná S.A.**

### **Ensaio Geofísicos a Sul da Região Metropolitana de Curitiba-RMC (Caminhamento Elétrico e Sondagem Elétrica Vertical)**

#### **RELATÓRIO FINAL**

Rodoilton Stevanato  
Francisco José Fonseca Ferreira  
Ricardo Wosniak

**Curitiba - PR  
Agosto/2004**

## I Introdução

O presente relatório é fruto de cooperação técnica entre o **Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA)**, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a **MINEROPAR – Minerais do Paraná S.A.**, tendo como objetivo apresentar os resultados referentes à aquisição e processamento de dados de imageamento elétrico 2-D (caminhamento elétrico), polarização induzida e sondagem elétrica vertical (SEV), como apoio à pesquisa de áreas a sul da Região Metropolitana de Curitiba – RMC, de interesse da **MINEROPAR**.

## II Localização da Área

A área objeto dos levantamentos geofísicos (Figura 1) situa-se no município de Araucária – PR, nas áreas A-134a, A-134b, A-134c e A-134d, a sul da Região Metropolitana de Curitiba (RMC).

## III Equipe do Projeto

A equipe do Projeto foi constituída pelos seguintes pesquisadores: Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira (Geólogo-Coordenador), MSc. Rodoilton Stevanato (Geólogo), Ricardo Wosniak (Geólogo), todos do **Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA/UFPR**. Os trabalhos foram assessorados pelo geólogo Sergio Maurus Ribas da Mineropar, o qual forneceu os auxiliares para os trabalhos de campo. A aquisição dos dados geofísicos também foi acompanhada pelos alunos da disciplina Geofísica Aplicada, Curso de Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

## IV Princípios dos Métodos Elétricos de Prospecção

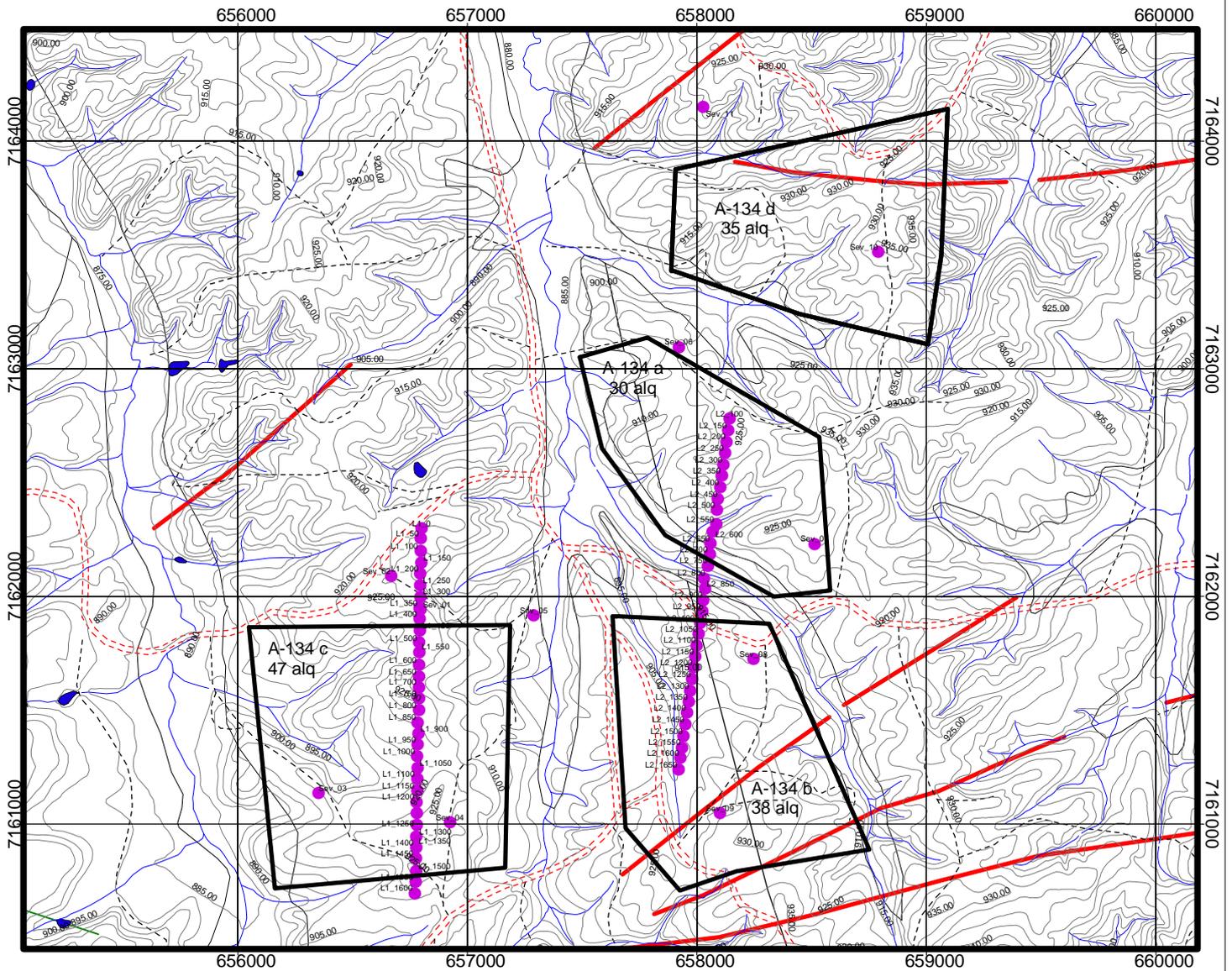
O princípio dos métodos elétricos de prospecção é baseado na injeção, no terreno, de uma corrente **I**, através de dois eletrodos, **A** e **B**, e na medida da diferença de potencial **DV**, entre outros dois eletrodos **M** e **N**. A função resistividade aparente ( $r_a$ ) é dada pela seguinte expressão:

$$r_a = K * \Delta V / I$$

O fator **K** que multiplica  $\Delta V / I$  é puramente geométrico e depende apenas da disposição dos eletrodos **A**, **B**, **M** e **N**. A resistividade aparente ( $r_a$ ) não é um parâmetro físico do meio, mas um efeito integrado sobre um segmento do semi-espaço, para a qual contribuem:

- Os valores da resistividade em cada ponto;
- A geometria elétrica do terreno;
- A disposição geométrica dos eletrodos.

# TRABALHOS DE GEOFÍSICA NAS ÁREAS INDICADAS PARA INSTALAÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA



- Áreas pré-selecionadas
- Estudos geofísicos
- ~ Curvas de nível
- ~ Rios
- Lagos
- ~ Estrada principal
- - - Estradas
- - - Caminhos
- ~ Falhas geológicas
- ~ Contatos geológicos

A Figura 2 ilustra o princípio dos métodos elétricos:

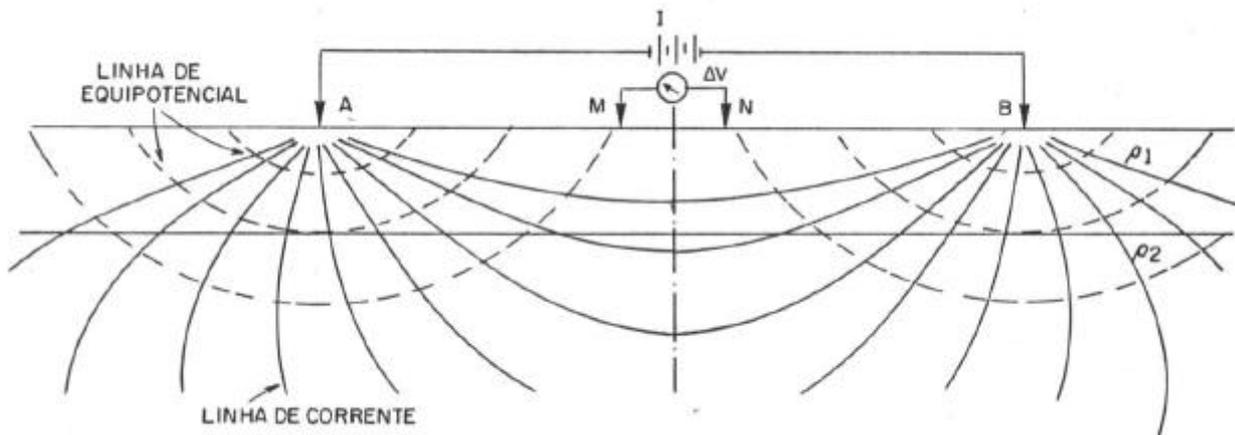


Figura 2 – Ilustração do princípio dos métodos elétricos indicando a propagação das linhas de corrente e de potencial no subsolo.

#### IV.1 Polarização Induzida

Quando uma corrente elétrica que circula no terreno é interrompida, a voltagem entre os eletrodos *M* e *N* não decai instantaneamente para zero. Durante o fluxo de corrente podem surgir concentrações de carga em várias partes do semiespaço. Depois da interrupção da corrente, as cargas elétricas tendem a retornar à sua posição original, enquanto o voltímetro continua a indicar um sinal fraco. Durante alguns segundos, ou minutos, uma determinada fração da voltagem inicial permanece no terreno enquanto as concentrações de cargas são dissipadas. Este fenômeno é conhecido como **polarização induzida** (*induced polarization – IP*).

Durante muitos anos os geofísicos conviveram com os potenciais induzidos durante levantamentos de eletrorresistividade. Apesar de Schlumberger ter verificado o fenômeno antes de 1920, as aplicações modernas iniciaram-se a partir de 1948, inicialmente para prospecção de metais base e, mais recentemente, à exploração de águas subterrâneas, aproveitando-se da propriedade de que a água não se polariza, ao contrário das argilas.

O fenômeno *IP* foi reconhecido pelos estudos eletroquímicos através da passagem de correntes elétricas num sistema eletrodo-eletrólito e sua conexão com sobrevoltagens (*overvoltage*). Esta sobrevoltagem é o potencial extra, que no *IP* é proporcional à densidade de corrente, devido as barreiras eletroquímica e eletrocinética criadas na interface entre o eletrodo e o meio circundante.

Um efeito similar também foi observado em substâncias dielétricas puras. A constante dielétrica de uma substância é a medida da capacidade desta substância em armazenar carga quando um campo elétrico é aplicado. Para um fluxo ininterrupto de corrente, a polarização induzida se manifesta como dependência da impedância do terreno e da frequência da corrente. Define-se impedância como a resistência aparente de uma substância frente ao fluxo de correntes alternadas, de forma análoga à resistência de um circuito elétrico.

O fenômeno da polarização induzida pode ser observado nos domínios do tempo e da frequência. Apesar de ser complexo, o **IP** assemelha-se à descarga de um capacitor (domínio do tempo) ou à variação de impedância de uma corrente alternada (domínio da frequência).

#### IV.1.1 Medidas de Polarização Induzida (**IP**)

Quando as medidas são feitas pela passagem de pulsos de corrente contínua com duração **T** (domínio do tempo), a magnitude da polarização induzida observada é frequentemente expressa em **DV/V** (milivolt/volt), onde **DV/V** é a voltagem remanescente durante um tempo finito **t**, depois do corte da corrente elétrica, e **V** é a voltagem medida enquanto a corrente circula. Esta medida de **IP**, designada como  $P_t^T$  é chamada de **polarizabilidade**. Normalmente são utilizados valores de **T** entre 1-20 segundos, enquanto **t** é uma fração de **T**.

É usual mandar primeiro o pulso de corrente contínua numa direção e, em seguida, enviá-lo na direção oposta, procedendo-se depois as leituras de **IP**. Normalmente o tempo de *cut-off* (**t**) é da mesma ordem de grandeza do tempo **T**.

É muito importante selecionar adequadamente o tempo **t**, o qual deve ser suficientemente longo para que os efeitos da indução eletromagnética no terreno não desapareçam, permitindo que pequenas frações de **DV** sejam registradas com segurança e, portanto, não se situem abaixo dos limites de detecção do instrumento. A razão **DV/V** é independente de **V**, pelo menos para densidades de corrente normalmente utilizadas nas operações de campo.

A **cargabilidade** ( $M_{t_1, t_2}^T$ ), como um dos vários parâmetros da polarização induzida no domínio do tempo, pode ser definida de diversas formas:

- Como a razão de decaimento da voltagem inicial (ou voltagem secundária) pela voltagem primária;
- Como a propriedade de um material no qual existe um momento de dipolo provocado por uma corrente induzida por unidade de volume **P**, energizado por uma densidade de corrente **J** ( $M = P/J$ );
- A quantidade de mudança na resistência, medida na curva de decaimento, como função do tempo ( $M = dr(t)/r$ );
- A integral da área sob uma curva de decaimento de **IP**, entre os tempos **t**<sub>1</sub> e **t**<sub>2</sub>, normalizada pela voltagem primária **V**<sub>p</sub> ( $M = (1/V_p \int_{t_1}^{t_2} V_t dt)$ ). A unidade de **cargabilidade** é milivolt.segundo/volt (**mVs/V**);
- A **cargabilidade** multiplicada pela **condutividade**, normalmente expressa em milifarads/unidade de comprimento, é denominada **capacidade específica** quando medida em farads/m. O **farad** é a unidade de **capacitância** no SI; a qual reflete a **capacitância** de um capacitor onde um volt de potencial provoca o armazenamento de um **coulomb** (unidade de carga no SI).

As medidas parciais de **cargabilidade** ( $M_i$ ) são integradas (somadas), resultando numa média global  $M_g$ .  $M_i$  e  $M_g$  fornecem informações sobre a capacidade do terreno em carregar-se como função de um fluxo de corrente. Como visto, a **cargabilidade** parcial de uma janela  $i$  é medida pela seguinte expressão:

$$M_i = \int_{T_{mi}} V dt / T_{mi} * V_{MN}$$

e a **cargabilidade** global é obtida pela seguinte fórmula:

$$M_g = \sum_{i=1}^n (M_i T_{mi}) / \sum_{i=1}^n T_{mi}$$

onde  $n$  é igual ao número de janelas  $IP$ .

No equipamento do **LPGA (ELREC 10)**, podem ser usadas até vinte janelas para definir a curva de decaimento. O fenômeno de descarga observado durante o tempo de relaxamento pode ser descrito de acordo com a Figura 3.

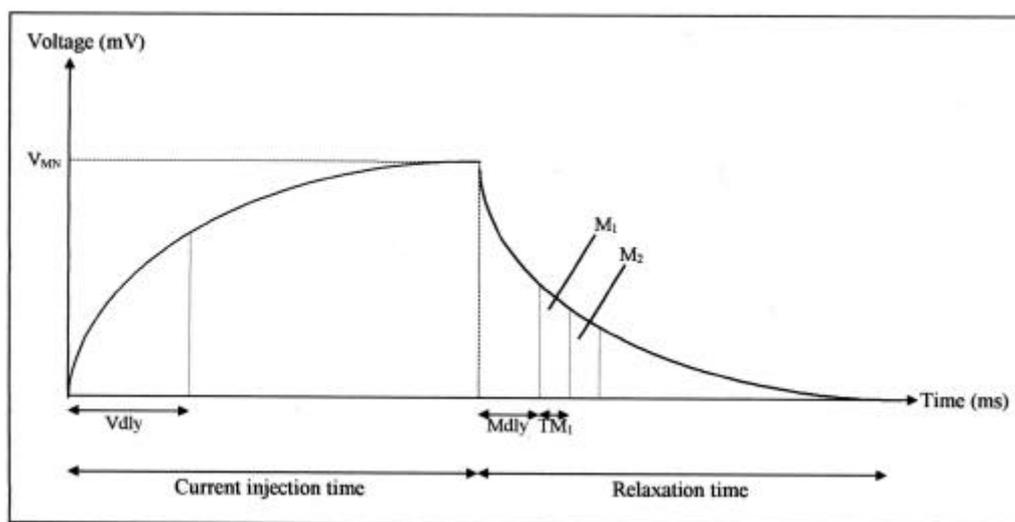


Figura 3 – Ilustração da curva de decaimento IP ao longo do tempo (Fonte: Manual de Operações do ELREC 10).

#### IV.1.2 Origem da Polarização Induzida – Polarização de Membrana e de Eletrodo

A condução elétrica no terreno é normalmente iônica, mas algumas vezes pode ser obstruída por quantidades maiores ou menores de partículas minerais (por exemplo, grãos de pirita), nas quais quem transporta a corrente elétrica são os elétrons. Este fenômeno é bem conhecido quando uma corrente que passa por um eletrodo de metal (condutor eletrônico), inserido num eletrólito, pode aumentar a carga continuamente, de baixo para cima, na interface do eletrodo com o meio circundante, quando os demais processos da reação eletrolítica não se desenvolvem com a mesma velocidade. Isto produz a denominada **polarização de eletrodo**. A carga extra acumulada difunde-se no eletrólito, quando a corrente é interrompida, restabelecendo-se o equilíbrio original, no qual uma película de íons negativos adere ao eletrodo de metal.

O efeito de **IP** observado em corpos de minerais sulfetados, ou outros minerais condutores como a grafita e a magnetita, é basicamente uma manifestação semelhante ao fenômeno da polarização de eletrodo. Tal efeito pode ser realçado se as partículas minerais estiverem dispersas (sulfetos disseminados) numa massa compacta, desde que o mesmo seja um fenômeno da superfície do mineral e que a polarização das cargas esteja relacionada à superfície total das partículas. Valores de **DV/V** maiores que 10% são comuns em muitos depósitos minerais.

A polarização induzida também é observada na ausência de minerais eletronicamente condutores. A presença de argila é uma condição necessária para a existência deste fenômeno porém, o mesmo não é observado em areias quartzosas ou em outro meio desprovido de argilas. A polarização de membrana, como este efeito tem sido chamado, é provavelmente devida a trocas iônicas e à disposição da difusão de potenciais. A presença de água em subsuperfície não sensibiliza o efeito IP, ou seja, apresentam baixos valores de cargabilidade.

A superfície das partículas de argila, as bordas ou extremidades de corpos acamadados, materiais fibrosos ou planos de clivagem, normalmente aprisionam cargas negativas não balanceadas que atraem uma nuvem de íons positivos do eletrólito. Quando uma corrente elétrica interage com um sistema eletrólito-argila, os íons positivos podem facilmente atravessar aquela nuvem, porém os íons negativos são bloqueados formando zonas de concentração iônica.

O retorno destes íons à sua distribuição de equilíbrio, depois de cessada a corrente, gera uma corrente residual responsável pelo efeito de polarização induzida. Superficialmente, de acordo com observações experimentais, os efeitos de **polarização de membrana e de eletrodo** são semelhantes entre si. Entretanto, não existe uma feição diagnóstica, não ambígua, que possa distinguir estes dois fenômenos durante as operações de campo. Existem diversas teorias, tanto macroscópicas quanto microscópicas, para explicar os mencionados efeitos, porém as mesmas não serão tratadas aqui.

No campo, o balanço químico é normalmente estabelecido entre as cargas elétricas dispostas na superfície dos minerais e os íons das águas que saturam os poros. Os íons positivos oriundos da água tendem a se concentrar em torno das partículas de argila negativamente carregadas e os íons negativos são atraídos pelas cargas positivas da superfície de alguns grãos de areia. Entretanto, a mobilidade dos íons mantém posições que permitem uma neutralidade elétrica como indicado na Figura 4.

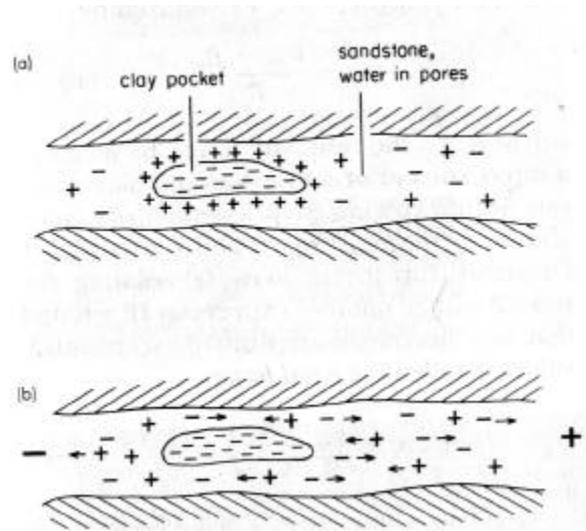


Figura 4 – Distribuição de íons e partículas sedimentares eletricamente carregadas num ambiente natural (a), onde íons positivos da água subterrânea tendem a se concentrar na superfície de partículas argilosas negativamente carregadas e íons negativos são atraídos por grãos de areia que carregam cargas positivas. Este balanço natural é interrompido quando uma corrente elétrica é injetada no terreno causando (b) migração dos íons positivos da água subterrânea em uma direção e negativa na direção oposta. Quando a corrente é removida, estes íons retornam à suas posições originais de equilíbrio. Durante este intervalo de tempo, o retorno dos íons produz uma voltagem seguida do decaimento da amplitude (adaptado de Robinson & Corun, 1998).

O balanço natural de cargas, que equivale a uma bateria gasta, é interrompido por uma corrente elétrica que circula no terreno, a qual age como se a bateria fosse recarregada. Isto significa que as cargas positivas e negativas circulam de um lado para o outro, como ilustrado na mencionada Figura 4b. O efeito de recarga é mais forte nas zonas de elevadas densidades de corrente, as quais correspondem as áreas de mais baixas resistividades. É nestas zonas de mais baixas resistividades que as cargas denotam mais mobilidade.

#### IV.1.3 Arranjo Dipolo-Dipolo (Caminhamento Elétrico)

Na prática dos levantamentos de imageamento elétrico 2-D ou de polarização induzida, denomina-se geralmente a fonte de corrente como circuito transmissor, ou simplesmente **transmissor** (foto 1), e os circuitos relacionados com os eletrodos de potencial como **receptor** (foto 2). O arranjo eletrônico normalmente utilizado neste tipo de levantamento é o **dipolo-dipolo**, onde a separação entre os eletrodos de corrente (**A** e **B**) é a mesma dos eletrodos de potencial não polarizáveis (**M** e **N**), e a distância entre seus pontos médios é um múltiplo deste espaçamento.



Foto 1 – Transmissor de corrente VIP3000W em primeiro plano e o gerador Honda EM5000S.



Foto 2 – Receptor multicanal e espectral ELREC10 e o eletrodo de potencial não polarizável.

Os caminhamentos elétricos são usualmente feitos ao longo de perfis (picadas). O procedimento mais comum é posicionar os eletrodos de corrente (**AB**) no início da linha. As leituras são feitas através de pares sucessivos de eletrodos de potencial (**MN**), igualmente espaçados. O **transmissor** (**AB**) é então deslocado para a próxima posição, na mesma linha, e o procedimento é então repetido. Tal procedimento é ilustrado na Figura 5.

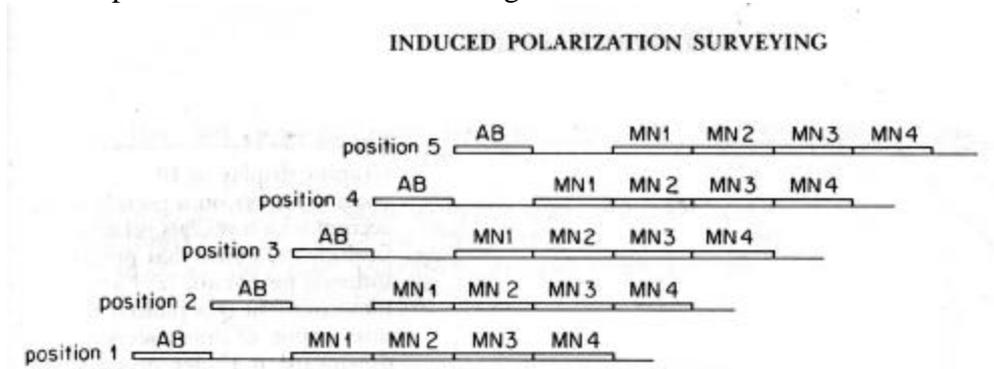


Figura 5 – Procedimento da perfilagem *IP-Resistividade*. Com o **transmissor AB** na posição 1 são realizadas leituras no **receptor MN** nas posições **MN1**, **MN2**, **MN3** e **MN4**. O transmissor é então deslocado, ao longo da linha, para a posição 2, procedendo-se mais quatro medidas no **receptor MN** e assim sucessivamente (adaptado de Robinson & Corun, 1988).

Os valores medidos ao longo do perfil são desenhados de acordo com a Figura 5. Nela, as posições do **transmissor (AB)** e do **receptor (MN)** são indicadas pelo primeiro e pelo segundo número, respectivamente. A Figura 5 mostra que a posição do transmissor está relacionada a uma linha que parte do ponto médio entre os eletrodos de corrente, segundo um ângulo de 45°. Esta linha é interceptada por outras, também com inclinações de 45°, partindo do ponto médio de cada par de eletrodos de potencial. Os valores medidos pelo **receptor**, nas diferentes posições, são colocados nas interseções entre as linhas inclinadas. Observe que os pontos assim desenhados situam-se abaixo da metade da distância entre os pontos médios **transmissor-receptor** ao longo da linha do levantamento. Note também que a profundidade destes pontos aumenta na medida em que a separação **transmissor-receptor** também aumenta. Entretanto, não existe uma relação direta entre estes pontos e o posicionamento das fontes de *IP*, embora se espera que os sinais das fontes profundas reflitam-se nas leituras onde a separação **transmissor-receptor** seja maior.

A Figura 6 mostra os pontos de leitura (interseções), a partir de posições sucessivas do transmissor. Para cada posição do transmissor, o procedimento ilustrado na Figura 5 é repetido (Figura 6b). Esta forma de apresentação dos dados, denominada **pseudoseção**, permite que os valores de *IP* sejam contornados, como esquematizado na Figura 6c, gerando uma imagem da posição relativa das fontes. Entretanto, como referido, tais contornos não refletem o posicionamento real das fontes de *IP*, mas uma aproximação de onde, ao longo do perfil, uma determinada fonte pode estar situada e se a mesma é relativamente rasa ou profunda. É usual nos levantamentos de *IP* também representar simultaneamente e da mesma forma, os valores da **resistividade aparente**.

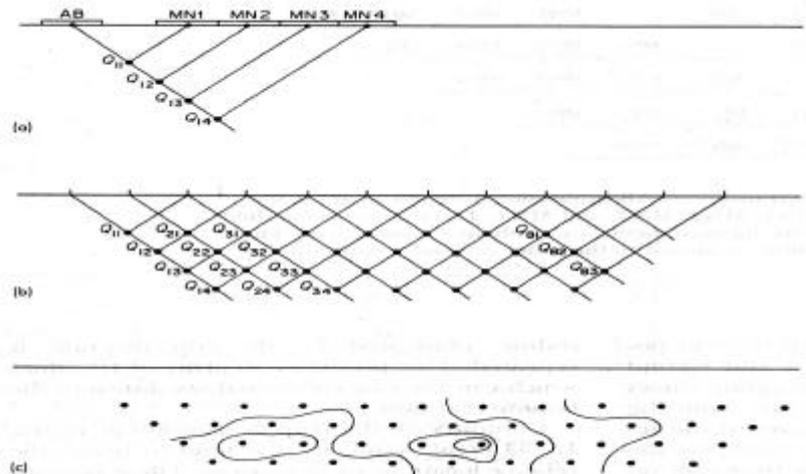


Figura 6 – Representação de uma **pseudoseção** de medidas de um caminhamento elétrico, indicando a posição relativa de zonas que produzem potenciais induzidos. (a) cada medida **Q** é colocada nas interseções de linhas inclinadas segundo  $45^\circ$ , a partir dos pontos médios do **transmissor** e do **receptor**. Para posições sucessivas do **receptor**, considerando uma posição fixa do **transmissor**, os valores são indicados como  $Q_{11}$ ,  $Q_{12}$ ,  $Q_{13}$ ,  $Q_{14}$ , etc., todos dispostos ao longo da linha que parte do ponto médio do transmissor. (b) deslocando o transmissor sucessivamente e repetindo o procedimento, é possível desenhar os valores de **Q** em intervalos iguais ao longo de um conjunto de linhas paralelas dispostas segundo ângulos de  $45^\circ$  a partir da posição do transmissor. (c) os valores de **Q** podem ser contornados e interpretados no sentido de identificar as posições relativas das fontes de **IP** (adaptado de Robinson & Corun, 1988).

#### IV.2 Arranjo Schlumberger (Sondagem Elétrica Vertical - SEV)

O arranjo **Schlumberger** é indicado na Figura 7:

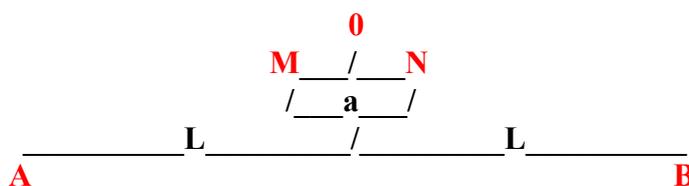


Figura 7 – Configuração do Arranjo Schlumberger

Neste tipo de arranjo (Figura 7 e Foto 3), enquanto os eletrodos de corrente **A** e **B** apresentam uma separação crescente (**L**), em relação ao centro do arranjo (**O**), os eletrodos de potencial **M** e **N** permanecem fixos durante o desenvolvimento do ensaio. A idéia básica deste arranjo é fazer com que a distância **a**, que separa os eletrodos **M** e **N**, tenda a zero em relação à distância crescente entre os eletrodos de corrente **A** e **B**. O erro resultante deste tipo de arranjo é insignificante e, para minimizá-lo, adota-se a seguinte relação: **MN** menor ou igual a **AB/5**.

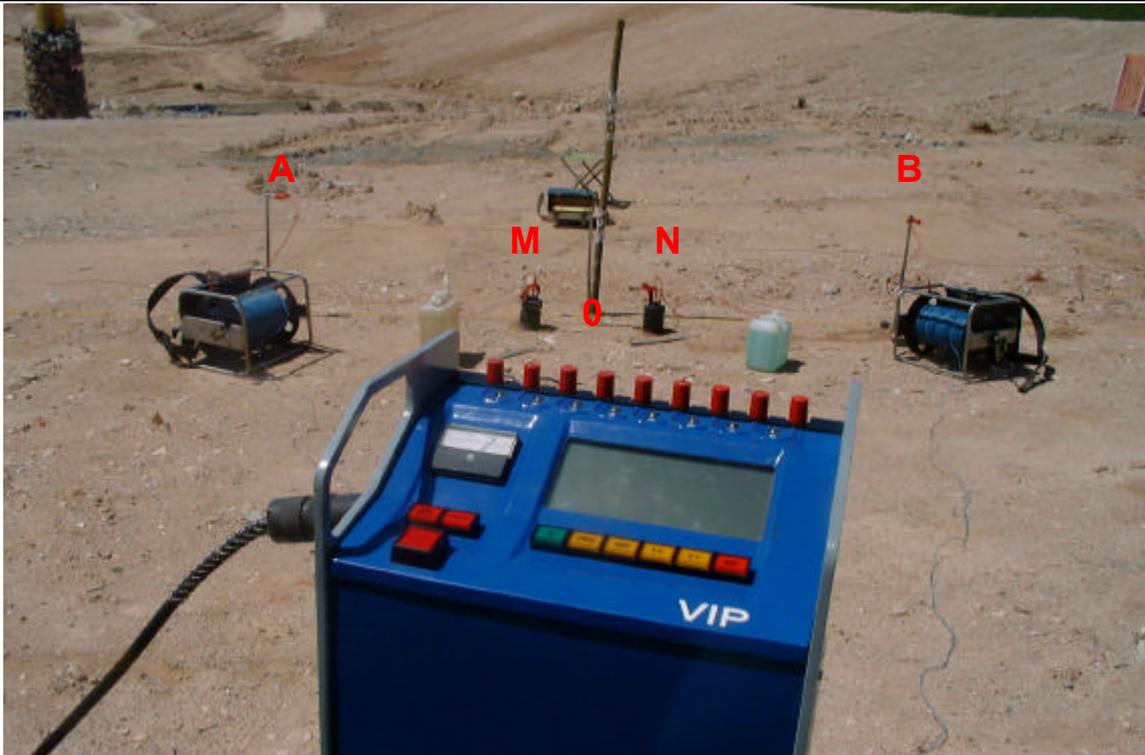


Foto 3 – Transmissor de corrente (primeiro plano) e disposição do arranjo Schlumberger.

A medida em que se aumenta a distância entre os eletrodos de corrente **A** e **B**, o volume total da subsuperfície investigada também aumenta, permitindo alcançar camadas cada vez mais profundas. Assim, os resultados obtidos estarão relacionados com as resistividades e/ou cargabilidades aparentes com a profundidade.

Os dados destes parâmetros físicos, assim obtidos, através de cada sondagem elétrica vertical (**SEV**), são representados por meio de curvas bilogárítmicas em função das distâncias entre os eletrodos correspondentes. No caso do arranjo Schlumberger, as resistividades aparentes ( $r_a$ , em **Ohm.m**) são plotadas nas ordenadas e as distâncias **AB/2** ( em metros) nas abcissas.

A profundidade de investigação de uma **SEV** é governada, principalmente, pelo espaçamento entre os eletrodos de corrente (**A** e **B**), podendo ser considerada, na prática, como igual à **AB/4**. Entretanto tal profundidade é uma estimativa para efeito de planejamento, uma vez que a mesma é dependente dos valores da resistividade e da disposição geométrica das camadas subsuperficiais.

A interpretação das curvas obtidas no campo é procedida automaticamente, através de *software* de inversão 1-D específico, obtendo-se as denominadas colunas geoeletricas, nas quais são indicadas as resistividades e profundidades verdadeiras das camadas. É fundamental, entretanto, que tais resultados sejam compatibilizados com os dados geológicos para que se obtenha uma interpretação segura. A ambigüidade na interpretação das SEVs pode resultar em modelos geoeletricos que não correspondam fielmente à geologia de subsuperfície, uma vez que camadas geologicamente distintas podem apresentar a mesma resistividade, ou, por outro lado, é possível que uma mesma camada indique mais de um nível de resistividade. Ressalte-se que a zona não saturada,

constituída por um ou mais tipos litológicos, é considerada um estrato geoeletrico. Finalmente as rochas de mesma natureza (litologia), apresentam resistividades que são influenciadas pela porosidade, conteúdo de água dos poros, condutividade, tamanho dos grãos, grau de compactação, metamorfismo, efeitos tectônicos, etc., aspectos estes que devem ser considerados na interpretação.

## V Aquisição dos dados geofísicos

Os equipamentos utilizados na aquisição dos dados de resistividade aparente ( $r_a$ ) e de cargabilidade global aparente ( $M_a$ ), são de última geração tecnológica e incluem um sistema completo de polarização induzida e resistividade, fabricado pela *Iris Instruments*, o qual é composto por um transmissor de alta potência (VIP3000W), alimentado por um gerador Honda (EM5000S) e um receptor multicanal/espectral (ELREC 10). Este sistema pode operar com dez níveis de investigação, além de permitir a coleta complementar de parâmetros espectrais como a cargabilidade verdadeira ( $M_{cc}$ ) e a constante de tempo ( $t$ ), utilizando o modelo Cole-Cole (Cole-Cole, 1941).

## VI Resultados Obtidos

Os dados geoeletricos coletados, processados e interpretados neste Projeto, utilizando as técnicas de caminamento elétrico/IP (imageamento elétrico 2-D/IP) e sondagem elétrica vertical (SEV/IP), foram os seguintes: a) caminamento elétrico/IP – linhas L1 (figuras 8 e 9) e L2 (figuras 10 e 11); b) sondagem elétrica vertical/IP - SEV-1, SEV-2, SEV-3, SEV-4, SEV-5, SEV-6, SEV-7, SEV-8, SEV-9, SEV-10, SEV-11 (figuras 12 a 22), cujos resultados serão discutidos a seguir.

O processamento dos dados geofísicos foi realizado em ambiente computacional através dos seguintes *software*: *Geosoft Oasis Montaj*<sup>TM</sup> e *Geosoft/Interpex Zonge 2-D Inversion for Interactive*<sup>TM</sup> IP, para os dados de caminamento elétrico/IP, e *IPI2Win* relativo aos dados de sondagem elétrica vertical/IP.

Os resultados dos caminamentos elétricos, por linha, e das sondagens elétricas verticais, por unidade, são apresentados da seguinte forma, respectivamente:

- Pseudoseções de resistividade aparente ( $r_a$ ) e cargabilidade total aparente ( $M_a$ ) e modelos de profundidade da resistividade verdadeira e da cargabilidade verdadeira correspondentes (figuras 8, 9, 10 e 11);
- Curvas de resistividade aparente ( $r_a$ ) e cargabilidade total aparente ( $M_a$ ), *versus* AB/2 (m), e modelos de profundidade correspondentes (figuras 12 a 22).

## VI.1 Caminhamentos Elétricos/IP (Imageamentos Elétricos/IP 2-D)

• **Linha L1** – As figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, as pseudoseções de resistividade e cargabilidade aparentes e os modelos de profundidade correspondentes. Nota-se na Figura 8 a identificação de baixas resistividades aparentes nos níveis mais superficiais, as quais gradam para valores maiores em profundidade. Já a pseudoseção da cargabilidade global aparente revela índices elevados na maioria dos níveis superficiais e baixos em profundidade, à exceção do segmento entre as estações 850 e 1050 metros (Figura 8). A Figura 9 representa os modelos de profundidade para ambas as variáveis. Observa-se claramente no modelo da resistividade verdadeira, a definição de um estrato superficial de baixa resistividade, o qual foi interpretado como resposta do conjunto solo-regolito (melhor detalhado na SEV-1, Figura 12), *versus* níveis profundos com maiores valores, interpretados como resposta do embasamento cristalino resistivo. Assinale-se também que a interrupção dos níveis superficiais de baixas resistividades verdadeiras, em torno da estação 750 metros, foi interpretada como uma fratura percolada por água, a qual se reflete também na seção do modelo de cargabilidade verdadeira (Figura 9). Nesta última seção verifica-se a presença de cobertura argilosa com polarização de membrana, a qual corresponde ao conjunto solo-regolito, enquanto o corpo polarizável localizado em torno da estação 1000, deve corresponder à disseminação fraca de minerais polarizáveis, provavelmente sulfetos e/ou magnetita. As zonas de baixa cargabilidade (tonalidades azuis), devem refletir locais com armazenamento de água. Tal comportamento pode ser bem visualizado na curva de cargabilidade aparente da Figura 12, a qual exibe incremento desta variável, a partir da superfície, decaindo a partir de  $AB/2$  em torno de 20 metros.

• **Linha L2** - As figuras 10 e 11 apresentam, respectivamente, as pseudoseções de resistividade e cargabilidade aparentes e os modelos de profundidade correspondentes. As pseudoseções da Figura 10 mostram um comportamento semelhante aquele observado na Figura 8. Já os modelos de profundidade da Figura 10 mostram também níveis superficiais de baixa resistividade e alta cargabilidade (polarização de membrana), cuja interrupção, do mesmo modo, foi interpretada como zonas fraturas. É interessante observar que os dois núcleos profundos de altas resistividades, separados por uma fratura, se refletem distintamente no modelo de cargabilidade da Figura 11, ou seja, baixas cargabilidades entre a estação 650 metros e o término setentrional do modelo, *versus* cargabilidades moderadas entre aquela estação e o extremo meridional do modelo. Tal contraste pode ser explicado pelo maior percentual de minerais polarizáveis do segmento setentrional, o que muitas vezes não se reflete em termos de resistividade.

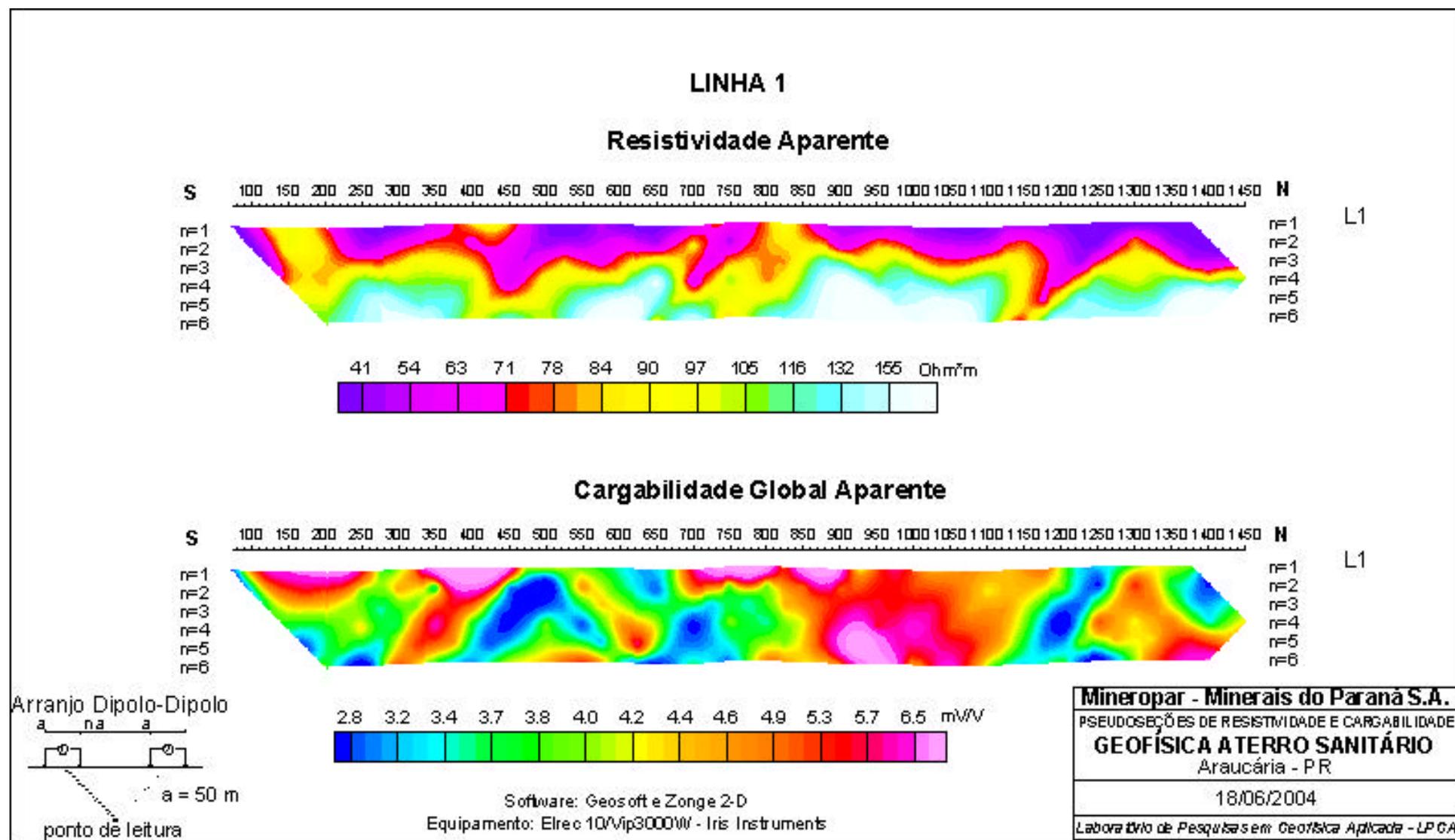


Figura 8 – Pseudoseções de resistividade e cargabilidade aparentes da Linha L1

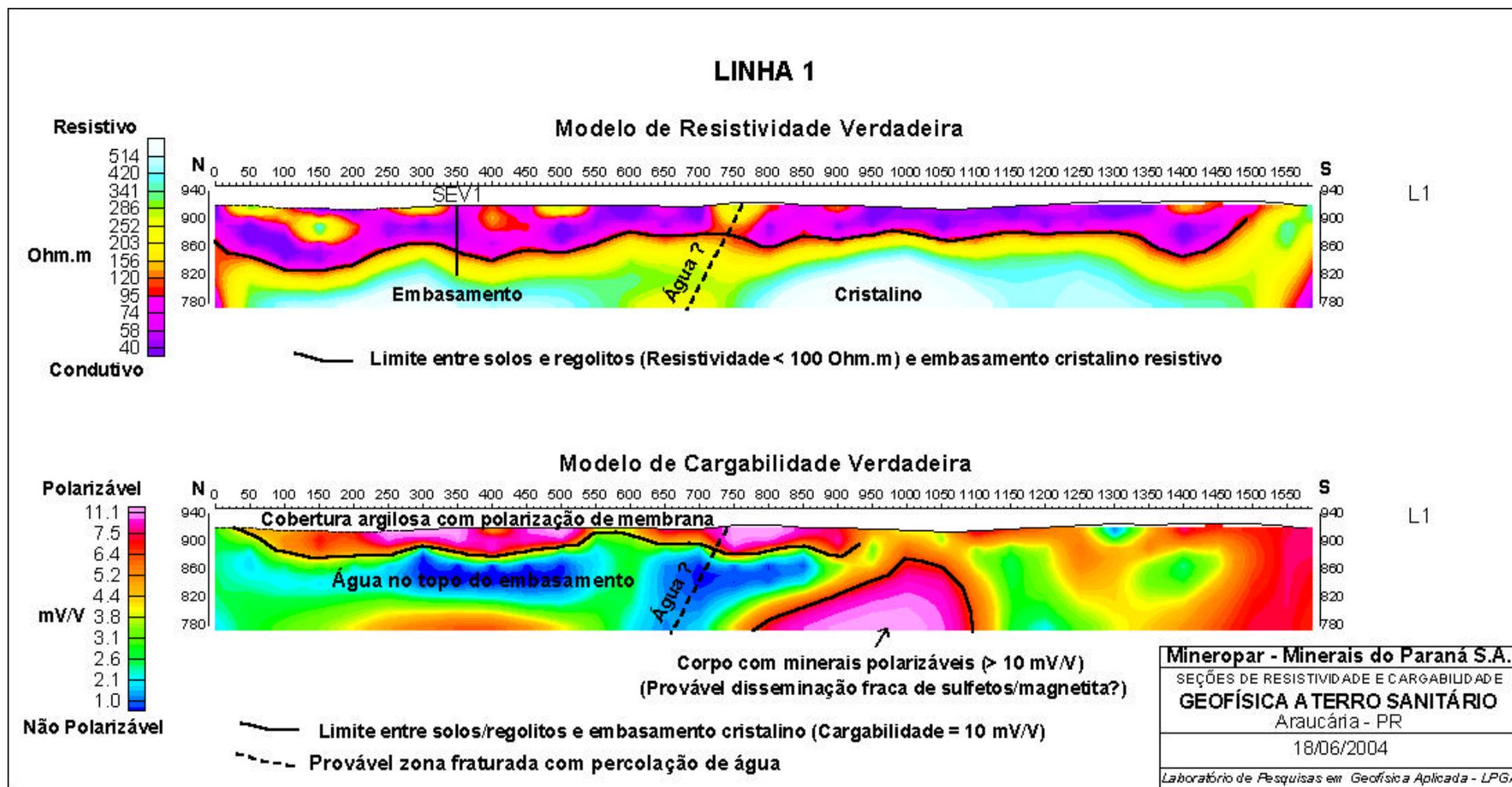


Figura 9 – Seções dos modelos de resistividade e cargabilidade verdadeiras da Linha L1

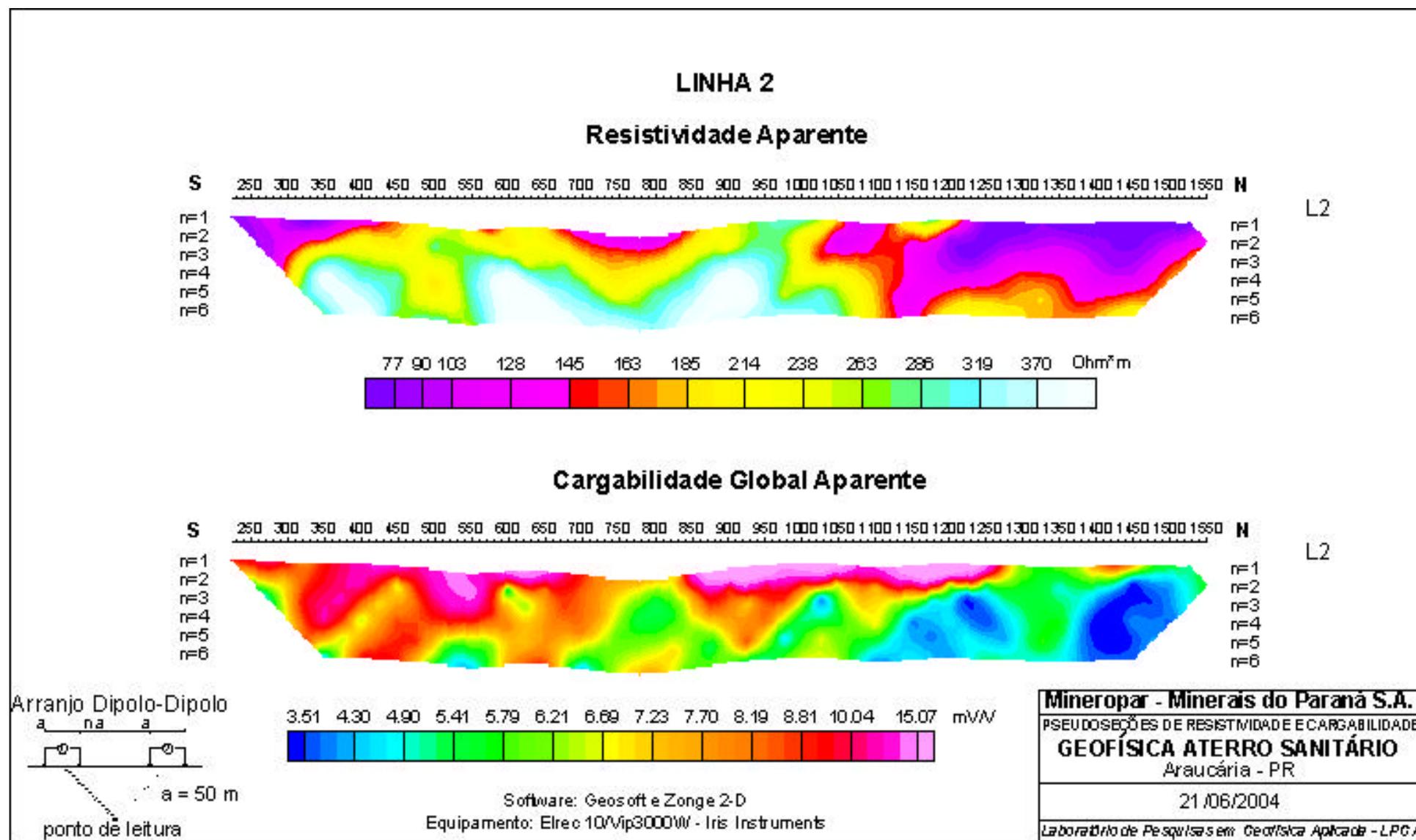


Figura 10 – Pseudoseções de resistividade e cargabilidade aparentes da Linha L2

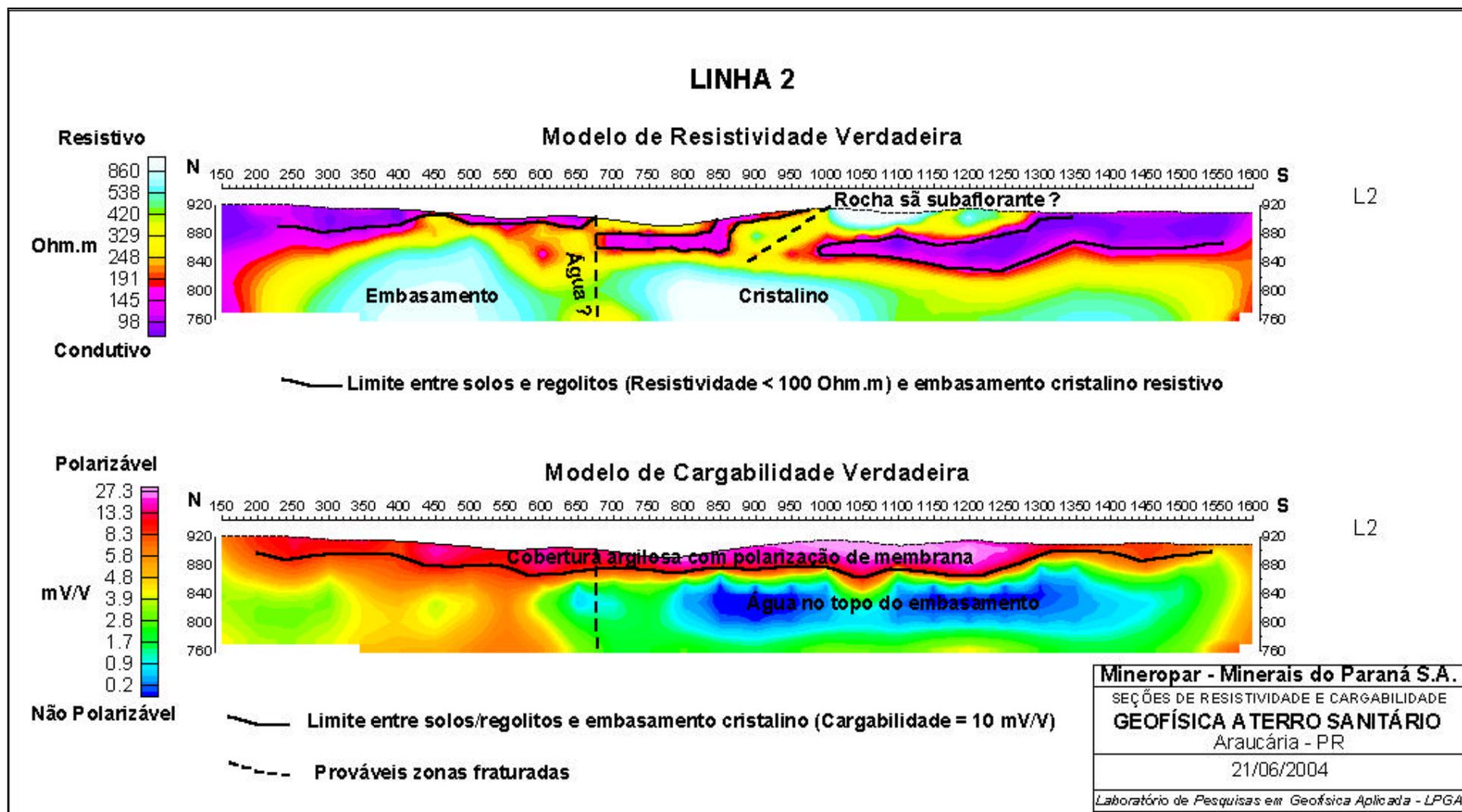


Figura 11 – Seções dos modelos de resistividade e cargabilidade verdadeiras da Linha L2

## VI.2 Sondagens Elétricas Verticais (SEVs/IP)

A descrição e a interpretação das sondagens elétricas verticais (SEVs) e das curvas de cargabilidade aparente (IP), adquiridas simultaneamente, serão feitas a seguir, de acordo com as figuras 12 a 22.

Como se pode observar nas figuras 12 a 22, o comportamento das SEVs e das curvas de cargabilidade aparente são muito semelhantes, refletindo a homogeneidade geológica da área investigada. Em todas as figuras mencionadas, as SEVs foram interpretadas geofísica e geologicamente, do que resultaram: 1) detalhamento geológico dos estratos superficiais, incluindo o início do lençol freático e o topo da rocha sã (coluna camadas); 2) resistividades verdadeiras das camadas definidas em (1); e espessuras/profundidades das camadas definidas em (1). O detalhamento geológico permitiu a definição das seguintes camadas/estratos geoeletricos: solo parcialmente saturado, solo não saturado, início do lençol freático, solo + regolito e topo da rocha sã.

A Tabela abaixo resume, de forma integrada e aproximada, os resultados obtidos:

	SEV-1	SEV-2	SEV-3	SEV-4	SEV-5	SEV-6	SEV-7	SEV-8	SEV-9	SEV-10	SEV-11
<b>RESIST. (Ohm.m)</b>											
<b>Sol. parc. saturado</b>	216	104 <sup>#</sup>	204	130 <sup>#</sup>	215 <sup>#</sup>	175 <sup>#</sup>	110 <sup>#</sup>	218	114 <sup>#</sup>	119 <sup>#</sup>	115 <sup>#</sup>
<b>Solo não saturado</b>	1576	395	---	---	---	994	2000	---	713	209	407
<b>Lençol freático</b>	66	120	32	25	96	71	77	44	59	43	110
<b>Solo+regol. satur.</b>	66	33	32 <sup>##</sup>	25 <sup>##</sup>	31 <sup>##</sup>	71 <sup>##</sup>	77	44 <sup>##</sup>	59 <sup>##</sup>	43 <sup>##</sup>	110 <sup>##</sup>
<b>Topo da rocha sã</b>	68236	45911	290	21338	39524	1603	57258	24388	19105	4557	4091
<b>ESP./PROF.(m)</b>											
<b>Sol. parc. saturado</b>	0-4	0-1 <sup>#</sup>	0-7	0-3 <sup>#</sup>	0-4 <sup>#</sup>	0-2 <sup>#</sup>	0-1 <sup>#</sup>	0-5	0-2 <sup>#</sup>	0-1 <sup>#</sup>	0-1 <sup>#</sup>
<b>Solo não saturado</b>	4-6	7-5	---	---	---	2-8	1-2	---	2-4	1-12	1-18
<b>Lençol freático</b>	6	5	7	3	4	8	2	5	4	12	18
<b>Solo+regol. satur.</b>	6-92	5-58	7-19 <sup>##</sup>	3-34 <sup>##</sup>	4-44 <sup>##</sup>	8-43 <sup>##</sup>	2-74 <sup>##</sup>	5-63 <sup>##</sup>	4-41 <sup>##</sup>	12-24 <sup>##</sup>	18-36 <sup>##</sup>
<b>Topo da rocha sã</b>	92	58	19	34	44	43	74	63	41	24	36
<b>ERRO (%)</b>	3	5	7	6	4	4	5	4	7	3	3

<sup>#</sup> solo saturado; <sup>##</sup> solo + regolito com água;

Os solos saturados ou parcialmente saturados mostraram resistividades verdadeiras entre 104 (SEV-2) e 218 (SEV-8) Ohm.m, média de 156 Ohm.m, enquanto os solos não saturados, identificados apenas nas SEV-1, SEV-2, SEV-6, SEV-7, SEV-9, SEV-10 e SEV-11, exibiram resistividades verdadeiras entre 209 (SEV-10) e 2.000 (SEV-7) Ohm.m, média de 899 Ohm.m.

As resistividades verdadeiras do topo do lençol freático, diretamente vinculadas às camadas de solo + regolito com água, variaram de 25 (SEV-4) a 120 Ohm.m (SEV-2), média de 68 Ohm.m. Como esperado, as resistividades verdadeiras da rocha sã indicaram valores elevados, sobretudo nas SEV-1, SEV-2, SEV-4, SEV-5, SEV-7, SEV-8 e SEV-9, entre 19.105 (SEV-9) e 68.236 (SEV-1) Ohm.m, média de 39.394 Ohm.m.



Entretanto, foram identificadas resistividades verdadeiras muito baixas para o topo da rocha sã na SEV-3 (290 Ohm.m), sugerindo a possibilidade de existência de fratura com percolação de água, o mesmo podendo ocorrer na SEV-6 (1.603 Ohm.m). Já nas SEV-10 e SEV-11, os valores desta variável, relativos ao topo da rocha sã, foram de 4.557 e 4.091 Ohm.m, respectivamente.

A profundidade máxima dos solos saturados, ou parcialmente saturados, foi de 7 metros (SEV-3), enquanto nas demais sondagens elétricas verticais a profundidade média foi de 2,5 metros. Onde identificados (SEV-1, SEV-2, SEV-6, SEV-7, SEV-9, SEV-10 e SEV-11), as espessuras dos solos não saturados foram as seguintes: 1,0 metro (SEV-7), 2,0 metros (SEV-1, SEV-2 e SEV-9), 6,0 metros (SEV-6), 11,0 metros (SEV-10) e 17 metros (SEV-11).

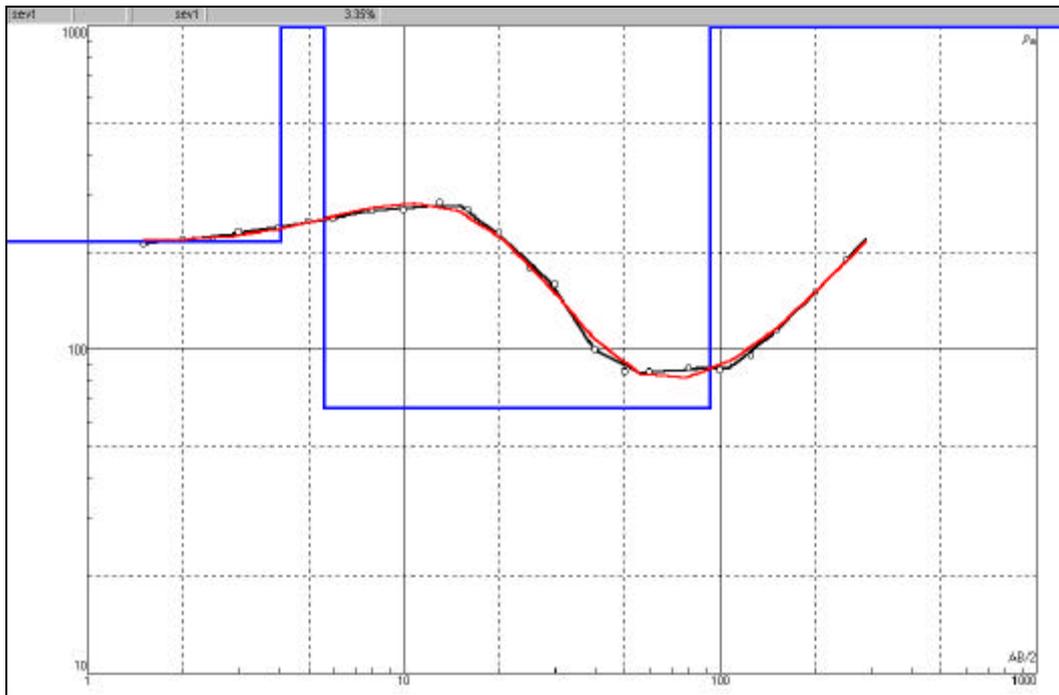
As profundidades máximas do topo do lençol freático foram registradas nas SEV-11 (18 metros) e SEV-10 (12 metros), enquanto nas demais as profundidades oscilaram entre 2,0 e 8,0 metros, média de 4,9 metros.

A profundidade máxima do topo da rocha sã foi registrada na SEV-1 (92 metros) e a mínima na SEV-3 (19 metros), enquanto a média das demais foi de 46 metros.

Finalmente, o erro médio do ajuste entre os dados observados e calculados foi de 4,6%.

## **VII Considerações Finais**

Os resultados obtidos na presente investigação mostraram que os métodos geofísicos, através das técnicas de caminhamento elétrico/*IP* (2-D) e sondagem elétrica vertical/*IP* (1-D), foram bastante eficazes no delineamento lateral e vertical (profundidade) do manto de alteração (solo + regolito) e das profundidades do lençol freático e do topo da rocha sã.



<b>SEV-1 (Ponto 1)</b>		
CAMADAS	RESISTIVIDADE (Ohm.m)	ESPESSURA/PROF. (m)
Solo parcialmente saturado	216	0 – 4,0
Solo não saturado	1576	4,0 – 5,6
Início do lençol freático	66	5,6
Solo + regolito saturado	66	5,6 – 92,5
Topo da rocha sã	68236	<b>92,5</b> (erro do ajuste = 3,35%)

Curva de Cargabilidade Aparente do Ponto 1

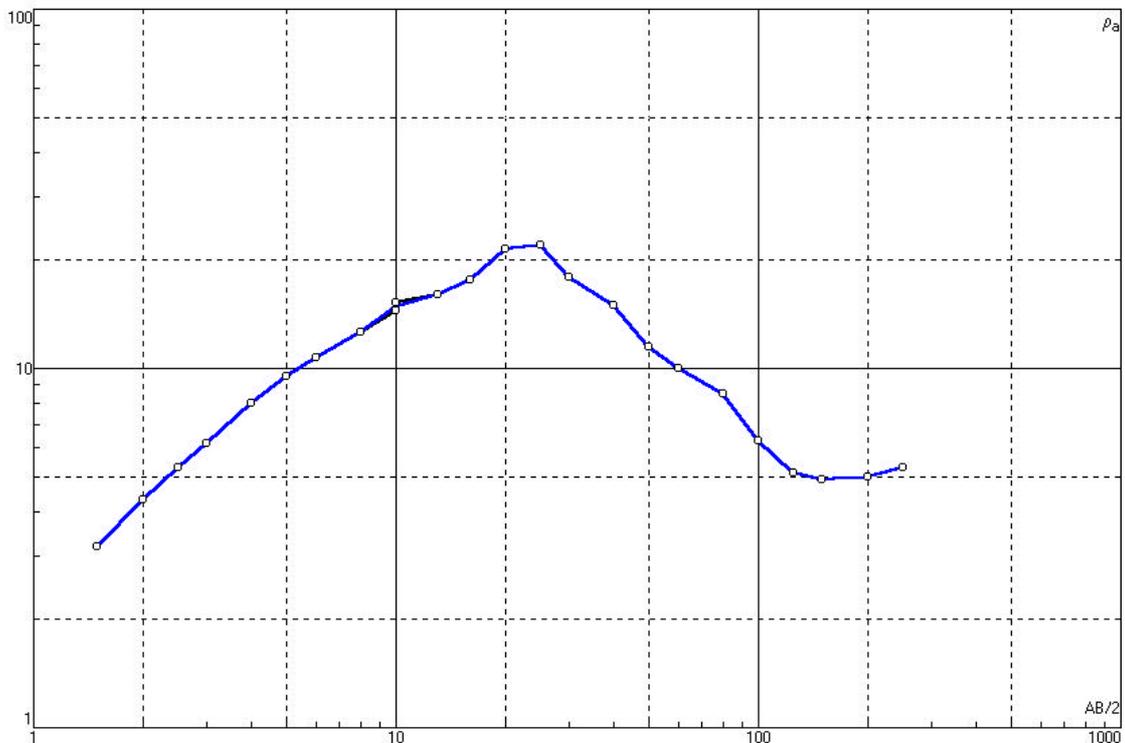
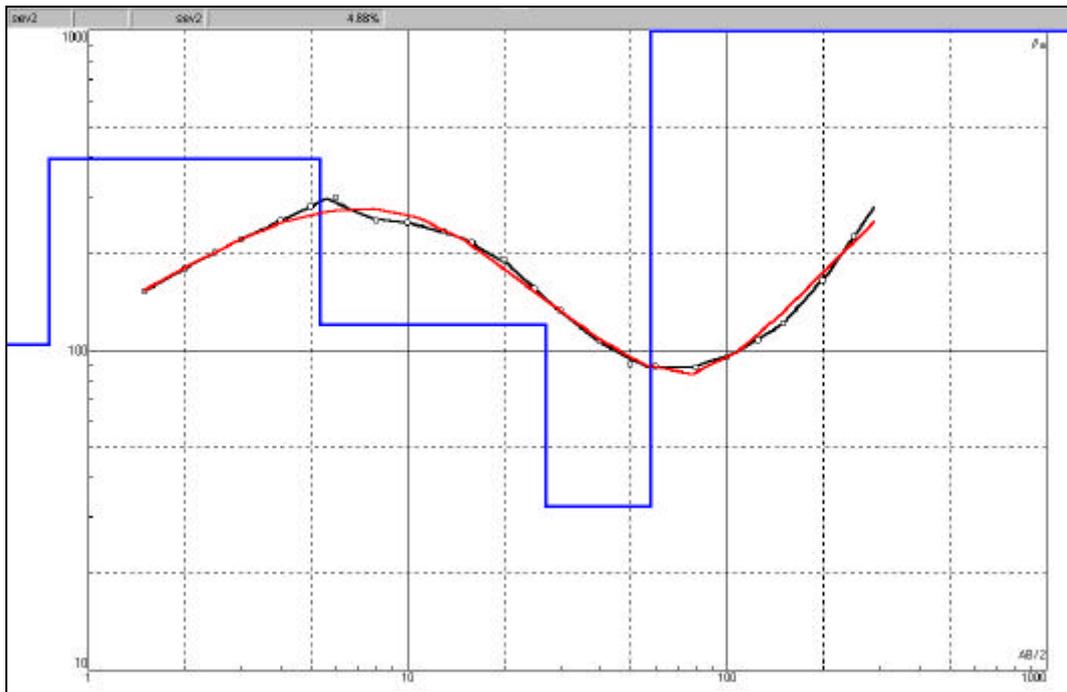


Figura 12 - Sondagem elétrica vertical (SEV-1), sua interpretação geofísico-geológica e a curva de cargabilidade aparente correspondente



**SEV-2 (Ponto 2)**

CAMADAS	RESISTIVIDADE (Ohm.m)	ESPESSURA/PROF. (m)
Solo saturado	104	0 – 0,7
Solo não saturado	395	0,7 – 5,3
Início do lençol freático	120	5,3
Solo + regolito saturado	33	5,3 – 57,7
Topo da rocha sã	45911	57,7 (erro do ajuste = 4,88%)

**Curva de Cargabilidade Aparente do Ponto 2**

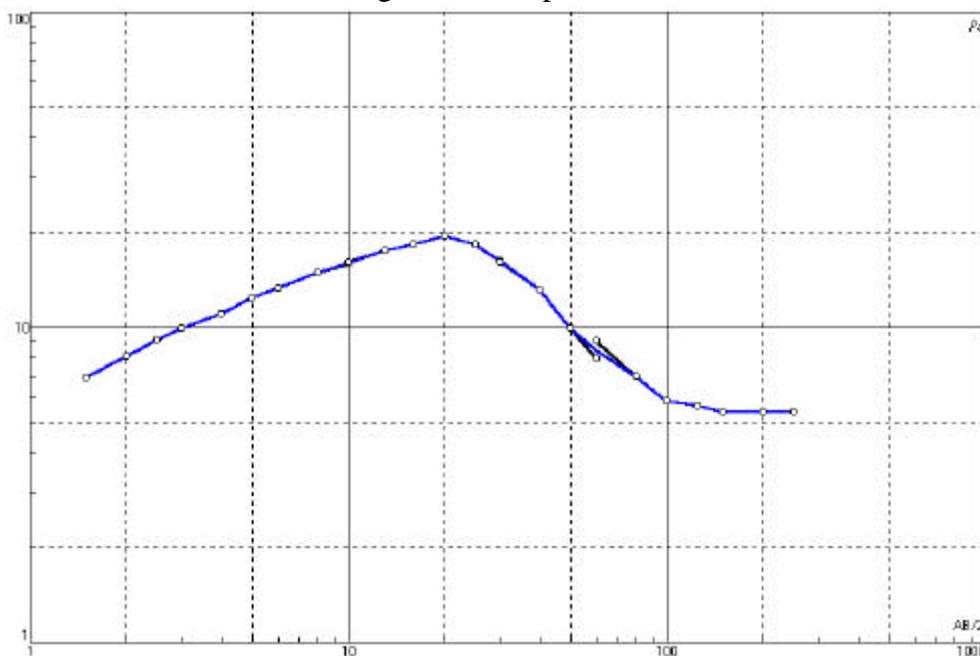
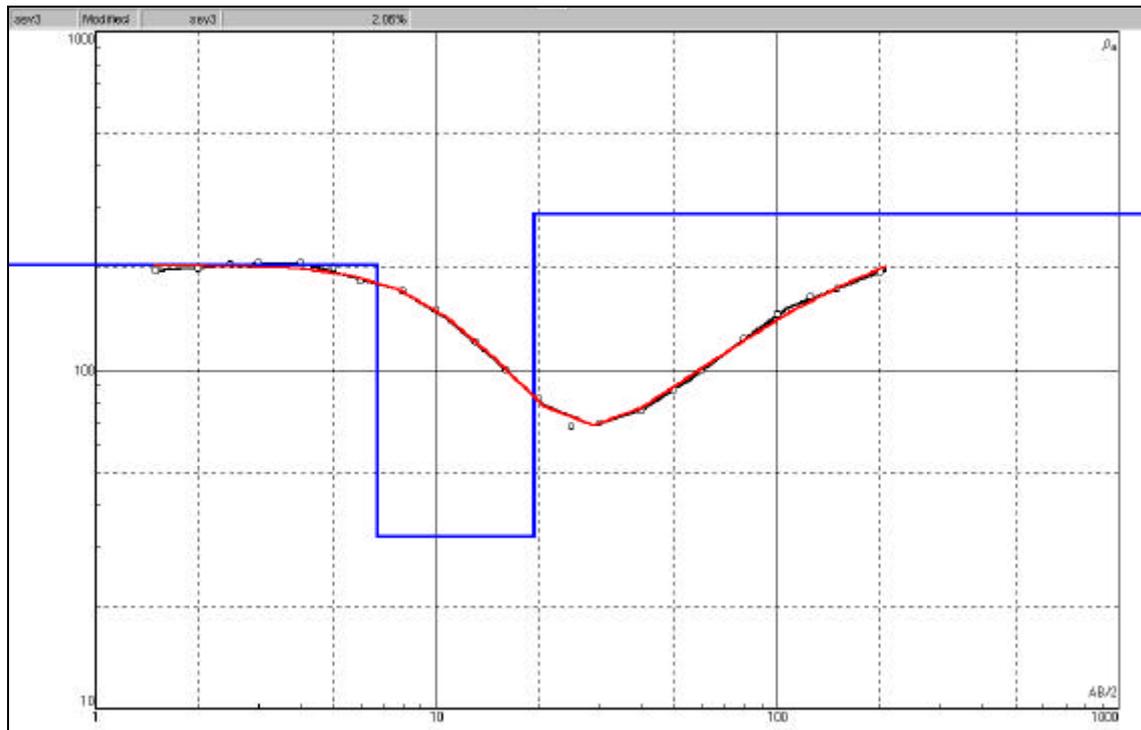


Figura 13 - Sondagem elétrica vertical (SEV-2), sua interpretação geofísico-geológica e a curva de cargabilidade aparente correspondente



SEV-3 (Ponto 3)		
CAMADAS	RESISTIVIDADE (Ohm.m)	ESPESSURA/PROF. (m)
Solo parcialmente saturado	204	0 – 6,7
Início do lençol freático	32,2	6,7
Solo + regolito com água	32,2	6,7 – 19,3
Topo da rocha sã	290	<b>19,3</b> (erro do ajuste = 6,75%)

Curva de Cargabilidade Aparente do Ponto 3

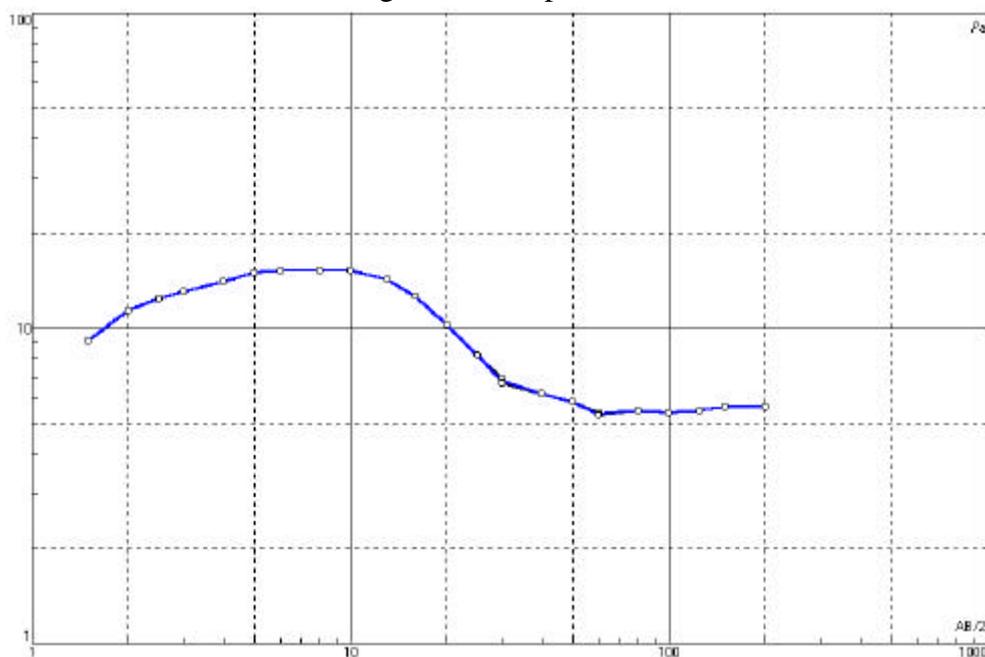
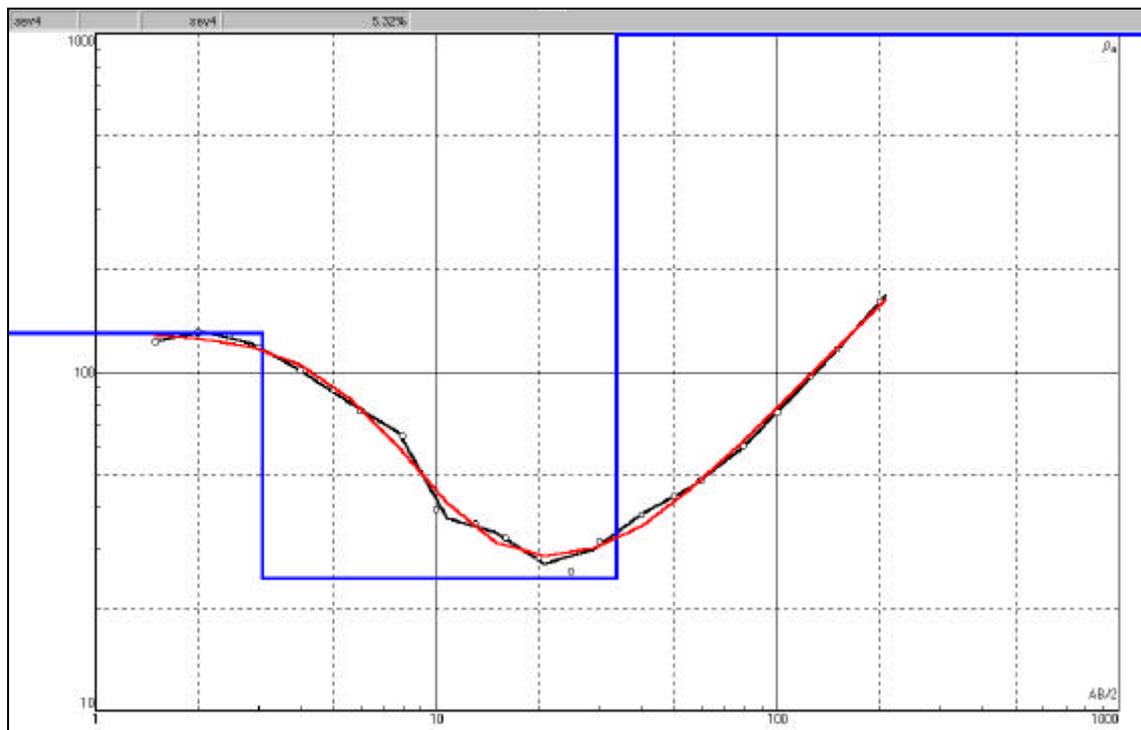


Figura 14 - Sondagem elétrica vertical (SEV-3), sua interpretação geofísico-geológica e a curva de cargabilidade aparente correspondente



**SEV-4 (Ponto 4)**

CAMADAS	RESISTIVIDADE (Ohm.m)	ESPESSURA/PROF. (m)
Solo saturado	130	0 – 3,0
Início do lençol freático	25	3,0
Solo + regolito com água	25	3,0 – 33,6
Topo da rocha sã	21338	<b>33,6</b> (erro do ajuste = 6,07%)

Curva de Cargabilidade Aparente do Ponto 4

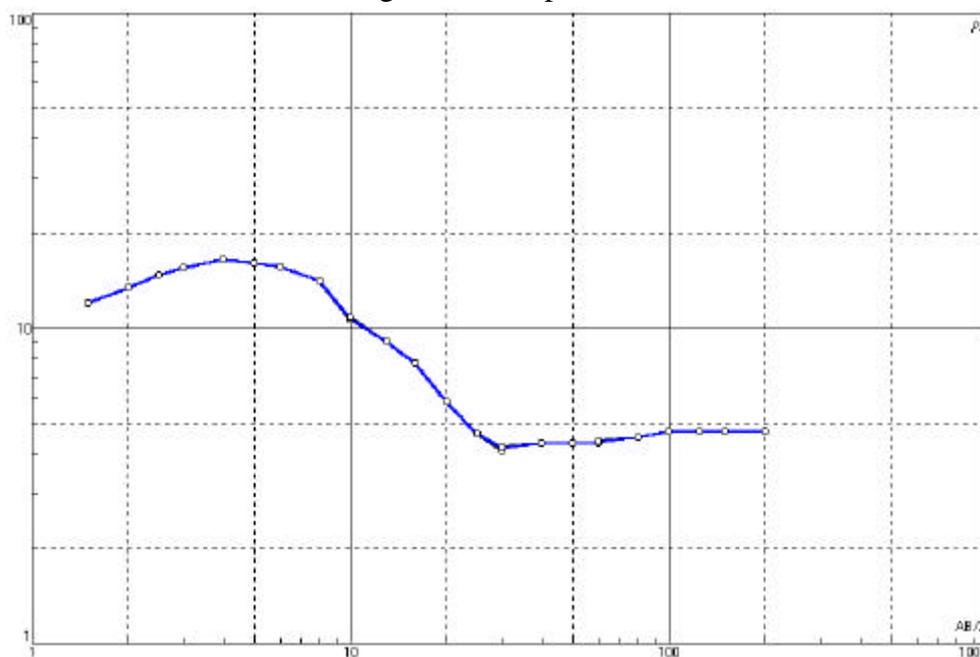
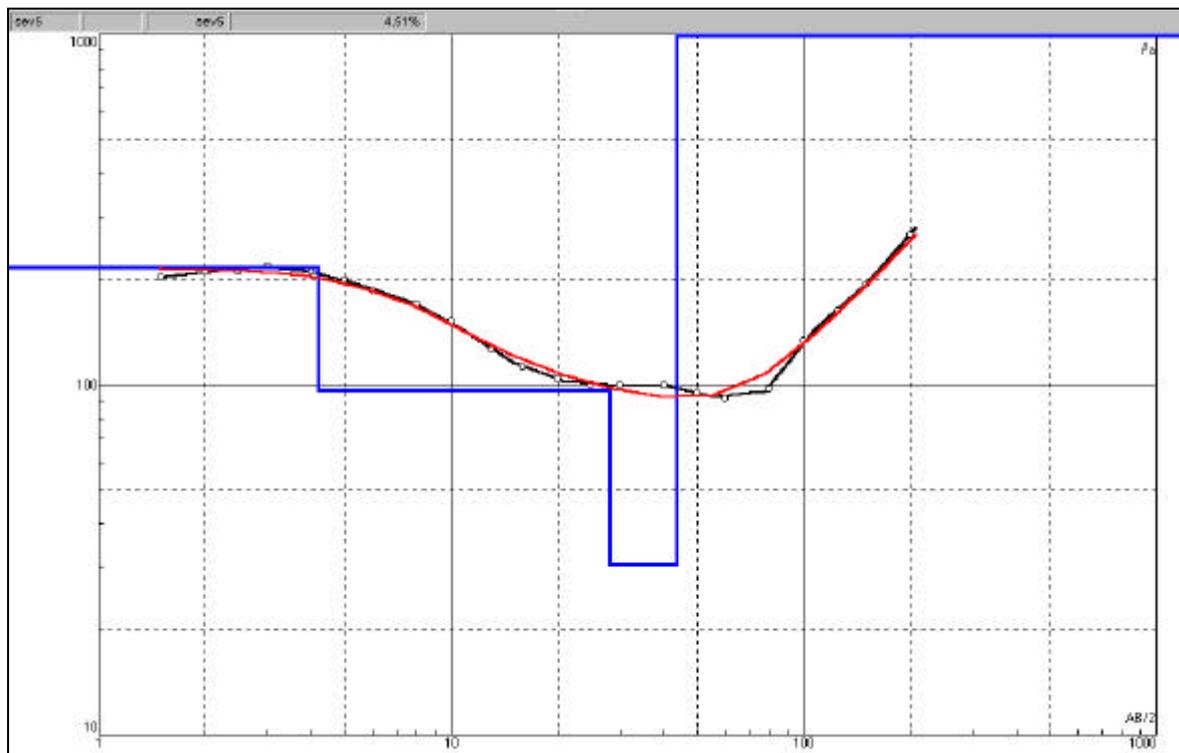


Figura 15 - Sondagem elétrica vertical (SEV-4), sua interpretação geofísico-geológica e a curva de cargabilidade aparente correspondente



SEV-5 (Ponto5)		
CAMADAS	RESISTIVIDADE (Ohm.m)	ESPESSURA/PROF. (m)
Solo saturado	215	0 – 4,2
Início do lençol freático	96	4,2
Solo + regolito com água	31	4,2 – 43,6
Topo da rocha sã	39524	<b>43,6</b> (erro do ajuste = 4,38%)

Curva de Cargabilidade Aparente do Ponto 5

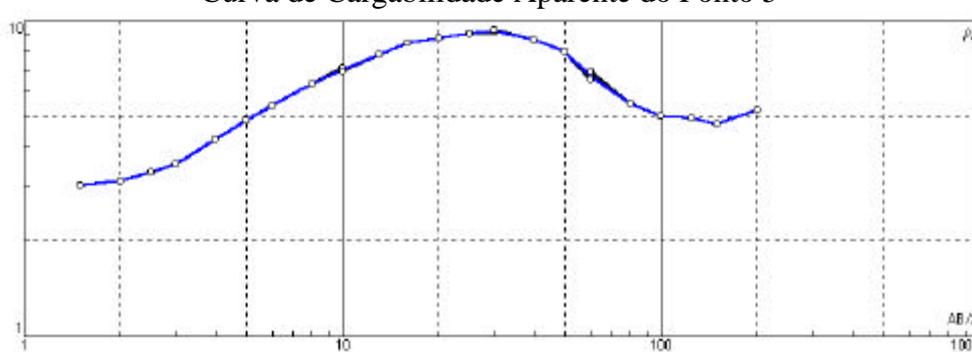
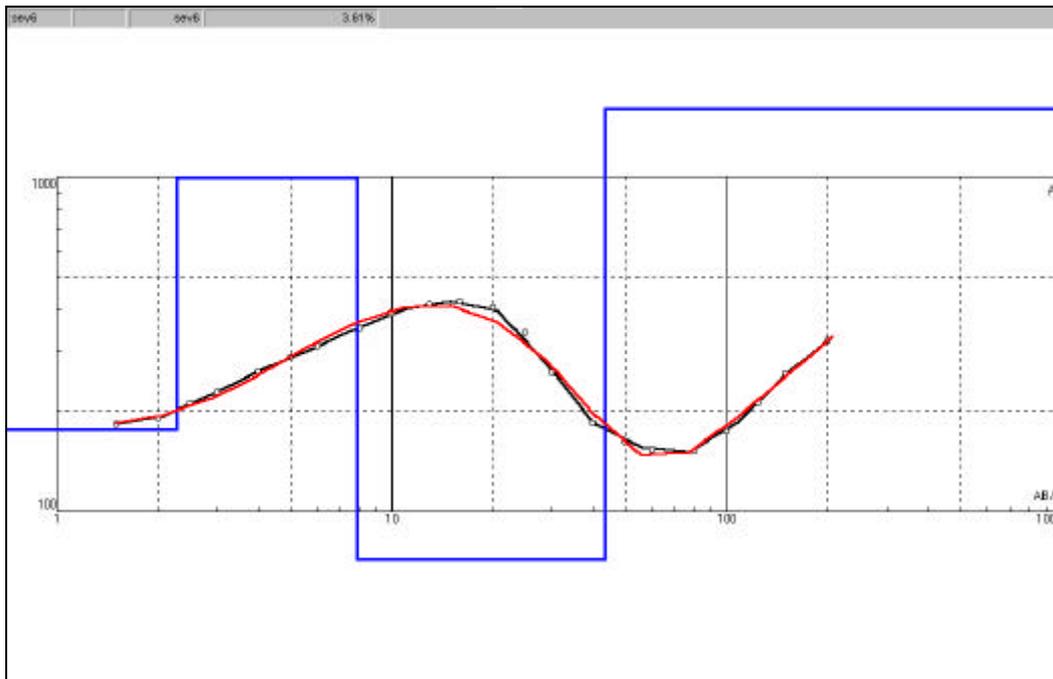


Figura 16 - Sondagem elétrica vertical (SEV-5), sua interpretação geofísico-geológica e a curva de cargabilidade aparente correspondente



<b>SEV-6 (Ponto 6)</b>		
CAMADAS	RESISTIVIDADE (Ohm.m)	ESPESSURA/PROF. (m)
Solo saturado	175	0 – 2,3
Solo não saturado	994	2,3 – 7,8
Início do lençol freático	71,4	7,8
Solo + regolito com água	71,4	7,8 – 43,2
Topo da rocha sã	1603	<b>43,2</b> (erro do ajuste = 3,61%)

Curva de Cargabilidade Aparente do Ponto 6

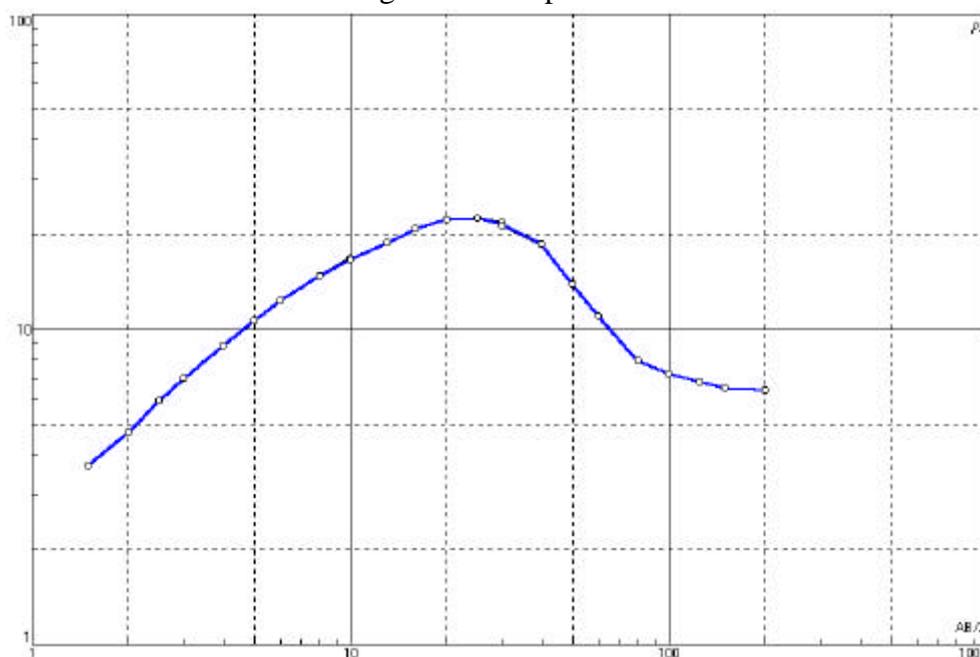
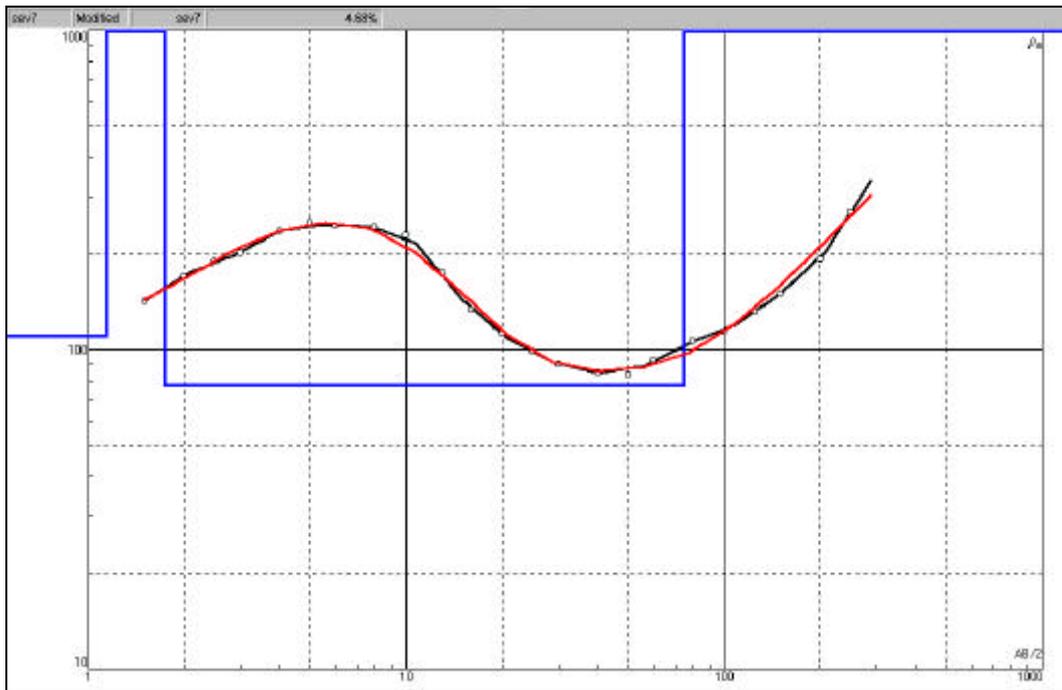


Figura 17 - Sondagem elétrica vertical (SEV-6), sua interpretação geofísico-geológica e a curva de cargabilidade aparente correspondente



SEV-7 (Ponto 7)		
CAMADAS	RESISTIVIDADE (Ohm.m)	ESPESSURA/PROF. (m)
Solo saturado	110	0 – 1,15
Solo não saturado	2000	1,15 – 1,75
Início do lençol freático	77,2	1,75
Solo + regolito com água	77,2	1,75 – 74,5
Topo da rocha sã	57258	<b>74,5</b> (erro do ajuste = 4,68%)

Curva de Cargabilidade Aparente do Ponto 7

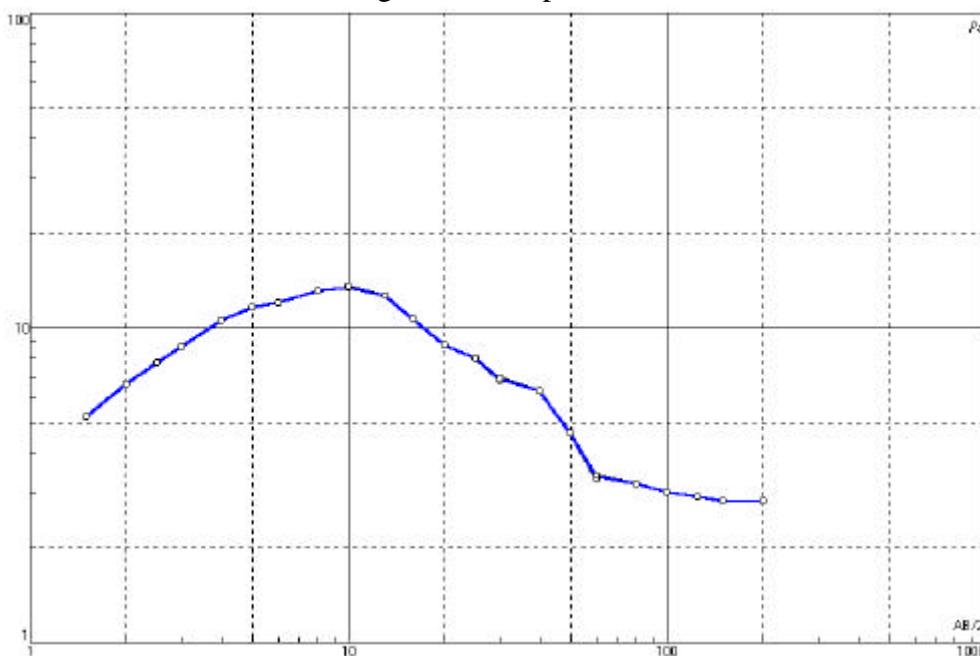
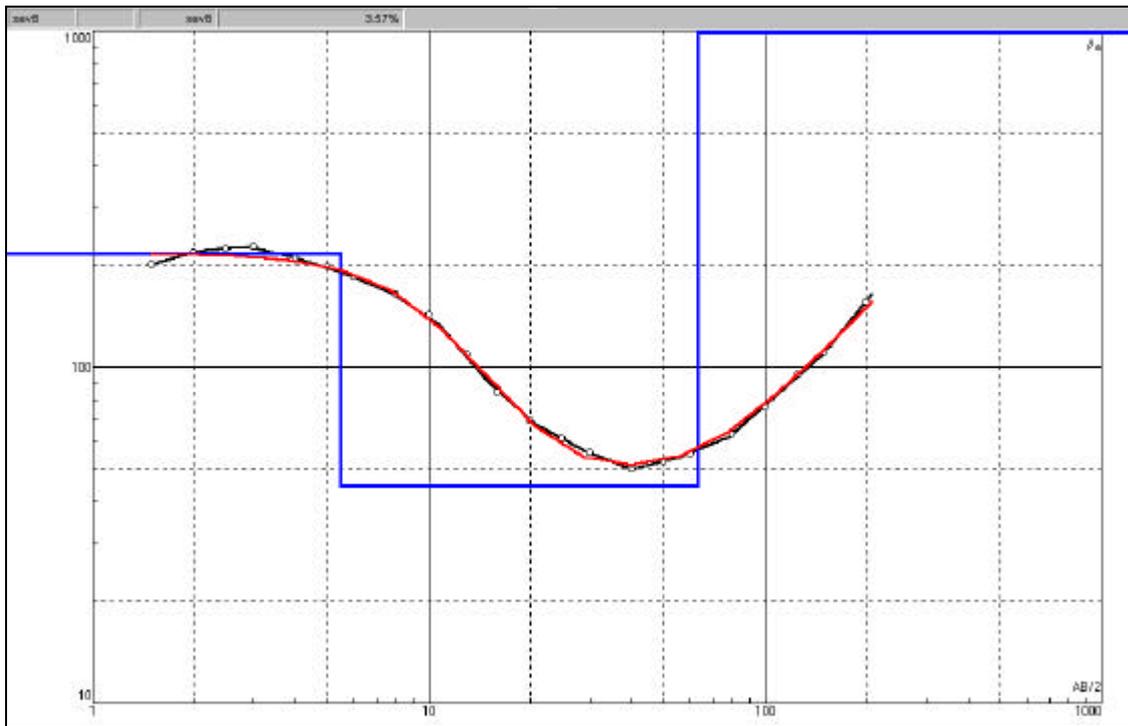


Figura 18 - Sondagem elétrica vertical (SEV-7), sua interpretação geofísico-geológica e a curva de cargabilidade aparente correspondente



SEV-8 (Ponto 8)		
CAMADAS	RESISTIVIDADE (Ohm.m)	ESPESSURA/PROF. (m)
Solo parcialmente saturado	218	0 – 5,5
Início do lençol freático	44,4	5,5
Solo + regolito com água	44,4	5,5 – 63,3
Topo da rocha sã	24388	<b>63,3</b> (erro do ajuste = 3,57%)

Curva de Cargabilidade Aparente do Ponto 8

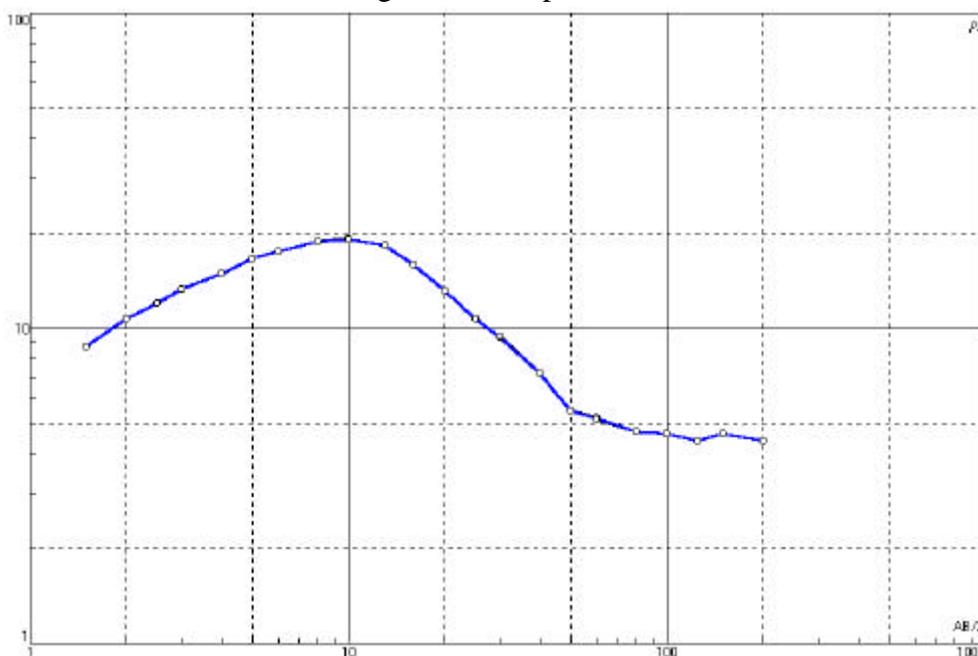
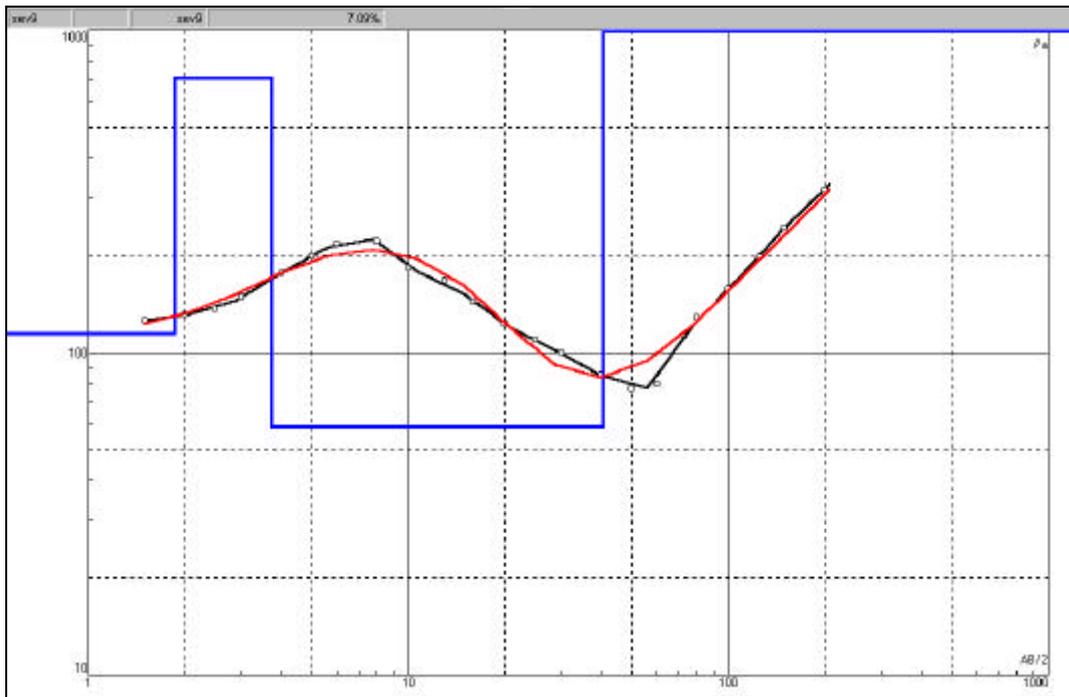


Figura 19 - Sondagem elétrica vertical (SEV-8), sua interpretação geofísico-geológica e a curva de cargabilidade aparente correspondente



SEV-9 (Ponto 9)		
CAMADAS	RESISTIVIDADE (Ohm.m)	ESPESSURA/PROF. (m)
Solo saturado	114	0 – 1,85
Solo não saturado	713	1,85 – 3,75
Início do lençol freático	59,1	3,75
Solo + regolito com água	59,1	3,75 – 40,6
Topo da rocha sã	19105	<b>40,6</b> (erro do ajuste = 7,09%)

Curva de Cargabilidade Aparente do Ponto 9

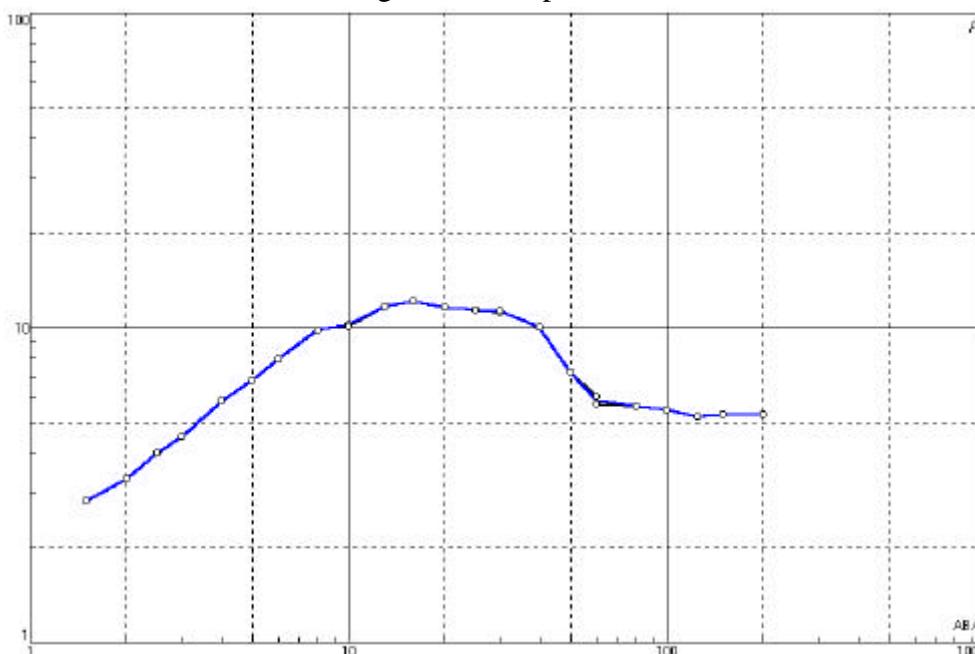
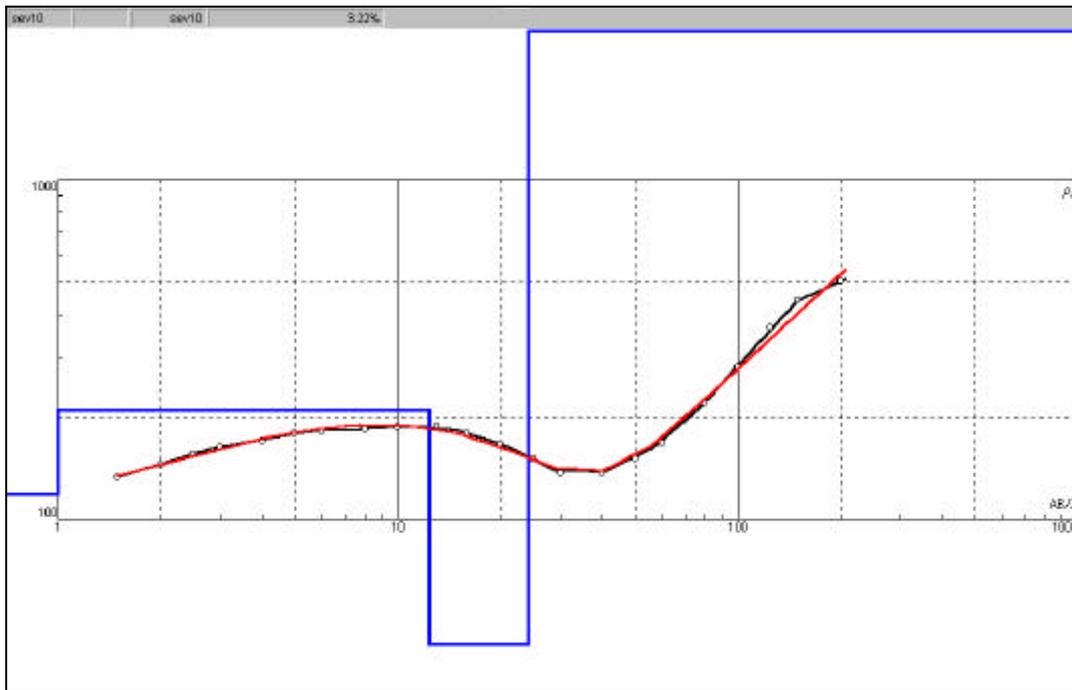


Figura 20 - Sondagem elétrica vertical (SEV-9), sua interpretação geofísico-geológica e a curva de cargabilidade aparente correspondente



**SEV-10 (Ponto 10)**

CAMADAS	RESISTIVIDADE (Ohm.m)	ESPESSURA/PROF. (m)
Solo saturado	119	0 – 1,0
Solo parcialmente saturado	209	1,0 – 12,4
Início do lençol freático	42,8	12,4
Solo + regolito com água	42,8	12,4 – 24,3
Topo da rocha sã	4557	<b>24,3</b> (erro do ajuste = 3,22%)

Curva de Cargabilidade Aparente do Ponto 10

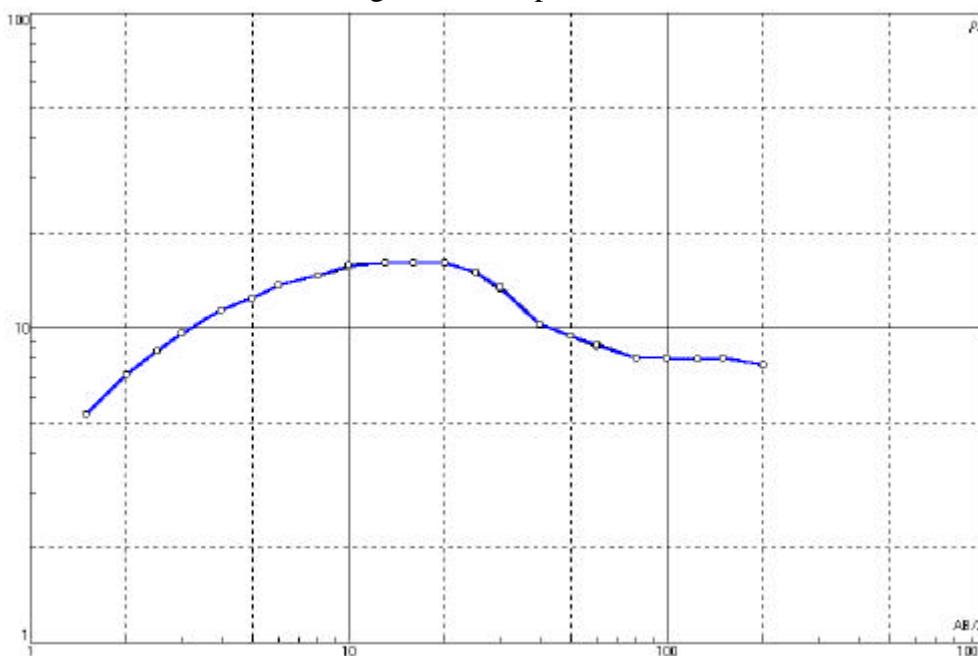
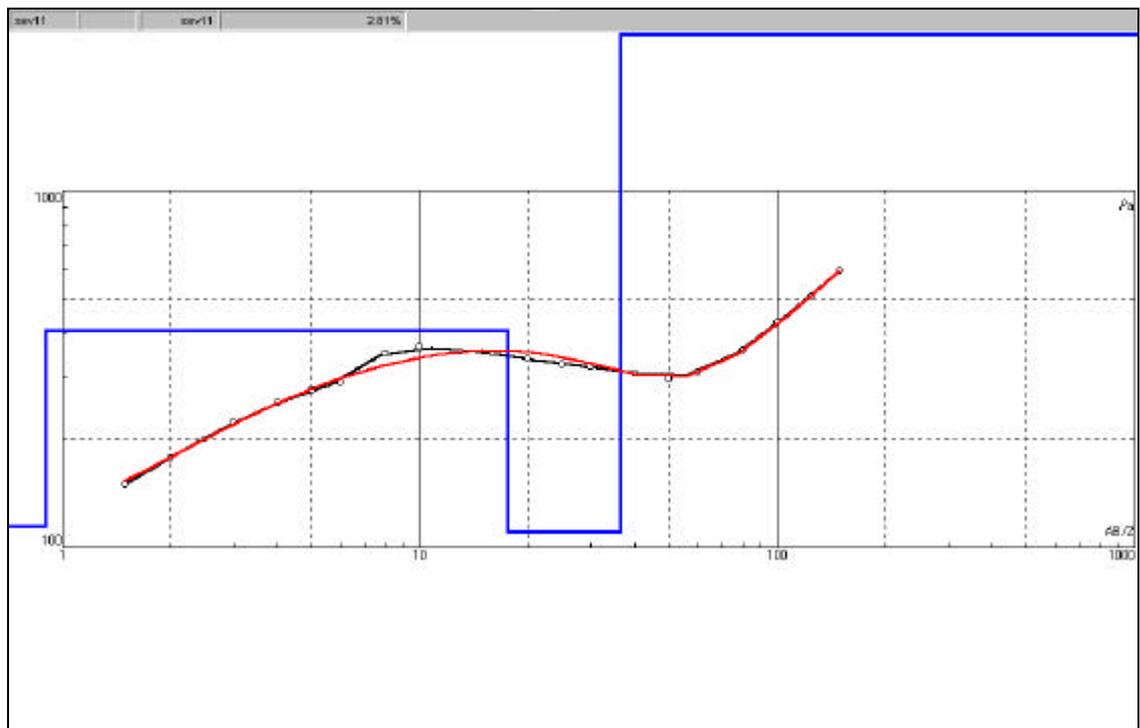


Figura 21 - Sondagem elétrica vertical (SEV-10), sua interpretação geofísico-geológica e a curva de cargabilidade aparente correspondente



**SEV-11 (Ponto 11)**

CAMADAS	RESISTIVIDADE (Ohm.m)	ESPESSURA/PROF. (m)
Solo saturado	115	0 – 1,0
Solo não saturado	407	1,0 – 17,7
Início do lençol freático	110	17,7
Solo + regolito com água	110	17,7 – 36,4
Topo da rocha sã	4061	<b>36,4</b> (erro do ajuste = 2,81%)

Curva de Cargabilidade Aparente do Ponto 11

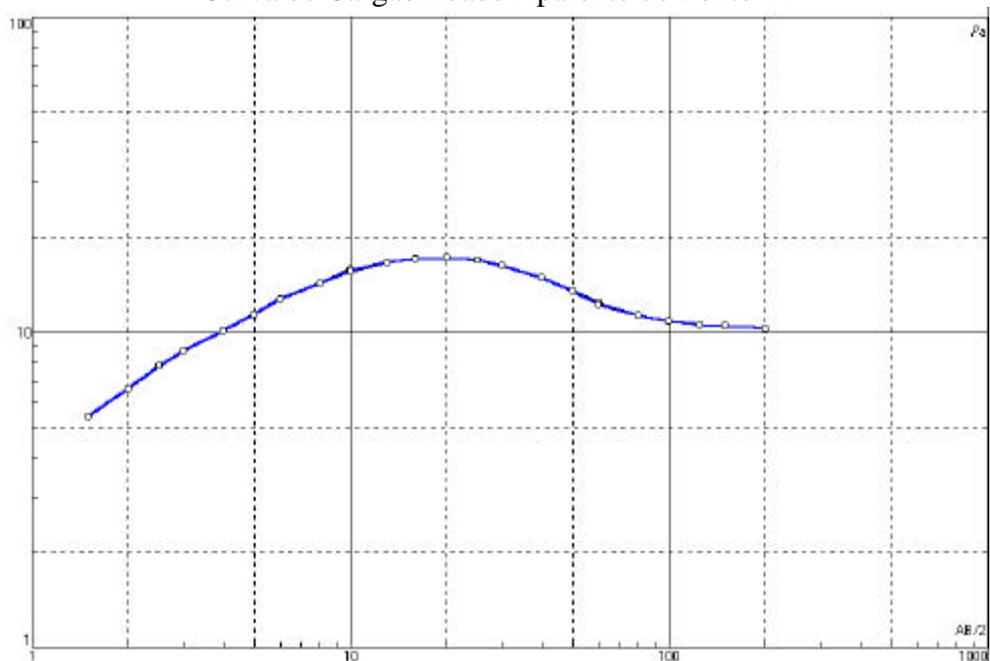


Figura 22 - Sondagem elétrica vertical (SEV-11), sua interpretação geofísico-geológica e a curva de cargabilidade aparente correspondente



## VIII Referências Bibliográficas

- Bertin, J. and Loeb, J., 1976. Experimental and theoretical aspects of induced polarization. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, Germany: Geopublication Associates, Geopublication Monographs, series 1, no. 7, v.1, 250p.
- Cole, K.S. and Cole, R.H., 1941. Dispersion and absorption in dielectrics. 1 – Alternating current fields. *J. Chem. Phys.*, **9**, 341.
- DeGroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, **55**, 1613-1624.
- Loke, M.H., 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys, 59p. (<http://www.agiusa.com>).
- Robinson, E. and Corun, C., 1988. Basic Exploration Geophysics. John Wiley & Sons, New York, 562p.

Curitiba, 21 de setembro de 2004.

Rodoilton Stevanato  
Geólogo MSc.  
LPGA/UFPR

Ricardo Wosniak  
Geólogo  
LPGA/UFPR

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira  
Geofísico/LPGA/UFPR  
Coordenador