

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

**GEOFÍSICA APLICADA NO MONITORAMENTO DE ÁREA DE
DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES**

César Augusto Moreira

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga

Tese apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP – Campus de Rio Claro, para obtenção do título de Doutor em Geociências, área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro – SP
2009

551 Moreira, César Augusto
M838g Geofísica aplicada no monitoramento de área de
disposição de resíduos sólidos domiciliares / César Augusto
Moreira. – Rio Claro : [s.n.], 2009
167 f. : il., tabs, figs., gráfs., fots.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Antonio Celso de Oliveira Braga

1. Geofísica. 2. Chorume. 3. Resistividade. 4.
Cargabilidade. 5. Potencial espontâneo. I. Título.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP
(Orientador)

Prof. Dr. Marcos Daniel Bonotto
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP

Dr. Otavio Coaracy Brasil Galdolfo
Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT

Prof. Dr. Wagner Roberto Elis
Instituto Astronômico e Geofísico - IAG/USP

Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas
Instituto de Geociências - IGc/USP

AGRADECIMENTOS

Ao nosso Senhor e Salvador Jesus Cristo que por meio de seu amor e sacrifício vicário, permite que sejamos aceitos junto ao Senhor Deus. Desde a decisão em iniciar esta tese, concepção do projeto, aquisição de dados e elaboração final do trabalho, em todos os momentos foi iluminado e guiado por sua Graça e Paz, ânimo e consolo nos momentos difíceis e pelos diversos livramentos. A Ele, pois, seja a honra, a glória, o louvor, o domínio e o poder pelo séculos do séculos (amém).

A Fabíola Coutinho Servidoni Moreira pelo amor e carinho, por sua dedicação e compreensão, além de sua participação em todas as etapas deste trabalho, sempre com muita disposição e preocupação com meu bem estar e saúde.

Ao Sr. Carlos Aparecido Moreira e Sra. Dalvina de Souza Moreira, por suas orações, pelo orgulho, dedicação e participação durante as aquisições de campo.

Ao Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga, por sua orientação, ensinamentos, atenção e pela confiança depositada em minha pessoa, pelo seu envolvimento e preocupação no pleno desenvolvimento desta tese.

Aos técnicos dos laboratórios de geofísica e geotecnia do IGCE/UNESP, Francisco Manuel Garcia Barrera (Paco) e Alan de Oliveira, por seus prestimosos auxílios, ensinamentos e paciência nas aquisições de campo deste trabalho e de muitos outros em que atuamos juntos.

Aos amigos Leonardo Zani Castelo, Gabriel Mineo Ito, Guilherme Franco, André Pavanelli, Gustavo Teixeira, pelo auxílio os trabalhos de campo.

A prefeitura municipal de Cordeirópolis pelo acesso a área de estudos e apoio para a realização dos trabalhos de campo.

A todos os companheiros de pós-graduação pela amizade, em especial a Fábio Braz Machado, momentos agradáveis, discussões, trabalhos realizados, passeios e festas, ao longo destes dois anos e meio de doutorado.

Ao Prof. Dr João Carlos Dourado e Prof. Dr. Walter Malagutti Filho pelo convívio, amizade e parcerias em pesquisas e trabalhos, desenvolvidos durante meus anos de vínculo com a UNESP.

Este trabalho contou com o apoio financeiro da Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, sob a forma de bolsa de estudo.

SUMÁRIO

1 -	INTRODUÇÃO	1
1.1 -	Considerações Gerais	1
1.2 -	Justificativas e Objetivos	2
2 -	ATERRO CONTROLADO E RESÍDUOS SÓLIDOS	3
2.1 -	Aterro em Valas	4
2.2 -	Resíduos Sólidos	6
2.3 -	Fatores Relevantes ao Estudo de Contaminações no Solo	7
2.3.1 -	Potencial Hidrogeniônico	8
2.3.2 -	Potencial de Oxidação-Redução	9
2.4 -	Caracterização Geoquímica do Chorume	10
2.4.1 -	Fases de Decomposição de Resíduos Orgânicos	11
2.4.2 -	Intemperismo Físico-Químico e Microbial	13
2.4.3 -	Ferro e Manganês	16
3 -	ÁREA DE ESTUDO	17
3.1 -	Localização	17
3.2 -	Fisiografia	17
3.3 -	Geologia e Hidrogeologia	19
4 -	MÉTODOS DE PESQUISA	22
4.1	Métodos Geofísicos	22
4.1.1 -	Método da Eletrorresistividade	22
4.1.2 -	Método de Polarização Induzida	23
4.1.3 -	Método de Potencial Espontâneo	29
4.1.4 -	Técnicas e arranjos de aquisição	34
4.1.4.1 -	Sondagem Elétrica Vertical	34
4.1.4.2 -	Caminhamento Elétrico	36
4.1.4.3 -	Base Fixa	37
4.2 -	Métodos Analíticos de Campo	38
4.3 -	Permeabilidade Hidráulica	39
5 -	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	41

5.1 - Eletroresistividade e Polarização Induzida	41
5.2 - Potencial Espontâneo	44
5.3 - Potencial Hidrogeniônico e Potencial de Oxidação/Redução	46
6 - AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO	50
6.1 - Aquisição dos Dados	50
6.1.1 - Resistividade e Polarização Induzida	51
6.1.2 - Potencial Espontâneo	53
6.1.3 - Potencial Hidrogeniônico e Potencial de Oxidação/Redução	55
6.1.4 - Permeabilidade Hidráulica	56
6.1.5 - Coleta de Solo	57
6.1.6 - Peneiramento e Análise Granulométrica Conjunta	59
6.2 - Processamento dos Dados	60
7 - RESULTADOS	62
7.1 - Apresentação dos Resultados	62
7.1.1 - Ensaio Geotécnicos	62
7.1.2 - Ensaio Analíticos	64
7.1.3 - Ensaio Geofísicos	65
7.1.3.1 - Caminhamento Elétrico	66
7.1.3.2 - Sondagens Elétricas Verticais	71
7.1.3.3 - Potencial Espontâneo	74
7.2 - Discussão dos Resultados	76
8 - CONCLUSÕES	85
9 - REFERÊNCIAS	89
APÊNDICE A	101
APÊNDICE B	112
APÊNDICE C	119
APÊNDICE D	144
APÊNDICE E	152

RESUMO

Este trabalho realiza um monitoramento em uma área de disposição de resíduos sólidos, para análise do comportamento temporal dos materiais enterrados e verificação da hipótese de aplicação e uso dos métodos geofísicos em estudos que prevejam o término na geração de chorume em aterros. Foram medidos os parâmetros físicos: resistividade elétrica, cargabilidade e potencial elétrico natural, a partir dos métodos geofísicos de Eletrorresistividade, Polarização Induzida e Potencial Espontâneo, por meio da técnica de caminhamento elétrico e de sondagem elétrica vertical. Também foram realizadas medidas de pH, Eh, ensaios de peneiramento, análise granulométrica e permeabilidade hidráulica de campo. Foi investigado o Aterro Controlado Municipal de Cordeirópolis (SP), uma área de disposição de resíduos sólidos domiciliares em valas escavadas no solo, com datas de abertura e fechamento programadas. A aquisição de dados consistiu na seleção de valas anualmente fechadas entre 12/2001 e 12/2007, realização dos ensaios geofísicos e coleta de solo para medidas de pH e Eh. Houve um aumento do potencial espontâneo das valas recentes para as valas antigas, possivelmente associado à estabilidade geoquímica crescente ao longo do período de degradação dos resíduos orgânicos. Há uma correlação entre baixa resistividade e alta cargabilidade em áreas ricas em matéria orgânica, enquanto que áreas com escassez de matéria orgânica são caracterizadas por baixos valores de cargabilidade e de resistividade. Também há uma correlação entre anomalias de baixo potencial espontâneo e de alta cargabilidade. A variação relativa dos parâmetros para cada vala, associados ao tempo de residência dos materiais, permitiu relacioná-los às fases de degradação de matéria orgânica em aterros. A análise estatística dos valores indica ser necessário 8 anos para retorno aos valores naturais de resistividade da camada de rocha situada a 10m de profundidade e 12 anos para o intervalo das valas de resíduos. A análise estatística dos dados de potencial espontâneo indica o retorno aos padrões naturais a partir de 7,8 anos. A semelhança e entre o tempo de estabilização obtido a partir da resistividade da camada de rocha e de potencial espontâneo, sugere que o potencial elétrico produzido é basicamente produzido pelo fluxo de chorume em fraturas.

Palavras-chave: chorume, lixo, resistividade, cargabilidade, potencial espontâneo.

ABSTRACT

This work accomplishes a monitoring in solid waste landfill, for analysis of the temporary behavior of the buried materials and verification of the application hypothesis and use of the geophysical methods in studies that foresee the end in the leachate generation in landfill. They were measured the physical parameters: electric resistivity, chargeability and natural electric potential, starting from the geophysical methods of Electrical Resistivity, Induced Polarization and Spontaneous Potential, through the techniques of electric profiling and vertical electric sounding. Were also accomplished pH and Eh measures, sieving, granulates analysis and hydraulic permeability field. The Cordeirópolis Solids Waste Landfill was investigated, a disposition area of domiciliary residues in ditches dug in the soil, with opening and closing programmed dates. The data acquisition consisted in annually selection of ditches closed between 12/2001 and 12/2007, accomplishment of the geophysical survey and soil collection for pH and Eh measures. There was an increase of the spontaneous potential of the recent ditches for the old ditches, possibly associated to the geochemical stability growing along the period of degradation of the organic residues. There is a correlation between low resistivity and high chargeability in rich areas in organic matter, while areas with shortage of organic matter are characterized by low chargeability values and of low resistivity. There is also a correlation among anomalies of low spontaneous potential and high chargeability. The relative variation of the parameters for each ditch, associated to residence time of the materials, allowed relating them the phases of degradation of organic matter in landfills. The statistical analysis of the values indicates to be necessary 8 years for return to the natural resistivity values of the rock located to 10m of depth and 12 years for the interval of the residues ditches. The statistical analysis of the data of spontaneous potential indicates the return to the natural patterns starting from 7,8 years. The similarity between the stabilization time obtained from the resistivity of the rock layer and of spontaneous potential, suggests that the produced electric potential is basically generated by leachate flow in the fractures.

Key-words: leachate, waste, resistivity, chargeability, spontaneous potential.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A intensificação do convívio em cidades e a padronização das formas de fabricação e consumo são traduzidas no expressivo aumento da produção de resíduos sólidos, constituindo um grande desafio para os gestores públicos.

As formas atualmente utilizadas para disposição final de resíduos sólidos podem ser resumidas em: incineração, compostagem, disposição em lixões e aterros tipo sanitário ou controlado.

Aterro é uma obra de engenharia que objetiva acomodar resíduos no solo, no menor espaço possível e com danos mínimos ao ambiente e à saúde pública. Essa técnica consiste na compactação de resíduos no solo, na forma de camadas que são periodicamente cobertas com solo ou outro material inerte.

Atualmente os aterros são alvos de críticas por não compreenderem reciclagem, necessitarem de grandes áreas para implantação, operação sujeita a condições climáticas favoráveis, além do conseqüente risco de contaminação do solo e água subterrânea pela disposição dos materiais diretamente sobre o solo.

Contudo, os aterros são a principal forma atualmente empregada na disposição final de resíduos sólidos urbanos, bem como resíduos provenientes de outras formas de destinação, como coleta seletiva, compostagem e incineradores.

O gerenciamento de aterros compreende uma série de procedimentos, como:

- Implantação de políticas de redução do volume de material destinado, pela implantação de programas de coleta seletiva e compostagem.

- Rígido controle operacional do material destinado, com minimização do período entre a chegada e destino final; cobertura do resíduo por solo ou material inerte e de baixa permeabilidade.

- Monitoramento da área de forma direta e indireta, para avaliação da área impactada pelo fluxo de chorume e variações diante das sazonalidades ambientais.

A aplicação de métodos geofísicos para caracterização e monitoramento de áreas contaminadas ou potencialmente contaminadas, possibilita a determinação de áreas em subsuperfície que eventualmente apresentem alterações em determinados parâmetros físicos devido à presença de contaminantes.

1.2- JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

Diante da necessidade crescente de técnicas e procedimentos aplicáveis em estudos ambientais, são necessários o desenvolvimento de formas de investigação ou o aprimoramento e adaptação de técnicas existentes.

Os métodos geofísicos consistem em formas indiretas de investigação do meio geológico, consagrados como ferramentas em estudos ambientais, essencialmente durante as fases de investigação preliminar e confirmatória, além de aplicação durante as fases de remediação e estabilização de áreas contaminadas.

O presente trabalho realiza o monitoramento de uma área de lançamento de resíduos sólidos domiciliares, a partir da aplicação de métodos geofísicos elétricos, medidas analíticas de pH e Eh, além de ensaios de condutividade hidráulica saturada de campo e análises granulométricas.

A área de estudos é o aterro controlado municipal de Cordeirópolis (SP), caracterizado pela disposição final de resíduos sólidos domiciliares de forma seqüencial em valas, com períodos pré-determinados de abertura e fechamento. Este aterro foi iniciado em 2001 e foi projetado para uma vida útil de 20 anos.

Nesta área foram selecionadas valas de resíduos anualmente fechadas, num período entre 12/2001 e 12/2007, sobre as quais foram realizados os ensaios geofísicos e coleta de solo para medidas dos parâmetros analíticos propostos. Este procedimento foi repetido numa linha de referência, em área externa próxima ao aterro, para fins de caracterização do meio geológico natural.

Este estudo visa analisar os parâmetros resistividade elétrica, cargabilidade e potencial elétrico natural, com o objetivo de averiguar a hipótese de aplicação da geofísica como forma de prever o tempo requerido para retorno aos padrões naturais de áreas contaminadas por chorume, além da correlação de eventuais variações com as fases de decomposição de matéria orgânica e produção de chorume.

A medida destes parâmetros físicos numa área com resíduos orgânicos enterrados em diversos períodos possibilita uma análise multitemporal a partir de um levantamento único. A análise estatística de dados adquiridos sob tais condições permite avaliar a correlação entre parâmetros, relações com as medidas de pH e Eh e principalmente a ocorrência de tendências de variação sujeitas ao ajuste de equações aplicáveis na previsão de retorno aos padrões de referência.

2 - ATERRO CONTROLADO E RESÍDUOS SÓLIDOS

Aterro sanitário é uma forma de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos a saúde pública e a segurança da população com impactos ambientais mínimos, sob confinamento dos resíduos ao menor volume possível e recobrimento com camada de terra ao final de cada jornada de trabalho ou em intervalos menores de tempo, além de impermeabilização da base e laterais das células de disposição de resíduos (ABNT, 1989). Lixão é uma forma de disposição de resíduos sobre o solo sem quaisquer critérios técnicos, medidas de proteção ao meio ambiente ou a saúde pública (IPT/CEMPRE, 2000).

Aterro controlado representa um passo sentido a um aterro sanitário, ou seja, é elaborado mediante critérios técnicos que visam minimizar essencialmente o impacto visual e o controle de vetores de doenças, sem requerer impermeabilização do substrato local, fato que o diferencia de um aterro sanitário.

De acordo com a norma NBR 10004, os resíduos sólidos foram classificados quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública em classes (ABNT, 2004):

- Resíduos Classe I - perigosos: apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Ex: baterias, produtos químicos.
- Resíduos Classe II - não inertes: não são enquadrados como resíduos de classe I – perigosos ou resíduos de classe III – inertes, e podem apresentar as seguintes propriedades: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Ex: matéria orgânica e papel.
- Resíduos Classe III – inertes: não apresentam constituinte algum solubilizado em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de águas. Ex: rochas, tijolos, vidros, determinados plásticos e borrachas de longo tempo de degradação.

Uma versão mais recente da norma NBR 10004 (ABNT, 2004) reúne os resíduos de classe II e III, doravante denominados resíduos Classe IIa (não inertes) e Classe IIb (inertes).

Este trabalho foi desenvolvido no aterro controlado do tipo vala, administrado pela prefeitura municipal de Cordeirópolis, Estado de São Paulo, que recebe resíduos sólidos domiciliares de Classe IIb.

2.1 - ATERRO EM VALAS

O Projeto Aterro Sanitário em Valas é uma das ações promovidas pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente em atendimento à Política Nacional de Meio Ambiente, instituída pela lei 6938 de 1981.

No âmbito dos resíduos sólidos que devem ter tratamentos e destinos específicos, classificados genericamente em industriais, domésticos e serviços de saúde, são destacados os resíduos gerados pelas residências e comércio em geral, cuja destinação final apresenta índices de qualidade abaixo da média (IQR de 2004 = 6,8), nas cidades com até 100.000 habitantes, segundo os Inventários Estaduais de Resíduos Sólidos Domiciliares (CETESB, 2005), que no Estado somam 578 locais, áreas alvo do projeto da Secretaria do Meio Ambiente.

Esta técnica consiste no preenchimento de valas escavadas com dimensões apropriadas, onde os resíduos são depositados sem compactação e posteriormente cobertos com terra (SMA, 2005). O confinamento dos resíduos sem compactação impede o aproveitamento integral da área a ser aterrada, fato que torna esse processo não recomendado para a maioria das comunidades com produção de resíduos superior a 10 toneladas por dia.

A escavação de valas exige condições favoráveis no que se refere à profundidade do nível freático e constituição do solo. Terrenos com nível freático aflorante ou muito próximo da superfície são impróprios, uma vez que possibilitam a contaminação do aquífero. Terrenos rochosos também não são indicados devido às dificuldades de escavação e a possibilidade de fluxo de contaminantes em fraturas. Solos excessivamente arenosos não apresentam coesão suficiente, causando o desmoronamento das paredes das valas.

O maquinário freqüentemente utilizado para abertura de valas é a retroescavadeira. Este equipamento é encontrado na maioria das prefeituras, inclusive das pequenas cidades, devido à ampla aplicação em obras civis, como a abertura de valas para instalação de rede de água e esgoto, construções de drenos e canais de escoamento de água, terraplanagem, construção civil, entre outros. Desta forma, a construção da vala de resíduos está condicionada aos limites técnicos do equipamento utilizado.

A retroescavadeira empregada no aterro controlado de Cordeirópolis permite a abertura de vala a uma profundidade máxima de 5m e largura basal de 1m. Este

trabalho é realizado em duas etapas, ou seja, inicialmente é aberta uma vala rasa com 3m de largura por 1m de profundidade, para apoio lateral do equipamento (Quadro 2.1A), aprofundada até o limite de alcance do equipamento.



Quadro 2.1 – Etapas de operação. A) Abertura de vala. B) Descarga de resíduos. C) Lançamento e cobertura dos resíduos. D) Valas finalizadas.

Os resíduos são descarregados na lateral da vala, a uma distância segura e ao mesmo tempo próxima da vala de resíduos (Quadro 2.1B). O lançamento de resíduos para o interior da vala é realizado pela retroescavadeira, que inicia o trabalho a partir das extremidades (Quadro 2.1C).

Os resíduos são nivelados à medida que são depositados e posteriormente recobertos pelo lançamento da terra proveniente da abertura da vala.

Este nivelamento e cobertura são realizados diariamente, para evitar exposições prolongadas de resíduos e ação de aves e outros animais. O nivelamento final é acima da cota do terreno, devido a possíveis recalques durante a decomposição dos resíduos (Quadro 2.1D).

2.2 – RESÍDUOS SÓLIDOS

Os resíduos sólidos apresentam grande diversidade e complexidade, cujas características físicas, químicas e biológicas variam conforme a fonte ou atividade produtora. Fatores econômicos, sociais, geográficos, educacionais, culturais, tecnológicos e legais afetam o processo de geração de resíduos sólidos, seja quanto à composição ou em relação à quantidade.

A norma NBR 10004 (ABNT, 2004), define resíduo sólido:

”Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam para isso soluções, técnica e economicamente, inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”

As classificações usualmente empregadas consideram a origem, grau de periculosidade para a saúde e meio ambiente, grau de biodegradabilidade, fração seca e úmida, fração reciclável e não reciclável, entre outras. As principais características de interesse para seleção de procedimentos, processos e técnicas de tratamento são a taxa de geração, composição granulométrica, peso específico, carbono, nitrogênio, potássio, enxofre, teor de sólidos totais fixos, sólidos voláteis, teor de umidade, tamanho da partícula, compressividade, poder calorífico e potencial hidrogeniônico (pH) (ZANTA et al., 2006).

O resíduo sólido domiciliar é originado da rotina diária das residências, sendo constituído por restos orgânicos de alimentos, produtos deteriorados, jornais e revistas, garrafas, embalagens em geral, papel higiênico, fraldas descartáveis, dentre uma grande diversidade de outros itens. Pode conter ainda resíduos com diversos graus de toxicidade, como tintas, solventes, pigmentos, vernizes, pesticidas, inseticidas, repelentes, herbicidas, óleos lubrificantes, fluidos de freio e transmissão, baterias, pilhas, frascos de aerossóis e lâmpadas fluorescentes.

2.3 - FATORES RELEVANTES AO ESTUDO DE CONTAMINAÇÕES NO SOLO

A fração inorgânica da matriz do solo é primariamente composta pelos elementos mais abundantes na crosta terrestre: oxigênio, silício, alumínio, ferro, sódio, magnésio, potássio, cálcio e hidrogênio. O quartzo (SiO_2) e aluminossilicatos primários são minerais dominantes na fração cristalina nos solos. Hidróxidos minerais, matéria orgânica e aluminossilicatos de fração argila são especialmente importantes na adsorção em diversos solos.

As características ambientais e propriedades mais relevantes à persistência e periculosidade em solos contaminados são sumarizadas por Hesterberg (1998):

Declividade e características geográficas:

- Distribuição de chuvas e redes de infiltração afetam a taxa de transporte de elementos químicos, superfícies de escoamento e erosão de sedimentos.
- Influência hidrológica e movimentação química em uma bacia hidrográfica ou região, profundidade do nível freático e padrões de distribuição das águas superficiais.
- Declividade e tipo de vegetação afetam a taxa de erosão e, desta forma, influenciam o transporte de contaminantes em sedimentos e água.

Propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos:

- Composição química dos argilominerais presentes influenciam na adsorção química e co-precipitação, com influência direta na mobilidade e solubilidade de contaminantes.
- Matéria orgânica também é um importante fator de retenção de diversos contaminantes orgânicos e inorgânicos.
- A drenagem ou permeabilidade dos solos afeta as direções preferenciais de escoamento, fluxo d'água subterrânea, tempo requerido para contaminação do nível freático e condições de oxidação-redução do solo.
- O pH é provavelmente uma das propriedades transitórias mais importantes para a solubilidade de contaminantes, com ampla variação nos solos. Flutuações significativas do pH podem ocorrer em resposta a ações corretivas em solo, como a aplicação de calcário.
- Potencial de oxidação-redução afetam a solubilidade e especiação química em um grande número de elementos do solo. Mudanças

substanciais no potencial redox e processos químicos concomitantes – denitrificações, dentre outros, podem ocorrer em poucos dias em solos aeróbicos e saturados em água (SPOSITO, 1989).

A compreensão do comportamento químico de contaminantes no solo é um processo de alta complexidade devido aos numerosos eventos em curso simultaneamente e de ampla continuidade temporal. Heterogeneidades espaciais acrescentam complexidades intrínsecas não lineares, como mudanças de longo prazo na mobilidade química do solo por mudanças na superfície – agricultura. Os solos apresentam heterogeneidades laterais ao longo do perfil topográfico e verticalmente em profundidade, observáveis em escala regional, escala local e microscópica (BUOL et al, 1989).

Devido a casos de disposição fisiográfica única de solos, as observações em escala de campo muitas vezes são aplicáveis a locais específicos. A relação com outros locais se torna necessária para o entendimento dos processos que afetam o comportamento de contaminantes.

2.3.1 - POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH)

A variação do pH afeta os mecanismos de retenção de metais no solo pela acidificação e posteriormente na metanogênese. Em geral, a queda do pH imposta por condições estabelecidas pela formação de ácidos, aumenta a mobilidade dos metais. O número de ânions para adsorção de cátions diminui e ocorre competição de cátions como Al^{3+} e H^+ por formas mais estáveis (EZAKI, 2004).

A queda do pH em solo depende da taxa de entrada de ácidos, capacidade de neutralização e reações da cinética de neutralização (VAN BREMEN et al, 1983).

Os efeitos da acidificação em solos contaminados são condicionados ao tipo de contaminante e de suas propriedades. Cátions metálicos, incluindo metais pesados e alumínio, tipicamente aumentam a solubilidade – reduzem a adsorção, com o decréscimo do pH (LINDSAY, 1979), onde muitos ânions (exceto boratos e silicatos), são menos solúveis – mas altamente adsorvidos, sob condições de solo mais ácido (GOLDBERG, 1992).

O pH é dependente da sorção de alguns cátions metálicos divalentes e oxiânions de goetita, um dos óxidos de ferro mais comuns no solo. Para uma determinada concentração total são adicionados cátions metálicos e o pH

decrecido, a sorção decresce fortemente entre 2 unidades de pH (intervalo de adsorção). O pH no intervalo de adsorção depende do tipo de metal, tipo de adsorvente e outras condições químicas tais como raio iônico.

2.3.2 - POTENCIAL DE OXIDAÇÃO-REDUÇÃO (EH)

O potencial redox afeta a solubilidade química, mobilidade e toxicidade por: conversão de espécies aquosas em gasosas, dissolução de componentes da matriz do solo, mudanças para formas mais estáveis dissolvidas ou espécies químicas de fase sólida. Devido ao oxigênio gasoso possuir baixa solubilidade em água, solos saturados podem ter aumentado o processo de redução, por respiração microbial.

A diminuição do potencial redox durante a fase anaeróbica favorece a solubilização de determinadas espécies metálicas, reduzidas para formas solúveis em água, como $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ e $\text{Mn}^{4+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ (MERBACH JR., 1989). Sob tais condições, a concentração destes metais dependerá do pH, que controla a dissolução e a precipitação de óxidos e hidróxidos de metais, carbonatos, fosfatos, entre outros. Os óxidos de Fe e Mn são dissolvidos sob $\text{pH} < 6$, com liberação de metais adsorvidos para a solução (McCLEAN & BLEADSOE, 1992).

A dissolução de óxidos minerais de Mn e Fe provavelmente resulta em mudanças na solubilidade (adsorção ou co-precipitação) de contaminantes associados, embora seus efeitos não sejam claramente compreendidos. Manganês pode ser fototóxico sob condições favoráveis a redução de Mn^{4+} para formas mais solúveis como Mn^{2+} (McBRIDE, 1994).

Uma importante consequência da redução de sulfato é a formação de sulfetos minerais insolúveis com metais pesados associados. Estes minerais são bastante instáveis (insolúveis) sob condições redutoras, devido à alta covalência das ligações dos íons metal-sulfeto. Entretanto, a aeração aumenta a solubilidade de sulfetos metálicos, com aumento de 2 a 4 vezes da solubilidade de Cádmio associado a sulfetos após aeração de sedimentos previamente reduzidos (ZHUANG et al, 1994).

2.4 - CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DO CHORUME

Atenuação é um termo freqüentemente aplicado a redução das concentrações de oxigênio dissolvido em plumas de contaminação, que incluem processos: físicos -

diluição; físico-químicos - sorção, troca iônica; químicos - precipitação; microbial - degradação (CHRISTENSEN et al., 2001).

Plumas de contaminação provenientes de aterros são freqüentemente caracterizadas por quatro grupos de poluentes (CHRISTENSEN et al., 1994):

- Matéria orgânica dissolvida, expressa pela demanda química de oxigênio ou carbono orgânico total, incluindo CH₄, ácidos graxos voláteis e compostos mais refratários como húmicos e fúlvicos.
- Componentes inorgânicos: Ca, Mg, Na, K, NH₄⁺, Fe, Mn, Cl, SO₄²⁺, HCO₃⁻.
- Metais pesados: Cd, Cr, Cu, Pb, Ni e Zn.
- Compostos orgânicos derivados de petróleo, que incluem hidrocarbonetos aromáticos, fenóis e compostos clorados alifáticos.

Outros compostos podem ser encontrados neste ambiente, como B, As, Se, Ba, Li, Hg, e Co, sempre em concentrações muito baixas e de importância secundária. A detecção e as concentrações destes elementos ou compostos podem variar devido a mudanças das fases de oxidação/redução e/ou alterações sazonais.

Processos de oxidação-redução exercem grande influência na geoquímica de elementos orgânicos e inorgânicos em aquíferos, com controle da estruturação química. Em geral, o potencial redox aumenta da parte central para as extremidades da área contaminada.

2.4.1 - FASES DE DECOMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

A geração de chorume e suas características químicas, físicas e microbiológicas, estão relacionadas aos processos de decomposição de matéria orgânica presentes nos resíduos sólidos, que ocorrem essencialmente nas fases aeróbica e anaeróbica.

Existem diversos modelos que descrevem os processos de decomposição, com diferenças entre si quanto ao número de fases, tempo de duração de cada fase, parâmetros analisados e a nomenclatura.

O trabalho de Farquhar & Rovers (1973) apresenta quatro fases de decomposição, determinados pelo acompanhamento da variação de concentrações dos gases, ácidos voláteis e celulose, complementado por Ress (1980) pelo acréscimo da 5ª fase (Tabela 2.1):

Tabela 2.1 - Fases de decomposição de matéria orgânica (RESS, 1980).

FASE	CARACTERÍSTICA
I - Aeróbica	Consumo de O ₂
II - Não-metanogênica	Queda na produção de CO ₂ ; pico de CO ₂ e H ₂ ; início da produção CH ₄ ; máxima produção de ácidos orgânicos
III - Metanogênica Instável	Produção crescente de CH ₄ ; H ₂ desaparece; queda de CO ₂ e H ₂
IV - Metanogênica Estável	Produção e utilização de CH ₄ ; CO ₂ estabiliza
V - Regressiva	Queda gradativa de CH ₄ e CO ₂ ; entrada de ar no meio (H ₂ e O ₂); exaustão de celulose

Fase aeróbica - consiste na decomposição por oxidação aeróbica dos compostos orgânicos contidos nos resíduos. O oxigênio disponível proporciona o desenvolvimento de bactérias aeróbicas, consumido em até 1 mês. O metabolismo aeróbico ocorre preferencialmente no primeiro metro do aterro, onde existe resíduos pouco compactados, oxigênio em relativa abundância e água de chuvas.

O carbono é convertido em CO₂, o hidrogênio orgânico em H₂O, nitrogênio em NO₃⁻, fósforo em PO₄³⁻ e enxofre em SO₄²⁻. O chorume gerado é caracterizado por elevadas concentrações de sais e íons metálicos devido à solubilidade de diversos íons sob elevadas temperaturas. O potencial redox inicia com valores positivos, mas tende a diminuir e pode chegar até a valores negativos nas fases seguintes (IPT/CEMPRE, 2000).

Fase anaeróbica - prevalece devido à escassez de oxigênio, caracterizada pela elevada produção de chorume, que pode durar meses ou anos. Inicialmente, bactérias facultativas e anaeróbicas produzem enzimas extracelulares que convertem compostos orgânicos complexos e insolúveis em compostos orgânicos solúveis, como etanol, acetato, butirato, entre outros (EZAKI, 2004).

A matéria orgânica hidrolizada é transformada em compostos sucessivamente mais simples e de alta solubilidade, como ácidos orgânicos, ácidos graxos, ácido acético, álcoois, CO₂ e H₂, por meio de bactérias acidogênicas para obtenção de energia. Elevadas concentrações de ácidos voláteis e CO₂ produzidos e assimilados ao chorume diminuem o pH, que resulta na solubilização de materiais orgânicos como óxidos e hidróxidos, aumento das concentrações de íons e redução da capacidade de sorção dos resíduos. A grande variedade de compostos orgânicos e inorgânicos favorece a formação de complexos solúveis com metais e a associação

destes ao material coloidal, em detrimento da forma iônica livre, com aumento da condutividade elétrica.

O chorume apresenta grande quantidade de matéria orgânica, elevada Demanda Biológica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO). Os compostos e ácidos voláteis simples consumidos favorecem a estabilização do pH próximo a neutralidade, possibilitando lento desenvolvimento de bactérias estritamente anaeróbicas, denominadas metanogênicas, caracterizadas pela sensibilidade à presença de oxigênio e requerem baixo potencial redox, para atuarem na formação de metano pela redução de CO₂ e descarboxilação do acetato ($2\text{CH}_3\text{COOH} \leftrightarrow 2\text{CH}_4 + 2\text{CO}_2$) (POHLAND & HARPER, 1985).

Fase metanogênica instável - o CH₄ produzido é variável e crescente, o H₂ é utilizado durante a redução de CO₂, por processos de metanogênese.

Fase metanogênica estável - caracterizada pela elevada produção de CH₄ e CO₂, que pode chegar a 50%. A conversão de ácidos orgânicos aumenta o pH, com conseqüente redução da solubilidade de nutrientes e de compostos inorgânicos como cálcio, ferro e metais pesados, concomitante a diminuição da condutividade elétrica do chorume. Este processo é seguido de complexação e precipitação de espécies metálicas (POHLAND & HARPER, 1985).

Fase regressiva - estabilização geoquímica gradativa do aterro, seguida pela queda gradativa na produção de CH₄ e CO₂. Grande parte dos nutrientes foi consumida ou removida, restando apenas um substrato de difícil biodegradação, com ácidos húmicos e fúlvicos.

Posteriormente a esta fase, pode ocorrer entrada de ar no sistema inicialmente nas camadas superiores, com o aumento do potencial redox e surgimento de espécies oxidadas por meio da infiltração de água, que contribui para a lenta alteração do pH. O novo estabelecimento de condições aeróbicas favorece a oxidação de matéria orgânica residual, com conseqüente geração de CO₂ e decréscimo do pH. O aumento da solubilidade poderá liberar metais adsorvidos, como os associados a carbonatos.

2.4.2 - INTEMPERISMO FÍSICO-QUÍMICO E MICROBIAL

A decomposição de resíduos orgânicos em aterros por longos períodos envolve processos físico-químicos e químicos, notavelmente hidrólise, hidratação,

carbonatação, oxidação e redução, além de degradação biológica – microbial, que resultam na dissolução e deterioração, geração de gás e produção de chorume.

O acúmulo de resíduos orgânicos em aterros promove condições ideais para a proliferação e o crescimento de colônias de bactérias, desde que haja disponibilidade de nutrientes e temperatura adequada, com surgimento de bactérias aeróbicas acima do nível freático – zona saturada (FANG, 1995).

Inicialmente, a degradação microbial ocorre sob condições aeróbicas. Com a queda dos níveis de oxigênio por ação das bactérias, rapidamente são estabelecidas condições anaeróbicas de biodegradação. O CH_4 é gerado por ação de bactérias, devido à abundância de matéria orgânica sob condições anaeróbicas.

A infiltração de águas de chuva e subterrânea, além de outros líquidos presentes nos resíduos, promove dissolução de constituintes minerais e aumento da porosidade, com conseqüente aumento da condutividade hidráulica. Este processo de lixiviação pode remover elementos minerais abundantes no meio geológico, como Ca, Mg, K, N e P, ou remover materiais estruturados como argilominerais, com alteração na cimentação ou concentração de íons na matriz dos materiais drenados por chorume, com alterações significativas nas propriedades físicas (MEJU, 2000).

Reações de troca catiônica acelerada por atividade bacteriana, podem causar mudanças na estrutura, composição e porosidade dos materiais que sustentam o aterro. Por exemplo, o CH_4 pode ser convertido em CO_2 e H_2O por metabolismo microbial, onde a combinação $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ pode formar ácido carbônico, instável e de curta duração. Este líquido é rico em bactérias, sais inorgânicos e matéria orgânica.

Grandes quantidades de água podem permear os resíduos pouco compactados em aterros antigos, quando comparados a aterros recentemente compactados, que resulta de forma relativa em baixas concentrações de constituintes químicos em chorume proveniente de aterros antigos, com elevada porosidade e permeabilidade (RADNOFF et al. 1992).

Os fluidos produzidos em aterros muitas vezes são ácidos, com variações associadas ao tipo de substrato, clima, tipos de resíduos, variações sazonais, entre outros. O metano bacteriogênico é formado pela fermentação de material orgânico sob baixos teores de oxigênio. A partir da produção de chorume, ocorrem diversas mudanças que envolvem estágios aeróbicos - acetogênico, e anaeróbicos - metanogênico. O conteúdo de carbono orgânico total, ácidos graxos totais ou

acetonas e sólidos totais dissolvidos são altos durante a acetonação e baixos durante a metanogênese.

Desta forma, o chorume proveniente de aterros recentes é caracterizado por altos níveis de ácidos orgânicos, amônia e sólidos totais dissolvidos, mas grande parte da massa biodegradada é fragmentada com o tempo, e a concentração destes parâmetros decresce no material livixiado de aterros antigos (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Mudanças típicas nas concentrações de chorume com a idade do resíduo (FARQUHAR, 1989; BIRKS & EYLES, 1997) (valores em mg/L).

Parâmetro	Idade do resíduo			
	0 - 5 anos	5 - 10 anos	10 - 20 anos	> 20 anos
STD	10000 - 25000	5000 - 10000	2000 - 5000	> 1000
pH	5 - 6	6 - 7	7 - 7.5	7.5
DBO	10000 - 25000	1000 - 4000	50 - 100	< 50
DQO	15000 - 40000	10000 - 20000	1000 - 5000	< 1000
N Amoniacal	500 - 1500	300 - 500	50 - 200	< 30
P total	100 - 300	10 - 100		< 10
Cloreto	1000 - 3000	500 - 2000	100 - 500	< 100
Sulfato	500 - 2000	200 - 1000	50 - 200	< 50
Cálcio	2000 - 4000	500 - 2000	300 - 500	< 500
Sódio + Potássio	2000 - 4000	500 - 1500	100 - 500	< 100
Magnésio + Ferro	500 - 1500	500 - 1000	100 - 500	< 100
Zinco + Alumínio	100 - 200	50 - 100	10 - 50	< 10
Alcalinidade	10000 - 15000	1000 - 6000	500 - 2000	< 500

O chorume pode conter substâncias tóxicas e perigosas em formas sólida e gasosa e pode apresentar elevadas concentrações dos íons cloreto, ferro e zinco. Os elementos com elevada mobilidade iônica geralmente apresentam altas concentrações em comparação aos elementos de baixa mobilidade iônica (BAGCHI, 1987). O pH tende a aumentar com o tempo, pois formas ácidas iniciais tendem a estados neutralizados, com decréscimo da DQO e DBO (Tabela 2.2). O carbono orgânico freqüentemente excede 8000mg/L no chorume proveniente de aterros recentes e 465mg/L em aterros antigos (DEARLOVE, 1995).

A composição do chorume depende do tipo e da idade do resíduo depositado, taxa de infiltração de água e pH. Entretanto, a quantidade de gás e chorume pode ser afetada pela profundidade de disposição do material, condições climáticas, variações do nível freático, espessura do material de recobrimento e controle de entrada e saída de líquidos da área (FARQUHAR, 1989). É esperado que nas partes

rasas do material ocorra rápida decomposição aeróbica, enquanto que nos resíduos em profundidade ocorra somente a decomposição parcial sob condições aeróbicas.

O transporte de chorume através do aterro é lento, inconstante, não uniforme e descontínuo em muitos casos, dependendo do grau de compactação do material e de mudanças sazonais no suprimento de água do sistema (FANG, 1995).

Reações exotérmicas de controle biogeoquímico são reconhecidas por causarem aumento da temperatura na água subterrânea em aterros, devido ao ingresso de chorume das partes rasas do aterro. Conseqüentemente, ocorre grande atividade de bactérias e reações de troca iônica de forma progressiva nas porções inferiores do aterro; tais reações podem resultar em alterações na porosidade destas porções e no substrato geológico em contato direto.

O chorume que adentra num aquífero anaeróbico é lentamente biodegradado, com a produção de ácidos graxos que podem reagir com os materiais do aquífero, com conseqüentes mudanças no fluxo químico próximo ao nível freático (BENNETT & SIEGEL, 1987). Num ambiente com baixos teores de oxigênio, materiais inorgânicos contidos no chorume podem ser dissolvidos na água subterrânea.

Ao cruzar a base do aterro, íons metálicos em solução podem ser removidos da fase aquosa por troca iônica, sorção ou precipitação para o substrato, especialmente para argilas.

A quantidade de água subterrânea contaminada resultante da invasão de chorume, depende da hidrogeologia da área e da capacidade de atenuação do substrato. Este processo pode ser efetivo por diluição e dispersão em água subterrânea, em aquíferos de alta permeabilidade e com elevada condutividade hidráulica. No caso de aquíferos menos permeáveis ou de baixa condutividade hidráulica, a contaminação carregada com sais inorgânicos pode provocar mineralizações (MEJU, 2000).

Caso os materiais de cobertura sejam ricos em ferro, é concebível que o metano e dióxido de enxofre com fluxo ascendente, governem a formação de halos de alteração de pirita, denominados “chaminés de enxofre”, comuns em trapas de acumulação de petróleo, ricas em ferro ou *redbeds* (OSTRANDER et al, 1983).

Sais minerais e materiais orgânicos lixiviados podem ser depositados próximos ao nível freático, dependendo das condições hidrogeológicas locais e dos padrões de pH e Eh, em analogia aos processos que controlam o enriquecimento

supergênico de sulfetos metálicos, como o níquel laterítico e o intemperismo químico de solos e rochas (LEVINSON, 1980).

Devido a flutuações no nível freático, a zona de deposição mineral pode se estender desde a base do aterro até a formação geológica subjacente, dependendo da permeabilidade, saturação em fluidos, fluxo da água subterrânea, características de dispersão em seu substrato e mobilidade dos íons em solução (MEJU, 2000).

Abaixo do nível freático, a mistura de choro-me com a água subterrânea e reações com o material do substrato, forma uma pluma eletricamente condutiva. Além dos limites da pluma, a quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD) e a condutividade elétrica apresentam valores intrínsecos aos do ambiente natural (BENNETT & SIEGEL, 1987).

A condutividade elétrica pode ser medida em termos de STD, devido à associação do íon cloreto como indicador conservativo da presença de choro-me em amostras de água (BAEDECKER & APGAR, 1984). O trabalho de Bell & Jermy (1995), dentre muitos outros, descreve a relação direta entre decréscimo de STD e da condutividade elétrica com o distanciamento do aterro.

2.4.3 - FERRO E MANGANÊS

A redução de óxidos de Fe e Mn pode conduzir quantidades significativas destes elementos às águas subterrâneas, resultando em áreas de enriquecimento. As concentrações de Fe e Mn no aquífero são governadas por processos de diluição, oxidação/redução, dissolução abiótica de elementos minerais, troca iônica, precipitação e possivelmente complexação com carbono orgânico dissolvido (CHRISTENSEN et al., 2001).

Elevadas concentrações de Fe e Mn dissolvidos, não originados dos resíduos de aterros sanitários foram detectadas no aterro Borden - Canadá (NICHOLSON et al., 1983), aterro Vejen – Dinamarca (LYNGKILDE & CHRISTENSEN, 1992; HERON & CHRISTENSEN, 1995), aterro Grindsted – Dinamarca (BJERG et al., 1995). Nestes casos, o Fe e o Mn são provenientes dos sedimentos que formam o aquífero.

Em aquíferos aeróbicos, estes elementos são associados aos sedimentos sob a forma de óxidos e hidróxidos minerais (Fe^{3+} e Mn^{4+}) e argilominerais.

3 - ÁREA DE ESTUDOS

3.1 – LOCALIZAÇÃO

A área de estudo compreende o aterro controlado do município de Cordeirópolis, localizado no Km 4,5 da Rodovia Cássio de Freitas Levi, que liga os municípios de Limeira e Cordeirópolis (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Área de estudos, com ano de fechamento das valas de resíduos.

3.2 – FISIOGRAFIA

Em termos geomorfológicos, o município Cordeirópolis faz parte da Depressão Periférica Paulista, dentro da Zona do Médio Tietê.

A região possui basicamente duas formas de relevo (IPT, 1981):

- Colinas amplas com topos extensos a aplainados, vertentes com perfis retilínios a convexos. Possui baixa densidade de drenagens, de padrão

subdentrítico, encaixadas em vales abertos, com planícies aluvionares interiores restritas e presença eventual de lagoas perenes e intermitentes.

- Colinas médias com topos aplainados, vertentes com perfis convexos e retilíneos. Drenagens com densidade média a baixa, padrão sub-retangular, vales abertos e fechados, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.

A área do aterro apresenta topografia relativamente plana, com desnível acentuado na direção leste/sudeste (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Topografia da área.

O clima da região é do tipo Cwa, tropical, seco no inverno e chuvoso no verão, segundo a classificação de Köppen. Apresenta temperatura anual média de 20°C, 22,5°C para o mês de janeiro e 18°C para o mês de julho (SETZER, 1966).

A área apresenta latossolo vermelho-escuro, rico em minerais metálicos, não hidromórfico com horizonte B latossólico, profundos, acentuadamente drenado, com pouca diferenciação entre horizontes, com textura predominantemente argilosa (RADAMBRASIL, 1983).

3.3 - GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA

A área está localizada na parte nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, situada na porção centro-leste da Plataforma Sul-Americana (ALMEIDA et al., 1977). Composta por rochas Paleozóicas (Grupo Itararé, Formações Aquidauana, Rio Bonito, Tatuí, Irati, Serra Alta, Teresina e Corumbataí), Mesozóicas (Formações Pirambóia, Serra Geral e intrusivas básicas associadas) e Cenozóicas (sedimentos Terci-quaternários).

Na área de estudo são descritos litotipos pertencentes à Formação Tatuí e intrusivas básicas associadas ao evento Serra Geral (Figura 3.3).

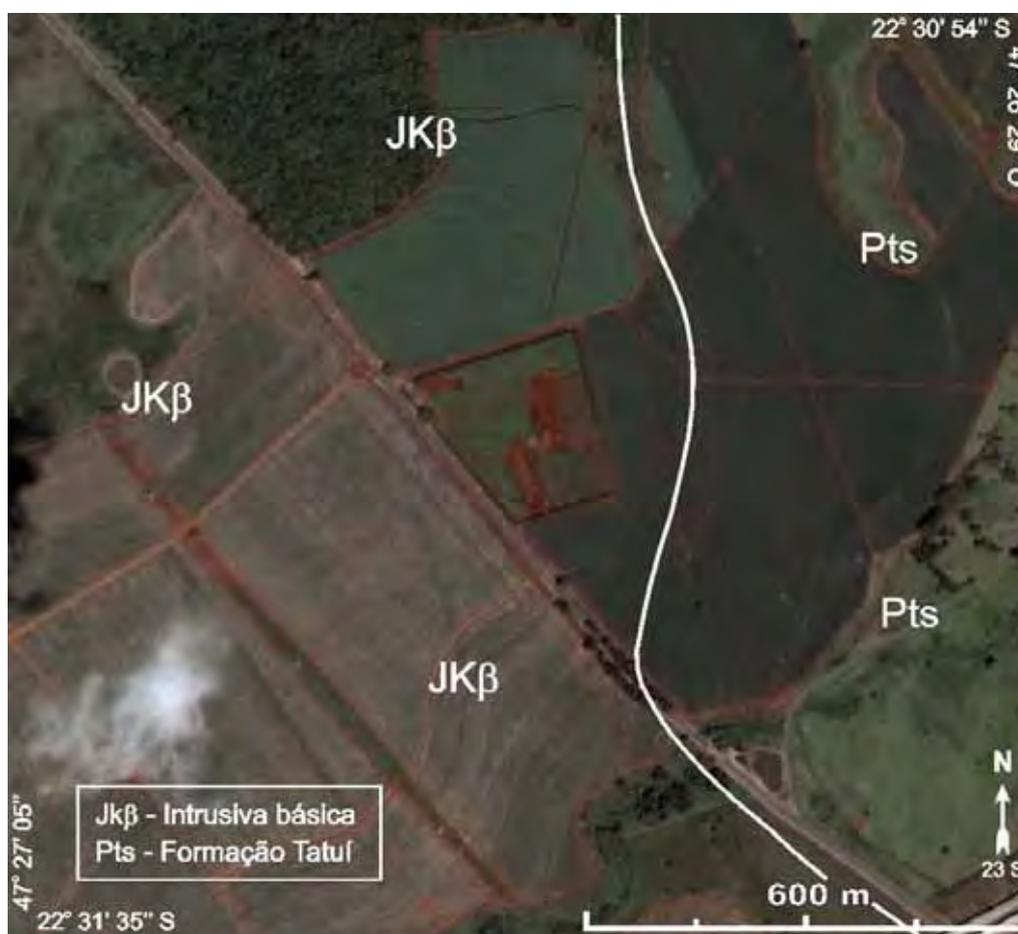


Figura 3.3 – Geologia da área de estudos.

A Formação Tatuí corresponde a variações laterais das Formações Palermo e Rio Bonito, predominantes nos estados do sul da Bacia, constituída por siltitos e lamitos verde, creme e marrom, maciços e bioturbados. De forma subordinada, ocorrem camadas de calcário ou sílex, arenitos sílticos ou argilosos com estratificação plano-paralela, e conglomerados.

As intrusivas básicas são atribuídas ao evento vulcânico responsável pelos derrames da Formação Serra Geral, de idade Cretácica (NARDY, 1995). Ocorrem sob a forma de “sills”, diques, soleiras, lacótilos entre outras, presentes tanto na área de estudo como em toda extensão da Bacia do Paraná.

Este corpo apresenta juntas verticais, fraturas subhorizontais possivelmente resultantes de alívio de tensão, com textura e estruturas bastante preservadas devido ao estado praticamente inalterado do maciço (Figura 3.4A).

Localmente ocorrem siltitos amarelado a amarelo-avermelhado, pertencentes à Formação Tatuí, sobreposto pelo corpo intrusivo de diabásio (Figura 3.4B).



Figura 3.4 - A) Diabásio fraturado, B) Siltito amarelo-avermelhado.

Na área ocorrem os sistemas aquíferos Serra Geral e Passa Dois (Figura 3.5). O armazenamento e circulação de águas subterrâneas no aquífero Serra Geral está condicionado a sistemas de fraturas e juntas tectônicas ou de resfriamento, a amígdalas intercomunicadas por juntas, que o caracterizam como um aquífero localizado e heterogêneo (TONETTO, 2001). Este aquífero apresenta produtividade variável entre 5 a 70m³/h.

O Sistema Aquífero Passa Dois é essencialmente constituído por lamitos, folhelhos e calcários. Apenas localmente apresenta comportamento de aquífero, associada a particularidades litológicas e ao padrão estrutural para movimentação das águas subterrâneas, caracterizado como heterogêneo e descontínuo (TONETTO, 2001).

Por se tratar de rochas sedimentares com granulação bastante fina, o aquífero Passa Dois apresenta comportamento de circulação fissural junto a

lineamentos estruturais ou como aquífero sedimentar principalmente em pacotes de arenitos carbonáticos, onde é possível o movimento intersticial das águas subterrâneas. A produtividade deste aquífero varia de 3 a 10m³/h (CETESB, 1997).

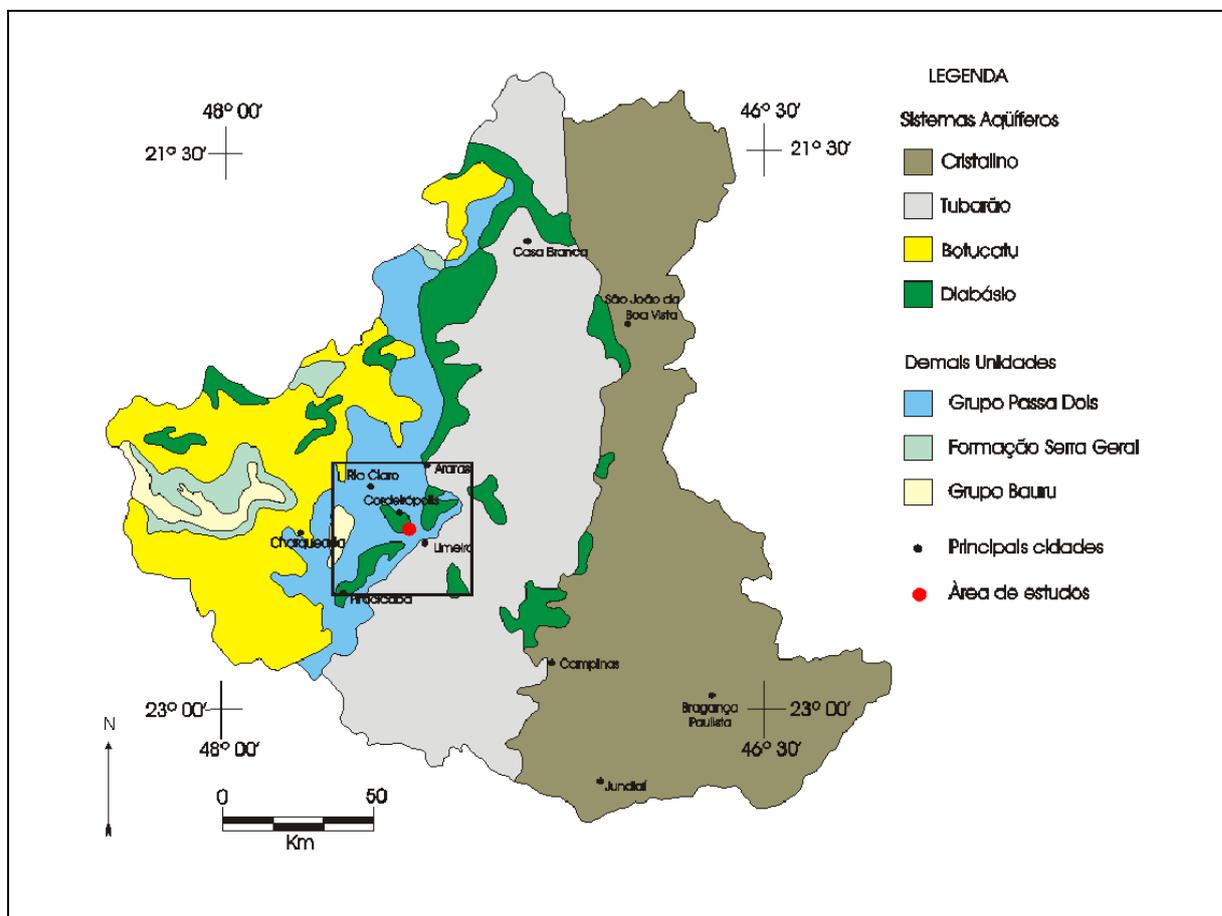


Figura 3.5 - Sistemas Aquíferos de Cordeirópolis e região (Mod. de DAAE, 1981).

4 - MÉTODOS DE PESQUISA

4.1 – MÉTODOS GEOFÍSICOS

4.1.1 - MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE

O método da eletrorresistividade está baseado na introdução de corrente elétrica no terreno, a partir de um arranjo denominado dispositivo eletródico. Em geral, este dispositivo é constituído de quatro eletrodos (Figura 4.1).

Os eletrodos A e B são convencionados como eletrodos de corrente, por meio dos quais é aplicada uma corrente elétrica em subsuperfície. Este circuito é conectado a um amperímetro, por meio de cabos elétricos.

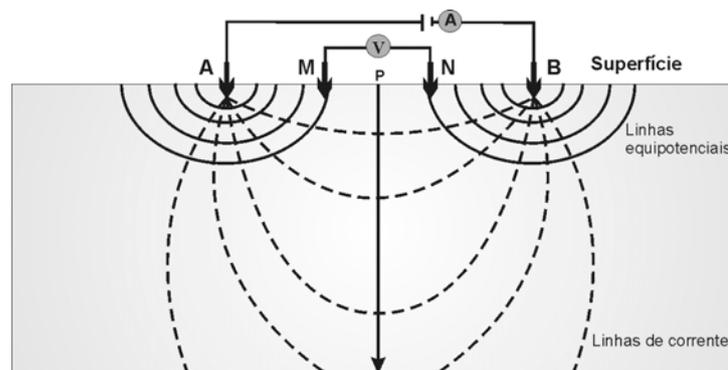


Figura 4.1 – Arranjo para medidas de resistividade/cargabilidade.

Os eletrodos M e N são convencionados como eletrodos de potencial ou eletrodos de potencial, utilizados para medir a diferença de potencial criada pelo circuito de corrente. Este circuito é conectado a um voltmímetro capaz de medir a diferença de potencial entre eles.

No caso de medidas de resistividade em meios homogêneos, o valor obtido representará a resistividade verdadeira do meio. Entretanto, o meio geológico é constituído de heterogeneidades intrínsecas e, portanto, as medidas de resistividade representam uma “média ponderada” das resistividades verdadeiras, cujo produto calculado é denominado resistividade aparente (ρ_a).

Conhecida a distância entre os eletrodos, a intensidade de corrente (I) fornecida pelo circuito emissor e a diferença de potencial (ΔV) obtida no circuito receptor, é possível calcular a resistividade aparente (ρ_a) (Equação 4.1).

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{equação 4.1})$$

onde K é um fator que depende exclusivamente da disposição geométrica dos eletrodos, que pode ser obtido da seguinte forma (Equação 4.2):

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (\text{equação 4.2})$$

Quanto às unidades empregadas, a resistividade aparente é calculada em ohm.m, a diferença de potencial é medida em milivolts - mV, a intensidade de corrente é medida em miliampère - mA, e o coeficiente K é medido em metros.

O parâmetro resistividade depende da natureza e do estado físico do material analisado. A resistividade e a condutividade elétrica estão relacionadas aos mecanismos de propagação de corrente elétrica dos materiais.

A resistividade elétrica em solo ou rocha está condicionada aos processos de condutividade eletrônica ou eletrolítica. O primeiro ocorre devido à presença de minerais metálicos ou condutores. E o segundo, devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida em poros ou fissuras.

O processo de condutividade eletrolítica é predominante, pois freqüentemente a água subterrânea contém íons dissolvidos. Em contrapartida, é rara a presença de minerais metálicos em quantidade suficiente para elevar a condutividade do meio.

4.1.2 - MÉTODO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA

Este método foi desenvolvido inicialmente para detecção de concentrações de minérios disseminados, essencialmente sulfetos, no âmbito da pesquisa de metais base (VAN VOORHIS et al. 1973, SUMNER, 1976). Sua popularização ocorreu a partir da década de 1950, por meio de diversos trabalhos descritos entre 1948 e 1952 (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966; TELFORD et al., 1990).

É um fenômeno de estimulação de voltagem que ocorre após a interrupção repentina do fluxo de corrente elétrica em solos e rochas.

Este fenômeno pode ser ilustrado a partir de um arranjo de quatro eletrodos dispostos para medidas de resistividade, onde um par de eletrodos é utilizado para injeção de corrente e outro para leituras da diferença de potencial (Figura 4.1). A injeção de um sinal de corrente direta durante um período de tempo é seguido de por um corte abrupto e resulta num decaimento do campo elétrico. Este campo não

chega a zero imediatamente, mas decai lentamente após uma queda brusca inicial, para um valor E_0 que corresponde a uma fração do campo inicial E_{ss} (Figura 4.2). Esta queda lenta é passível de medição, que pode variar de poucos segundos até alguns minutos.

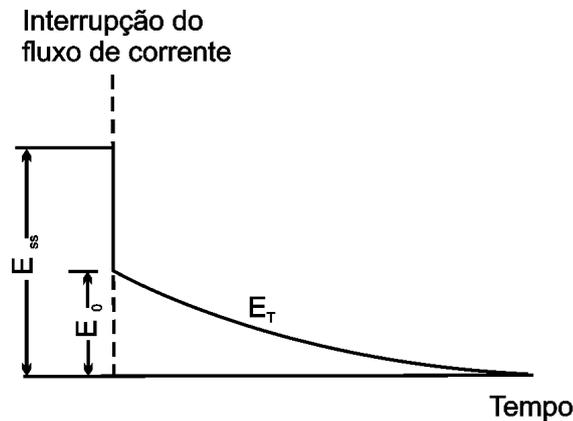


Figura 4.2 – Curva de decaimento transiente no meio geológico (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966).

A curva de decaimento representa um retorno ao estado original de repouso pretérito ao distúrbio devido à aplicação de uma corrente elétrica. Durante o tempo de aplicação desta corrente, uma fração desta energia é armazenada no meio geológico. Este armazenamento pode ocorrer sob a forma de energia mecânica, elétrica ou química, dentre as quais a energia química se mostra a mais importante na ocorrência deste fenômeno em solos e rocha.

Esta energia química armazenada resulta da:

- Variação da mobilidade de íons em fluxo através de poros ou fraturas.
- Variação entre condutividade iônica e eletrônica em presença de metais.

O primeiro destes efeitos é conhecido como *polarização de membrana* ou eletrolítica e constitui o chamado efeito de polarização induzida normal, que pode ocorrer em rochas onde não haja minerais metálicos. O segundo é conhecido como *polarização de eletrodo ou eletrônica*, relativamente de grande magnitude e depende da presença de minerais metálicos.

O processo de polarização eletrônica ocorre em rochas que contenham minerais condutivos disseminados, como sulfetos e metais nativos. Sob efeito de um campo elétrico, este meio será submetido a um fluxo de corrente parcialmente eletrônico e parcialmente eletrolítico. No contato entre o eletrólito contido nos poros

da rocha e o mineral metálico, ocorre transferência de íons seja do grão para o eletrólito ou o contrário. O processo resultante da perda de elétrons do mineral para o eletrólito é denominado *oxidação*, enquanto que o ganho de elétrons por parte do grão mineral é conhecido como *redução* (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966).

É produzida uma diferença de potencial pela tendência de perda de elétrons metal para o eletrólito, na ausência de fluxos de corrente na interface eletrólito/mineral (Figura 4.3). A diferença entre o potencial do metal e o da solução é denominado *potencial de eletrodo* (E_e), com valores característicos aos diversos tipos de minerais metálicos, dependente da temperatura e composição do eletrólito.

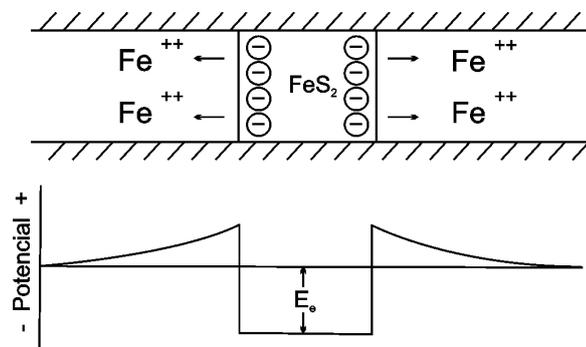


Figura 4.3 – Potencial eletrônico (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966).

Quando um fluxo de corrente elétrica atravessa este meio, ocorre um aumento do número de íons na solução em contato com uma face do mineral metálico concomitante à redução no número de íons na outra face do mineral, num fenômeno conhecido como *sobrevoltagem* (TELFORD, et al., 1990). Estabelecida esta condição de desequilíbrio, a carga é transferida através do mineral metálico, e desta forma, ocorre passagem de corrente elétrica.

Devido ao fluxo de corrente elétrica por condução eletrônica ser muito superior ao fluxo por condução eletrolítica, este desequilíbrio permanece mantido enquanto houver o trânsito de corrente. A interrupção do fluxo resulta na queda imediata do campo elétrico E_{ss} para E_0 . O retorno dos íons ao equilíbrio produz um campo elétrico E_T transiente, denominado polarização induzida (Figura 4.2).

O efeito de polarização eletrônica pode aumentar quando o conteúdo de sulfeto de rocha aumenta, ou seja, o aumento no número de poros em contato com minerais metálicos aumenta também a impedância do meio como um todo. Este feito também depende das dimensões dos minerais, ou seja, a área exposta de um corpo singular de sulfeto é menor quando comparada à área total de sulfetos

disseminados. Desta forma, quanto maior a área exposta às reações de troca iônica, maior será o efeito de polarização induzida.

Rochas com baixa porosidade são mais polarizáveis que rochas porosas, com mesmo conteúdo de metálicos. Grande parte da corrente é forçada a cruzar minerais metálicos em rochas com baixa porosidade, que resulta em polarização eletrônica. O fluxo de corrente tende a ocorrer por condução no eletrólito em rochas porosas, fenômeno que independe do conteúdo metálico.

A polarização eletrolítica ou de membrana também consiste em um processo de acumulação de íons, seja em pontos de estrangulamento em caminhos de fluxo eletrolítico ou por influência de argilominerais eletricamente carregados (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966, WARD, 1990; TELFORD, et al., 1990).

Um dos mecanismos consiste em alterações na mobilidade do eletrólito. Muitas das moléculas de água que fluem em poros e capilares interagem com suas paredes, onde a velocidade de fluxo é bastante reduzida. Em caminhos bastante estreitos, o aumento da viscosidade resulta no decréscimo da velocidade de fluxo no intervalo. Este processo promove o acúmulo de ânions em uma extremidade do canal e de cátions na outra extremidade. A passagem de corrente elétrica neste contexto resulta no acúmulo de cargas com sinal oposto separadas pela zona de estrangulamento e geração de uma diferença de potencial (Figura 4.4).

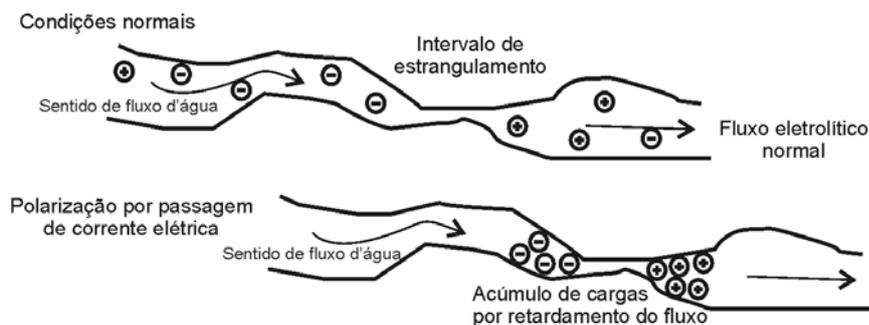


Figura 4.4 – Compressão do fluxo eletrolítico e polarização por passagem de corrente elétrica.

Outro mecanismo que afeta a velocidade do fluxo de íons sem impedir sua mobilidade é a presença de fragmentos de rocha ou partículas minerais distribuídas ao longo dos poros, que apresentem capacidade de troca catiônica. Este fenômeno é característico de argilominerais, constituídos de camadas alternadas de ânions e camadas passíveis de retenção ou troca de cátions em solução (Figura 4.5).

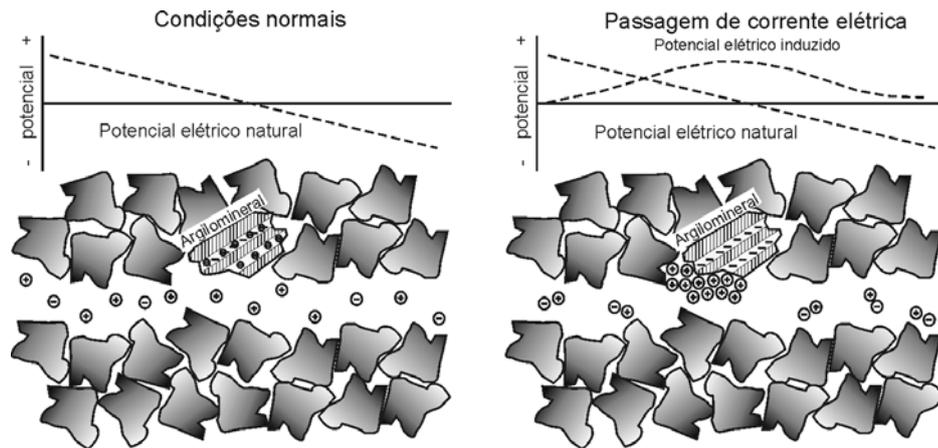


Figura 4.5 - Potencial elétrico natural em argilominerais e potencial produzido pela passagem de corrente elétrica em aquífero granular.

O grau de polarização não é diretamente proporcional à capacidade de troca catiônica em rochas com argilominerais (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966). Rochas como argilitos ou folhelhos argilosos apresentam baixa capacidade de polarização em relação a siltitos, que possuem um conteúdo menor de argilominerais. Rochas ricas em argila apresentam grande quantidade de carga negativa fixada nas camadas de troca, restando poucos ânions em solução. Na ausência de ânions livres, a capacidade de acúmulo e cargas é pequena.

Medidas de polarização induzida podem ser efetivadas de duas formas básicas. Uma forma consiste em aplicar corrente contínua no meio estudado e em medir o decréscimo da tensão após o corte de corrente. Outra forma consiste em medidas da polarização induzida pela variação de freqüência na corrente aplicada. A primeira forma é denominada técnica de domínio do tempo, utilizada neste trabalho, enquanto que a segunda é denominada técnica de domínio da freqüência.

No domínio do tempo as medidas são realizadas após a interrupção do fluxo de corrente. No domínio da freqüência as medidas são realizadas enquanto o fluxo de corrente é constante, com medição de duas ou mais freqüências distintas.

Os parâmetros de medidas de polarização induzida no domínio do tempo são determinados pela característica da forma da curva do potencial transiente, que podem ser a cargabilidade, integral tempo-transiente e percentagem de polarização induzida (TELFORD et al. 1990).

Cargabilidade é definida pelo potencial transiente variável entre dois pontos da curva de decaimento, normalizada pelo potencial primário (Equação 4.3):

$$M = \frac{1}{V_c} \int_{t_2}^{t_1} V_t dt \quad (\text{equação 4.3})$$

Este parâmetro é freqüentemente utilizado em medida no domínio do tempo, onde **M** é medido em termos de milissegundos.

A integral de decaimento é uma forma utilizada em equipamentos de medição e consiste em medir a integral do potencial transiente durante um período de tempo definido. Esta integração é realizada num tempo muito curto e se a curva de decaimento é amostrada em diversos pontos, os valores de integral efetivamente medidos são potenciais obtidos em diversos intervalos de tempo (Figura 4.6).

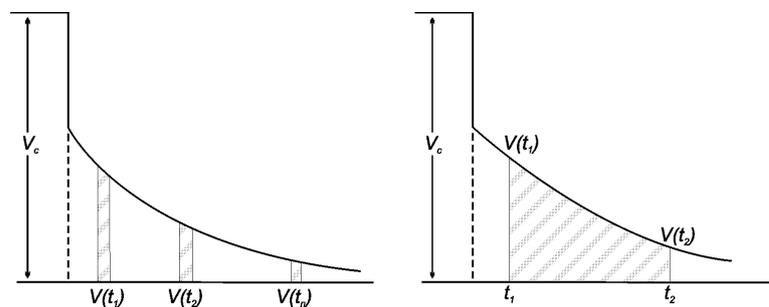


Figura 4.6 – Integral de $V(t)$ pelo intervalo de tempo de decaimento em diversos intervalos (à esquerda) e sob um intervalo amplo (TEL福德 et al., 1990).

A percentagem de polarização induzida consiste numa comparação entre a voltagem residual Vt existente num tempo t após a interrupção da corrente e a voltagem inicial Vc aplicada durante o fluxo de corrente. A voltagem residual deve ser medida em um tempo hábil para que o ruído não mascare o sinal. Contudo, não é possível medir o potencial no momento do corte da corrente devido a geração de potencial transiente resultante deste corte.

Devido ao fato de Vt ser muito menor que Vc , a relação Vt/Vc é expressa em milivolts por volts ou em freqüência. O intervalo de tempo t pode variar de 0,1 a 10 s.

4.1.3 - MÉTODO DE POTENCIAL ESPONTÂNEO

O potencial espontâneo é um dos mais antigos métodos geofísicos. Foi utilizada pela primeira vez por Robert Fox, interessado em detectar corpos de sulfeto em Cornwall – Inglaterra, em 1830 (DRAHOR, 2004).

Atualmente este método é utilizado em investigações de movimentação de águas subterrâneas, principalmente em engenharia e estudos ambientais.

Aplicações específicas incluem mapeamento de direções preferenciais de fluxo em corpos de barragens, diques e outras estruturas de contenção; determinação do padrão de fluxo em zonas de falhas ou fraturas seja em superfície ou dentro de túneis ou “shafts”, em estudos hidrogeológicos e geotécnicos (CORWIN, 1990).

Outras aplicações incluem a detecção de áreas com elevado gradiente geotermal, mapeamento de zonas de elevado fluxo térmico em áreas vulcânicas. Aplicações bastante recentes estão na determinação do gradiente de concentração de contaminantes em subsuperfície e estudos arqueológicos.

Diversos trabalhos demonstram a aplicabilidade do método em estudos de prospecção mineral, essencialmente em pesquisas de metais em corpos sulfetados, de forma complementar a aplicações dos métodos de polarização induzida, eletrorresistividade, métodos eletromagnéticos e magnetometria.

Este método apresenta rapidez e baixo custo de aquisição, seja em investigações preliminares ou durante estudos extensivos com outras técnicas geofísicas e/ou geotécnicas.

O método de potencial espontâneo é caracterizado pela realização de leituras de campo elétrico natural, sem necessidade de quaisquer circuitos de injeção de corrente elétrica ou geração de campo eletromagnético (ORELLANA, 1972).

Anomalias de potencial espontâneo resultam de variações na temperatura, gradiente de pressão, porosidade, migração de fluidos, variação de resistividade e da umidade do solo (CORWIN, 1990). Quanto ao processo de geração, o potencial espontâneo pode ser classificado em potencial Eletroquímico, Eletrolítico e Mineral.

O fenômeno de potencial eletroquímico engloba o potencial de difusão e o potencial de Nernst.

O potencial de difusão está associado a gradientes de concentração de espécies iônicas em subsuperfície. As diferenças na mobilidade de cátions e ânions em um meio poroso resultam em diferentes taxas de difusão, com conseqüente geração de potencial elétrico devido à separação de íons de cargas opostas por difusão diferencial. O campo elétrico resultante depende da velocidade de movimentação das espécies iônicas envolvidas e da manutenção da eletroneutralidade.

Em equilíbrio, o potencial de difusão (E_d) é dado por (Equação 4.4):

$$E_d = \frac{RT}{nF} (I_a - I_c) \ln (C_1/C_2) \quad (\text{equação 4.4})$$

onde l_a e l_c representam respectivamente a mobilidade de ânions e cátions, n é a carga elétrica do íon, R é a constante universal dos gases, T é a temperatura absoluta, F é a constante de Faraday e C_1 e C_2 são as concentrações da solução criada pelo gradiente de difusão.

O potencial de Nernst é considerado como potencial de folhelho em perfilagens de poços. Caso um nível de folhelho esteja em contato com um nível de arenito, uma diferença de potencial pode ser gerada devido ao arenito ser permeável aos íons Na^+ e Cl^- e ao folhelho ser permeável somente ao Na^+ . Este caso, o Na^+ difundido no folhelho tende a migrar para o arenito, em busca de estabilidade eletroquímica. O equilíbrio entre difusão e estabilidade eletroquímica é dado pela equação de Nernst, onde o potencial de difusão ocorre na ausência de mobilidade iônica diferencial (Equação 4.5):

$$E_d = \frac{RT}{nF} \ln (C_1/C_2) \quad (\text{equação 4.5})$$

A magnitude do potencial de difusão e de Nernst são diretamente proporcionais à temperatura.

O fenômeno de potencial Eletrolítico engloba o potencial de eletrofiltração e o potencial bioelétrico.

O potencial de eletrofiltração, também conhecido como potencial de fluxo ou zeta, surge quando a água ou outro fluido qualquer cruza rochas porosas ou fraturadas. Em áreas com elevada precipitação de chuva, relevo escarpado e rochas porosas, o potencial de eletrofiltração pode ser de grande amplitude.

O campo elétrico produzido pelo fluxo de um eletrólito através de um tubo é dado por (Equação 4.6):

$$E = \frac{\epsilon \rho \zeta}{4\pi \mu} p \quad (\text{equação 4.6})$$

onde ϵ é a constante dielétrica do eletrólito ($F.m^{-1}$), ρ é a resistividade do eletrólito ($\Omega.m$), ζ é um parâmetro determinado pela capilaridade das paredes do tubo e o eletrólito, p é o gradiente de pressão ($Pa.m^{-1}$) e μ é a viscosidade dinâmica do eletrólito ($Pa.s$). O campo elétrico é dado em relação à direção do gradiente de pressão e oposto à direção de fluxo do eletrólito.

O potencial bioelétrico é produzido pela seletividade de íons à ação de absorção de água pelas raízes das plantas. As raízes são membranas de seletivas de íons e, desta forma, podem gerar de anomalias de campo elétrico.

Alterações abruptas de potencial espontâneo podem ser acompanhadas pela mudança do tipo de vegetação, que seguem alterações no tipo de solo e rocha. Este fenômeno pode resultar em anomalias de centenas de milivolts.

O potencial mineral surge devido a reações geoquímicas de oxidação/redução num corpo de minério, equivalentes a célula galvânica definida pela Eletroquímica (Figura 4.7). Algumas das maiores anomalias de potencial espontâneo são associadas a depósitos minerais, especialmente corpos de sulfeto, com valores superiores a 2V.

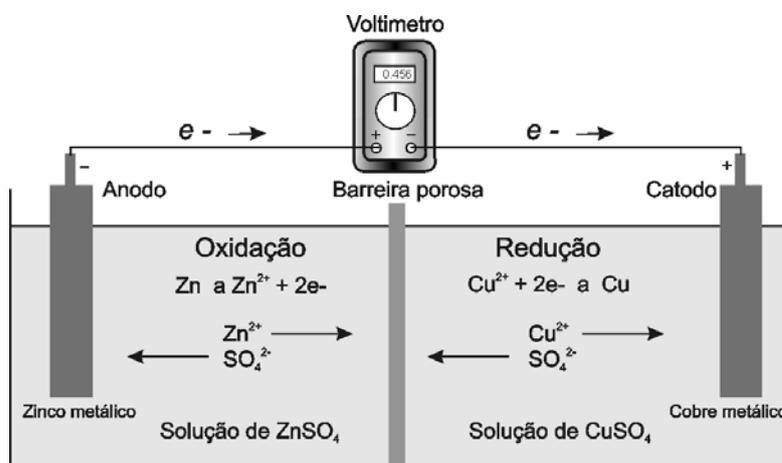


Figura 4.7 – Diferença de potencial redox entre duas metades de uma célula galvânica registradas por um voltmetro (NYQUIST & CORRY, 2002).

O modelo clássico proposto por Sato e Mooney (1960), conhecido por "geobateria", é aceito em todos os importantes trabalhos relativos ao estudo do potencial espontâneo, corroborado por Bigalke & Grabner (1997).

Estes autores realizaram um estudo crítico de cerca de 150 trabalhos relacionados ao tema, que permitiu as seguintes conclusões:

- Os corpos que produzem potencial elétrico são sempre bons condutores eletrônicos, geralmente com continuidade elétrica em seu interior.
- As anomalias de potencial elétrico são quase sempre negativas nas proximidades do extremo superior dos corpos.
- A diferença de potencial total observada pode ser de centenas de mV.
- O corpo deve estar, ao menos em parte, em uma zona de oxidação.
- O potencial espontâneo é relativamente estável com o tempo.

A partir da análise das principais teorias propostas, Sato & Mooney (1960) propuseram um mecanismo para origem do potencial espontâneo. Este mecanismo envolve uma reação entre duas células eletroquímicas, presentes simultaneamente em dois diferentes locais em um corpo de minério. Normalmente, uma célula está acima e outra abaixo do nível freático e são interligadas pelo corpo de minério. Estas duas células são opostas por natureza, uma catódica e outra anódica, com reações que envolvem ganho e perda de elétrons. Acima do nível freático ocorrem reações de oxidação, ao passo que abaixo do nível freático ocorre de redução (Figura 4.8).

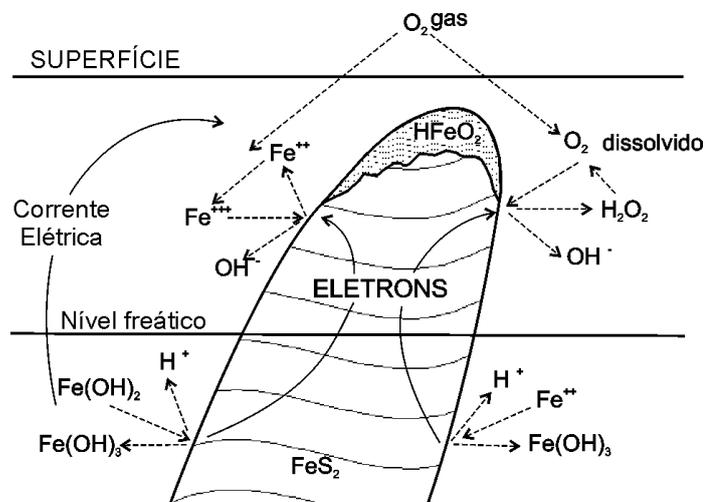


Figura 4.8 - Mecanismo gerador de potencial espontâneo (SATO & MOONEY, 1960)

A diferenças de potencial geram correntes naturais que surgem devido a diferenças de potencial de oxidação/redução da solução em redor, mediante contato entre as extremidades do corpo de minério. As substâncias dissolvidas em redor da porção superior do corpo estão em relativo estado de oxidação, e de redução abaixo do nível freático; estas diferenças relativas no grau de oxidação são reveladas em diferentes valores de Eh e resultam no fluxo de corrente elétrica em presença de um condutor eletrônico, neste caso representado pelo corpo de minério (Figura 4.8).

Os elétrons reduzidos da porção inferior são conduzidos a porção superior oxidada através do corpo de minério, desta maneira a porção inferior é relativamente oxidada frente à porção superior, relativamente reduzida (Figura 4.8).

Neste mecanismo, o corpo de minério não participa diretamente das reações eletroquímicas, pois caso contrário, seria consumido durante o processo. Este atua somente como um meio de transporte de elétrons quimicamente inerte.

Os trabalhos de Corry (1985) e Nyquist & Corry (2002) analisam a proposta de Sato e Mooney e levantam algumas questões incongruentes no modelo:

- Amplitude: segundo este modelo, não são possíveis valores superiores a 800mV baseado no potencial Eh dos sulfetos, cuja amplitude máxima da anomalia gerada entre os pólos da geobateria em relação ao eletrodo de referência é de somente 400mV. Contudo, diversos trabalhos relatam valores de 1000mv ou mais em estudos de corpos sulfetados (GAY, 1967).
- Perda do pólo positivo: este modelo requer pólos positivo e negativo. Medidas de potencial espontâneo em superfície e furos de sondagem em corpos de minério revelam anomalias negativas em relação ao eletrodo de referência locado nas imediações do corpo.
- Nível freático: não há referências neste modelo quanto a anomalias de potencial espontâneo em corpos de minério completamente secos, úmidos ou sobre sulfetos, caracterizados por condutor central não inerte.
- Estabilidade: medidas diretas de anomalias de potencial espontâneo associado a corpos de sulfeto são estáveis durante décadas e, presumivelmente, durante o tempo geológico. Entretanto, o modelo não esclarece de que forma a geobateria não "descarrega" ou os valores não oscilam frente a flutuações sazonais do nível freático e das conseqüentes variações sazonais na composição químicas das águas subterrâneas.

Estes autores concordam que anomalias detectadas em corpos de sulfeto resultam de processos químicos de oxidação/redução. Contudo, discordam da proposta de produção de voltagem pelo modelo de geobateria e descarga nas rochas resistivas em redor.

Tais autores propõem que o arranjo de pares de eletrodos mede meramente a diferença de potencial entre o eletrodo posicionado sobre a anomalia e o eletrodo de referência. A anomalia pode ser representada um corpo de sulfeto ou uma pluma de contaminação (Figura 4.9).

Em uma célula galvânica não ocorre fluxo de corrente elétrica a menos que os eletrodos estejam fixados em ambientes com diferenças de potencial. Desta forma, o potencial espontâneo seria gerado entre os eletrodos ligados por um cabo e não por um corpo de minério, a partir do fechamento de circuito entre uma zona relativamente mais oxidada e outra mais reduzida (Figura 4.9).

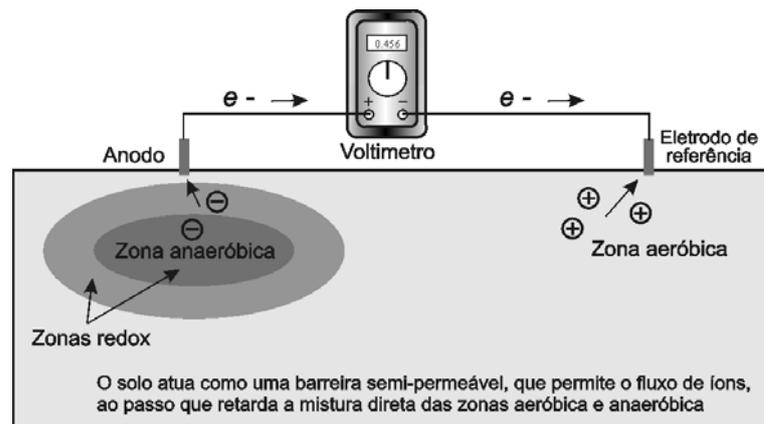


Figura 4.9 – Diferença de potencial produzida pelo metabolismo de bactérias em contaminantes derivados de hidrocarbonetos (NYQUIST & CORRY, 2002).

Um fio conectado a dois materiais imersos em um eletrólito com potencial de oxidação/redução suficientemente distinto para que haja uma reação espontânea, o resultado será um valor de potencial elétrico mensurável (Figura 4.9).

4.1.4 - TÉCNICAS E ARRANJOS DE AQUISIÇÃO

4.1.4.1 – SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL

É denominada Sondagem Elétrica Vertical (SEV) uma série de determinações de resistividade aparente com separação crescente entre os eletrodos de emissão e recepção ou separação crescente apenas dos eletrodos de emissão, em uma mesma direção (ORELLANA, 1972).

Os arranjos de campo mais utilizados na realização para SEV compreendem a disposição simétrica de quatro eletrodos em relação a um ponto central **P** fixo (Figura 4.10). Este ensaio permite leituras pontuais de resistividade em diversas profundidades na medida em que os eletrodos são espaçados de forma crescente.

Os valores de resistividade aparente, obtidos em cada SEV são plotados em um gráfico bi-logaritmico em relação à distância $AB/2$ de cada medida, que resulta numa curva de resistividade que varia em função da profundidade investigada.

Este trabalho utiliza o arranjo Schlumberger nas leituras de resistividade aparente por meio de SEVs. Este arranjo apresenta maior versatilidade na execução dos trabalhos de campo em relação ao arranjo Wenner, devido ao deslocamento de

apenas um par de eletrodos e leituras com menor susceptibilidade a interferências indesejáveis, provenientes de linhas de alta tensão e transformadores elétricos.

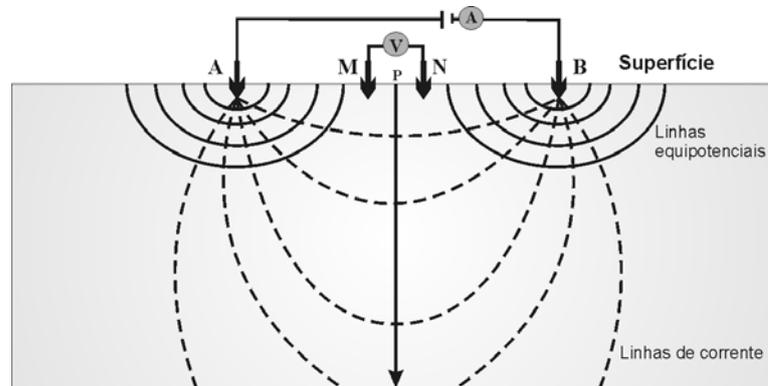


Figura 4.10 - Arranjo Schlumberger, com propagação de linhas equipotenciais e linhas de corrente num semi-espaço homogêneo.

A qualidade da curva de resistividade aparente obtida por meio do arranjo Schlumberger é superior a obtida pelo arranjo Wenner, devido ao fato dos eletrodos de potencial permanecerem fixos no caso do primeiro arranjo. Desta forma, os efeitos da zona superficial onde estão fixos os eletrodos permanecem o mesmo por toda a curva, até a próxima mudança de posição de M e N (ORELLANA, 1972).

A principal característica do arranjo Schlumberger é a curta distância dos eletrodos de potencial em relação aos eletrodos de corrente, sempre próximo da relação MN menor ou igual à $AB/5$ (Figura 4.11). Na prática, a distância MN é aumentada quando o sinal medido (ΔV) apresenta baixa intensidade, para realização de uma nova série de medidas com variação apenas dos eletrodos de corrente.

No caso do arranjo Schlumberger, o coeficiente geométrico K pode ser obtido de forma simplificada (Equação 4.7).

$$K = \pi \left(\frac{AM \cdot AN}{MN} \right) \text{ (equação 4.7)}$$

4.1.4.2 – CAMINHAMENTO ELÉTRICO

A técnica de Caminhamento Elétrico está baseada na realização de medidas de resistividade aparente ao longo de uma linha, com o objetivo de investigar variações em um ou mais níveis em profundidade.

Dentre os diversos tipos de arranjos de campo disponíveis para a técnica do caminhamento elétrico, o presente trabalho utiliza o arranjo dipolo-dipolo, devido a disposição dos eletrodos em arranjo simétrico, facilidade operacional durante a aquisição, baixa razão sinal/ruído, além de uma resolução lateral adequada aos objetivos do trabalho (Figura 4.11).

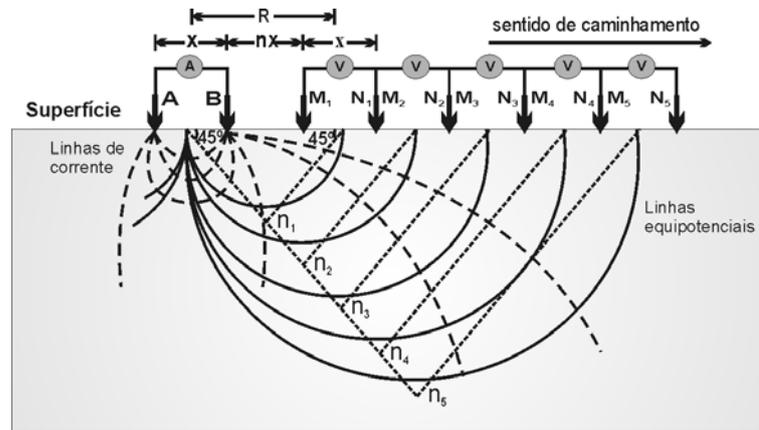


Figura 4.11 – Arranjo dipolo-dipolo, com propagação de linhas equipotenciais e linhas de corrente num semi-espaço homogêneo.

O arranjo dipolo-dipolo é caracterizado por utilizar espaçamento igual entre MN e AB, com deslocamento do centro de ambos os dipolos ao longo da linha. O espaçamento entre os dipolos AB e MN pode ser variado a partir do uso simultâneo de vários dipolos MN ao longo da linha (Figura 4.12).

A profundidade de investigação cresce com o espaçamento entre os centros de AB e MN, que, em teoria, corresponde a $R/2$ ou ao cruzamento de duas retas com ângulo de 45° , ou seja, uma reta que parte do centro de AB e outra que parte do centro de MN (Figura 4.13). Desta maneira, as leituras são realizadas a partir do par de eletrodos de potencial M_1N_1 que correspondem à profundidade teórica n_1 .

O fator geométrico K é calculado pela fórmula (Equações 4.8 e 4.9):

$$K = 2\pi G X \quad (\text{equação 4.8})$$

sendo G (equação 4.9)

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \quad (\text{equação 4.9})$$

x é o espaçamento entre os dipolos AB e MN e n é o nível teórico de investigação.

As seções obtidas permitem uma interpretação qualitativa das variações laterais do parâmetro medido partir de pseudo-seções, que podem ser processadas por meio da inversão de dados e interpretadas de forma quantitativa.

4.1.4.3 – POTENCIAIS

As medidas de potencial espontâneo foram realizadas por meio da técnica dos potenciais, em arranjo de base fixa ou campo total, com eletrodo de referência estacionário conectado ao equipamento e leituras de potencial com eletrodo de medidas móvel ou de caminhamento (CORRY, 1985).

A principal vantagem deste quando comparado ao arranjo gradiente é o baixo nível de erro acumulado. Embora cada medida esteja sujeita aos efeitos indesejados comumente descritos em medidas de potencial espontâneo, não ocorrem acúmulos de erro como no método gradiente. Os dados obtidos pelo arranjo de base fixa são considerados de melhor qualidade em relação ao arranjo gradiente, provavelmente em decorrência da baixa influência de correntes espúrias (CORWIN, 1990).

A partir deste arranjo foram efetuadas medidas de potencial espontâneo por meio de um par de eletrodos não polarizáveis. Neste trabalho foram utilizados eletrodos não-polarizáveis de Pb/PbCl tipo Petiau (PETIAU, 2000).

Este eletrodo consiste em um elemento metálico (Pb) imerso em uma solução de sal - PbCl, ao qual é adicionado caulim para retardar a perda de eletrólito. Sua base é constituída por uma junção porosa de madeira para contato entre a solução e o solo, sendo a extremidade superior lacrada por cap de PVC, ao qual é fixado um fio de chumbo para contato entre o conector externo e o eletrólito.

O procedimento em campo para aquisição de dados segue em linhas gerais a proposta de Corwin (1990). Abaixo são descritos tais procedimentos:

- Eletrodo de referência fixado a montante do fluxo d'água subterrânea.
- Adoção do eletrodo de referência como o pólo negativo e do eletrodo de leitura como pólo positivo no medidor.

A locação do eletrodo de referência em base fixa visa evitar mudanças bruscas nas medidas ("drift"), reduzir a polarização e erros por efeitos acumulativos.

4.2 – MÉTODOS ANALÍTICOS DE CAMPO

O potencial de oxidação-redução representa a tendência de liberação ou ganho de elétrons, que pode ser medido por meio de um eletrodo inerte (YU & JI, 1993). A diferença de potencial entre um eletrodo de metal inerte e os íons em solução é na realidade um processo de oxidação/redução, devido ao fato de sempre haver transferência de elétrons na interface solução-metal. Para reações entre substâncias com diferentes estados de valência, a equação geral pode ser descrita como (Equação 4.10):



Um eletrodo tipo platina para oxidação/redução inserido em um sistema, servirá como meio de transferência de elétrons, onde compostos oxidantes e redutor podem entrar em equilíbrio, com estabelecimento do potencial de equilíbrio pelo eletrodo. Este é denominado potencial de oxidação/redução (redox), designado como E_h , no qual o símbolo h significa o potencial relativo a um eletrodo normal de hidrogênio (Equação 4.11):

$$E_h = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{reductor}}}{a_{\text{oxidante}}} \quad (\text{equação 4.11})$$

Esta é a equação de Nernst para reação de oxidação/redução, posteriormente deduzida das equações termodinâmicas de *energia livre de Gibbs*.

O potencial de oxidação/redução de um sistema é determinado a partir de um potencial padrão E° . Para um sistema a uma determinada temperatura o valor de E_h é determinado pela razão de atividade entre dois componentes devido aos termos E° , n , R , T e F serem constantes, mas não por suas quantidades absolutas (BROWNLOW, 1996). Desta forma, o fator E_h é produto da avaliação da intensidade do estado redox da solução.

Um sistema com valores de E° mais positivos indicam forte poder de oxidação, que pode oxidar sistemas com valores mais negativos de E° . Reciprocamente, este sistema pode ser reduzido e retornar ao estado anterior. Grandes diferenças de E° entre dois sistemas resultam em reações oxidação/redução relativamente facilitada.

O pH é originalmente definido em termos de concentração do íon hidrogênio (BROWNLOW, 1996) (Equação 4.12) :

$$\text{pH} = -\log (\text{H}^+) \quad (\text{equação 4.12})$$

O uso deste termo permite referenciar a concentração do íon hidrogênio a uma escala positiva e variável entre 0 a 14. Esta definição é baseada em termos de atividade do íon H^+ (Equação 4.13):

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] \quad (\text{equação 4.13})$$

A aplicação de instrumental para determinação do pH em solução consiste em medir a atividade do íon hidrogênio em razão da concentração do íon hidrogênio. Um medidor de pH é uma célula eletroquímica que utiliza um par de eletrodos, por meio do qual é medida a força eletromotriz da solução. Os eletrodos medem em volts, somente em função da atividade do íon hidrogênio.

A ionização da água pode ser descrita como (Equação 4.14):



A constante de equilíbrio da reação a 25°C é dada por (Equação 4.15):

$$K = [\text{H}^+] [\text{OH}^-] = 10^{-14} \quad (\text{equação 4.15})$$

Em água pura, $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-]$ e $\text{pH} = 7$, que define uma solução como neutra. Os valores em equilíbrio constante mudam com a temperatura. Independente da presença de outros solutos em solução, o produto da atividade dos íons hidrogênio e hidróxido é sempre 10^{-14} a 25°C.

4.3 – PERMEABILIDADE HIDRÁULICA

Este trabalho realiza medidas de permeabilidade hidráulica a partir de um permeâmetro de Guelph, caracterizado como Infiltrômetro de anel duplo.

Este ensaio atinge somente a saturação de campo, devido à impossibilidade de expulsão total de ar intraporo apenas com a carga hidráulica produzida. Desta forma, a condutividade obtida será a condutividade hidráulica da saturação de campo (K_{fs} – hydraulic conductivity at field saturation).

O equipamento é projetado para medidas de condutividade entre 10^{-2} cm/s e 10^{-6} cm/s. Além deste intervalo ocorrem erros que impedem a realização do ensaio.

A recarga de água no furo está submetida a três tipos de fluxo: pressão radial ao longo das paredes, pressão vertical na base do furo e pressão gravitacional. Ao considerar a variação destes fluxos ao longo da base e das paredes do furo, foi

desenvolvido um método semi-analítico e numérico para a estimativa da permeabilidade saturada de campo. Mas, para a aplicação destes métodos, algumas condições têm que ser consideradas:

- Meio poroso rígido, homogêneo e isotrópico;
- Fluxo em regime permanente;
- Domínio de fluxo em um semi-espaço infinito.

A partir do somatório destes três fluxos considerando a Lei de Darcy e as características geométricas do furo de sondagem, Reynolds et al. (1983), desenvolveram uma equação para quantificar a K_{sat} a partir dos valores do fluxo (Q) obtidos no campo com o permeômetro de Guelph (Equação 4.16):

$$K_{sat} = \frac{CQ}{2\pi H^2 \left[1 + \frac{C}{2} \left(\frac{a}{H} \right)^2 \right]} \quad (\text{equação 4.16})$$

onde

K_{sat} – condutividade saturada [cm/h]

a – raio do furo [cm]

C – constante de proporcionalidade adimensional

Q – fluxo constante medido no campo ($Q = R \times A$) [cm³/h]

H – carga constante aplicada [cm]

Para os cálculos do coeficiente de permeabilidade, geralmente são feitos ensaios com duas cargas de pressão (H_1 e H_2). Com cada carga aplicada, se obtém as vazões (Q_1 e Q_2). A condutividade hidráulica será (Equações 4.17, 4.18 e 4.19):

$$K = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (\text{equação 4.17})$$

onde

$$G_1 = \frac{H_2 C_1}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (\text{equação 4.18})$$

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (\text{equação 4.19})$$

a = raio do furo

C = parâmetro retirado do gráfico $C \times H/a$

5 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 - ELETRORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA

Por meio da aplicação conjunta das técnicas de sondagem elétrica vertical, caminhamento elétrico – para leitura dos parâmetros resistividade e cargabilidade, e potencial espontâneo em arranjo gradiente, Elis & Zuquette (2001) caracterizam uma área de lançamento de resíduos de curtume ricos em cromo, em Franca (SP). Os resultados indicam que a resistividade elétrica é o parâmetro mais promissor na identificação de zonas anômalas associadas ao fluxo de resíduos, enquanto que a cargabilidade não revela relação de contraste entre áreas impactadas e não impactadas. Os dados de potencial espontâneo auxiliaram na determinação de caminhos preferenciais de fluxo d'água subterrânea, sem indicar atividade geoquímica nas áreas contaminadas.

O trabalho de Elis (1999) descreve as possibilidades de aplicação e as limitações dos métodos geofísicos elétricos no estudo de áreas de disposição de resíduos, e da conseqüente contaminação gerada. Os resultados indicam o método da eletrorresistividade como a ferramenta mais indicada aos objetivos propostos, principalmente devido a grande versatilidade, facilidade e rapidez na aquisição de dados em campo, enquanto que o parâmetro cargabilidade demonstrou sensibilidade à presença de resíduos urbanos e ao chorume percolado no solo. A técnica de potencial espontâneo demonstrou ser bastante adequada ao estudo de alvos específicos, como atividade geoquímica resultante da degradação dos resíduos orgânicos e o fluxo em zonas fraturadas.

No monitoramento do aterro sanitário de Nanji em Seul (Coréia do Sul), Hyoung-Soo & Yeonghwa (1997) utilizam o método de potencial espontâneo em arranjo gradiente e base fixa, associada a medidas de resistividade elétrica a partir das técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico. Os resultados de potencial espontâneo apresentam ampla variação nos valores – entre -500mV e 600mV, associada à atividade geoquímica, além de valores semelhantes entre os arranjos gradiente e base fixa.

A integração de análise estrutural, condutividade hidráulica e resistividade por meio de sondagens elétricas verticais, possibilitaram a Frohlich et al. (1996), uma estimativa das propriedades hidráulicas do maciço fraturado onde está localizado o

aterro sanitário Central de Rhode Island (Estados Unidos). A definição de caminhos preferenciais de fluxo d'água no maciço foi possível devido à baixa resistividade elétrica associada a planos de fratura. A correlação entre condutividade hidráulica e resistividade elétrica das camadas estudadas, sugerem que íons presentes na água contida em fraturas são em parte condutores de corrente elétrica, ou seja, quanto menor a resistividade elétrica, maior a condutividade hidráulica da zona de fratura.

O monitoramento por longos períodos em áreas contaminadas é demonstrado por Aaltonen & Olofsson (2002) no depósito de lixo de Högbypörp, Estocolmo (Suécia), pela aplicação de um sistema de eletrodos e cabos fixos para medidas de resistividade aparente dispostos em duas linhas, com medidas mensais entre 1996 e 1999. Os resultados revelam variações sazonais em torno de 15% em arenitos e variações praticamente imperceptíveis em argilitos. Não houve indicação de migração de contaminantes em subsuperfície no sentido das linhas de monitoramento, localizadas nos limites da área do depósito.

Com o objetivo de estimar a extensão e espessura de resíduos e definir a profundidade do nível freático contaminado do aterro sanitário de Mallard North – Illinois (Estados Unidos), Carpenter et al. (1990) utilizam a técnica de sondagem elétrica vertical em arranjos Wenner e Schlumberger. Os resultados indicam o arranjo Schlumberger como o mais adequado ao estudo em áreas contaminadas, por definir estratos de cobertura de resíduos ($15\Omega.m$ a $30\Omega.m$), estratos com resíduos insaturados ($9\Omega.m$ a $19\Omega.m$) e o nível saturado por acúmulo de chorume.

Na caracterização geoquímica e geofísica do aterro sanitário municipal de Camacchio (Itália), Abu-Zeid et al. (2004) utilizam os métodos de resistividade elétrica e polarização induzida, na tentativa de esclarecer a resposta IP geralmente observada em aterros e suas áreas adjacentes. Diversas análises químicas em amostras de águas subterrâneas coletadas na área do aterro descrevem grandes quantidades de metais dissolvidos, sob a forma de partículas metálicas insolúveis. Resultados obtidos sobre os intervalos com resíduos indicam baixos valores de resistividade e elevados valores de cargabilidade. Os autores interpretam esta associação a presença de metais dissolvidos, que se comportam como condutor eletrônico pela ocorrência do fenômeno de polarização eletrônica.

Em estudo realizado em duas áreas de disposição de resíduos domiciliares por Cardarelli & Di Filippo (2004), sendo um aterro sanitário revestido com membrana impermeável, e um aterro controlado com disposição direta sobre o solo, são

aplicados os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida. Os resultados para o aterro sanitário revelam baixos valores de resistividade e altos valores de cargabilidade na base das valas, onde ocorre saturação por acúmulo de chorume. Os sedimentos de substrato do aterro controlado são caracterizados por elevados valores de resistividade e baixos valores de cargabilidade; contudo, o substrato permeável (zona insaturada) abaixo das valas de resíduos é caracterizado por baixos valores de resistividade e elevados valores de cargabilidade.

Por meio da aplicação conjunta dos métodos de eletrorresistividade e polarização induzida no aterro sanitário de Rio Claro - SP, Moura & Malagutti Filho (2003) caracterizam os intervalos com células de resíduos enterrados, que contrastam com os sedimentos que constituem o arcabouço geológico da área. As células de resíduos estão situadas acima do nível freático e são caracterizadas por baixos valores de resistividade e elevados valores de polarizabilidade, em relação ao padrão descrito em ensaios realizados fora do aterro, que caracterizam os sedimentos da área por elevada resistividade e baixa polarizabilidade. Os autores associam o padrão obtido nas células de resíduos à presença de chorume enriquecido em íons (baixa resistividade), e a presença de metais e outros materiais eletricamente carregáveis (elevada polarizabilidade).

No aterro sanitário de Bauru (Brasil), Lago et al. (2006) aplicam os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida no estudo das relações espaciais entre a área de disposição de resíduos e o ambiente natural. Os resíduos contidos em valas apresentam baixa resistividade e elevados valores de cargabilidade, depositados em cotas no terreno acima do nível freático. Os autores definem intervalos de zona saturada e zona insaturada, e apontam áreas contaminadas dentro da zona saturada, caracterizada por baixos valores de resistividade e de cargabilidade.

Em estudo de recuperação ambiental três áreas de deposição de resíduos na Suécia por Leroux et al. (2007), foram realizadas medidas conjuntas de resistividade e cargabilidade. Todas as áreas são constituídas por sedimentos arenosos e argilosos, com resíduos dispostos diretamente sobre o solo, acima do nível freático. Os resultados para os três casos foram baixos valores de resistividade e elevados valores de cargabilidade no intervalo com resíduos.

Em estudo comparativo entre eletrodos metálicos e eletrodos de Pb/PbCl₂, Dahlin et al. (2002) realizam leituras de resistividade e cargabilidade por meio da

técnica de caminhamento elétrico no aterro sanitário de Dalby (Suécia). Os resíduos contidos nos intervalos das valas são caracterizados por anomalias de baixa resistividade e elevada cargabilidade, dispostos acima do nível freático.

Os artigos supracitados corroboram para a hipótese de ocorrência conjunta de baixa resistividade e alta cargabilidade em áreas de disposição de resíduos situadas acima do nível freático, associação descrita também em Vogelsang (1995) e Ward (1990). Entretanto, a presença de chorume na zona saturada aparentemente é caracterizada por anomalias de baixa resistividade e baixa cargabilidade, segundo Lago (2004) e Gallas et al. (2003).

5.2 - POTENCIAL ESPONTÂNEO

A delimitação de plumas de contaminação a partir da definição de frentes de oxidação/redução pode ser uma técnica auxiliar em avaliações geoquímicas. Naudet et al. (2003) e Naudet et al. (2004) , utilizam esta técnica concomitante a medidas de Eh, no estudo da evolução de uma pluma de contaminação proveniente do aterro sanitário Entressen – França. Os resultados indicam que o potencial elétrico decresce progressivamente na zona anaeróbica, aumenta drasticamente na frente de redox e finalmente alcança o padrão da área de estudos ao atingir a zona de oxidação. Em perfil, há uma grande correlação entre potencial espontâneo negativo e medidas de potencial redox, com geração de potencial elétrico associada a processos de oxidação/redução dos compostos contaminantes.

Medidas de potencial espontâneo podem promover meios de detecção e quantificação relativa de contaminantes nas águas subterrâneas. Baker & Cull (2004) aplicaram a técnica no vale do rio King – Tasmânia, para avaliação da presença de metais provenientes de pilhas de rejeito da mina de sulfetos Mt. Lyell, localizada nas adjacências. Os contornos do potencial elétrico foram consistentes com o potencial hidráulico estimado a partir de piezômetros, auxiliando desta forma no refinamento do modelo de fluxo d`água subterrânea e na compreensão dos gradientes de pressão observados em perfurações.

O fluxo de água subterrânea em paleocanais permeáveis pode ser detectável por meio do potencial de fluxo, com valores positivos no sentido de fluxo d`água. Revil et al. (2005) aplicaram a técnica no delta do rio Reno, sudoeste da França, em conjunto com linhas de caminhamento elétrico para definição da arquitetura dos

estratos sedimentares. Os resultados indicam que o método de potencial espontâneo permitiu delinear os contornos do pelaocanal, além da sensibilidade em determinar a direção preferencial de fluxo da água subterrânea em relação ao substrato impermeável adjacente, enquanto que as linhas de caminhamento permitiram averiguar a profundidade do canal e sua arquitetura.

Nesta linha de trabalho, Nimmer & Osiensky (2002) realizaram medidas de potencial espontâneo e de resistividade em superfície e em furos, para avaliar o fluxo de uma pluma salina em basalto parcialmente fraturado, na Universidade de Idaho – Estados Unidos. Os resultados indicam que o potencial espontâneo permite detalhes adicionais da dinâmica da pluma num meio complexo, em relação às técnicas de campo elétrico artificial, que em algumas linhas pesquisadas foram insensíveis à presença de contaminantes.

Também em meio fraturado, Mota et al. (2004) aplicam as técnicas de potencial espontâneo, caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical na avaliação estrutural de maciço granítico subjacente ao aterro sanitário de Póvoa de Lanhoso – Portugal. Os resultados permitiram definir zonas de baixa resistividade correlacionadas com valores negativos de potencial espontâneo, que indicam áreas impactadas por contaminantes oriundos do aterro.

A temperatura e a circulação em subsuperfície de fluidos hidrotermais são feições características de sistemas geotermiais, capazes de gerar um campo elétrico detectável em superfície. Çaglar & Demirörer (1999) aplicam a técnica na obtenção de geometrias e possíveis zonas de falhas com fluxo de águas quentes, no campo geotermal de Kertanbol – Turquia, associada a medidas de resistividade. Os resultados revelam a continuidade de uma zona geotermal comprovada, além de detectar outras duas regiões de baixa resistividade próxima à zona principal, promovendo-as a alvos de prospecção futura.

Análises estruturais aliadas a técnicas geofísicas podem auxiliar na compreensão de sistemas aquíferos hidrominerais quentes em zonas de falha. Santos et al. (2002) utilizam o método de potencial espontâneo e o método eletromagnético indutivo na região de Vilarelho da Raia-Chaves – Portugal, na avaliação de fontes de águas termominerais estruturalmente controladas. Os resultados permitem delinear estruturas rasas associadas a fontes de água mineral da região, sendo o potencial espontâneo importante para delimitação e correlação

de zonas de falhas com modelos estruturais, e estimativas preliminares de porosidade pelo método eletromagnético indutivo.

Anomalias de potencial espontâneo ocorrem em diversas regiões hidrotermais e vulcânicas, nas quais as variações de potencial são associadas ao fluxo de fluidos geotermiais ou atividade vulcânica. Lewicki et al. (2003) utilizam medidas de potencial espontâneo, de fugacidade de CO₂ e temperatura nas adjacências do cone Comalito, flanco do vulcão Masaya – Nicarágua. O uso concomitante de medidas de potencial espontâneo e de CO₂ permitiu uma melhor compreensão dos processos que ocorrem no sistema vulcânico em subsuperfície.

A aplicação desta técnica é bastante esporádica em estudos arqueológicos. Entretanto, Drahor (2004) apresenta uma série de casos históricos na detecção de vasos cerâmicos, objetos metálicos, paredes de antigas construções, entre outros, sempre de forma complementar a outras técnicas geofísicas como magnetometria, eletrorresistividade e radar de penetração no solo.

A aplicação do modelo de Sato & Mooney em estudos de prospecção mineral com o método de potencial espontâneo, demonstra a eficácia deste modelo em tais casos e contribui para o entendimento de diversos jazimentos.

A partir de um levantamento com mais de 1200 Km de linhas de potencial espontâneo para a mina Yanacocha – Peru, Goldie (2002) apresenta uma relação direta entre anomalias de elevada resistividade e zonas com potencial espontâneo de grande intensidade, com valores médios acima de -1V e extremos de 10V. Conclui também que o volume dos corpos sulfetados e valores extremamente elevados de resistividade contribuem diretamente para a magnitude dos valores de potencial espontâneo.

5.3 - POTENCIAL HIDROGEONIÔNICO E POTENCIAL DE OXIDAÇÃO/REDUÇÃO

A correlação temporal dos produtos de degradação do diesel e mudanças na condutividade elétrica específica em experimentos em laboratório, sob condições aeróbicas e anaeróbicas, resultou em mudanças biogeoquímicas significativas e num acentuado aumento da condutividade elétrica do meio (CASSIDY et al., 2001). Tais mudanças correspondem ao aumento de sólidos totais dissolvidos por ação de ácidos orgânicos em processos de dissolução mineral, com produção de CO₂.

Experimentos de campo em rejeito de mineração sugerem que a mobilidade de metais depende do pH e do Eh, que influenciam na especiação ou associação de metais com a matriz (PAGNANELLI et al., 2004), pois num curto espaço de tempo os metais são imobilizados em rejeitos devido à precipitação secundária ou reações de adsorção, mudanças no pH ou o pH induzindo decréscimo no Eh e conseqüente aumento na mobilidade de metais.

Variações de pH e Eh em rejeitos areno-siltosos de uma mina de cobre em escala de laboratório por Al-Abed et al. (2006), indicam que sob pH levemente alcalino (entre 7 e 9) ocorre um modesto aumento ou redução nas concentrações de Cu, Pb e Zn dependendo ao teor de O₂, possivelmente devido à liberação de metais por indução do pH ao decréscimo do Eh ou formação de complexos. Entretanto, sob condições de pH ácido ou fortemente alcalino, ocorre a liberação de grandes quantidades de metais (Figura 5.1).

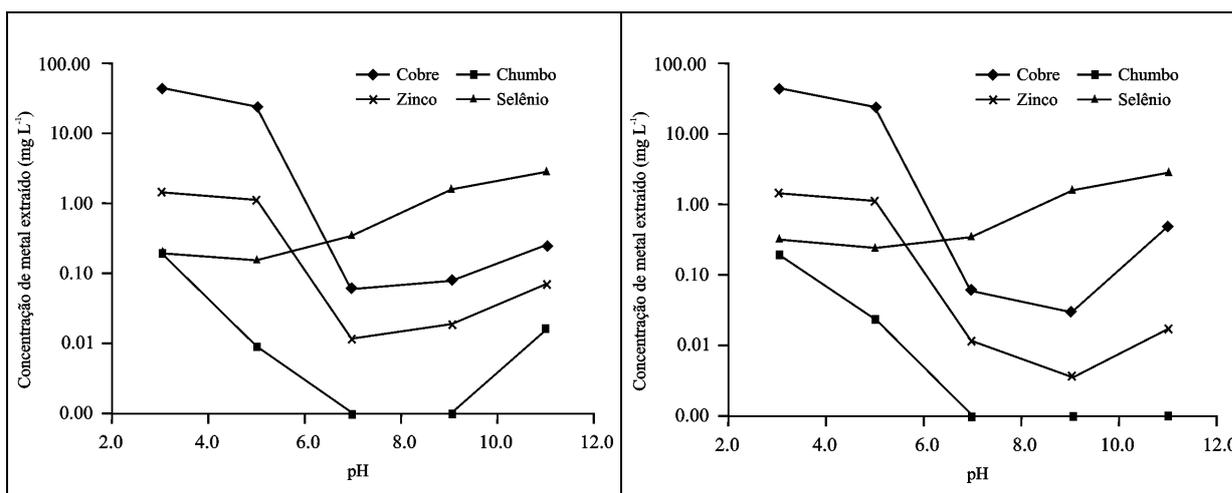


Figura 5.1 - Concentração de metais extraídos sob pH controlado (AL-ABED et al., 2006). Condições óxicas (esq.). Condições anóxicas (dir.).

Sob condições óxicas, Cu, Pb e Zn apresentam um padrão em “V”, com forte liberação em condições extremas de pH, enquanto o Se apresenta uma tendência constante de liberação concomitante ao aumento do pH. Sob condições anóxicas ou redutoras, o comportamento do Zn, Cu e Se é semelhante, exceto no caso do Pb que se mostra não lixiviável acima do pH 7. Estes dados demonstram os efeitos distintos de mudanças do pH na liberação de metais e sua direta influência nos mecanismos de adsorção/desorção e dissolução.

Os experimentos de Singh (2001), demonstram o aumento da temperatura e o decréscimo proporcional dos valores de Eh em medições em poços, acompanhado pelo aumento do pH (Figura 5.2).

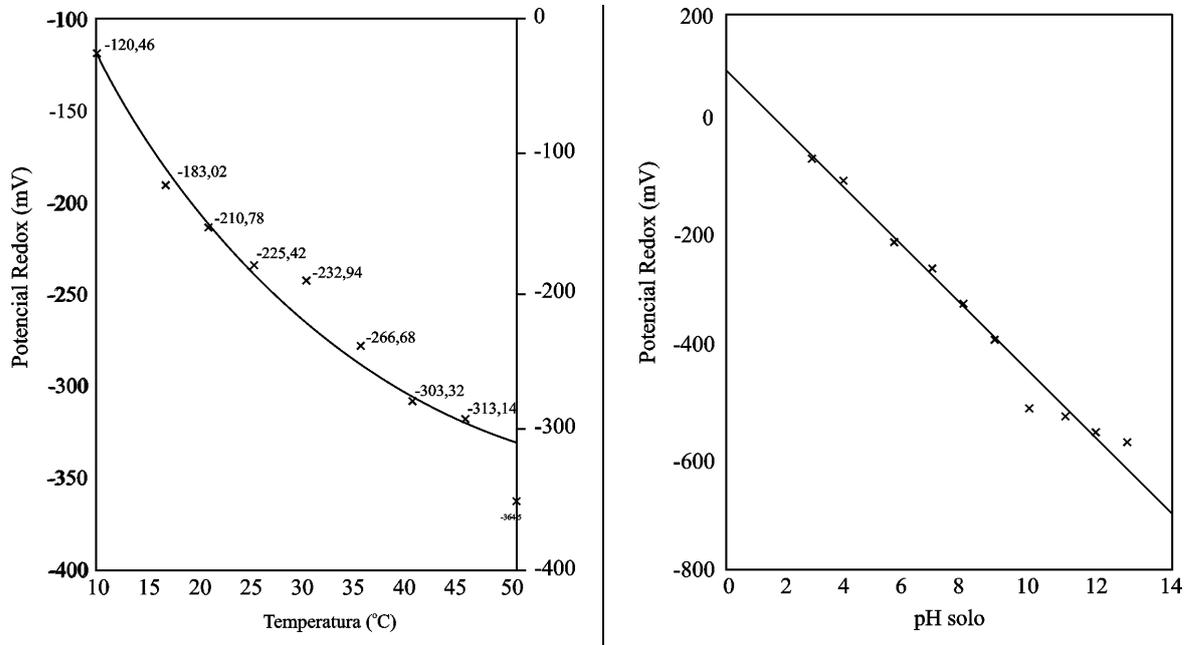


Figura 5.2 – Efeitos da temperatura, pH e Eh em sedimentos (SINGH, 2001).

Variação do potencial redox com a temperatura (esq.), e pH (dir.)

A correlação positiva entre temperatura do solo e emissão de metano é limitada pelo suprimento de O_2 proveniente da água subterrânea, essencial para a atividade microbiana (SEILER et al., 1984). Quanto ao pH, o processo de metanogênese é positivo entre 6 e 8, com pH ótimo próximo a 7, cujas mudanças além desta faixa afetam drasticamente a produção de CH_4 em solos anaeróbicos (CICERONE & OREMLAND, 1988).

Os trabalhos de Shannon & White (1994) e Reslev & King (1996) descrevem uma correlação entre nível d'água, metanogênese e emissão de CH_4 por pântanos. Singh (2001) conclui por meio de testes em amostras de solo encubadas em laboratório que uma relação solo/água de 1:0,5 apresenta Eh $-148,5$ mV, enquanto que uma relação solo/água de 1:4 o Eh varia para -312 mV.

É possível concluir que ocorram variações sazonais nos valores de Eh, que tende a ser mais negativos em períodos chuvosos e mais positivos em períodos de

seca além de variações associadas à temperatura, com menor atividade microbiana em dias frios, são correlacionáveis ao método de potencial espontâneo.

As maiores mudanças no comportamento de processos redox em elementos traços ocorrem tipicamente na interface entre água e sedimento, limite que freqüentemente define a passagem da zona óxica para a zona anóxica. Tais mudanças induzem a ocorrência de ciclos geoquímicos complexos, cujo entendimento pode auxiliar no controle da qualidade da água.

Por meio de ensaios em coluna de sedimentos, Schlieker et al. (2001) detectaram a liberação de Ce e La para água como resultado da redução de óxidos e hidróxidos de Fe e Mn, com teores mais elevados associados à zona de redução mais acentuada, concomitante a estabilização de sulfetos. Nos intervalos mais óxicos, ocorreu à liberação de Cu, Zn, e Mo provenientes da oxidação de sulfetos.

A aplicação conjunta de medidas de potencial espontâneo, pH e Eh em poços na área do depósito de ouro Marsh Zone – Canadá, por Hamilton et al. (2004), permitiram o reconhecimento de um corpo mineralizado, sotoposto a um pacote de sedimentos glaciais de 20m de espessura. Os resultados comprovam uma correlação inversa entre Eh e pH, em particular nas vizinhanças do corpo mineralizado, seja em medidas próxima a superfície ou em níveis mais profundos nos poços (Figura 5.3).

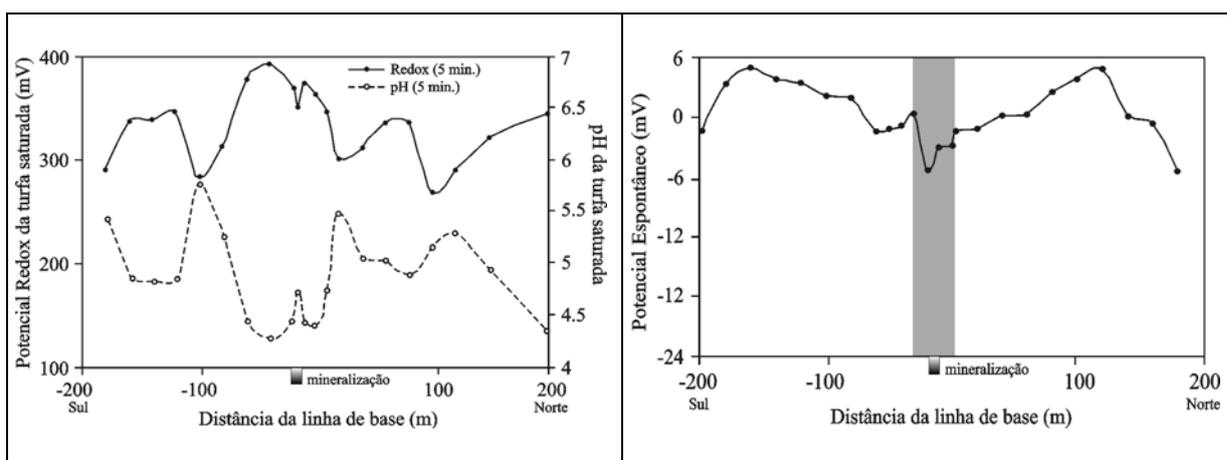


Figura 5.3 – Correlação entre medidas de pH, Eh, potencial espontâneo e posição do corpo mineralizado no depósito de ouro Marsh Zone (HAMILTON et al., 2004).

6 - AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO

6.1 – AQUISIÇÃO DE DADOS

Para medidas de resistividade elétrica, cargabilidade e potencial espontâneo, foi utilizado o resistivímetro Terrameter, modelo SAS 4000, fabricado pela ABEM (Suécia), (Foto 6.1). Este equipamento consiste num módulo único de transmissão e recepção de dados, com 100W de potência e 4 canais de leitura (ABEM, 2006).



Foto 6.1 – Resistivímetro Terrameter SAS 4000.

As medidas de Eh e pH foram efetuadas por meio do medidor PH-1500 (Foto 6.1A), em amostras de solo dos pontos de leitura de resistividade e cargabilidade conjuntos, nas linhas de caminhamento elétrico. Para as medidas de Eh foi utilizado um eletrodo de platina conjugado a um eletrólito de referência de cloreto de prata – Pt/AgCl, marca Instrutemp, modelo ORP-897. Para as medidas de pH foi adotado um eletrodo de vidro sensível combinado com eletrodo de prata/cloreto de prata Ag/AgCl, marca Instrutemp, modelo EPC-70.

Para estimativa da condutividade hidráulica foi utilizado o permeâmetro tipo Guelph, modelo 2800KI, fabricado pela Soilmoisture (Estados Unidos) (Foto 6.1B). Este equipamento consiste num permeâmetro de carga hidráulica constante, que mede a condutividade hidráulica saturada de campo. É composto de uma garrafa de Mariotte, que controla a carga constante de água dentro do furo no solo, um tubo de acrílico graduado para introdução de água e um tripé que permite adaptar o aparelho a terrenos irregulares.

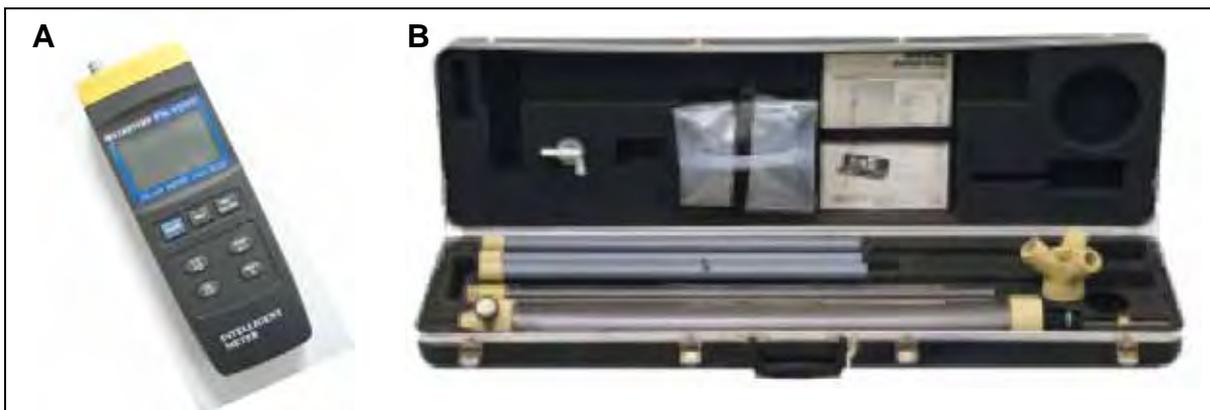


Foto 6.2 - A) Medidor PH-1500, B) Permeâmetro Guelph.

6.1.1 - ELETRORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA

Neste trabalho são adotadas as seguintes configurações para o resistivímetro: corrente de transmissão = 50mA, atraso inicial = 10ms, intervalo da janela de leitura = 100ms, janela única de leitura e 1s por ciclo de aquisição.

Foram realizadas 30 sondagens elétricas verticais, sendo 6 sondagens externas para definição da profundidade do nível freático e 24 sondagens rasas dispostas na linha de referência e sobre as valas de resíduos datadas (Figura 6.1), para avaliar as variações temporais dos parâmetros no solo contaminado e suas relações com o ambiente natural.

As SEVs 1 a 4 apresentam abertura máxima de AB/2 de 300m e as SEVs 5 e 6 apresentam abertura máxima de AB/2 de 400m, a partir das quais foi medido apenas o parâmetro resistividade elétrica (Tabela 6.1). As demais sondagens apresentam abertura máxima de AB/2 de 60m, onde foram utilizados de eletrodos não polarizáveis para leitura conjunta de resistividade e cargabilidade.

Foram realizadas 12 linhas de caminhamento elétrico em arranjo Dipolo-dipolo, 8 níveis de profundidade e espaçamento entre eletrodos de 5m (Tabela 6.1). A linha de referência e as linhas 1, 4 e 5 foram realizadas nos arredores da área do aterro, enquanto que linhas 2 e 3 cruzam toda seqüência de valas (Figura 6.2).

As linhas 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006 e 2007 seguem o sentido de abertura das valas, cuja denominação indicam o ano de fechamento das respectivas valas (Figura 6.2). Foram selecionadas valas fechadas no mês de dezembro, de modo que houvesse variações anuais no tempo de residência dos resíduos.



Figura 6.1 – Pontos de Sondagem Elétrica Vertical.

Tabela 6.1 - Relação dos ensaios geofísicos realizados.

Método	Técnica	Arranjo	Quantidade	Alvo
Eletrorresistividade	Sondagem Elétrica Vertical	Schlumberger	6 sondagens	Profundo
Eletrorresistividade	Sondagem Elétrica Vertical	Schlumberger	24 sondagens	Raso
Polarização Induzida	Sondagem Elétrica Vertical	Schlumberger	24 sondagens	Raso
Eletrorresistividade	Caminhamento Elétrico	Dipolo-dipolo	13 linhas	Raso
Polarização Induzida	Caminhamento Elétrico	Dipolo-dipolo	13 linhas	Raso
Potencial Espontâneo	Caminhamento Elétrico	Base fixa	241 leituras	Raso

Ensaios preliminares em campo indicaram que leituras de resistividade e cargabilidade sob solo úmido apresentam variações mínimas, além de pouquíssimos valores negativos de cargabilidade. Este mesmo ensaio repetido em solo seco resultou em medidas de cargabilidade amplamente variáveis, além de diversos valores negativos.

Desta forma, a aquisição de dados geofísicos foi realizada sobre solo úmido, em períodos que sucederam chuvas ou durante dias úmidos. Os levantamentos de campo foram efetuados entre outubro e dezembro de 2007.



Figura 6.2 – Linhas de caminhamento elétrico.

6.1.2 - POTENCIAL ESPONTÂNEO

Foram realizadas 241 leituras de potencial espontâneo por meio do arranjo de base fixa, em duas etapas (Tabela 6.1).

A primeira etapa objetivou uma caracterização geral da área, com aquisição por meio de uma malha quadrada de 20 x 20m (Figura 6.3). Na segunda etapa foram realizadas leituras a cada 5m, exatamente nos pontos onde foram realizadas as linhas de caminhamento sobre as valas selecionadas (Figura 6.4).



Figura 6.3 – Malha regular de leituras de potencial espontâneo.



Figura 6.4 – Pontos de leitura potencial espontâneo e de extração de solo para medidas de pH e Eh, sobre as valas de resíduos selecionadas.

6.1.3 - POTENCIAL HIDROGENIÔNICO E POTENCIAL DE OXIDAÇÃO/REDUÇÃO

Os pontos de coleta solo para leituras de pH e Eh foram os mesmos adotados nos ensaios de caminhamento elétrico sobre as valas de resíduos (Figura 6.4).

O material foi coletado na interface solo/lixo via trado manual, em profundidade média de 1m. Esta interface reflete possíveis alterações geoquímicas que ocorram durante o processo de degradação de materiais orgânicos enterrados, que podem ser traduzidas em alterações de pH e Eh (Foto 6.3).

O procedimento de leitura segue a norma 9045D (EPA, 2006):

- Pesagem de 20g de amostra e mistura em 20ml de água destilada.
- Medição da temperatura e inserção do eletrodo de pH.
- Leitura do valor de pH durante 10 minutos (Foto 6.4A).
- Leitura do valor de Eh durante 10 minutos (Foto 6.4B).



Foto 6.3 – Coleta de amostra de solo, com detalhe da interface oxidação-redução.

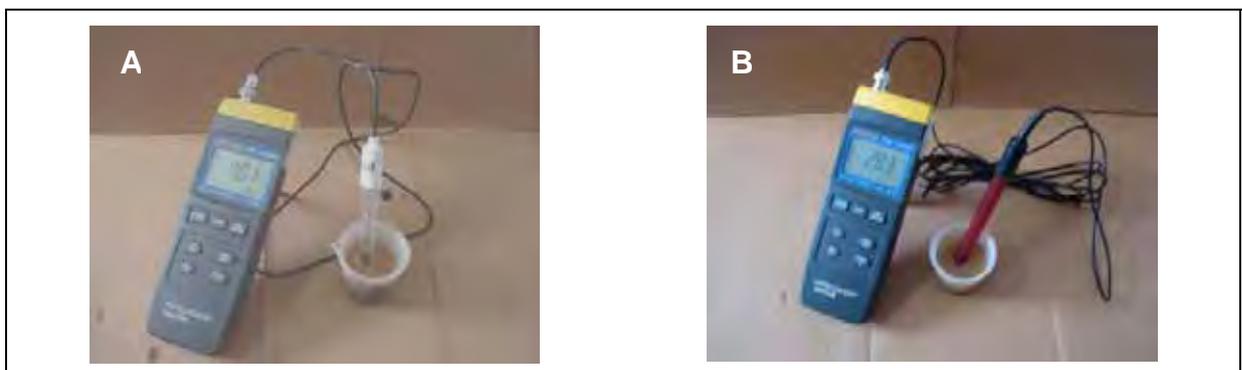


Foto 6.4 - A) Leitura de pH, B) Leitura de Eh.

6.1.4 – PERMEABILIDADE HIDRÁULICA

Os ensaios de permeabilidade hidráulica saturada foram realizados no entorno da área do aterro, em pontos que não sofreram compactação pelo trânsito de veículos ou escavações para implantação de valas de resíduos (Figura 6.5).

O procedimento consistiu na perfuração de 30cm da camada superficial de solo, via trado manual, para inserção da extremidade do equipamento. Em seguida, o permeâmetro é posicionado e preenchido por água destilada (Foto 6.5).



Figura 6.5 – Pontos de ensaio de condutividade hidráulica saturada (Ksat).

O ensaio é iniciado com a liberação de água para a extremidade inferior do equipamento e conseqüente saturação do solo em redor. Durante intervalos pré-determinados, são realizadas leituras na altura da coluna d'água no equipamento, para controle da perda de água para o solo.

Foram realizadas leituras a cada 2 minutos, durante 20 minutos de ensaio, tempo necessário para saturação do solo e estabelecimento de fluxo constante.

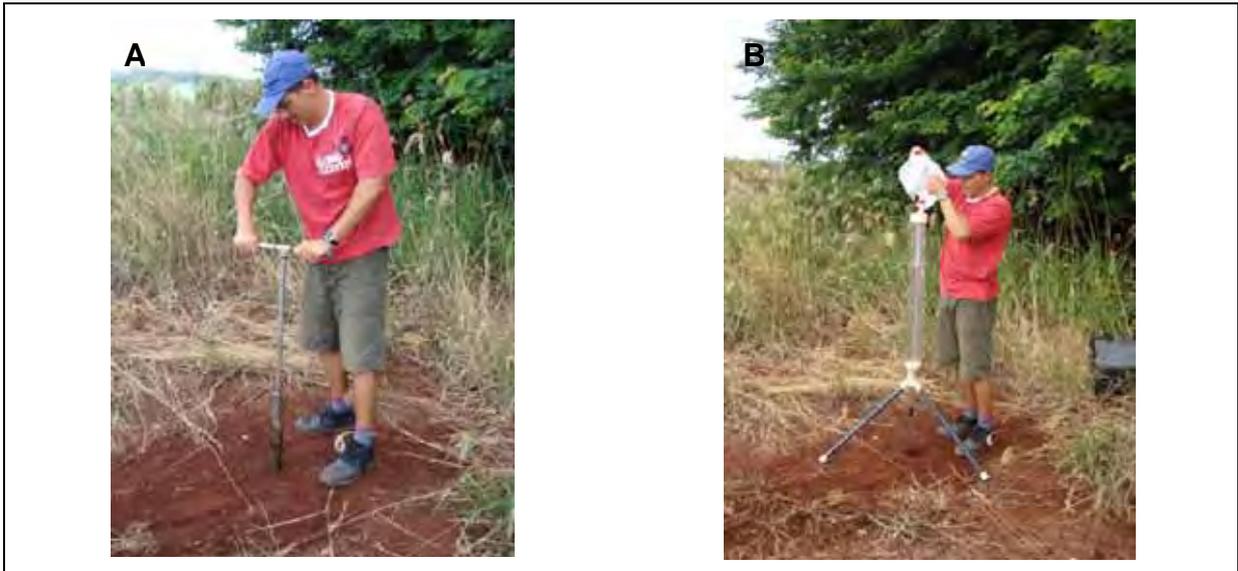


Foto 6.5 - A) Perfuração do solo, B) Instalação e abastecimento do permeâmetro.

6.1.5 - COLETA DE SOLO

A coleta de solo para realização dos ensaios de peneiramento e análise granulométrica conjunta foi realizada em horizontes definidos a partir de descrições pedológicas realizadas no talude da rodovia, especificamente ao lado da linha referência (Figura 6.4).

As descrições pedológicas revelam a presença de Latossolo vermelho-escuro desenvolvido “*in-situ*” por alteração do diabásio sotoposto. Em termos gerais, ocorre fraturamento vertical pouco pronunciado, com fragmentação do solo seco em prismas, presença de nódulos de óxidos de ferro milimétricos a centimétricos disseminado nos horizontes de solo. Foram definidos 5 horizontes, descritos a seguir (Tabela 6.2):

Tabela 6.2 – Horizontes de solo descritos da área do aterro.

Horizonte	Profundidade	Breve descrição do material
A/B	0 a 2m	Solo areno-siltoso, vermelho-escuro, com nódulos milimétricos de óxido de ferro.
B	2 a 5m	Solo siltoso, vermelho-médio, com nódulos milimétricos a centimétricos de óxido de ferro.
C	5 a 6,5m	Solo siltoso, vermelho médio, com nódulos centimétricos de óxido de ferro.
C/R	6,5 a 10m	Solo siltoso, amarelo escuro, com fragmentos centimétricos de diabásio, angulosos e parcialmente alterados.

O contato entre os horizontes B e C apresenta transição gradual, enquanto que o contato entre os horizontes C e C/R é marcado pela mudança brusca na coloração e pelo surgimento de fragmentos de rocha. O contato entre os horizontes C/R e R é definido pelo surgimento de solo saprolítico arenoso e pela presença de blocos arredondados de diabásio, cuja seqüência resulta no aparecimento de diabásio inalterado em profundidades abaixo de 10m (Figura 6.6).

Foram definidos quatro perfis verticais para a coleta de material para realização de ensaios geotécnicos, posicionados a partir do início da linha de referência (Figura 6.6). Foram coletadas quatro amostras por perfil, ou seja, 1 amostra para cada horizonte, num total de 16 amostras (Tabela 6.3).

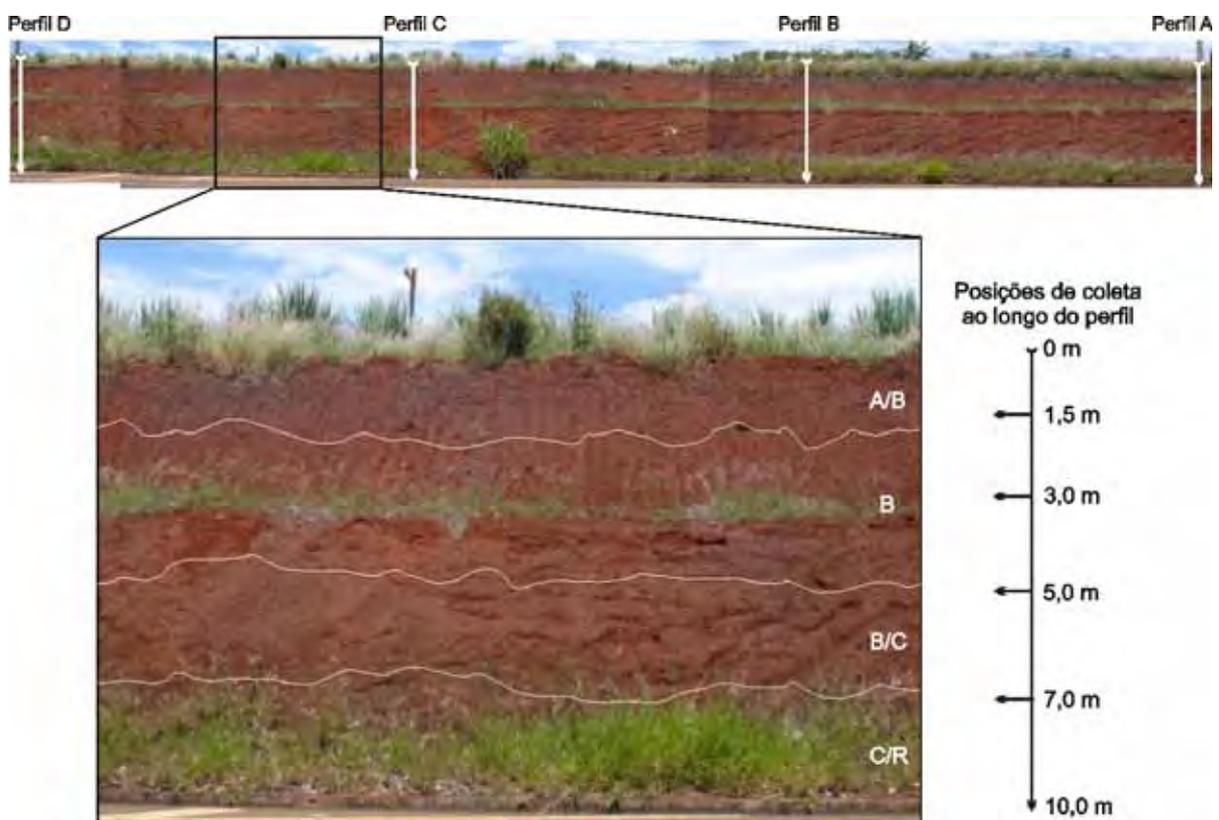


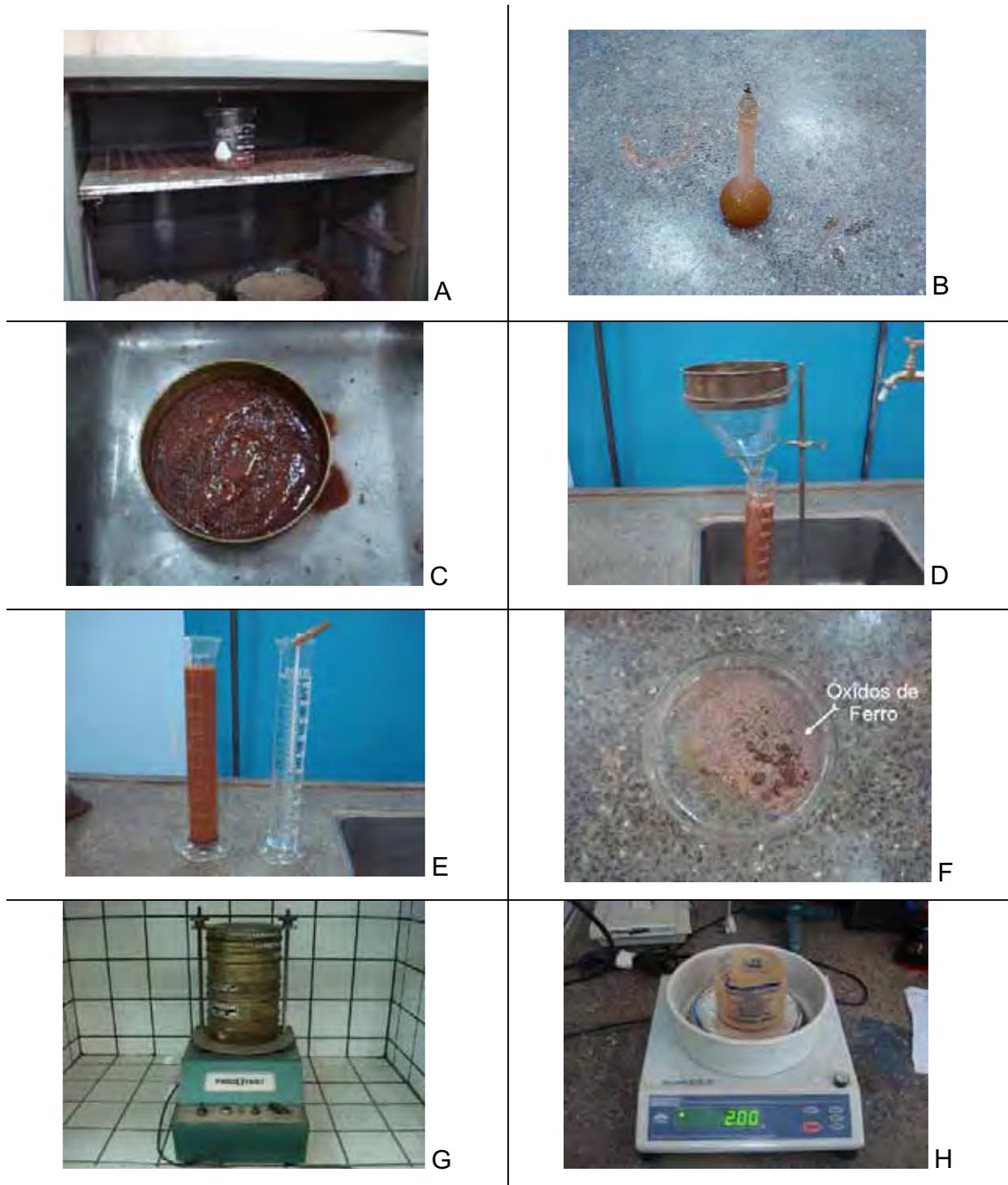
Figura 6.6 – Talude da linha referência, com posições dos perfis de coleta, com detalhe dos horizontes de solo e profundidades de coleta.

Tabela 6.3 – Relação de amostras coletadas para os ensaios geotécnicos.

Profundidade (m)	Posição dos perfis em relação ao início da Linha Referencia			
1,5	A1 – 0m	B1 – 25m	C1 – 50m	D1 – 75m
3,0	A2 – 0m	B2 – 25m	C2 – 50m	D2 – 75m
5,0	A3 – 0m	B3 – 25m	C3 – 50m	D3 – 75m
7,0	A4 – 0m	B4 – 25m	C4 – 50m	D4 – 75m

6.1.6 - PENEIRAMENTO E ANÁLISE GRANULOMÉTRICA CONJUNTA

O procedimento de peneiramento e análise granulométrica conjunta foi realizado segundo Stancani et al. (1981), sumarizados abaixo (Quadro 6.1):



Quadro 6.1 – Síntese do ensaio. A) Secagem, B) Medidas de massa específica, C) Lavagem, D) Maceração, E) Leitura de densidade F) Amostra pré-peneiramento (óxidos de ferro em realce), G) Peneiramento, H) Pesagem das frações peneiradas.

- Separação de frações para pesagem e secagem em estufa pré-aquecida, seguido por nova pesagem para extração do teor de umidade (Quadro 6.1A).
- Determinação da massa específica em picnômetro (Quadro 6.1B).
- Separação de 20g de amostra seca, maceração para destorroamento e lavagem em peneira com malha de 0,053mm (270 mesh) (Quadro 6.1C). A amostra retida na peneira é seca e pesada, para estimativa do teor de argila.
- Maceração de amostra seca e pesagem do volume de material que contenha 55g de argila, quantia adequada à calibração do densímetro utilizado.
- Adição de defloculante e repouso por 24 horas.
- Mistura da amostra em dispersor.
- Lavagem em peneira de 0,053mm (Quadro 6.1D).
- Leitura da quantidade de argila do material passante após lavagem, via densímetro (Quadro 6.1E). Foram realizadas leituras nos seguintes intervalos: 2min., 4min., 8min., 15min., 30min., 1h., 2h., 4h. e 8h.
- Secagem do material retido na peneira (Quadro 6.1F). Foram utilizadas peneiras com as seguintes aberturas: 4,76mm, 2mm, 1,19mm, 0,595mm, 0,420mm, 0,297mm, 0,250mm, 0,149mm, 0,075mm e 0,053mm (ABNT, 1984).
- Peneiramento do material retido e seco (Quadro 6.1G).
- Pesagem das frações retidas em cada peneira e separação de grãos magnéticos via imã manual (Quadro 6.1H).

6.2 – PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados de sondagem elétrica vertical foram tabelados e processados no programa IX1D, versão 3.24, desenvolvido pela Interpex (Estados Unidos). Num primeiro momento, os dados de resistividade elétrica e polarização induzida foram processados em conjunto, na tentativa de contornar o problema de equivalência entre modelos geoeletricos.

Segundo Vacquier et al. (1957), ensaios realizados em arenitos tanto com matriz argilosa quanto com sais dissolvidos no fluido intersticial, podem apresentar valores de resistividade semelhantes. Contudo, no primeiro caso a polarizabilidade é elevada, enquanto que no segundo caso a polarizabilidade é decrescente.

Posteriormente, os dados de polarização induzida foram processados de forma independente, ou seja, após a exclusão dos dados de resistividade.

Os dados de caminhamento elétrico foram tabelados no programa Surfer, versão 8, desenvolvido pela Golden software (Estados Unidos), e posteriormente processados no programa Res2dinv, versão 3.4, desenvolvido pela Geotomo software (Malásia).

O Res2dinv é um programa que determina automaticamente um modelo bidimensional de subsuperfície, a partir de dados de resistividade ou cargabilidade obtidos em ensaios de caminhamento elétrico (GRIFFITHS & BARKER, 1993).

O modelo 2D utilizado no programa divide a pseudo-seção em blocos retangulares, que representarão a pseudo-seção pelo ajuste das medidas de campo. Esta otimização procura reduzir a diferença entre os valores de resistividade aparente calculados e medidos em campo, pelo ajuste da resistividade do modelo de blocos. Esta diferença é expressa pelo erro RMS (*root mean squared*) (LOKE & BARKER, 1996).

Os dados de potencial espontâneo, mapas de resistividade e cargabilidade são apresentados sob a forma de superfícies de isovalores, processados no programa Surfer, desenvolvido pela Golden Software. O Surfer é um pacote de programas gráficos comerciais, utilizados para o cálculo e a confecção de mapas de variáveis por meio de métodos de interpolação.

Foi adotado o método de vizinhança ou ligação simples (*natural neighbor*). Neste método, os grupos iniciais são determinados pelos mais altos coeficientes de associação mútua, ou seja, para a admissão de novos membros é suficiente determinar quais os representantes de maior coeficiente de associação com um dos elementos de determinado grupo (LANDIM, 2004).

Este método de interpolação foi escolhido devido à fidelidade aos valores interpolados e limitação da superfície aos valores extremos de entrada.

Tabelas e gráficos foram gerados nos editores Excel e Word. As curvas granulométricas foram tabeladas e processadas no programa Grapher, também desenvolvido pela Golden software.

7 - RESULTADOS

7.1 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Esta fase envolve a apresentação e interpretação preliminar dos resultados e definição de zonas ou intervalos anômalos. O produto resultante da aplicação das técnicas é descrito e interpretado de forma individualizada, assumindo o pressuposto de não haver interdependência dos parâmetros analisados.

São divididos em ensaios geotécnicos, analíticos e geofísicos. Os resultados pormenorizados são apresentados em apêndices (APÊNDICES A, B, C, D e E).

7.1.1 - ENSAIOS GEOTÉCNICOS

Os dados de peneiramento e análise granulométrica são apresentados em termos de porcentagem e representam os quatro horizontes de solo descritos e amostrados ao longo da linha de referência (APÊNDICE A).

Os dados revelam a predominância da fração argila na composição do solo, que constitui em média 70% do intervalo entre 0m a 5m de profundidade e pela média de 18% da fração silte. Entre 5m e 10m também predomina a fração argila com média de 80%, seguida pela fração areia fina, com 7% em média (Figura 7.1)

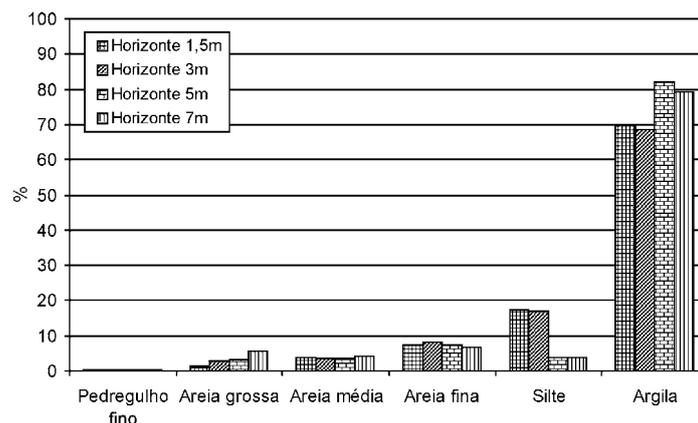


Figura 7.1 – Porcentagem granulométrica média por horizonte de solo.

Os dados referentes à separação magnética dos minerais durante o peneiramento indicam que entre 63% e 66% do solo é constituído por minerais metálicos, majoritariamente representados por óxidos de ferro, proveniente da alteração do diabásio sotoposto (Figura 7.2).

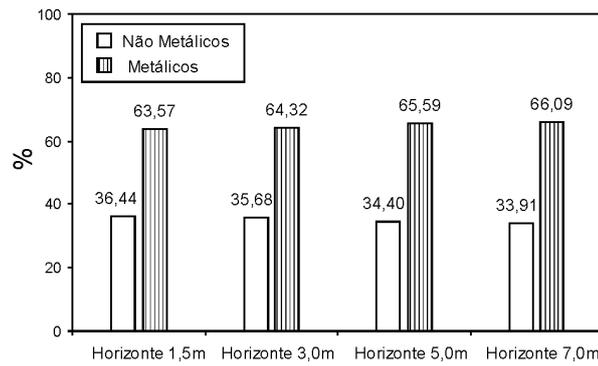


Figura 7.2 - Porcentagem média de minerais metálicos e não metálicos.

O teor de umidade médio das amostras de solo é de 20%, com pequenas variações entre horizontes de solo, coletadas a 1m de profundidade ao longo da linha referência (Figura 7.3).

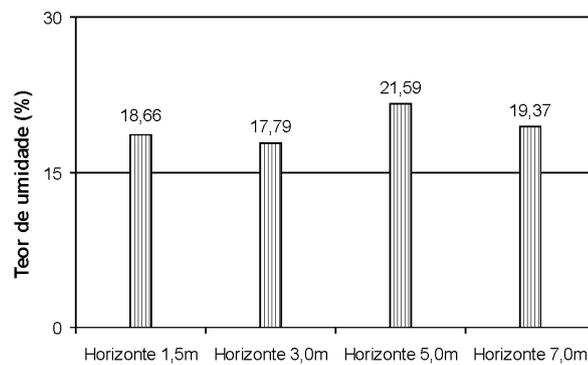


Figura 7.3 – Teor de médio de umidade das amostras.

As medidas de condutividade hidráulica saturada (Ksat) são apresentadas em tabela (Tabela 7.1). Os resultados apresentam medidas que variam de $8,08 \times 10^{-5}$ cm/s a $1,04 \times 10^{-4}$ cm/s, com valores mais elevados para o sentido ESE da área.

Tabela 7.1 - Condutividade hidráulica saturada (Ksat).

Ponto	Latitude	Longitude	Ksat (cm/s)
1	22° 31' 11"	47° 26' 47"	$2,84 \times 10^{-4}$
2	22° 31' 13"	47° 26' 45"	$1,87 \times 10^{-5}$
3	22° 31' 15"	47° 26' 43"	$8,08 \times 10^{-5}$
4	22° 31' 17"	47° 26' 41"	$2,26 \times 10^{-4}$
5	22° 31' 15"	47° 26' 36"	$1,34 \times 10^{-4}$
6	22° 31' 12"	47° 26' 37"	$1,04 \times 10^{-4}$
7	22° 31' 10"	47° 26' 37"	$2,92 \times 10^{-4}$
8	22° 31' 08"	47° 26' 38"	$4,50 \times 10^{-5}$
9	22° 31' 08"	47° 26' 41"	$5,86 \times 10^{-4}$
10	22° 31' 10"	47° 26' 44"	$5,42 \times 10^{-4}$

A homogeneidade granulométrica do solo em diversas profundidades permite extrapolar as medidas de condutividade hidráulica do 1º horizonte de solo para os demais. Os contaminantes gerados pela decomposição dos resíduos e infiltrados na base das valas devem seguir o fluxo sentido SE, no intervalo referente ao 3º e 4º horizontes de solo, além de fluxo vertical em direção ao corpo de diabásio.

7.1.2 - ENSAIOS ANALÍTICOS

Foram realizadas medidas de pH e Eh em parcelas de cada amostra coletada para os ensaios de peneiramento e análise granulométrica. Os resultados indicam pequenas variações num mesmo horizonte de solo (Figura 7.4).

Os valores de Eh apresentam aumento gradativo do horizonte 1,5m para o horizonte 5,0m, variando de 293mV para 335mV respectivamente, com aumento acentuado dos valores para o horizonte 7m, com média de 424mV.

Os valores de pH apresentam redução gradativa com o aumento da profundidade.

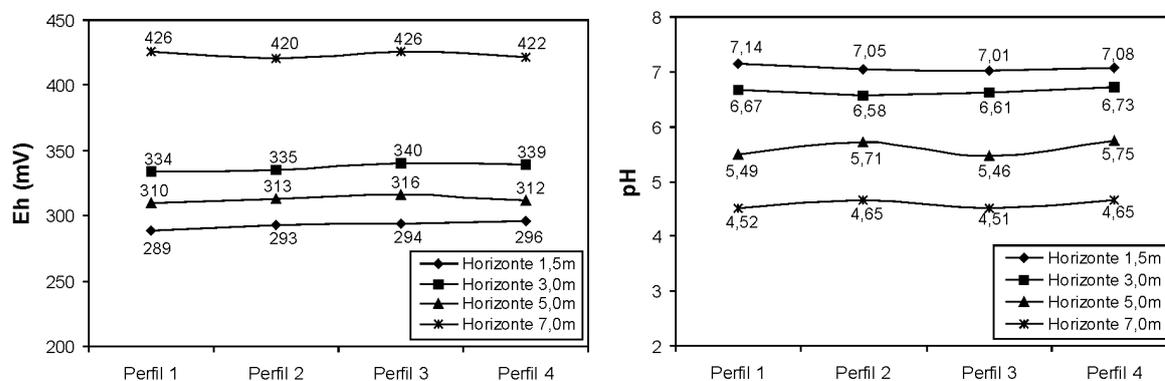


Figura 7.4 - Medidas de Eh e pH nos horizontes de solo da linha de referência.

As medidas pH e Eh sobre as valas de resíduos revelam grandes variações em uma mesma vala, para ambos os parâmetros (Figura 7.5 e 7.6).

Os valores de Eh para a vala de 2007 são bastante semelhantes aos medidos na linha de referência, com extremos entre 197mV e 265mV. A vala de 2006 apresenta algumas medidas relativamente elevadas, tendência realçada para as valas de 2005 e 2004, caracterizadas por ampla variação e os valores médios mais elevados, com extremos entre 156mV e 354mV (Figura 7.5).

As medidas de Eh para a vala de 2003 definem uma ruptura na tendência de aumento dos valores, pois é caracterizada pela menor média dentre as demais. As medidas das valas de 2002 e 2001 são relativamente mais elevadas.

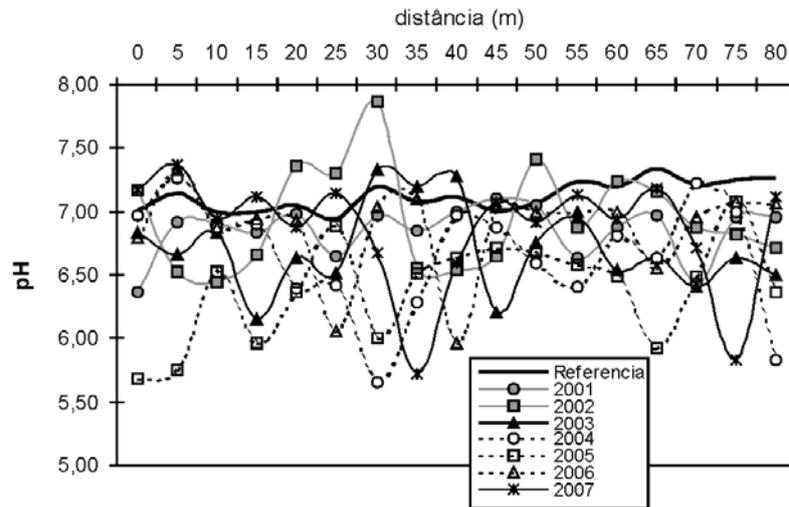


Figura 7.5 – Medidas de pH.

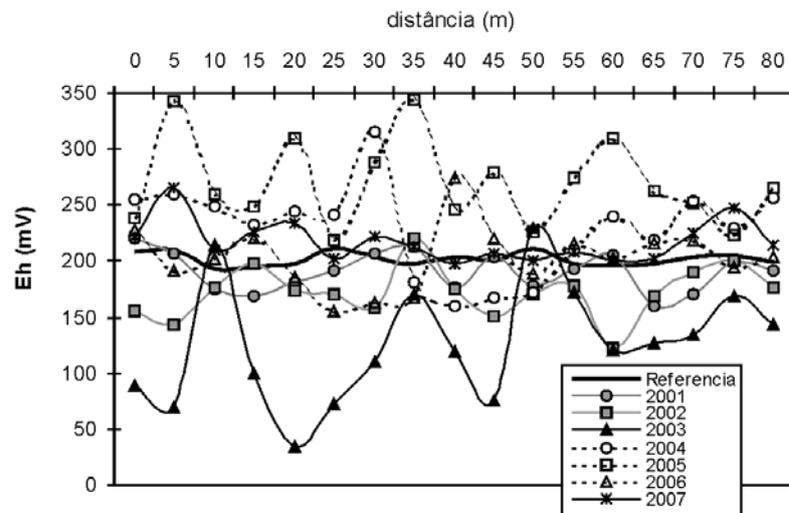


Figura 7.6 – Medidas de Eh.

7.1.3 - ENSAIOS GEOFÍSICOS

As linhas de caminhada elétrica são divididas em dois grupos, com base nos objetivos de cada etapa de levantamento (Figuras 7.7, 7.8, 7.9 e 7.10).

As linhas que cruzam as valas de resíduos e áreas adjacentes foram realizadas na primeira etapa de levantamento, para averiguação da presença de

intervalos anômalos na área com resíduos enterrados, independente da idade de fechamento das valas (Figuras 7.7 e 7.8).

Posteriormente foram selecionadas valas com períodos pré-determinados de fechamento, sobre as quais foram realizados novos ensaios (Figuras 7.9 e 7.10). O objetivo neste caso é a averiguação da influência do tempo de degradação dos resíduos nos parâmetros analisados.

As linhas de caminhamento realizadas sobre as valas datadas são apresentadas em conjunto com a linha de referência, que serve de base comparativa para a identificação de eventuais anomalias para os parâmetros resistividade e cargabilidade.

Da mesma forma, são apresentados os resultados das sondagens elétricas verticais, onde a variação dos parâmetros é analisada de forma comparativa em relação às sondagens elétricas de referência (Figura 7.12).

As medidas de potencial espontâneo em malha regular foram interpoladas e são cruzadas apenas com a idade das valas. Os valores medidos sob as valas de resíduos datadas são apresentados sob a forma de gráfico (Figura 7.14).

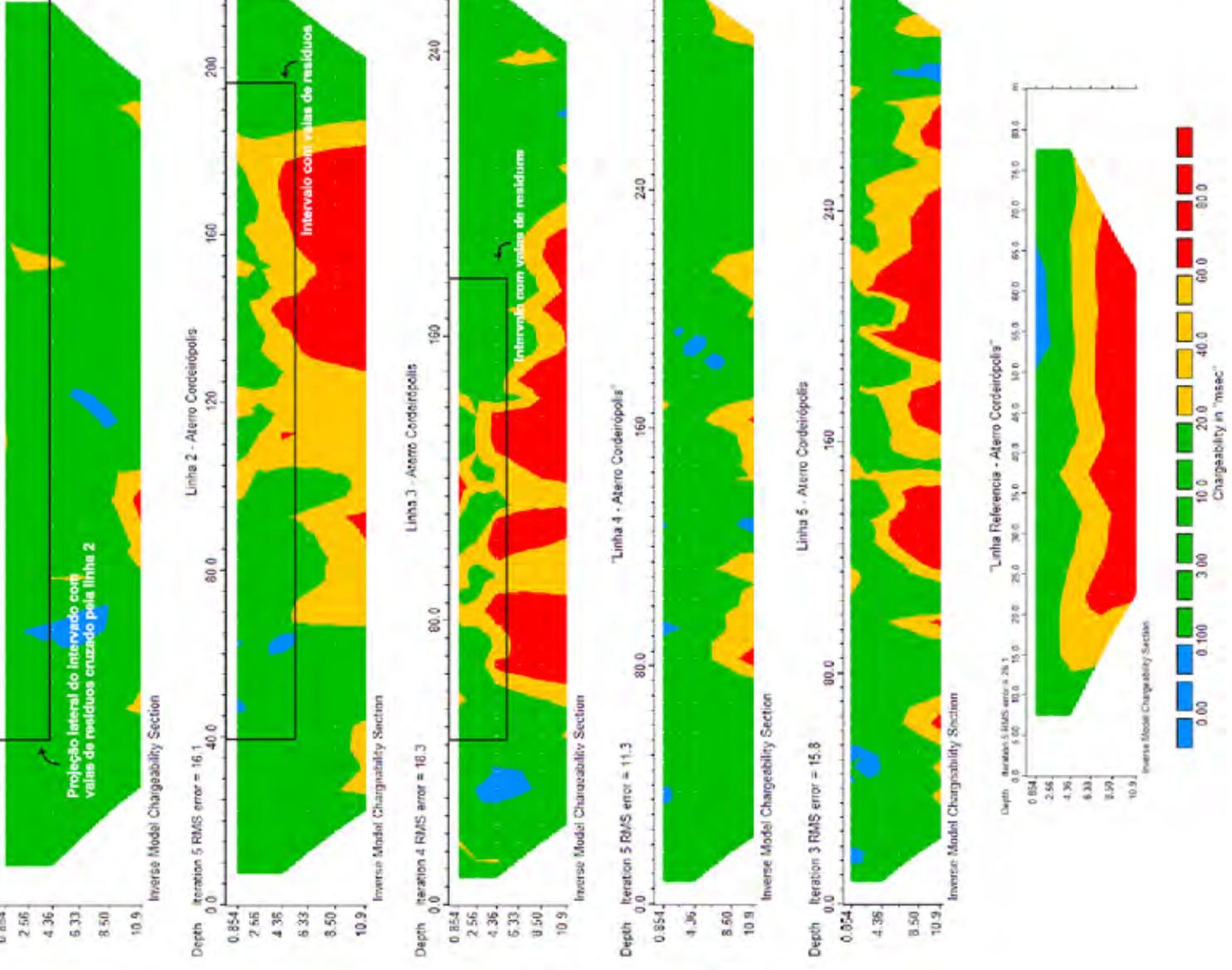
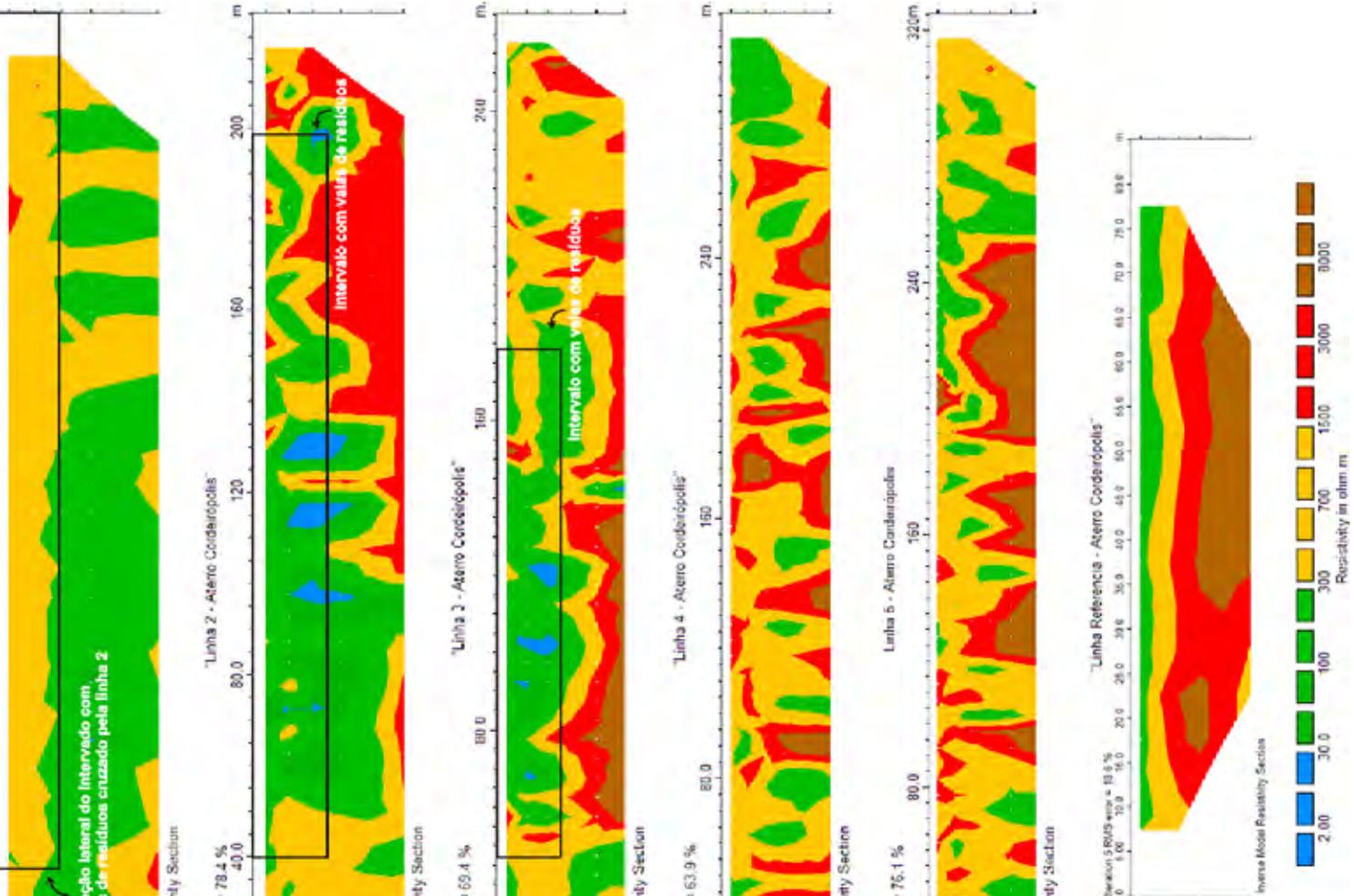
7.1.3.1 - CAMINHAMENTOS ELÉTRICOS

A escala de variação de resistividade é limitada a 5 cores, enquanto que nas seções de cargabilidade a escala é limitada a 4 cores, definidos para realce de áreas anômalas em contraste com as seções de referência. A posição das linhas sob a imagem do aterra é reproduzida no mapa potenciométrico (Figura 7.11).

Uma análise preliminar das seções permite concluir a ocorrência de intervalos anômalos tanto para resistividade quanto cargabilidade (Figuras 7.7, 7.8, 7.9 e 7.10).

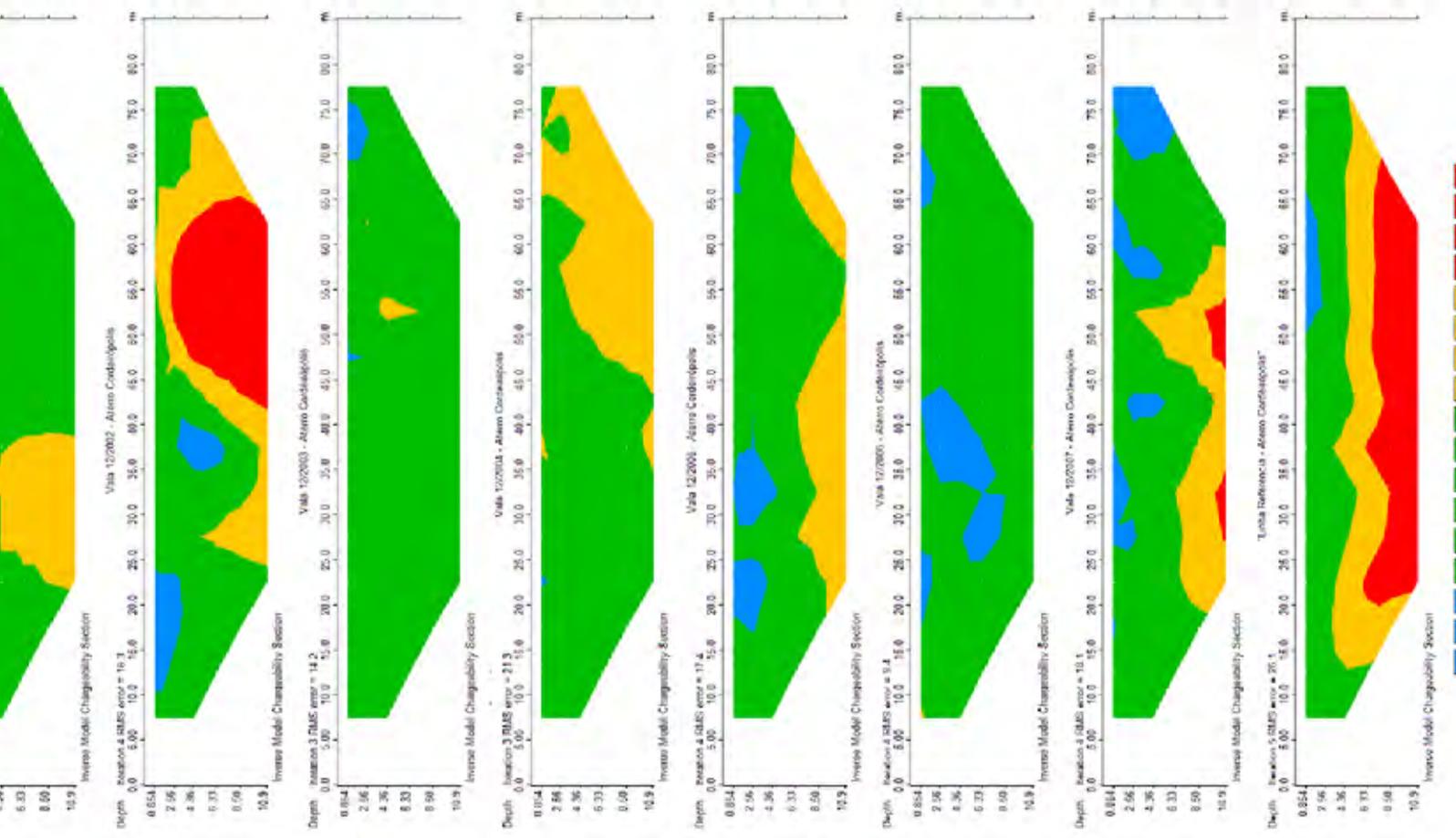
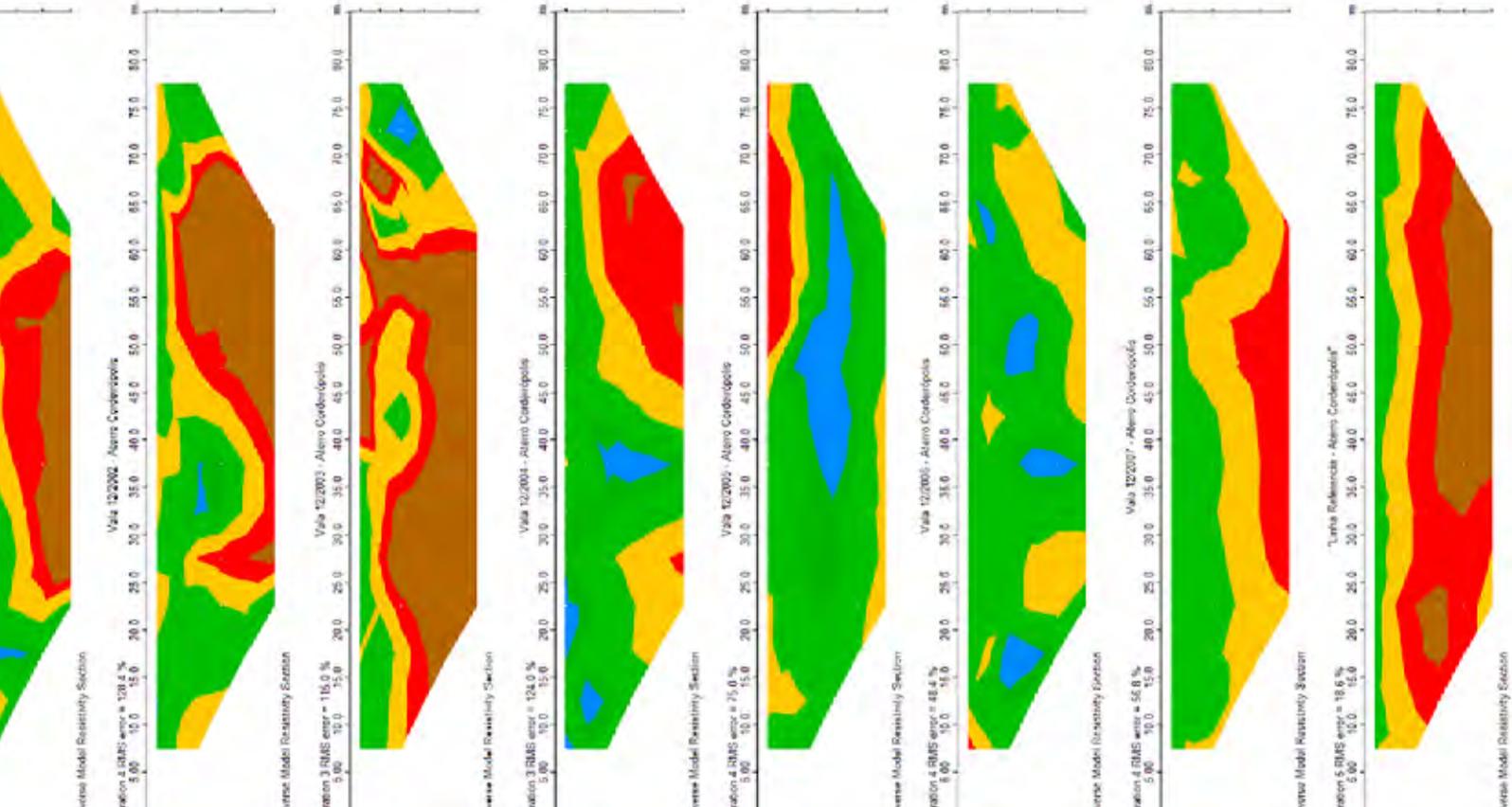
Nas seções que cruzam as valas de resíduos e ruas adjacentes, ocorrem amplos intervalos com resistividade abaixo de $300\Omega.m$, além de intervalos restritos com valores abaixo de $30\Omega.m$ (Figura 7.7). Estas áreas provavelmente indicam zonas de concentração de chorume, produzido pela degradação de resíduos orgânicos, que migraram para a base das valas e permearam o solo subjacente.

Os valores de resistividade entre $30\Omega.m$ e $300\Omega.m$ podem indicar áreas parcialmente saturadas por chorume. As valas de resíduos estão praticamente contidas no intervalo de $300\Omega.m$.



— Modelo de inversão de Resistividade das linhas que cruzam as valas

Figura 7.8 – Modelo de inversão de Cargabilidade das linhas que cruzam as valas



As seções de cargabilidade das linhas que cruzam as valas de resíduos e ruas adjacentes podem ser analisadas em dois grupos distintos. As linhas 1 e 4 são caracterizadas pelo predomínio de valores inferiores a 20ms e ocorrência de áreas pontuais com valores entre 20ms e 60ms (Figura 7.8).

Nas linhas que cruzam as valas, ocorre uma coincidência entre elevados valores de cargabilidade e o intervalo com resíduos enterrados. A linha 5 também apresenta elevados valores de cargabilidade, embora realizada fora do aterro.

As seções obtidas sobre as valas datadas apresentam ampla variação nos parâmetros resistividade e cargabilidade (Figuras 7.9 e 7.10).

Apenas a seção de 2007 apresenta alguma semelhança com a linha de referência, embora com valores de resistividades contrastantes. O ensaio de caminhamento elétrico foi realizado após uma semana do fechamento desta vala e, portanto, é provável que tal semelhança seja atribuída ao curto espaço de tempo de residência dos resíduos.

É possível distinguir o predomínio de valores entre $30\Omega.m$ e $300\Omega.m$ nas seções de 2007, 2006, 2005 e 2004, com áreas restritas de ocorrência de valores abaixo de $30\Omega.m$. Nas seções de 2003, 2002 e 2001 predominam valores superiores a $6000\Omega.m$, principalmente na seção de 2003 (Figura 7.9).

Nas seções de cargabilidade ocorre um amplo predomínio de valores entre 10ms e 100ms, com áreas relativamente amplas com valores abaixo de 1ms, principalmente na seção de 2003 (Figura 7.10).

7.1.3.2 - SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS

Este conjunto de ensaios é dividido em sondagens externas e sondagens rasas. As sondagens externas objetivam a caracterização geológica abaixo da camada de solo, cuja espessura média é de 10m, além de definir a profundidade do nível freático. As sondagens rasas objetivam caracterizar o intervalo de solo, onde são escavadas as valas de resíduos.

As sondagens elétricas externas são detalhadas no APÊNDICE B, com curva de campo, modelo geoeletrico e descrição dos materiais predominantes. Em termos gerais, são caracterizadas pelo aumento constante de resistividade até 10m de profundidade, indicativo de inexistência de água e possivelmente do aumento da quantidade de fragmentos de rocha, em direção a base desta camada.

Entre 10m e 20m de profundidade ocorre diabásio. Entre 20m e 40m ocorre um intervalo de siltito, sucedido por um intervalo com predomínio de arenito fino entre 40 e 60m, cuja base define a posição do nível freático local.

A interpretação das sondagens elétricas externas permitiu definir a profundidade do nível freático, situado em torno de 62m (APÊNDICE B). Os valores e respectivos pontos investigados são apresentados em mapa (Figura 7.11).



Figura 7.11 – Potenciometria da área do aterro definida a partir das sondagens elétricas verticais profundas, com posição das linhas de caminhamento elétrico.

O mapa potenciométrico indica que o fluxo d'água subterrâneo local ocorre no sentido sudeste. Este sentido condiz com a topografia da área, onde predomina relevo praticamente plano no perímetro compreendido pelo aterro, seguido por declividade acentuada a partir da extremidade sudeste.

As sondagens elétricas rasas realizadas sobre as valas de resíduos e ao longo da linha de referência são apresentadas em anexo (APÊNDICE C).

A espessura e profundidade dos níveis definidos nos modelos geoelétricos não coincidem com os horizontes de solo, exceto em relação ao diabásio (APÊNDICE C). Os resultados indicam um aumento constante de resistividade e da cargabilidade com a profundidade.

Foi adotado o critério de camadas fixas para geração do modelo geoeletrico durante o processamento das sondagens elétricas rasas, devido à presença de contatos bastante distintos entre camadas naturais e antropogênicas:

- 1º nível geoeletrico: solo de cobertura dos resíduos, com espessura entre 0,7m a 1m, definido a partir das perfurações via trado manual para coleta de solo. As menores espessuras foram descritas nas valas mais antigas, possivelmente devido à compactação dos resíduos.
- 2º nível geoeletrico: intervalo escavado e preenchido por resíduos, com espessura de entre 4,2m e 4,6m, também com espessura variável devido ao tempo de compactação dos resíduos enterrados.
- 3º nível geoeletrico: intervalo de solo entre a base das valas de resíduos e o topo do diabásio, com espessura de 5m.
- 4º nível geoeletrico: diabásio inalterado, exposto no talude da rodovia de acesso ao aterro, com espessura entre 8m a 10m.
- 5º nível geoeletrico: siltito, com início entre 18m e 20m de profundidade.

O cruzamento dos valores de resistividade e cargabilidade com a idade das valas estudadas permite analisar a variação temporal dos parâmetros. As medidas de resistividade foram processadas em conjunto com as medidas de cargabilidade, com o objetivo de reduzir a ambigüidade ou problemas de equivalência durante o processamento e interpretação dos dados. Posteriormente, os dados de cargabilidade foram processados em separado (APÊNDICE C).

O 2º nível geoeletrico apresenta queda nos valores de resistividade de 2007 a 2004, seguido por aumento até 2001 (Figura 7.12). A análise do 3º nível geoeletrico indica redução nos valores de resistividade de 2007 para 2003, estabilização em 2002 e aumento em 2001 (Figura 7.12).

A análise do 4º nível geoeletrico indica tendência de aumento contínuo nos valores de resistividade das valas de 2007 para 2001, com suave redução nas medidas de 2004 e retomada da tendência de aumento sentido a 2001. Os valores de referência são superiores as medidas sobre as valas (Figura 7.12).

As medidas de cargabilidade são bastante variáveis, seja para valores medidos numa mesma vala, seja para medidas num mesmo horizonte em profundidade ou para valas com idades distintas. Entretanto, os valores de cargabilidade referentes ao 2º nível geoeletrico apresentam relativa constância a partir de 2004 (Figura 7.12).

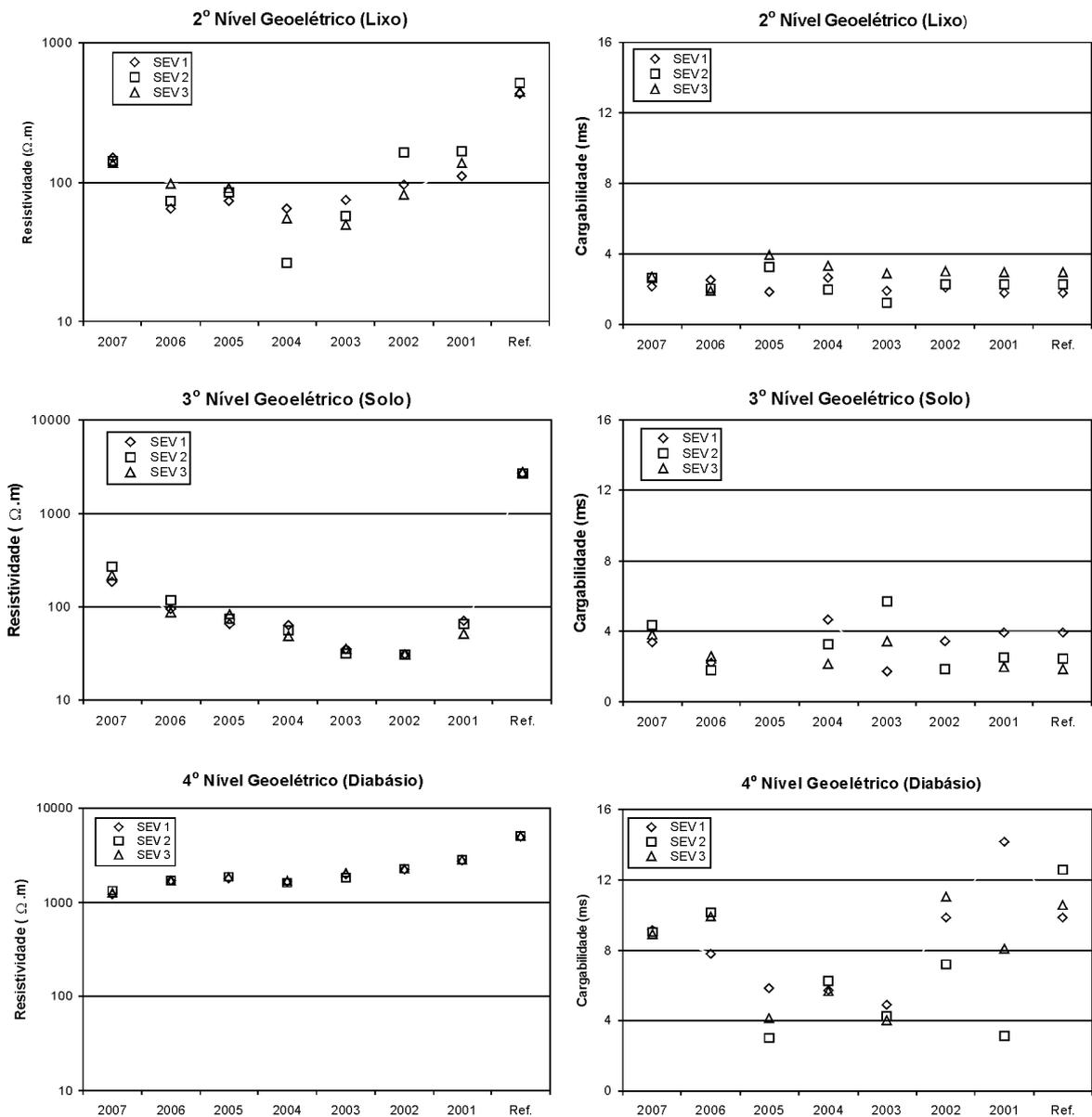


Figura 7.12 - Valores de resistividade e cargabilidade referentes ao 3º nível e 4º níveis geoeletricos, das sondagens elétricas rasas.

7.1.3.3 - POTENCIAL ESPONTÂNEO

O potencial elétrico natural medido sobre as valas de resíduos datadas é apresentado sob a forma de gráfico, acompanhado das medidas realizadas sobre a linha de referência (Figura 7.13).

Os dados sugerem o aumento do potencial espontâneo das valas recentes para as valas antigas. Este aumento possivelmente está associado à estabilidade geoquímica crescente ao longo do período de degradação dos resíduos orgânicos.

Os valores obtidos sobre a linha de referência são relativamente pouco variáveis e superiores aos adquiridos sobre as valas de resíduos.

As medidas sobre a vala de 2007 apresentam relativamente os valores mais baixos, com medidas extremas entre -1mV a 28mV. As valas de 2006, 2005 e 2004 apresentam valores mais elevados, com extremos entre 20mV e 48mV.

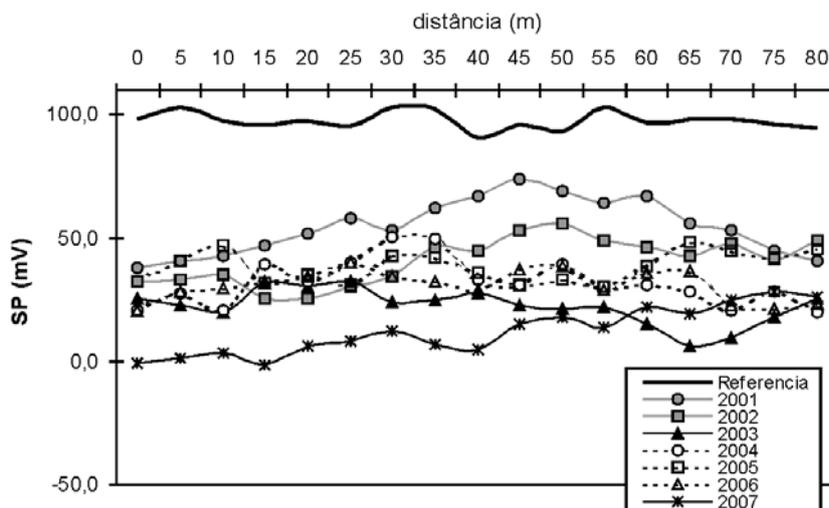


Figura 7.13 – Medidas de SP obtidas sobre as valas.

A vala de 2003 descreve uma ruptura na tendência de aumento médio dos valores, pois apresenta medidas extremas entre 6mV e 30mV. As valas de 2002 e 2001 retomam a tendência de aumento, com extremos de 25mV a 56mV para a vala de 2002 e de 38mV a 74mV para a vala de 2001.

As medidas de potencial espontâneo em malha regular são apresentadas em mapa, sotopostas às idades de fechamento das valas de resíduos (Figura 7.14).

Os dados indicam valores mais negativos nas valas fechadas recentemente (entre 0mV e 10mV), e ampla ocorrência de valores entre 10mV e 30mV em valas com idades de fechamento entre 2005 e 2004. Medidas entre 30mV e 70mV ocorrem nas valas fechadas entre 2003 e 2001.

O potencial elétrico pode estar associado tanto ao fluxo de material percolado quanto à atividade geoquímica por oxidação. O fluxo de chorume na área das valas é basicamente condicionado ao grau de compactação dos resíduos, com permeabilidade bastante superior ao solo argiloso que constitui o substrato local.

Medidas abaixo de 20mV estão praticamente contidas nos limites das valas fechadas entre 2007 e 2006. Desta forma, o potencial elétrico medido deve resultar predominantemente da atividade geoquímica de decomposição dos resíduos.

A tendência de valores positivamente crescentes nas valas mais antigas pode estar associada ao decréscimo de matéria orgânica disponível e a conseqüente estabilidade geoquímica intrínseca. Medidas elevadas obtidas nas valas fechadas entre 2003 e 2001 podem indicar um avançado processo de degradação. Mesmo novas incursões de oxigênio a partir de fraturas de compactação resultam em pequena atividade geoquímica, devido à redução drástica na oferta de matéria orgânica, consumida ao longo dos anos de residência dos resíduos.

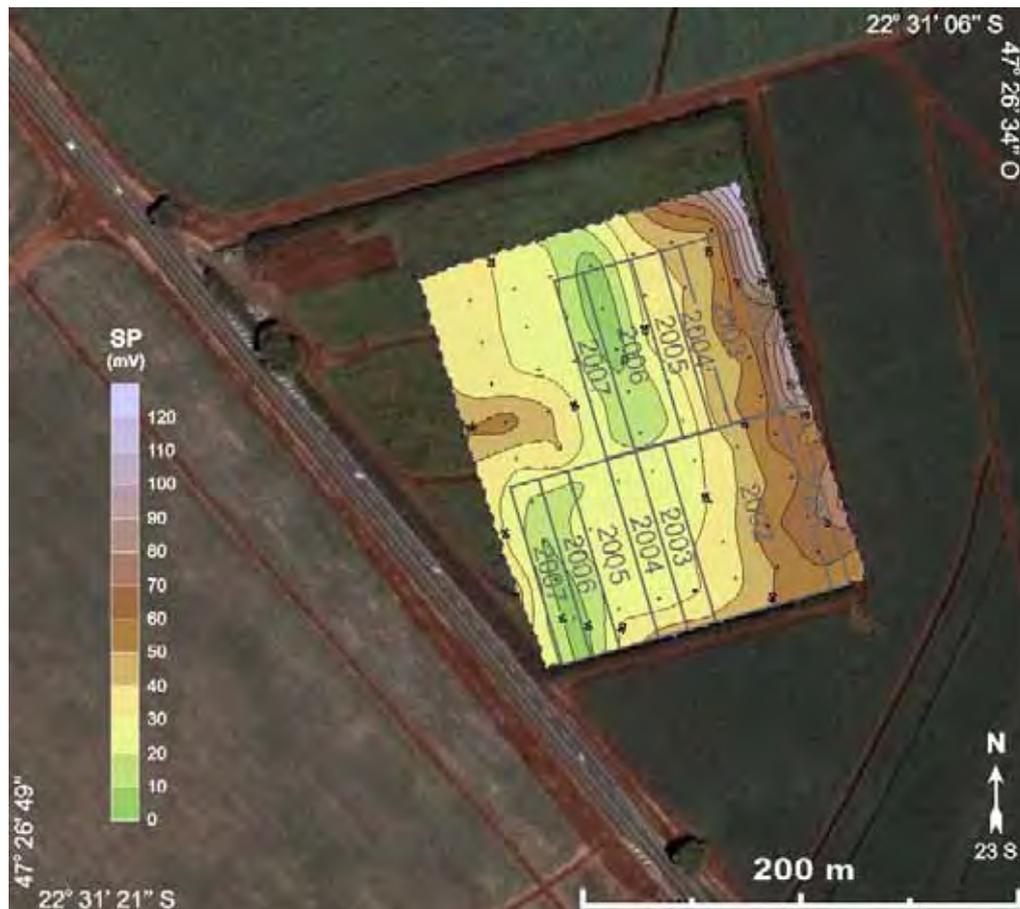


Figura 7.14 – Mapa de Potencial Espontâneo, sotoposto as idades das valas.

7.2 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta etapa é realizada uma análise conjunta dos resultados para estabelecimento de possíveis correlações entre os parâmetros analisados.

A integração dos modelos de inversão das linhas de caminhamento elétrico que cruzam as valas de resíduos e ruas adjacentes é apresentada em mapas (Figuras 7.15 e 7.16). Os mapas interpolam valores referentes à base das valas.

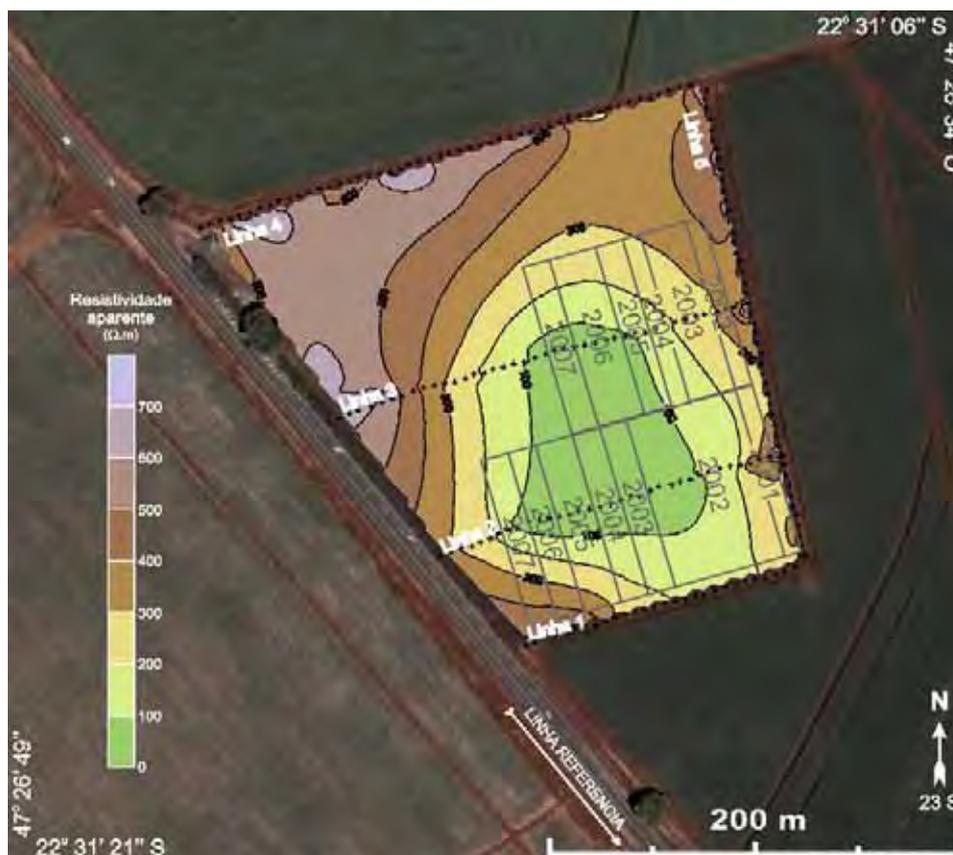


Figura 7.15 – Mapa de resistividade para 5m de profundidade.



Figura 7.16 – Mapa de cargabilidade para 5m de profundidade.

No mapa de resistividade é possível estabelecer a isolinha de $500\Omega.m$ como o limite máximo da provável área contaminada (Figura 7.15), pois a seção de referência apresenta valores pouco superiores a este para 5m de profundidade (APÊNDICE D). Há também tendências de fluxo para NNE e WSW, subordinados ao sentido SE.

A isolinha central com valores abaixo de $100\Omega.m$ possivelmente representa a área com maior concentração de contaminantes, dado a elevada carga de sólidos totais dissolvidos que caracterizam o chorume proveniente da decomposição de resíduos orgânicos. O formato desta área anômala sugere que o fluxo de chorume a princípio esteja condicionado à direção das valas, possivelmente devido a maior porosidade e permeabilidade deste meio.

As isolinhas de $200\Omega.m$ e $300\Omega.m$ indicam tendência de fluxo para SE. Neste contexto, é possível que o chorume tenda a percolar inicialmente o volume de resíduos e, posteriormente, o solo ao redor das valas. A migração no solo possivelmente acompanha o gradiente topográfico local (SE).

Uma análise preliminar do mapa de cargabilidade permite associar a ocorrência de valores elevados às valas de resíduos recentemente fechadas (Figura 7.16). Medidas acima de 60ms estão restritas às valas fechadas entre 2005 e 2007 e valores entre 20ms e 60ms ocorrem nas valas fechadas até 2003.

Aparentemente, há uma relação entre a disponibilidade de matéria orgânica passível ou em processo de decomposição e a ocorrência de altos valores de cargabilidade. As valas mais recentes apresentam grandes quantidades de matéria orgânica em relação às valas mais antigas.

O chorume é caracterizado pela acidez e elevada demanda química por oxigênio (DQO) e elevada demanda biológica por oxigênio (DBO), que imprimem condições redutoras ao ambiente contaminado, após o consumo do oxigênio.

O estabelecimento de condições ácidas e redutoras num solo argiloso e rico em óxidos férricos, como no caso da área de estudos, resulta a solubilização em quantidades significativas de elementos metálicos e argilominerais.

No monitoramento de contaminantes orgânicos por meio de polarização induzida espectral (SIP), Olhoeft (1985) propõe que sob determinadas condições de oxidação/redução e reações de troca catiônica, os argilominerais apresentam polarizabilidade.

Segundo Vanhala et al. (1997), os principais fatores que influenciam o efeito IP em sedimentos são: mineralogia, textura e composição do fluido intersticial. Sob um contexto de argilominerais eletronegativos em solução enriquecida por cátions como o churume, ocorre a formação de dupla camada elétrica na interface dos argilominerais. Este fenômeno é diretamente associado à capacidade de troca catiônica (CTC) (Vinegar & Waxman, 1984; Marshall & Madden, 1959).

A influência da textura na magnitude do efeito IP reside no fato de argilas compactadas (elevada CTC) apresentarem efeito IP fraco, em contraponto ao efeito IP forte em sedimentos que contenham somente argilominerais particulados (baixa CTC). Por outro dado, o aumento da salinidade ou concentração de íons provoca o decréscimo do efeito IP (Marshall & Madden, 1959; Klein & Still, 1982).

É provável que as áreas do aterro com elevada cargabilidade, especialmente valores acima de 60ms, sejam áreas de concentração de metais solubilizados. Os baixos valores de resistividade sugerem elevada concentração de churume nas áreas com resíduos recentemente enterrados, segundo as seções de caminhamento elétrico. Neste contexto, o efeito IP nos argilominerais dissolvidos deve contribuir em pequena escala as anomalias detectadas.

O churume sofre alterações físico-químicas à medida em que a matéria orgânica se torna escassa, caracterizadas por elevação do pH e estabelecimento de condições oxidantes. O crescente estabelecimento destas condições deve resultar na precipitação de elementos metálicos, sob a forma de óxidos e hidróxidos de ferro, em semelhança as formas de ocorrência no ambiente natural (hematita e goetita).

A posição da linha 5 (no cruzamento do gradiente de fluxo de churume) e sua localização (limite do aterro), podem esclarecer sua semelhança com as seções obtidas sobre as valas. A diferença de porosidade e permeabilidade entre a área com resíduos e o solo em redor, permite que o churume atinja os limites do aterro com relativa rapidez (em direção a linha 5). O contato entre as valas e o solo que cruza o sentido de fluxo do churume, constitui uma interface de redução/oxidação.

O churume que atinge esta interface apresenta carga de íons dissolvidos relativamente reduzida. O ataque ao solo e a dissolução de argilominerais produzem condições de geração de efeito IP relativamente elevado. A ocorrência de valores abaixo de 20ms para as valas fechadas entre 2003 e 2001, pode indicar que a quantidade de metais e argilominerais em solução seja reduzida, a ponto de não produzirem anomalias em magnitude acima dos padrões naturais da área.

Há uma correlação entre as áreas anômalas de alta cargabilidade e de baixa resistividade (Figuras 7.15 e 7.16). Entretanto, esta correlação parece válida apenas para valas de resíduos com até dois anos de fechamento, pois a partir deste período, os valores de cargabilidade tendem à redução, enquanto que a área de baixa resistividade ocorre em valas com diversas idades de fechamento.

É plausível afirmar que a cargabilidade varia de valores altos para valores baixos durante num certo período, enquanto que a resistividade seja baixa e constante durante o mesmo período e sob as mesmas condições geoquímicas.

Portanto, a correlação entre elevada cargabilidade e baixa resistividade está associada a áreas ricas em matéria orgânica e sob instabilidade geoquímica, enquanto que a correlação entre baixa cargabilidade e baixa resistividade caracteriza áreas com escassez de matéria orgânica e sob estabilidade geoquímica.

O cruzamento dos mapas de resistividade e potencial espontâneo indicam que a área anômala com valores abaixo de $100\Omega.m$ apresenta medidas de potencial espontâneo entre 0mV e 40mV. Esta área abrange valas de resíduos com diversas idades de fechamento, enquanto que as anomalias mais eletronegativas estão associadas às valas de resíduos fechadas entre 2007 e 2006. O contexto sugere a inexistência de relação direta entre resistividade e potencial espontâneo.

Há uma coincidência entre as áreas de baixo potencial espontâneo e de alta cargabilidade (Figuras 7.14 e 7.16). O acúmulo de minerais metálicos pode influenciar o potencial elétrico, pela ocorrência do fenômeno de potencial mineral.

Este fenômeno é previsto e verificado em corpos mineralizados em sulfeto, onde são detectadas anomalias de potencial elétrico resultante de processos químicos de oxidação/redução. É possível a ocorrência deste fenômeno nas valas de resíduos, pois os ensaios de peneiramento e análise granulometria conjunta, revelam a presença de 60% de óxidos de ferro no solo da área (Figura 7.2).

Os parâmetros analíticos são apresentados em gráficos, onde são realçados os valores máximos, mínimos e médios (Figuras 7.17, 7.18 e 7.19).

Os gráficos descrevem semelhanças entre as medidas de Eh e SP, com aumento dos valores de 2007 para 2005, queda em 2003 e nova subida para 2001 (Figuras 7.17 e 7.18).

As diferenças quanto à magnitude dos valores, que oscilam entre -1mV e 108mV para o SP e de 32mV a 348mV para o Eh, resultam do referencial usado para cada método. Neste trabalho, o SP foi medido por meio de um eletrodo fixado

fora da área contaminada, em contato direto com o solo, com eletrólito a base de $PbCl_2$. O Eh foi obtido por dissolução de amostras de solo em água destilada, com realização da medida por meio de eletrodo com estrutura interna de platina.

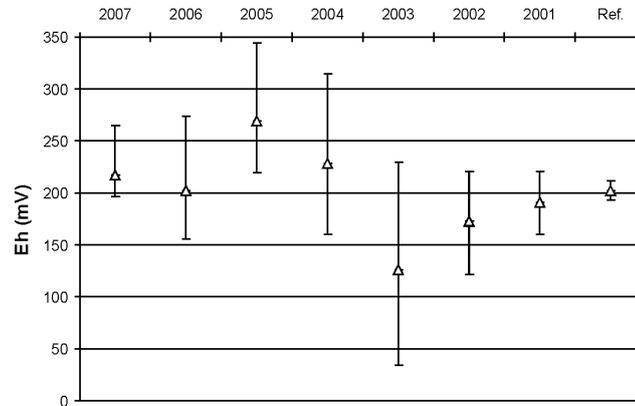


Figura 7.17 - Média das medidas de Eh sobre as valas.

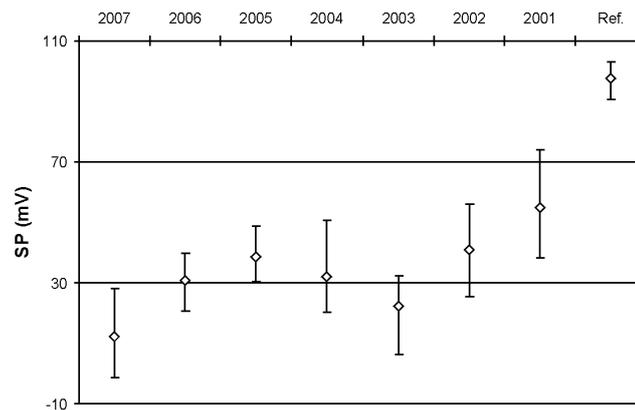


Figura 7.18 - Média das medidas de SP sobre as valas.

Em contrapartida, os valores pH apresentam queda de 2007 para 2005, onde ocorre a menor média dentre todas as valas, seguido com aumento em direção à vala de 2002 e suave queda para 2001 (Figura 7.19).

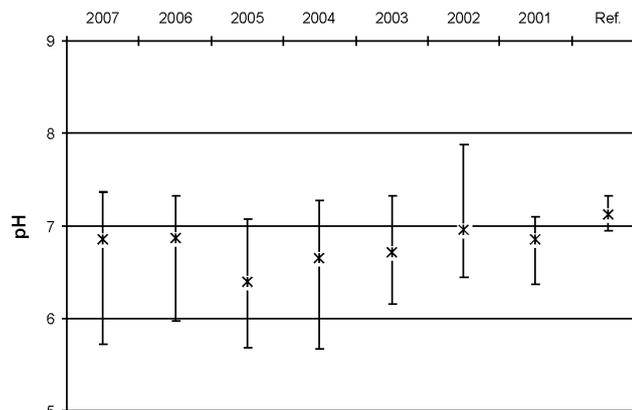


Figura 7.19 - Média das medidas de pH sobre as valas.

A variação relativa entre pH e Eh reflete as condições geoquímicas do ambiente analisado, indicando tendência de solubilização ou precipitação de íons em solução no chorume (Figura 7.20).

A interpretação adequada do resultado geofísico requer correlações com parâmetros que avaliem o comportamento geoquímico do ambiente. A degradação de resíduos orgânicos é um processo dinâmico e variável temporal e espacialmente, caracterizado por fases sucessivas de alteração físico-química.

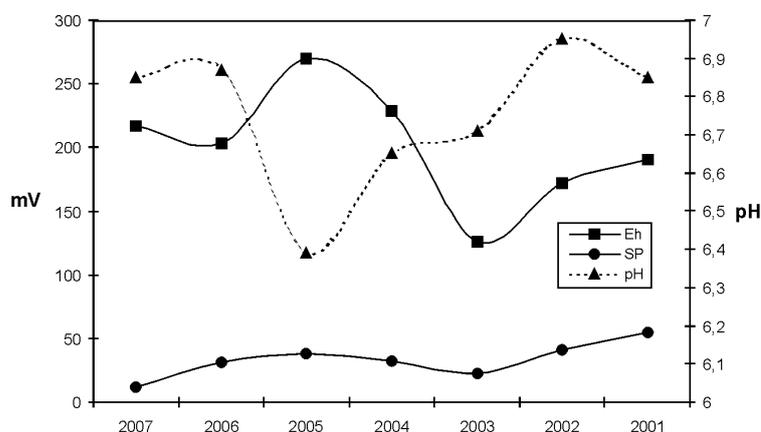


Figura 7.20 – Variação média dos parâmetros pH, Eh e SP.

Cada fase ou estado é caracterizado pelo consumo predominante de um elemento químico catalisador das reações, além da geração de subprodutos.

O principal elemento catalítico utilizado em reações de consumo de matéria-orgânica é o oxigênio. Os elementos liberados neste processo são o carbono e o hidrogênio, constituintes predominantes na estrutura da matéria-orgânica. As combinações destes elementos também caracterizam as fases de degradação.

A *fase aeróbica* é essencialmente caracterizada pela elevada disponibilidade de oxigênio e curto período de decomposição dos resíduos orgânicos. Nesta fase ocorre o início da geração de chorume, conversão do carbono em CO_2 e de hidrogênio em H_2O , num processo que ocorre durante poucas semanas.

O desdobramento desta fase culmina em condições redutoras e no estabelecimento da *fase anaeróbica*. A quebra de cadeias orgânicas produz compostos sucessivamente mais simples, como ácidos orgânicos e compostos iônicos. Há grande produção de chorume, aumento da acidez e do teor de sais e elementos metálicos em solução.

A diminuição na quantidade de água e de oxigênio, além da combinação do hidrogênio com CO_2 em detrimento a outras formas ácidas, resulta na queda da

produção de chorume, redução da acidez no estabelecimento da *fase metanogênica instável*. Por conseqüência, ocorre a precipitação dos elementos em solução.

A instalação da *fase metanogênica estável* é caracterizada pela combinação de carbono e hidrogênio para geração de grandes quantidades de CH₄, conversão de ácidos em compostos mais alcalinos e queda na saturação do ambiente. Ocorre drástica diminuição no teor de elementos em solução, devido a processos de precipitação de sais, complexação e precipitação de espécies metálicas.

A escassez em matéria orgânica culmina com a *fase regressiva*, caracterizada pela queda gradativa na produção de CH₄ e CO₂ e estabilização geoquímica do aterro. Novas incursões de oxigênio via fraturas de compactação ou infiltração de água de chuva provocam retorno a fases de degradação anteriores, até haver o consumo total da matéria orgânica.

A análise integrada dos parâmetros geofísicos em termos relativos permite associar os resultados a três fases distintas de degradação:

- Fase aeróbica – Seção 2007: resistividade e cargabilidade moderados e semelhantes à linha de referência, provavelmente devido ao limitado tempo de residência dos materiais orgânicos. Esta linha foi realizada 1 semana após o fechamento da vala de resíduos.
- Fase anaeróbica – Seções 2006 e 2005: resistividade e cargabilidade reduzidos. Há uma associação entre o resultado geofísico e o comportamento geoquímico do contaminante, caracterizado por elevada saturação das valas e grande quantidade de sais e elementos metálicos em solução.
- Fase metanogênica estável – Seções 2003 e 2002: resistividade e cargabilidade bastante elevados. O resultado geofísico deve refletir a diminuição na saturação do ambiente, precipitação de sais e complexação de elementos metálicos.

As duas fases restantes são transicionais ou recorrentes, nas quais ocorre sobreposição de características marcantes nas fases anteriormente descritas:

- Fase metanogênica instável – Seção 2004: resistividade e cargabilidade moderados. Transição entre fase anaeróbica e fase metanogênica estável. O hidrogênio anteriormente associado ao CO₂ e O₂ sob a forma de H₂O e HCO₃⁻ (aumento da saturação e da acidez

do ambiente), passa a ser incorporado ao carbono e produz CH₄ (redução da saturação e da acidez do ambiente).

- Fase regressiva – Seção 2001: resistividade e cargabilidade elevados. Representa início da estabilização geoquímica. Contudo, novas incursões de oxigênio podem provocar o retorno a fases anteriores, até haver a queima completa da matéria orgânica.

A interpretação dos parâmetros geofísicos sob a ótica dos processos geoquímicos utiliza por base os resultados analíticos de pH e Eh (Tabela 7.2).

Tabela 7.2 – Interpretação integrada dos parâmetros físico-químicos analisados com base nas fases de degradação de matéria orgânica em aterros.

Idade	ρ	M	SP	pH	Eh	Comportamento Geoquímico
2001	↑	↑	↑	↔	↓	<u>Fase regressiva</u> – estabilização gradativa ao aterro e provável alternância com a fase metanogênica estável, até o consumo completo da matéria orgânica.
2002	↑↑	↑↑	↔	↔	↓	<u>Fase metanogênica estável</u> – elevada produção de CH ₄ , conversão de ácidos em álcalis (queda drástica na saturação por chorume), redução na solubilidade (complexação e precipitação de sais e elementos metálicos)
2003	↑↑	↔	↓↓	↓	↓↓	
2004	↑	↔	↓	↓	↑	<u>Fase metanogênica instável</u> – H ₂ passa a ser incorporado ao CH ₄ (queda na produção de ácidos/chorume). Queda na saturação relativa e diminuição no teor de íons em solução.
2005	↓	↓	↔	↓↓	↑↑	<u>Fase anaeróbica</u> – elevada produção de chorume. Matéria orgânica é transformada em compostos sucessivamente mais simples e de alta solubilidade (aumento na concentração de íons e metais em solução).
2006	↓↓	↓↓	↓	↔	↔	
2007	↔	↔	↓↓	↔	↑	<u>Fase aeróbica</u> – decomposição de resíduos orgânicos por oxidação aeróbica. Vala recentemente fechada. Características físicas e químicas semelhantes ao ambiente natural.

↓↓ - muito baixo, ↓ - baixo, ↔ - moderado, ↑ - alto, ↑↑ - muito alto

A análise estatística das medidas de potencial espontâneo, referente à média dos valores sobre as valas de resíduos, indica o período de 8 anos para retorno aos valores naturais, a partir do primeiro ano de fechamento das valas (Figura 7.21).

A análise estatística da média dos valores de resistividade para o 2º nível geoeletrico, obtidos após o processamento das sondagens elétricas verticais rasas, indica ser necessário 12,25 anos para que o intervalo das valas preenchidas por lixo

apresente valores de resistividade elétrica semelhantes aos padrões naturais da área (Figura 7.22).

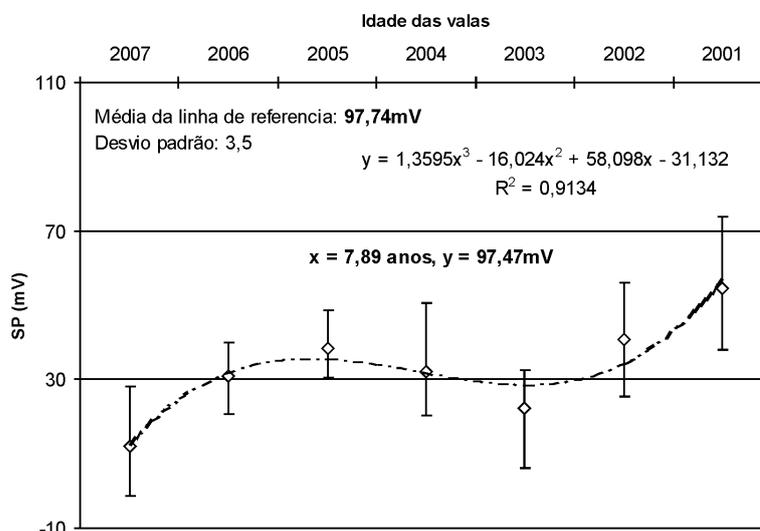


Figura 7.21 – Estimativa de retorno aos valores naturais de potencial espontâneo.

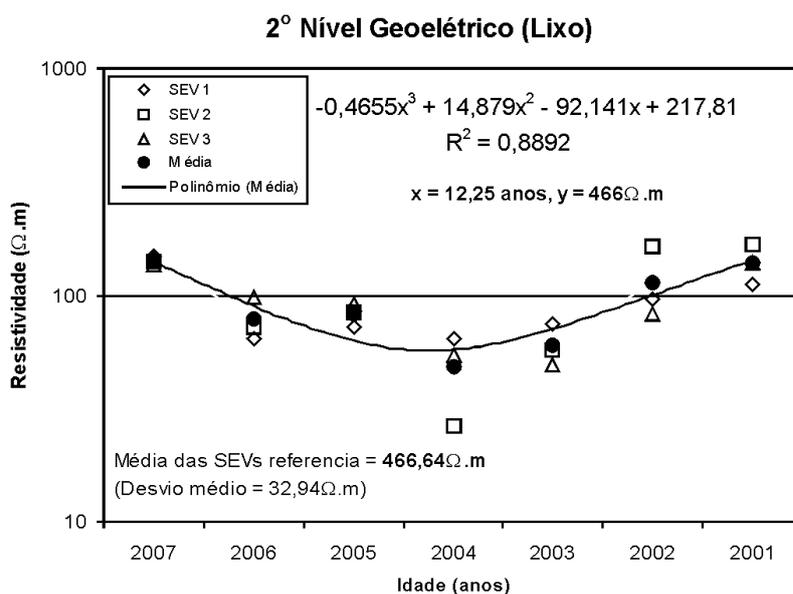


Figura 7.22 – Estimativa de retorno aos valores naturais de resistividade elétrica para o intervalo das valas de lixo.

Esta mesma análise a partir do parâmetro cargabilidade, indica ser necessário 2,18 anos para que o mesmo intervalo de profundidade apresente valores semelhantes aos padrões naturais da área (Figura 7.23).

A análise estatística de média dos valores de resistividade para o 4º nível geométrico, também obtidos após o processamento das sondagens elétricas

verticais rasas, sugere uma previsão de estabilidade nos processos de decomposição de matéria orgânica devido à relação entre presença de chorume e queda na resistividade elétrica em materiais geológicos (Figura 7.24).

O resultado indica serem necessários 8,7 anos para retorno aos valores naturais de resistividade para o 4º nível geolétrico, correspondente ao diabásio sotoposto às valas de resíduos.

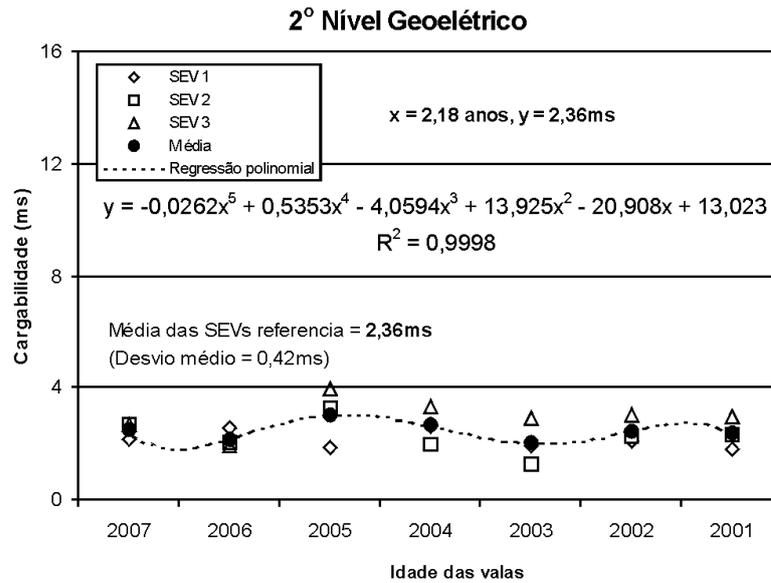


Figura 7.23 – Estimativa de retorno aos valores naturais de cargabilidade para o intervalo das valas de lixo.

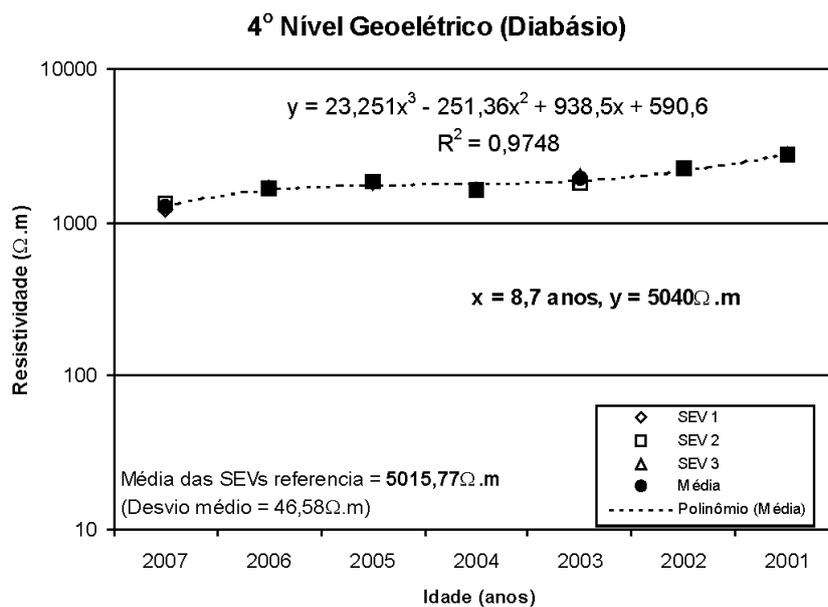


Figura 7.24 – Estimativa de retorno aos valores naturais de resistividade para o intervalo de diabásio.

8 - CONCLUSÕES

Em consonância aos objetivos propostos, foi possível correlacionar a degradação de resíduos sólidos em aterros aos resultados obtidos pela aplicação dos métodos geofísicos e técnicas analíticas propostas.

Todos os parâmetros medidos diretamente sobre as valas ou em amostras de solo apresentaram variações ao longo do tempo de residência dos resíduos. Desta forma, é possível concluir que a degradação de resíduos sólidos e seus subprodutos alteram as propriedades físicas do meio geológico.

Há uma relação direta entre queda nos valores de resistividade e elevadas concentrações de chorume. Este composto é caracterizado por elevada quantidade de sólidos totais dissolvidos e seu acúmulo no ambiente geológico resulta na queda da resistência ao trânsito de corrente elétrica. Desta forma, o parâmetro físico resistividade elétrica é alterado em presença de contaminantes provenientes da decomposição de resíduos sólidos domiciliares.

Também há uma relação entre tempo de degradação de resíduos e variação no parâmetro cargabilidade. Valores elevados de cargabilidade foram detectados em valas recentemente fechadas, que diminuem gradativamente na direção das valas mais antigas, até atingir os valores naturais da área. As anomalias mais representativas ocorrem nas valas fechadas entre 2007 e 2004.

Este período é descrito por baixos valores de resistividade e caracterizado por grande produção de chorume. É possível que este padrão de cargabilidade seja resultante do acúmulo de minerais de elevada polarizabilidade na base das valas, sob condições relativamente ácidas.

Análises físicas indicam o teor médio de 64% de minerais férricos em amostras de solo coletadas fora da área do aterro, essencialmente representado por óxidos e hidróxidos de ferro.

Sob este ponto de vista, o parâmetro físico cargabilidade pode estar indiretamente associado à presença de chorume. Condições geoquímicas impostas pela presença de chorume, sua interação com os minerais do solo e materiais metálicos presentes nos resíduos, podem resultar na solubilização, precipitação e acúmulo de minerais férricos na base das valas onde haja geração de chorume.

As medidas de pH e Eh expressam em valores relativos, as condições geoquímicas do ambiente subjacente. O material coletado na interface solo/lixo

apresentou coloração preta, contrastante ao solo vermelho-escuro coletado na linha de referência. Este fato sugere condições relativamente redutoras para a interface solo/lixo e que este material está sujeito às condições de acidez e redução atuantes no centro e em maior intensidade na base das valas. Sob este ponto de vista, o pH e Eh refletem as condições geoquímicas reinantes nos resíduos enterrados, embora não tenha sido medido diretamente no centro e base das valas, que expressariam valores em termos absolutos.

Os dados de potencial espontâneo indicam uma relação com o tempo de decomposição dos resíduos, com gradativo aumento do potencial elétrico concomitante ao aumento do período de residência dos resíduos. A ocorrência de valores próximos a zero na vala de 2007 e valores positivos e crescentes em direção as valas mais antigas, indica que a decomposição de resíduos orgânicos produz potencial elétrico passível de medição pelo instrumental geofísico.

O campo elétrico total medido pelo método de potencial espontâneo apresenta comportamento temporal relativamente semelhante ao apresentado em medidas de potencial hidrogeniônico (Eh). Os diversos potenciais elétricos gerados no ambiente são indistintos ao método de potencial espontâneo. Entretanto, o Eh indica o potencial de oxidação/redução e sua variação está associada à atividade do íon hidrogênio.

A permeabilidade hidráulica de campo medida na área varia de 10^{-4} cm/s a 10^{-5} cm/s, com nível freático em torno de 62m de profundidade. Nestas condições, o potencial gerado pelo fluxo da água subterrânea provavelmente contribua pouco ao potencial total medido.

A interpretação conjunta dos dados geofísicos, medidas analíticas de campo e, principalmente, do tempo de residência dos resíduos sólidos, permitiu relacioná-los a fases ou estágios de decomposição de matéria orgânica.

As variações dos parâmetros físicos medidos pelo instrumental geofísico no presente trabalho devem refletir de forma direta ou indireta a presença de resíduos orgânicos e seus produtos de degradação. A degradação de matéria orgânica está condicionada ao tempo de residência dos materiais no ambiente.

A queda relativa da resistividade elétrica é diretamente correlacionável a presença de chorume, enquanto que o potencial natural eletronegativo pode refletir atividade geoquímica com forte processo de oxidação. Por outro lado, anomalias de

cargabilidade aparentemente indicam a presença de subprodutos da interação do chorume com o ambiente geológico e com os materiais metálicos contidos no lixo.

A análise temporal do parâmetro cargabilidade, a partir de sondagens elétricas verticais realizadas sobre as valas de resíduos, indicam uma variação passível de análise estatística por meio de regressão linear. Os resultados passíveis de estimativa são referentes ao intervalo com resíduos enterrados e indicam que os valores de cargabilidade decrescem e atingem o padrão da área após 2,18 anos.

Este período é sucedido pelo aumento do pH e queda do Eh, indicativo de alteração nas condições geoquímicas, com provável precipitação de óxidos e hidróxidos de ferro, conforme sugere o aumento de resistividade da linha de 2005 para a linha de 2004.

Neste sentido, o parâmetro cargabilidade obtido em áreas de aterro também deve ser analisado sob a ótica dos processos de decomposição de resíduos orgânicos, além da possibilidade de ocorrência de outras fontes de elevada magnitude, como a polarização de materiais metálicos presentes nos resíduos.

O chorume gerado nas valas de resíduos afeta diretamente as camadas sotopostas devido ao fluxo preferencialmente vertical. Desta forma, alterações na geração de chorume e, conseqüentemente, na quantidade de líquido percolado, resultam em mudanças no padrão de resistividade em solo ou rocha sotopostos. Neste contexto, o tempo previsto para retorno aos valores naturais deve refletir o tempo necessário para consumo total da matéria orgânica disponível nos resíduos.

A análise temporal do parâmetro resistividade elétrica, a partir de sondagens elétricas verticais realizadas sobre as valas de resíduos, indicam uma variação passível de análise estatística por meio de regressão linear.

O resultado indica ser necessários 12,25 anos para retorno aos valores naturais de resistividade no intervalo com resíduos enterrados. Em contrapartida, análise dos resultados para a camada de diabásio sotoposta, indicam uma previsão de 8,7 anos para retorno aos valores naturais de resistividade. Estes dados sugerem que após 8,7 anos de fechamento da primeira vala de resíduos, a produção de chorume começa decrescer e passa a percolar somente o solo abaixo das valas, que apresenta permeabilidade hidráulica relativamente baixa, até o consumo completo da matéria orgânica e término do processo de geração após 12,25 anos.

A análise estatística dos dados de potencial espontâneo indica um progressivo aumento das medidas e retorno as condições naturais a partir de 7,89

anos após o fechamento da primeira vala de resíduos. A semelhança ao tempo requerido para retorno aos valores naturais de resistividade para a camada de diabásio pode indicar que as anomalias de potencial espontâneo sejam em grande parte produzidas pelo fluxo de churume na camada de diabásio, além da possibilidade de geração de potencial pela degradação dos resíduos orgânicos.

Os resultados revelam possibilidade de aplicação da geofísica como ferramenta em estudos ambientais de caráter previsional em áreas de disposição de materiais ricos em matéria orgânica, como aterros sanitários, aterros controlados, lixões e cemitérios.

9 - REFERÊNCIAS

AALTONEN, J.; OLOFSSON, B. Direct current (DC) resistivity measurements in long-term groundwater monitoring programmes. **Environmental Geology**, n° 41, p. 662-671, 2002.

ABEM **Terrameter SAS 4000 / SAS 1000 - Instruction Manual**, 136f. 2006

ABU-ZEID, N.; BIANCHINI, G.; SANTARATO, G.; VACCARO, C. Geochemical characterization and geophysical mapping of Landfill leachates: the Marozzo canal case study (NE Italy). **Environmental Geology**, n° 45, p. 439-447, 2004.

AL-ABED, S. R.; HAGEMAN, P. L.; JEGADEESAN, G.; MADHAVAN, N.; ALLEN, D. Comparative evaluation of short-term leach tests for heavy metal release from mineral processing waste. **Science of the Total Environment**, n° 364, p. 14-23, 2006.

ALMEIDA, F. F. M. de; HASUI, Y.; NEVES, B. B. de B.; FUCK, R. A. - **Províncias Estruturais e Brasileiras**. Atas do 8º Simp. Geol. Nordeste, Campina Grande-PB, p. 363-391, 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica conjunta. Rio de Janeiro, 13 p. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10703**: Degradação do Solo, Rio de Janeiro, 41 p. 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: classificação de resíduos. Rio de Janeiro, 71 p. 2004.

BAEDECKER, M. J. & APGAR, M. A. **Hydrogeochemical studies at a landfill in Delaware**. Groundwater Contamination, National Academic Press, Washington, pg 127-138, 1984.

- BAGCHI, A. Natural attenuation mechanisms of landfill leachate and effects of various factors on the mechanism. **Waste Management Research**. n° 5, p. 453-464, 1987.
- BAKER, S. S. & CULL, J. P. Streaming potential and groundwater contamination. **Exploration Geophysics**, n° 35, p. 41-44, 2004.
- BELL, F. G. & JERMY, C. A. **A seepage problem associated with an old landfill in the greater Durban area**. In: Sarsby, R. W. (Ed.), Waste Disposal by Landfill – GREEN'93, A. A. Balkema, Rotterdam, pg. 607-615, 1995.
- BENNETT, P. & SIEGEL, D. I. **Increased solubility of quartz in water due to complexing by organic compounds**. Nature, vol. 326, p. 684 – 686, 1987.
- BIGALKE, J. & GRABNER, E. W. The Geobattery model: a contribution to large scale electrochemistry. **Electrochimica Acta**, vol. 42, n°s 23-24, p. 3443-3452, 1997.
- BIRKS, J. & EYLES, C. A. Leachate from landfill along the Niagara Escarpment. In: Eyles, N. (ed.), **Environmental Geology of Urban Areas**. Geological Association of Canada. Canada. p. 347-363, 1997.
- BJERG, P. L., RÜGGE, K., PEDERSEN, J.K., CHRISTENSEN, T.H., Distribution of redox sensitive groundwater quality parameters downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). **Environmental Science Technology**, n° 29, 1387 – 1394, 1995.
- BROWNLOW, A. H. **Geochemistry**. 2o ed., New Jersey, Prentice-Hall Inc., 1996, 580 pp..
- BUOL, S. W.; HOLE, F. D.; McCracken, R. J. **Soil Genesis and Classification**. 3° ed., Iowa State Univ. Press, 1989, 446 pp..
- ÇAGLAR, I. & DEMİRÖRER, M. Geothermal exploration using geoelectric methods in Kestanbol, Turkey. **Geothermics**, n° 28, p. 803-819, 1999.

CARDARELLI, E.; DI FILIPPO, G. Integrated geophysical surveys on the waste dump: evaluation physical parameters to characterized an urban waste dump (four cases study in Italy). **Waste Management & Research**, nº 22, p. 390-402, 2004.

CARPENTER, P. J.; KAUFMANN, R. S.; PRICE, B. Use of Resistivity Soundings to Determine Landfill Structure, **Ground Water**, vol. 28, p. 569-575, 1990.

CASSIDY, D. P.; WERKEMA, D. D. JR.; SAUCK, W.; ATEKWANA, E.; ROSSBACH, S.; DURIS, J. The Effects of LNAPL Biodegradation Products on Electrical Conductivity Measurements. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, vol. 6, nº 1, p. 47-52, 2001.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Uso das águas subterrâneas para abastecimento público no Estado de São Paulo**. Coord. CASARI, D. C. & SILVA, M. F. B. São Paulo, 1997, p. 46.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares: relatório de 2005**. Coord. NOVAES JÚNIOR, A. C. & NETO, A. S.. São Paulo, 2005, p. 95.

CHRISTENSEN, T. H.; KJELDEN, P.; BJERG, P. L.; JENSEN, D. L.; CHRISTENSEN, J. B.; BAUN, A.; ALBRECHTSEN, H. J.; HERON, G. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. **Applied Geochemistry**, nº 16, p. 659-718, 2001.

CHRISTENSEN, T. H.; KJELDEN, P.; ALBRECHTSEN, H. J.; HERON, G; NIELSEN, P. H.; BJERG, P. L.; HOLM, P. E. Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. **Critical Review in Environmental Science and Technology**, nº 24, p. 119-202, 1994.

CICERONE, R. J. & OREMLAND, R. S. Biogeochemical aspects os atmospheric methane. **Global Biogeochemical Cycles**, vol. 2, nº 4, 1988.

CORRY, C. E. Spontaneous polarization associated with porphyry sulfide mineralization. **Geophysics**, vol. 50, nº 6, p. 1020-1034, 1985.

CORWIN, R. F. The self-potential for environmental and engineering applications. In: **Geotechnical and Environmental Geophysics, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, USA, Investigations in Geophysics**, nº 5, 1990, p.127-145.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Diretoria de Planejamento e Controle. **Estudo das águas Subterrâneas – Região Administrativa 5 – Campinas**, São Paulo, 444 p, 1981.

DAHLIN, T.; LEROUX, V.; NISSEN, J. Measuring techniques in induced polarization imaging, **Journal of Applied Geophysics**, vol. 50, no 3, p. 279-298, 2002.

DEARLOVE, J. P. L. Geochemical interaction processes between landfill clays liner materials and organo-metallic landfill leachate. In: Sarsby, R. W. (ed), **Waste Disposal by Landfill - GREEN'93**, A. A. Balkema, Rotterdam, p. 409-414, 1995.

DRAHOR, M. G. Applications of the Self-potential Method to Archaeological Prospection: some Case Histories. **Archaeological Prospection**, vol. 11, p. 77-105, 2004.

EZAKI, S. **Íons de metais pesados (Pb, Cu, Cr e Ni) associados a solos de cobertura de resíduos sólidos em dois aterros sanitários da região metropolitana de São Paulo-SP**. 2004, 123f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ELIS, V. R. **Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos**. 1999, 264f. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

ELIS V. R. & ZUQUETTE, L. V. Aplicação integrada de métodos geoelétricos em áreas de disposição de resíduos industriais: cidade de Franca, Brasil. **Geotecnia**, nº 92, p. 47-69, 2001.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Test Methods for Evaluating Solid Waste Physical/Chemical Methods, SW-846, 9000 Series Methods.** 2006, Acessado em www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/pdfs/9045d.pdf, em dezembro de 2006.

FANG, H. Y. **Bacteria and tree root attack on landfill liners.** In: Sarsby, R. W. Ed., Waste Disposal Landfill – GREEN'93. A. A. Balkema, Rotterdam, p. 419-426, 1995.

FARQUHAR, G. J. Leachate: production and characterization. **Canadian Journal of Civil Engineering.** n^o 16, p. 317-325, 1989.

FARQUHAR, G, J, & ROVERS, F. A. Gas production during refuse decomposition. **Water, Air and Soil Pollution**, vol. 2, n^o 10, p. 483-499, 1973.

FROHLICH, R. K.; FISHER, J. J.; SUMMERLY, E. Electric-hydraulic conductivity correlation in fractured crystalline bedrock: Central Landfill. Rodhe Island, USA. **Journal of Applied Geophysics**, n^o 35, p. 249-259, 1996.

GALLAS, J. D. F.; MALAGUTTI FILHO, W.; PRADO, L. R.; TAIOLI, F. Lixão de Alvarenga – Mapeamento da pluma de contaminação pelos métodos Geofísicos. In: **VIII Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica 2003**, Rio de Janeiro.

GAY, S. P. A 1,800 millivolts self-potential anomaly near Hualgayoc, Peru. **Geophysics Prospecting**, no 15, p. 236-245, 1967.

GRIFFITHS, D. H.; BAKER, R. D. Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology. **Journal of Applied Geophysics**, n^o 29, p. 211-226, 1993.

GOLDBERG, S. **Use of surface complexation models in the soil chemical system.** In; Sparks, D. L. (ed), Advances in Agronomy, vol. 47, 1992, p. 233-329.

GOLDIE, M. Self-potential associated with the Yanacocha high-sulfidation gold deposit in Peru. **Geophysics**, vol. 67, n^o 3, p.684-689, 2002.

HAMILTON, S. M.; CAMERON, E .M.; McCLENAGHAN, M. B.; HALL, G. E. M. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden. Part I: methodologies and field investigation at the Marsh Zone gold property. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, vol. 4, p. 33-44, 2004

HERON, G. & CHRISTENSEN, T .H. Impact of sediment-bound iron on redox buffering in a landfill leachate polluted aquifer (Vejen, Denmark). **Environmental Science Technology**, vol. 29, nº 1, p. 187-192, 1995.

HESTERBERG, D. Biogeochemical cycles and processes leading to changes in mobility of chemicals in soils. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, vol. 67, p. 121-133, 1998.

HYOUNG-SOO, K. & YEONGHWA, K. Geoelectrical Monitoring in Nanji Waste Landfill. **Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica**, São Paulo, vol. 1, p. 494-498, 1997

IPT/CEMPRE. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2ª ed., São Paulo, 234pg, 2000.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Divisão de Minas e Geologia Aplicada. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo. 94 pg., escala 1:500.000, 2v., 1981.

KELLER, G. V. & FRISCHKNECHT, F. C. **Electrical methods in geophysical prospecting**. Pergamon Press, 1966, 562pp.

KLEIN, J. D. & SILL, W. R. Electrical properties of artificial clay-bearing sandstones. **Geophysics**, vol. 47, p. 1593-1605, 1982.

LAGO, A.L.; ELIS, V. R.; GIACHETI, H. L. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. **Revista Brasileira de Geofísica**, nº24, vol. 3, p.357-374, 2006.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Edunesp. 2º ed., 253p., 2004.

LEROUX, V.; DAHLIN, T.; SVESSON, M. Dense resistivity and induced polarization profiling for a landfill restoration project at Härlov, Southern Sweden. **Waste Management & Research**, nº 25, p. 49-60, 2007.

LEVINSON, A. A. **Introduction to Exploration Geochemistry**. Applied Publishing, Wilmette, 1980.

LEWICKI, J. L.; CONNOR, C.; St-AMAND, K.; STIX, J.; SPINNER, W. Self-potential, soil CO₂ flux and temperature on Masaya volcano, Nicaragua. **Geophysics Research Letters**. nº 30, p. 1817-1823. 2003.

LINDSAY, W. L. **Chemical Equilibria in Soils**. New York, Wiley, 1979, 449 pp..

LYNGKILDE, J.; CHRISTENSEN, T. H.; Redox zones of a landfill leachate pollution plume (Vejen, Denmark). **Journal Contaminant Hydrogeology**, nº 10, p. 273-289, 1992.

LOKE, M. H.; BAKER, R. D., Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. **Geophysical Prospecting**, nº 44, p. 131-152, 1996.

MARSHALL, D. J. & MADDEN, T. R. Induced polarization, a study of its causes. **Geophysics**, vol. 24, p. 780-816, 1959.

McBRIDE, M. B. **Environmental Chemistry of Soils**. New York, Oxford Univ. Press, 1994, 405 pp.

McCLEAN, J. E. & BLEADSOE, B. E. **Behavior of Metals in Soils**. USEPA-United States Environmental Protection Agency. EPA/540/S-92/0-18. Ground Water Issue, 25pp., 1992.

MEJU, M. A. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. **Journal of Applied Geophysics**, vol. 44, no 1, p. 115-150, 2000.

MERBACH, P. S. JR. **Estudos de avaliação de metais pesados em percolado de aterro sanitário em função do tempo de disposição**. 1989, 83f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MOURA, H. P.; & MALAGUTTI FILHO, W. Métodos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: aterro controlado de Rio Claro - SP. **Geociências**, vol. 22, p. 129-139, 2003.

MOTA, R.; MONTEIRO SANTOS, F. A.; MATEUS, A.; MARQUES, F. O.; GONÇALVES, M. A.; FIGUEIRAS, J.; AMARAL, H. Granite fracturing and incipient pollution beneath a recent landfill facility as detected by geoelectrical surveys. **Journal of Applied Geophysics**, vol. 57, p.11-22, 2004.

NARDY, A. J. R.. **Geologia e Petrologia do Vulcanismo Básico Mesozóico da Região Central da Bacia do Paraná**. 1995, 316f. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

NAUDET, V.; REVIL, A.; BOTTERO, J. Y.; BÉGASSAT, P. Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater. **Geophysical Research Letters**, vol. 30, n° 21, p. 1-4, 2003.

NAUDET, V.; REVIL, A.; RIZZO, E.; BOTTERO, J. Y.; BÉGASSAT, P. Groundwater redox conditions in a contaminant plume from geoelectrical investigations. **Hydrogeology and Earth System Sciences**, vol. 8, n° 1, p.8-22, 2004.

NICHOLSON, R. V.; CHERRY, J. A.; REARDON, E. J. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study 6. Hydrogeochemistry. **Journal of Hydrogeology**, n° 63, p. 161-176, 1983.

NIMMER, R., E.; OSIENSKY, J. L. Direct current and self-potential monitoring of an evolving plume in partially saturated fractured rock. **Journal of Hydrogeology**, nº 267, p. 258-272, 2002.

NYQUIST, J. E. & CORRY, C. E. Self-potential: The ugly ducking of environmental geophysics. **The Leading Edge**, vol. 1, p. 446-451, 2002.

OLHOEFT, G. R. Low frequency electrical properties. **Geophysics**, vol. 50, p. 2492-2503, 1985.

ORELLANA, E. **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua**, Biblioteca Técnica Philips, Madrid: Paraninfo, 523 p, 1972.

OSTRANDER, A. G.; CARLSON, N. C.; ZONGE, K. L. Further evidence of electrical anomalies over hydrocarbon accumulations using CSAMT. In: **Expanded Abstracts and Biographies, 53rd Annual International Society of Exploration Geophysicists Meeting and Exposition**, Las Vegas, p. 60-63, 1983.

PAGNANELLI, F., MOSCARDINI, E.; GIULIANO, V., TORO, L. Sequential extraction of heavy metals in river sediments of abandoned pyrite mining area: pollution detection and affinity series. **Environmental Pollution**, nº 132, vol. 2, p. 189-201, 2004.

PETIAU, G. Second generation of Lead-Lead Chloride Electrodes for Geophysical applications. **Pure and Applied Geophysics**, no 157, p. 357-382, 2000.

POHLAND, F. G. & HARPER, S. R. **Critical review and summary of Leachate and gas production from landfill**. USEPA-Office of Research and Development, EPA/600/2-86/073, 1985.

RADAMBRASIL **Levantamento de Recursos Naturais**, vol. 32, Folhas SF 23/24 – Rio de Janeiro/Vitória, 775 pp., 1983.

RANDNOFF, D.; HOLLINGSHEAD, S.; ANDERSON, G. What legacy are we leaving with future landfill leachates? **Environmental Science Technology**, n° 26, p. 58-60, 1992.

RESLEV, P.; KING, G. M. Regulation of methane oxidation in fresh water wetland by water table changes and anoxia. **FEMS Microbial Ecology**, n° 19, p. 105-115, 1996.

RESS, J. F. The fate of carbon compounds in the landfill disposal of organic matter. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 30, p. 161–175, 1980.

REVIL, A.; CARY, L.; FAN, Q.; FINIZOLA, A.; TROLAND, F. Self-potential signals associated with preferential ground water flow pathways in a buried paleo-channel. **Geophysical Research Letters**, vol. 32, p. 1 a 4, 2005.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E., & TOPP, G.C., A Reexamination of the constant-head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. **Soil Science**, 136 (4), p. 250-268, 1983.

SANTOS, F. A. M.; ALMEIDA, E. P.; CASTRO, R.; NOLASCO, R.; MENDES-VICTOR, L. A hydrogeological investigation using EM34 and SP surveys. **Earth Planets Space**, vol. 54, p. 655-662, 2002.

SATO, M. & MOONEY H. D. The electrochemical mechanism of sulfide self-potential. **Geophysics**, vol. XXV, no 1, p. 226-249, 1960.

SCHLIEKER, M.; SCHÜRING, J.; HENCKE, J.; SCHUTZ, H. D. The influence of Redox processes on trace element mobility in a sandy aquifer – an experimental approach. **Journal of Geochemical Exploration**, vol. 73, n° 3, p. 167-179, 2001.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO - SMA.
Procedimentos para implantação de Aterro Sanitário em Vala. São Paulo, 2005,
disponível em
http://www.ambiente.sp.gov.br/valas/proced_implantacao/proc_implant.pdf,
acessado em 07/11/2007

SEILER, W.; HOLZAPFEL-PSCHORM, A.; CONRAD, R.; SCHARFFE, D. Emission of methane from rice paddles. **Journal Atmos Chem.**, nº 1, p. 241-268, 1984.

SETZER, J. **Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, esc. 1:2.000.000, 1966.

SINGH, S. N. Exploring correlation between redox potential and other edaphic factors in field and laboratory conditions in relation to methane efflux. **Environment International**, nº 27, p. 265-274, 2001.

SHANNON, R. D.; WHITE, J. R. A 3-year study of controls on methane emission and from two Michigan peat lands. **Biogeochemistry**. vol. 27, p. 35-60, 1994.

SPOSITO, G. **The Chemistry of Soils**. New York, Oxford Univ. Press, 1989, 277 pp..

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J. B.; VILAR, O. M. **Ensaio de Laboratório em Mecânica de Solos**. E.E.S.C., Universidade de São Paulo, 1981, p. 207.

SUMNER, J. S. **Principles of induced polarization for geophysical exploration**. Elsevier Scientific, Amsterdam, 1976, 277 pp.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 2º ed., New York, Cambridge University Press, 1990, p. 774.

TONETTO, E. M. **Hidroquímica em aquíferos de Rio Claro (SP) e adjacências**. 2001, 108f. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

VACQUIER, V.; HOLMES, C.R.; KINTZINGER, P.R.; LAVERGNE, M. Prospecting for groundwater by induced electrical polarization. **Geophysics**, nº 22, p. 660-687, 1957.

VANHALA, H. Mapping oil-contaminated sand and till with the spectral induced polarization (SIP) method. **Geophysical Prospecting**, vol. 45, p. 303-326, 1997.

Van BREEMEN, N.; MULDER, J.; DRISCOLL, C. T. Acidification and alkalization of soils. **Plant and Soil**, vol. 75, p 283-308, 1983.

Van VOOHIS, G. D.; NELSON, P. H.; DRAKE, T. L. Complex resistivity spectra of porphyry copper mineralization. **Geophysics**, vol. 38, p. 49-60, 1973.

VOGELSANG, D. **Environmental Geophysics**. Springer-Verlag, 1995, 173p.

VINEGAR, H. J. & WAXMAN, M. HH. Induced polarization of shaly sands. **Geophysics**, vol. 48, p. 1267-1287, 1984.

ZANTA, V. M.; MARINHO, M. J. M. R.; LANGE, L. C.; PESSIN, N. Resíduos Sólidos, Saúde e Meio Ambiente: Impactos Associados aos Lixiviados de Aterro Sanitário, IN: **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários** / Armando Borges de Castilhos Júnior (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, 2006, 494 p.

ZHUANG, Y.; ALLEN, H. E.; GONGMIN, F. Effect of aeration of sediment on cadmium binding. **Environ. Toxicol. Chem.**, vol. 13, p. 717-724, 1994.

YU, T. R.; JI, G. L. **Electrochemical methods in soil and water research**. Exeter, Pergamon Press, 1993, 478 pp..

WARD, S. H. **Resistivity and induced polarization methods**. USA. Investigations in Geophysics, no 5. Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Stanley H. Ward, vol. 1, p. 147-198, 1990.

APÊNDICE A

ENSAIOS GEOTÉCNICOS

PENEIRAMENTO

GRANULOMETRIA

Amostra 01A							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,14	0,00	100,00	0,00	0,25	0,00
Areia grossa	2,00	0,46	0,41	10,87	89,13	0,16	1,99
	1,19	0,34	0,34	0,00	100,00		
Areia média	0,59	0,57	0,54	5,26	94,74	1,96	1,52
	0,42	0,57	0,22	61,40	38,60		
	0,297	1,20	0,45	62,50	37,50		
Areia fina	0,25	0,81	0,31	61,73	38,27	4,50	5,45
	0,149	2,25	1,01	55,11	44,89		
Silte	0,074	4,66	2,55	45,28	54,72	22,92	30,81
	0,020	35,82	20,55	42,63	57,37		
Argila	< 0,020	20,18	11,58	42,62	57,38	13,05	17,39
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
67,00	29,04		42,84		37,96		57,16

Tabela A1 – Resultados do peneiramento na amostra 1,5m do perfil A

Amostra 02A							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Areia grossa	2,00	0,60	0,60	0,00	100,00	0,20	2,69
	1,19	0,56	0,56	0,00	100,00		
Areia média	0,59	0,69	0,61	11,59	88,41	1,51	2,09
	0,42	0,65	0,38	41,54	58,46		
	0,297	1,10	0,52	52,73	47,27		
Areia fina	0,25	0,84	0,45	46,43	53,57	3,69	6,87
	0,149	2,42	1,41	41,74	58,26		
Silte	0,074	4,97	3,20	35,61	64,39	17,63	37,53
	0,020	37,40	25,47	31,90	68,10		
Argila	< 0,020	18,77	12,78	31,91	68,09	8,92	18,87
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
68,00	22,02		31,95		45,98		68,05

Tabela A2 – Resultados do peneiramento na amostra 3m do perfil A

Amostra 03A							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,15	0,15	0,00	100,00	0,00	0,23
Areia grossa	2,00	0,39	0,39	0,00	100,00	0,24	1,39
	1,19	0,15	0,15	0,00	100,00		
Areia média	0,59	0,40	0,31	22,50	77,50	1,70	1,98
	0,42	0,58	0,27	53,45	46,55		
	0,297	1,22	0,55	54,92	45,08		
Areia fina	0,25	0,83	0,42	49,40	50,60	2,20	4,34
	0,149	2,16	1,21	43,98	56,02		
Silte	0,074	2,35	1,59	32,34	67,66	1,81	3,20
	0,020	3,18	2,05	35,53	64,47		
Argila	< 0,020	54,59	32,75	40,01	59,99	33,19	49,72
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
66,00	26,16		39,14		39,84		60,86

Tabela A3 – Resultados do peneiramento na amostra 5m do perfil A

Amostra 04A							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,34	0,34	0,00	100,00	0,00	0,49
Areia grossa	2,00	1,03	0,95	7,77	92,23	0,77	5,69
	1,19	1,16	0,98	15,52	84,48		
Areia média	0,59	2,21	1,93	12,67	87,33	1,11	4,99
	0,42	1,33	1,12	15,79	84,21		
	0,297	1,72	1,35	21,51	78,49		
Areia fina	0,25	1,21	0,90	25,62	74,38	2,05	5,48
	0,149	3,27	2,36	27,83	72,17		
Silte	0,074	2,07	1,35	34,78	65,22	2,30	4,91
	0,020	4,88	3,35	31,35	68,65		
Argila	< 0,020	49,78	37,98	23,70	76,30	17,15	55,06
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
69,00	16,39		23,38		52,61		76,62

Tabela A4 – Resultados do peneiramento na amostra 7m do perfil A

Amostra 01B							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,41	0,41	0,00	100,00	0,00	0,60
Areia grossa	2,00	0,23	0,23	0,00	100,00	0,23	1,40
	1,19	0,27	0,26	3,70	96,30		
Areia média	0,59	0,49	0,40	18,37	81,63	1,63	2,03
	0,42	0,61	0,28	54,10	45,90		
	0,297	1,26	0,59	53,17	46,83		
Areia fina	0,25	0,83	0,45	45,78	54,22	2,14	4,20
	0,149	2,28	1,33	41,67	58,33		
Silte	0,074	2,20	1,46	33,64	66,36	2,20	4,01
	0,020	4,10	2,66	35,12	64,88		
Argila	< 0,020	55,32	36,88	33,33	66,67	27,21	54,35
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
68,00	23,05		33,41		44,95		66,59

Tabela A5 – Resultados do peneiramento na amostra 1,5m do perfil B

Amostra 02B							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,24	0,24	0,00	0,00	0,00	0,36
Areia grossa	2,00	0,87	0,87	0,00	100,00	0,20	3,20
	1,19	0,65	0,65	0,00	100,00		
Areia média	0,59	0,63	0,56	11,11	88,89	1,65	1,88
	0,42	0,61	0,30	50,82	49,18		
	0,297	1,18	0,52	55,93	44,07		
Areia fina	0,25	0,76	0,37	51,32	48,68	1,62	2,67
	0,149	2,11	1,13	46,45	53,55		
Silte	0,074	0,95	0,59	37,89	62,11	3,04	4,62
	0,020	5,01	3,03	39,52	60,48		
Argila	< 0,020	53,99	35,17	34,86	65,14	28,19	52,57
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
67,00	23,57		34,70		43,43		65,30

Tabela A6 – Resultados do peneiramento na amostra 3m do perfil B

Amostra 03B							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,55	0,55	0,00	100,00	0,00	0,89
Areia grossa	2,00	1,24	1,24	0,00	100,00	0,09	3,60
	1,19	0,65	0,65	0,00	100,00		
Areia média	0,59	0,57	0,51	10,53	89,47	1,46	1,79
	0,42	0,56	0,31	44,64	55,36		
	0,297	1,06	0,47	55,66	44,34		
Areia fina	0,25	0,75	0,38	49,33	50,67	3,42	5,99
	0,149	2,15	1,15	46,51	53,49		
Silte	0,074	4,41	2,82	36,05	63,95	1,20	2,03
	0,020	2,07	1,32	36,23	63,77		
Argila	< 0,020	53,99	36,76	31,91	68,09	25,40	54,13
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
68,00	21,84		31,57		46,16		68,43

Tabela A7 – Resultados do peneiramento na amostra 5m do perfil B

Amostra 04B							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,21	0,21	0,00	100,00	0,00	0,31
Areia grossa	2,00	2,21	2,13	3,62	96,38	0,35	10,56
	1,19	2,00	1,94	3,00	97,00		
Areia média	0,59	3,21	3,08	4,05	95,95	0,59	5,53
	0,42	1,54	1,42	7,79	92,21		
	0,297	1,68	1,48	11,90	88,10		
Areia fina	0,25	1,00	0,82	18,00	82,00	1,95	6,04
	0,149	2,47	1,91	22,67	77,33		
Silte	0,074	3,06	2,16	29,41	70,59	1,30	2,61
	0,020	2,58	1,73	32,95	67,05		
Argila	< 0,020	48,04	29,51	38,57	61,43	27,31	43,45
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
68,00	21,61		31,50		46,39		68,50

Tabela A8 – Resultados do peneiramento na amostra 7m do perfil B

Amostra 01C							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,15	0,15	0,00	100,00	0,00	0,23
Areia grossa	2,00	0,39	0,39	0,00	100,00	0,24	1,39
	1,19	0,15	0,15	0,00	100,00		
Areia média	0,59	0,40	0,31	22,50	77,50	1,70	1,98
	0,42	0,58	0,27	53,45	46,55		
	0,297	1,22	0,55	54,92	45,08		
Areia fina	0,25	0,83	0,42	49,40	50,60	2,20	4,34
	0,149	2,16	1,21	43,98	56,02		
Silte	0,074	2,35	1,59	32,34	67,66	1,81	3,21
	0,020	3,18	2,05	35,53	64,47		
Argila	< 0,020	54,59	32,75	40,01	59,99	33,19	49,71
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
66,00	26,16		39,14		39,84		60,86

Tabela A9 – Resultados do peneiramento na amostra 1,5m do perfil C

Amostra 02C							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,25	0,00	0,00	0,00	0,47	0,00
Areia grossa	2,00	0,77	0,77	0,00	100,00	0,21	2,30
	1,19	0,38	0,38	0,00	100,00		
Areia média	0,59	0,38	0,31	18,42	81,58	1,58	1,62
	0,42	0,53	0,24	54,72	45,28		
	0,297	1,07	0,43	59,81	40,19		
Areia fina	0,25	0,70	0,33	52,86	47,14	2,82	4,86
	0,149	1,98	1,03	47,98	52,02		
Silte	0,074	3,28	2,11	35,67	64,33	1,30	2,07
	0,020	2,09	1,30	37,80	62,20		
Argila	< 0,020	54,57	27,28	50,01	49,99	41,40	41,37
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
66,00	31,82		47,78		34,18		52,22

Tabela A10 – Resultados do peneiramento na amostra 3m do perfil C

Amostra 03C							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,13	0,13	0,00	100,00	0,00	0,19
Areia grossa	2,00	1,58	1,58	0,00	100,00	0,16	5,47
	1,19	0,86	0,86	0,00	100,00		
Areia média	0,59	1,37	1,31	4,38	95,62	1,20	3,46
	0,42	0,96	0,76	20,83	79,17		
	0,297	1,42	0,96	32,39	67,61		
Areia fina	0,25	0,93	0,61	34,41	65,59	2,97	6,56
	0,149	2,44	1,54	36,89	63,11		
Silte	0,074	4,31	2,93	32,02	67,98	0,92	1,52
	0,020	1,58	1,00	36,71	63,29		
Argila	< 0,020	53,42	33,83	36,67	63,33	28,45	49,10
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
69,00	23,49		33,70		45,51		66,30

Tabela A11 – Resultados do peneiramento na amostra 5m do perfil C

Amostra 04C							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Areia grossa	2,00	1,09	1,09	0,00	100,00	0,00	3,25
	1,19	0,38	0,38	0,00	100,00		
Areia média	0,59	0,54	0,54	0,00	100,00	0,23	2,15
	0,42	0,36	0,36	0,00	100,00		
	0,297	0,57	0,52	8,77	91,23		
Areia fina	0,25	0,54	0,44	18,52	81,48	1,34	4,17
	0,149	1,87	1,41	24,60	75,40		
Silte	0,074	1,74	1,20	31,03	68,97	1,83	2,82
	0,020	2,90	1,76	39,31	60,69		
Argila	< 0,020	53,01	27,02	49,03	50,97	41,27	42,94
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
63,00	28,28		44,67		34,72		55,33

Tabela A12 – Resultados do peneiramento na amostra 7m do perfil C

Amostra 01D							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Areia grossa	2,00	0,26	0,26	0,00	100,00	0,20	1,15
	1,19	0,21	0,21	0,00	100,00		
Areia média	0,59	0,34	0,25	57,63	42,37	1,58	1,69
	0,42	0,51	0,22	69,86	30,14		
	0,297	1,11	0,48	69,81	30,19		
Areia fina	0,25	0,76	0,37	67,26	32,74	1,92	3,63
	0,149	2,02	1,15	63,72	36,28		
Silte	0,074	1,87	1,23	60,32	39,68	1,90	3,65
	0,020	3,59	2,37	60,23	39,77		
Argila	< 0,020	56,33	39,84	58,57	41,43	24,75	59,53
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
67,00	20,62		30,35		46,38		69,65

Tabela A13 – Resultados do peneiramento na amostra 1,5m do perfil D

Amostra 02D							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Areia grossa	2,00	1,59	1,56	50,48	49,52	0,19	3,46
	1,19	0,39	0,39	50,00	50,00		
Areia média	0,59	0,34	0,29	53,97	46,03	1,26	1,36
	0,42	0,40	0,19	67,80	32,20		
	0,297	0,83	0,35	70,34	29,66		
Areia fina	0,25	0,64	0,31	67,37	32,63	2,98	5,52
	0,149	1,75	1,00	63,64	36,36		
Silte	0,074	4,01	2,59	60,76	39,24	0,81	1,55
	0,020	1,45	0,97	59,92	40,08		
Argila	< 0,020	54,60	39,43	58,07	41,93	23,05	59,82
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
66,00	18,92		28,29		47,08		71,71

Tabela A14 – Resultados do peneiramento na amostra 3m do perfil D

Amostra 03D							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Areia grossa	2,00	1,07	1,07	0,00	100,00	0,09	2,74
	1,19	0,51	0,48	51,52	48,48		
Areia média	0,59	0,27	0,23	54,00	46,00	0,41	0,83
	0,42	0,26	0,16	61,90	38,10		
	0,297	0,53	0,30	63,86	36,14		
Areia fina	0,25	0,40	0,22	64,52	35,48	0,46	1,33
	0,149	1,18	0,72	62,11	37,89		
Silte	0,074	0,42	0,28	60,00	40,00	1,54	2,89
	0,020	3,16	2,02	61,00	39,00		
Argila	< 0,020	57,20	38,65	32,43	67,57	30,71	59,00
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
65,00	20,87		33,21		44,13		66,79

Tabela A15 – Resultados do peneiramento na amostra 5m do perfil D

Amostra 04D							
Granulometria	Malha (mm)	Retido Total (g)	Retido Metálicos (g)	% não Metálicos	% Metálicos	% total de não Metálicos por granulometria	% total de Metálicos por granulometria
Pedregulho fino	4,76	1,03	1,03	0,00	100,00	0,00	1,72
Areia grossa	2,00	0,81	0,81	0,00	100,00	0,17	2,60
	1,19	0,59	0,51	13,56	86,44		
Areia média	0,59	0,25	0,22	12,00	88,00	0,65	1,52
	0,42	0,33	0,26	21,21	78,79		
	0,297	0,24	0,17	29,17	70,83		
Areia fina	0,25	0,74	0,46	37,84	62,16	1,51	1,81
	0,149	1,13	0,68	39,82	60,18		
Silte	0,074	0,99	0,38	61,62	38,38	0,20	0,30
	0,020	0,24	0,15	37,50	62,50		
Argila	< 0,020	53,65	33,53	37,50	62,50	33,57	55,95
Total (g)	Total de não metálicos (g)		%		Total de metálicos (g)		%
60,00	21,80		36,10		38,2		63,90

Tabela A16 – Resultados do peneiramento na amostra 7m do perfil D

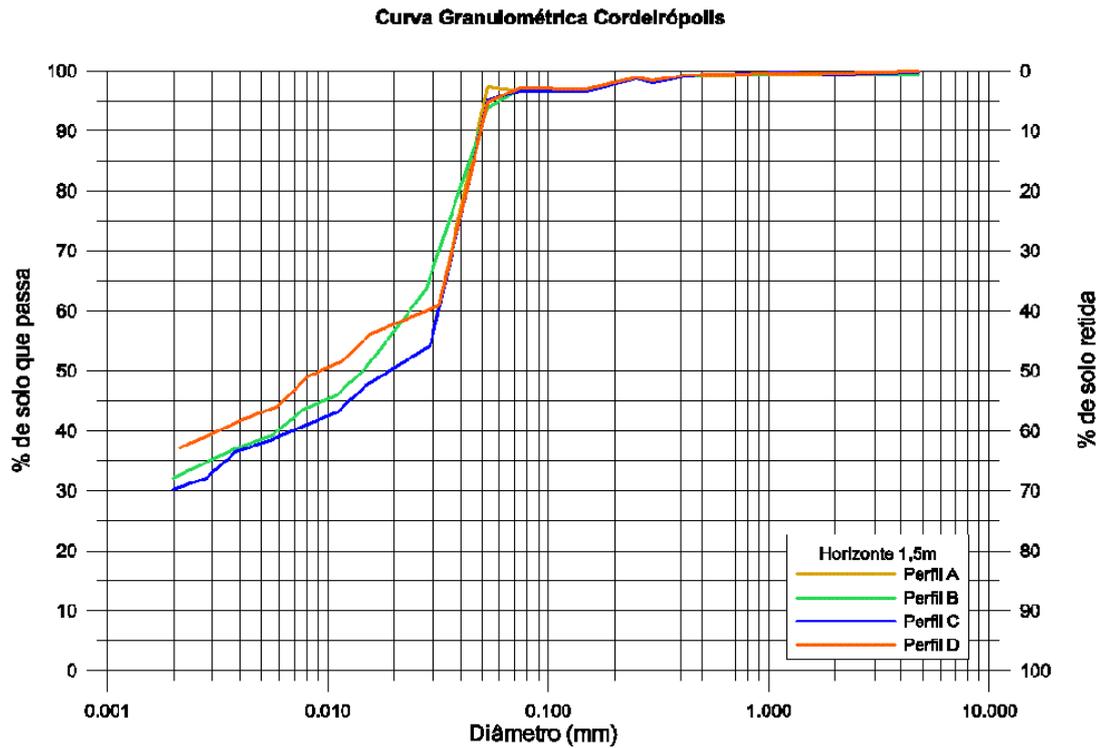


Gráfico A1 – Curva granulométrica do horizonte de 1,5m de profundidade

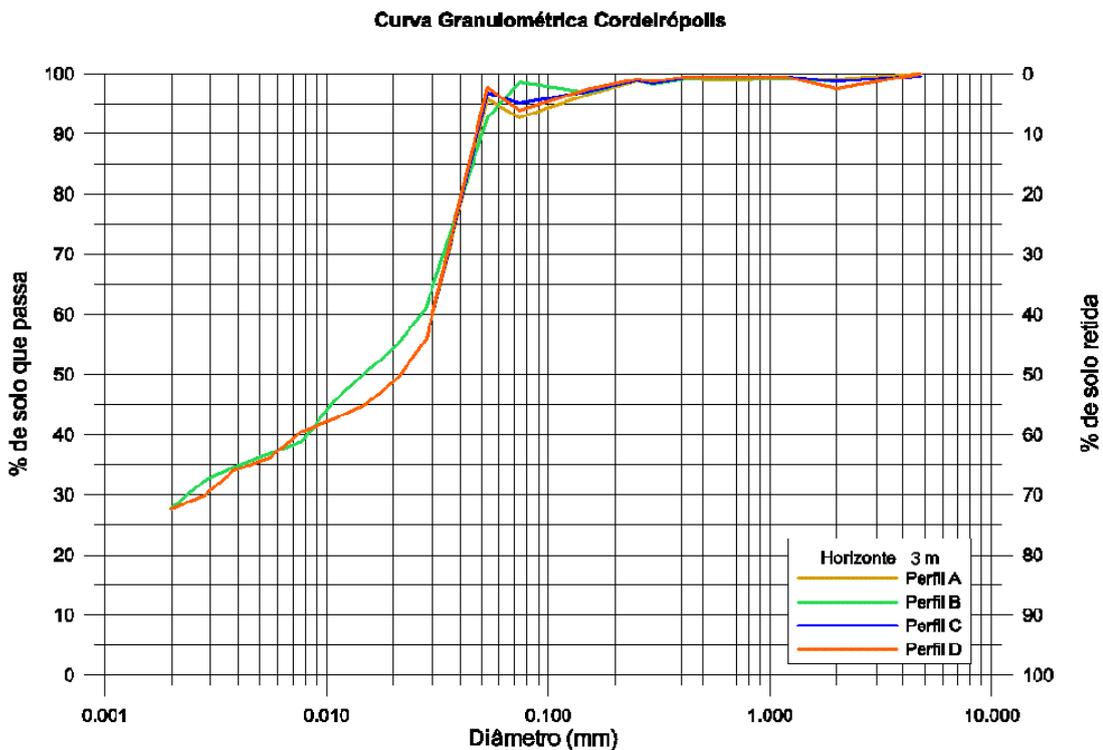


Gráfico A2 – Curva granulométrica do horizonte de 3m de profundidade

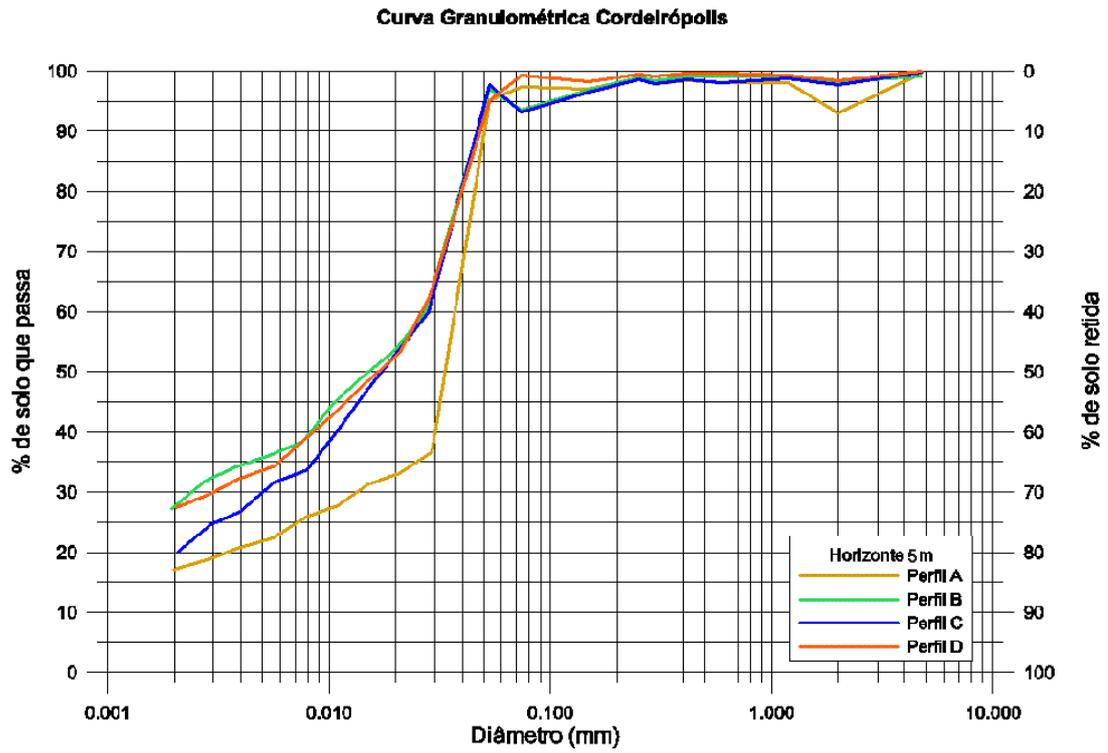


Gráfico A3 – Curva granulométrica do horizonte de 5m de profundidade

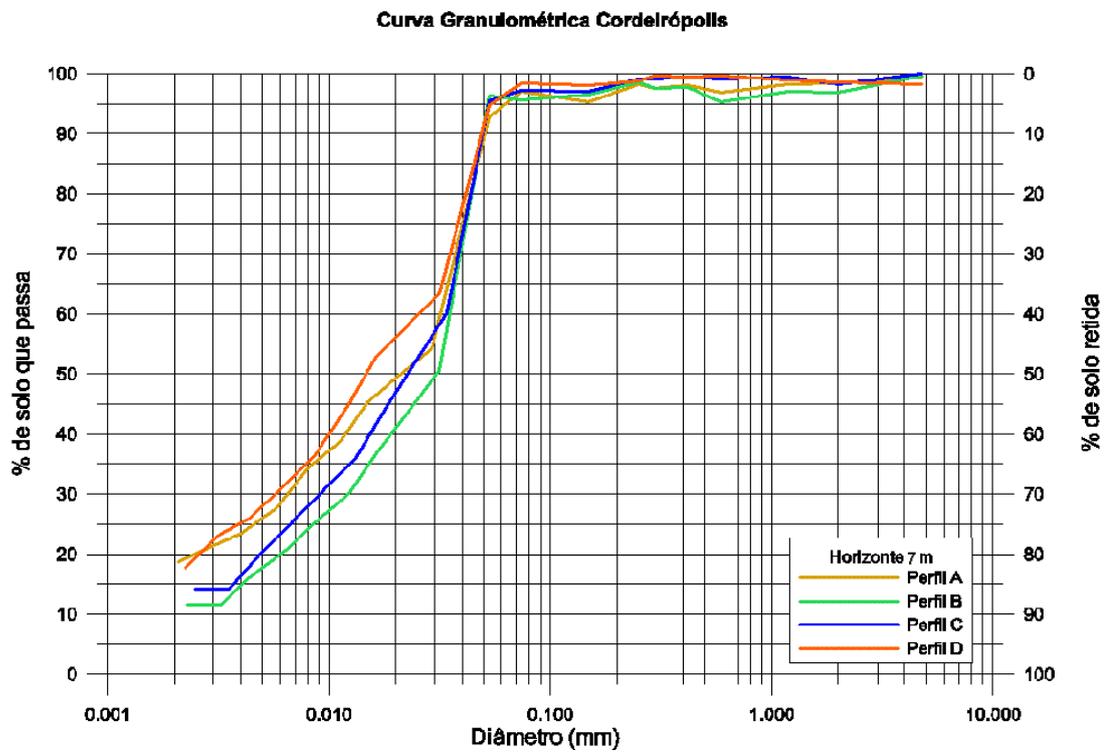


Gráfico A4 – Curva granulométrica do horizonte de 7m de profundidade

APÊNDICE B

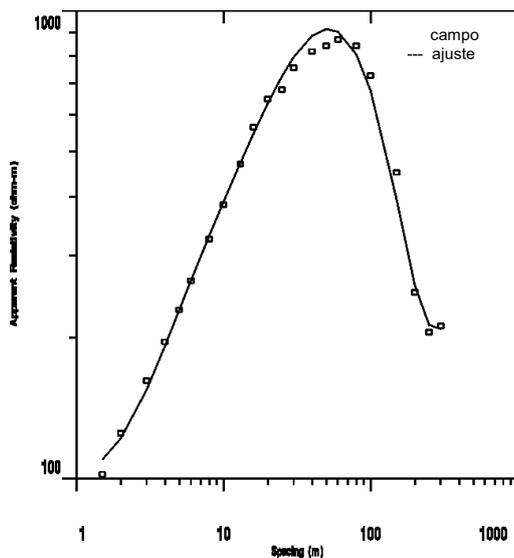
SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS EXTERNAS

CURVA DE CAMPO

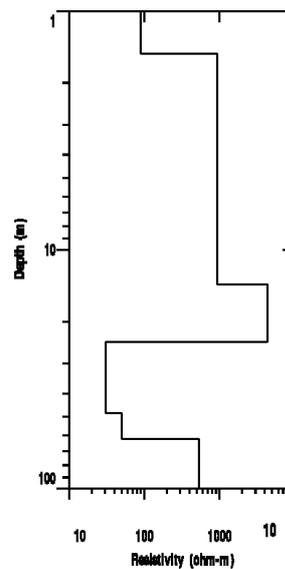
MODELO GEOELÉTRICO

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS PREDOMINANTES

Curva de Campo



Modelo Geométrico

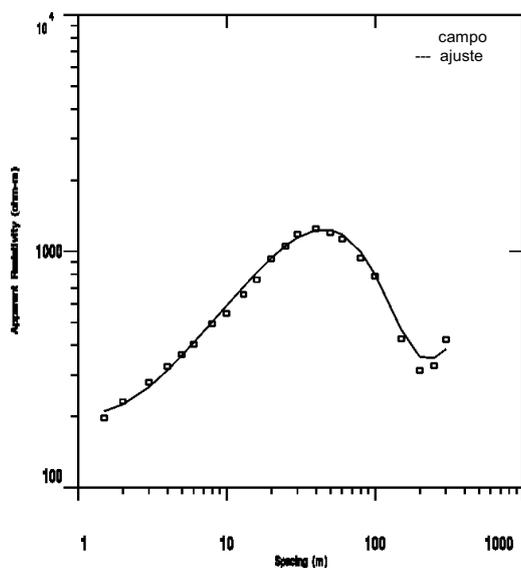


SEV 1		Cota: 660 m			Material predominante*
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	
1	89.69	1.51	0.00	660.00	Solo areno-siltoso seco Solo siltoso seco Diabásio inalterado seco Siltito Arenito fino Folhelho
2	937.12	12.47	1.51	658.49	
3	4369.7	10.39	13.98	646.02	
4	30.50	24.00	24.37	635.62	
5	49.86	13.55	48.37	611.62	
6	531.62		61.93	598.07	
Profundidade do nível freático: 61,93m					

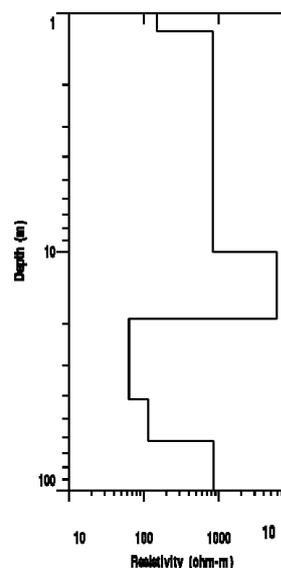
* Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Quadro B1 - SEV-01: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis geométricos

Curva de Campo



Modelo Geométrico

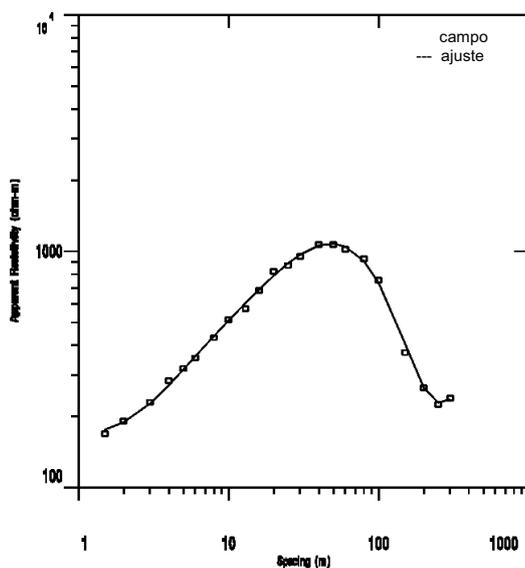


SEV 2		Cota: 659 m			Material predominante*
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	
1	149.42	1.19	0.00	659.00	Solo areno-siltoso seco Solo siltoso seco Diabásio inalterado seco Siltito Arenito fino Folhelho/silexito
2	836.50	8.84	1.19	657.80	
3	5865.2	9.04	10.04	648.96	
4	63.22	22.38	19.09	639.91	
5	114.18	20.76	41.47	617.53	
6	842.95		62.24	596.76	
Profundidade do nível freático: 62.24m					

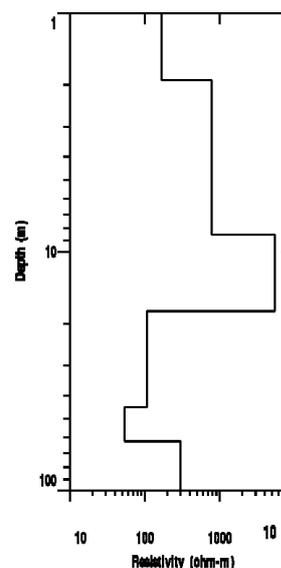
* Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Quadro B2 - SEV-02: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis geométricos

Curva de Campo



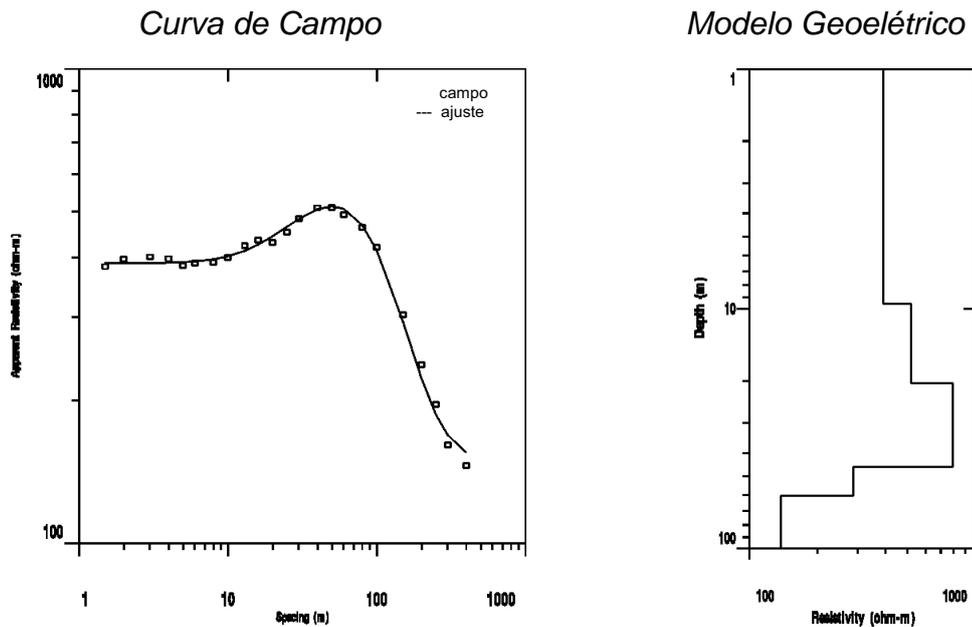
Modelo Geométrico



SEV 3					
Cota: 658 m					
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante*
1	165.91	1.91	0.00	658.00	Solo areno-siltoso seco Solo siltoso seco Diabásio inalterado seco Siltito Arenito fino Folhelho
2	785.78	6.55	1.91	656.08	
4	5381.0	9.28	8.47	649.53	
5	106.54	27.03	17.75	640.24	
6	53.80	18.91	44.79	613.20	
7	296.67		63.71	594.29	
Profundidade do nível freático: 63.71m					

* Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

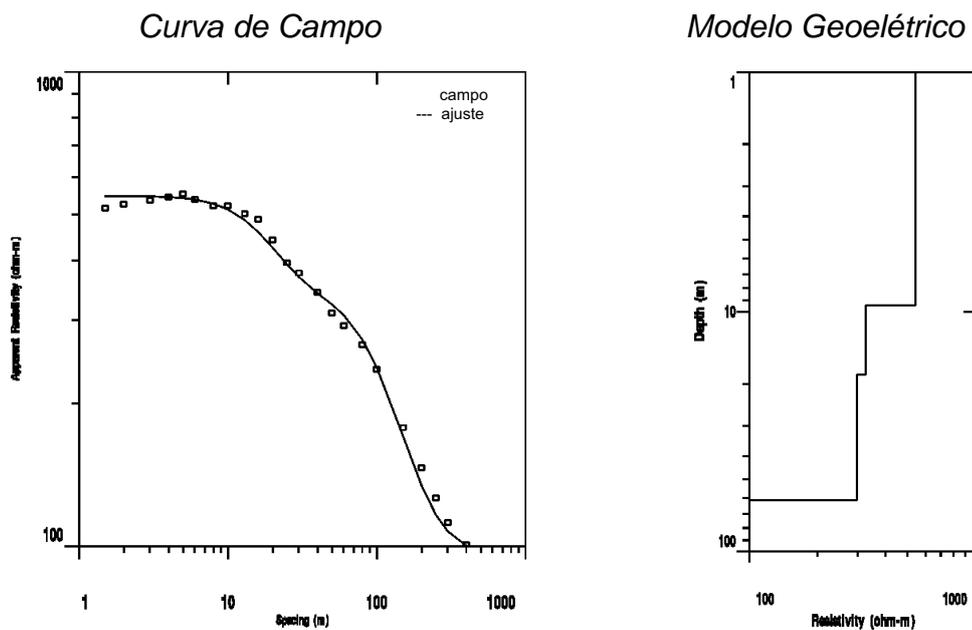
Quadro B3 - SEV-03: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis geométricos



SEV 4		Cota: 655 m			Material predominante*
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	
1	389.79	9.55	0.00	655.00	Solo silto-argiloso seco Saprolito arenoso Siltito Arenito fino Folhelho
2	518.48	10.91	9.55	645.45	
3	789.16	25.23	20.46	634.54	
4	288.71	16.58	45.69	609.30	
5	137.52		62.28	592.72	
Profundidade do nível freático: 62.28m					

* Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Quadro B4 - SEV-04: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis geométricos

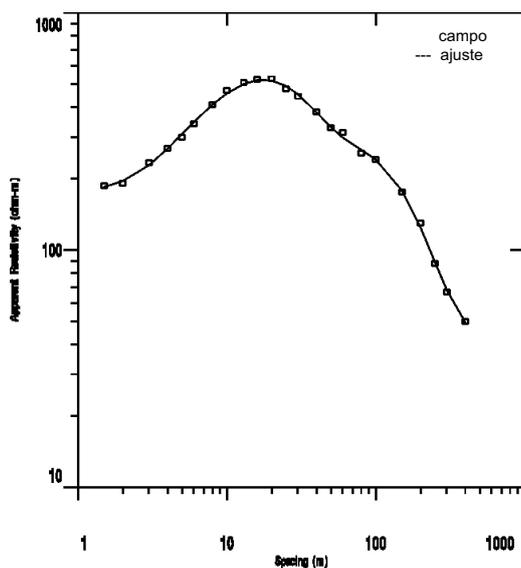


SEV 5					
Cota: 658 m					
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante*
1	542.04	9.41	0.00	658.00	Solo silto-argiloso seco Saprolito arenoso Siltito Arenito fino
2	327.49	8.96	9.41	648.58	
3	299.23	44.83	18.38	639.62	
4	100.27		63.22	594.78	
Profundidade do nível freático: 63.22m					

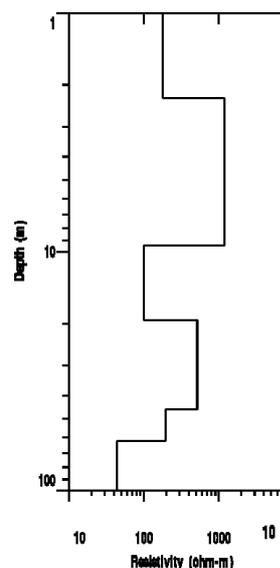
* Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Quadro B5 - SEV-05: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis geométricos

Curva de Campo



Modelo Geométrico



SEV 6					
Cota: 660 m					
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante*
1	177.42	2.27	0.00	660.00	Solo siltoso seco Solo silto-argiloso seco Saprolito arenoso Siltito Arenito fino Folhelho
2	1192.4	7.11	2.27	657.73	
3	100.37	10.00	9.39	650.61	
4	515.23	26.33	19.39	640.61	
5	196.55	18.66	45.72	614.28	
6	44.07		64.38	595.62	
Profundidade do nível freático: 61.90m					

* Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Quadro B6 - SEV-06: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis geométricos

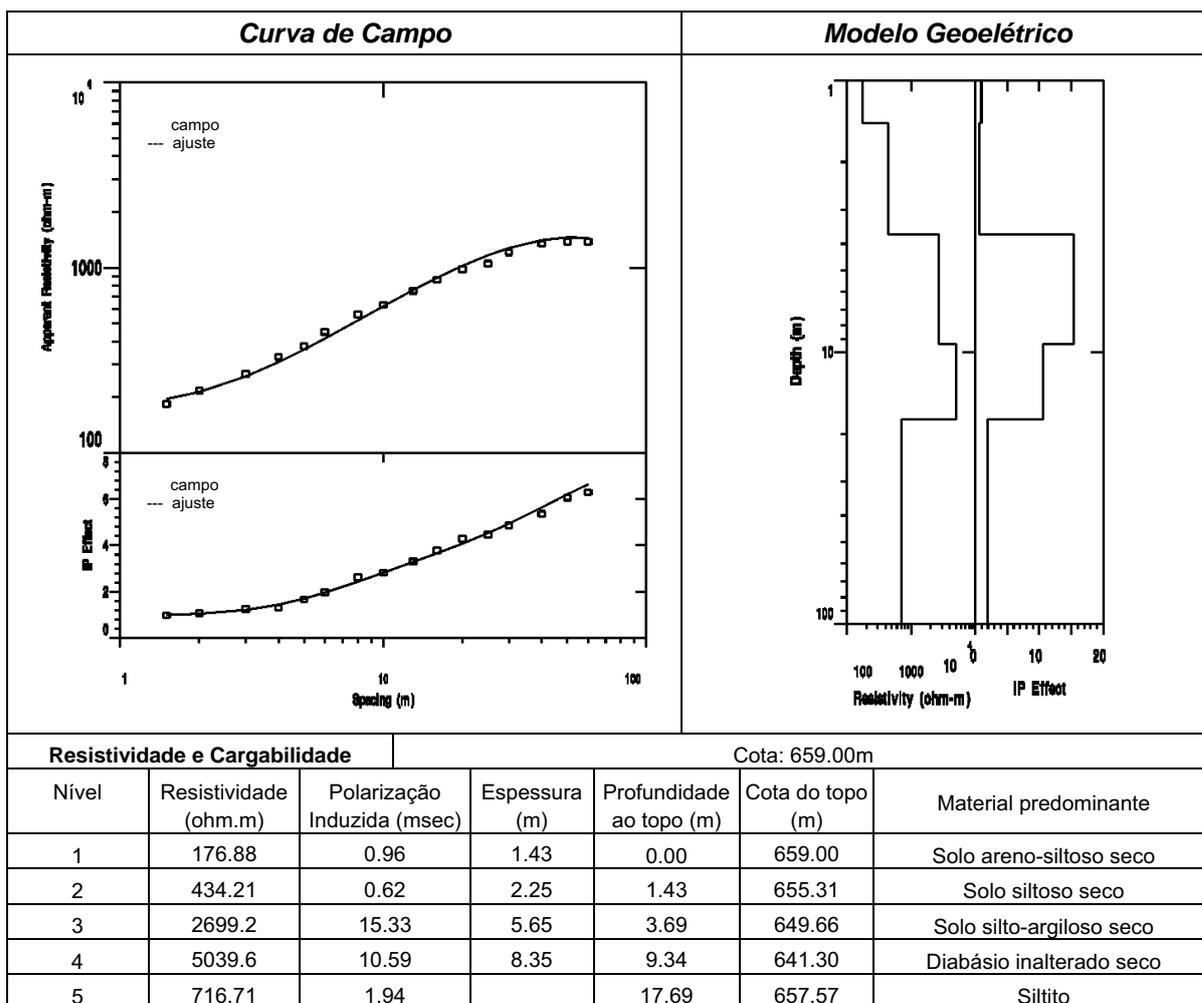
APÊNDICE C

SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS RASAS

CURVA DE CAMPO

MODELO GEOELÉTRICO

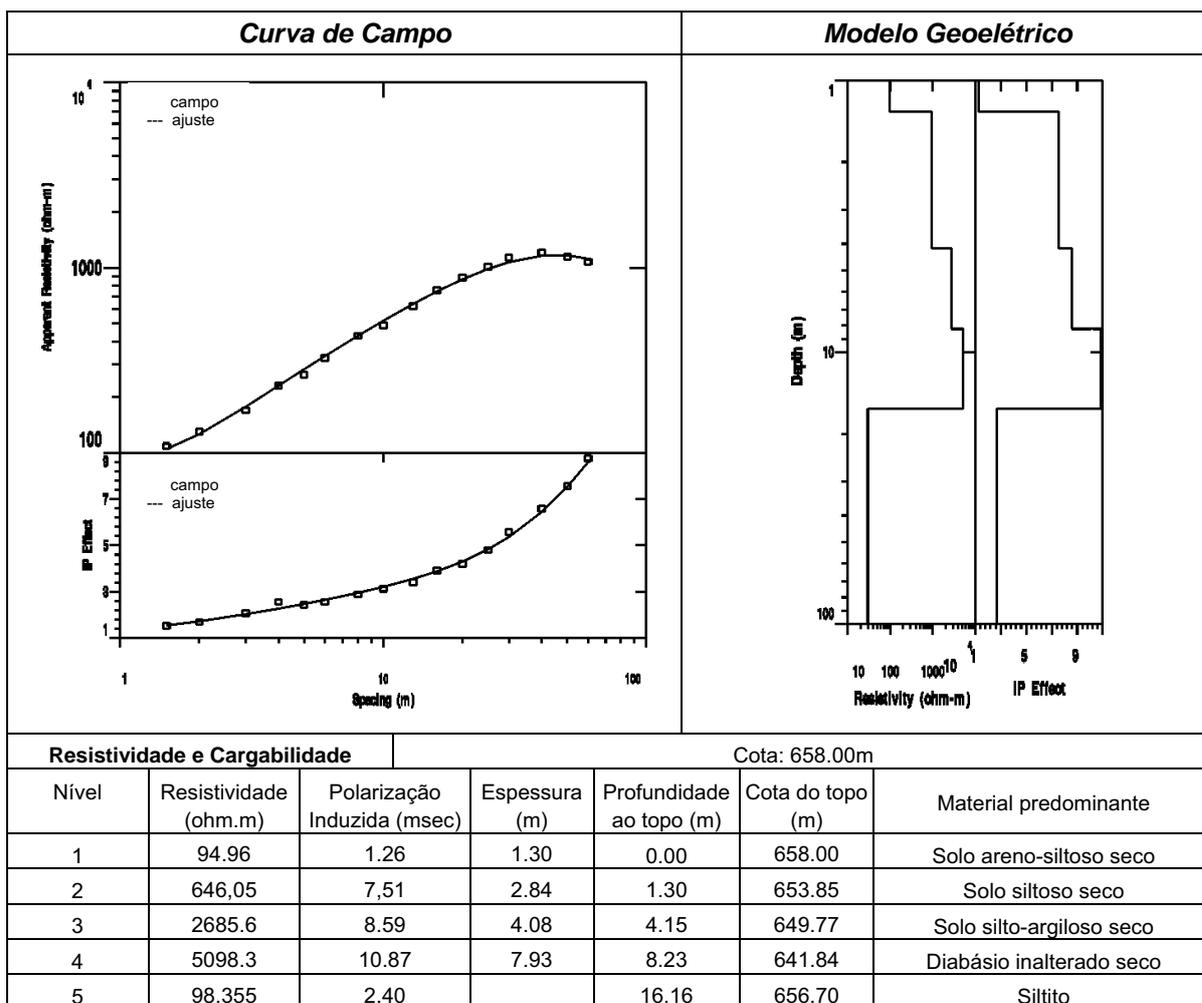
DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS PREDOMINANTES



Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	1.64	1.54	0.00	658.00
2	1.79	2.24	1.54	657.46
3	3.95	6.54	3.79	655.21
4	14.17	5.42	10.33	648.67
5	10.62		15.75	643.25

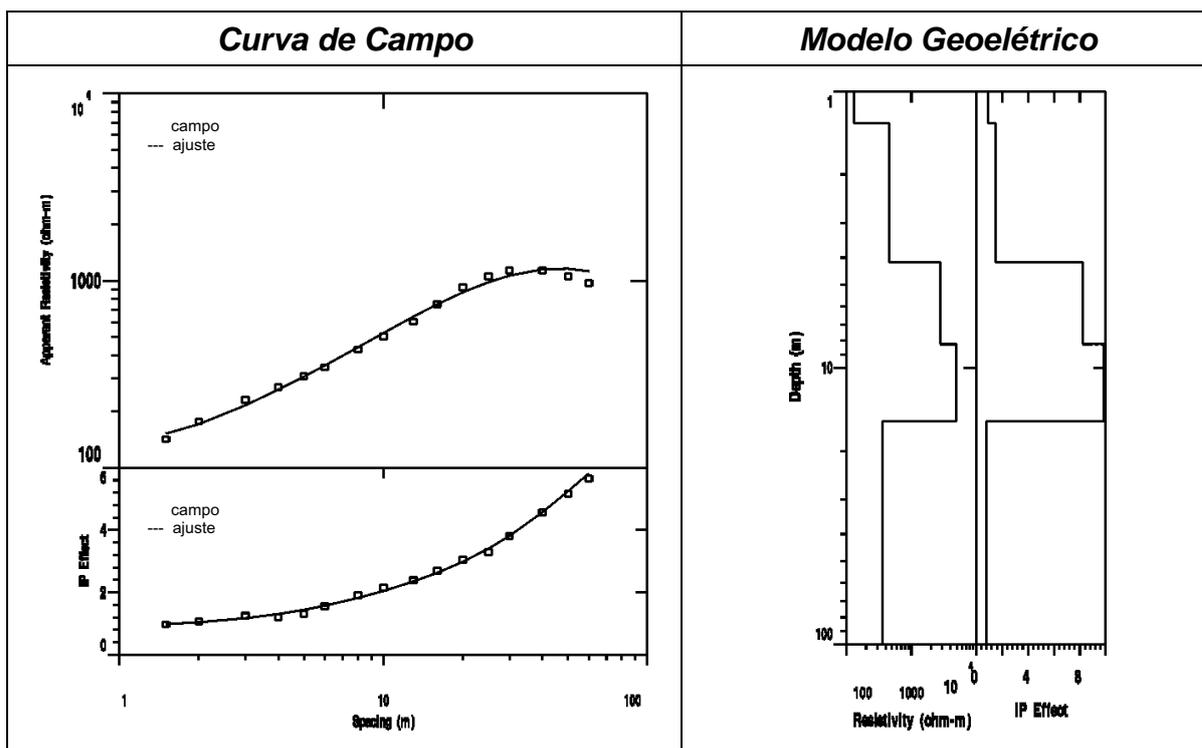
Quadro C1 – Referencia-01: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).



Obs.: Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 658.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	2.37	0.85	0.00	658.00
2	2.30	2.41	0.85	658.15
3	2.46	3.18	5.25	653.75
4	3.15	7.53	8.44	650.56
5	2.81		15.97	643.03

Quadro C2 – Referencia-02: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

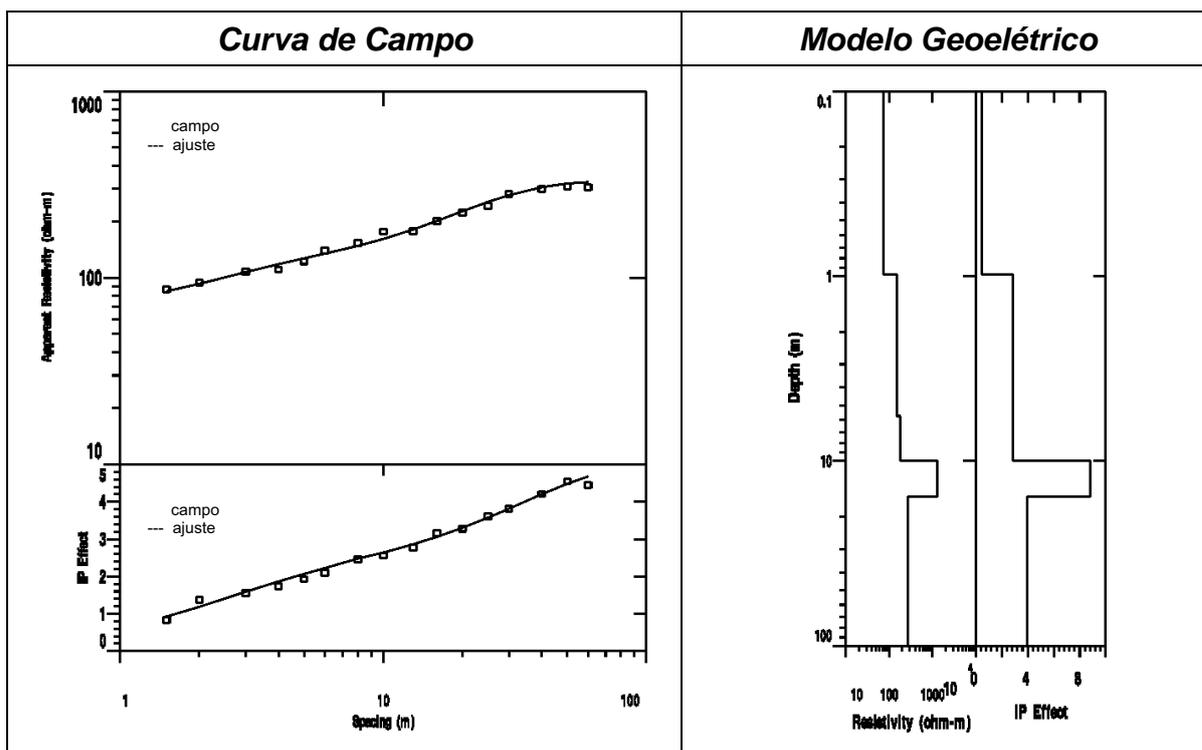


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 658.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	130.82	0.91	1.30	0.00	658.00	Solo areno-siltoso seco
2	449.66	1.47	2.84	1.30	653.85	Solo siltoso seco
3	2767.7	8.21	4.08	4.15	649.77	Solo silto-argiloso seco
4	4945.9	9.84	7.42	8.23	642.36	Diabásio inalterado seco
5	355.45	0.76		15.64	656.70	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 658.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	3.65	1.02	0.00	658.00
2	2.98	2.47	1.02	657.98
3	1.81	4.68	3.49	655.51
4	8.07	6.32	8.17	650.83
5	4.42		14.49	644.51

Quadro C3 – Referencia-03: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

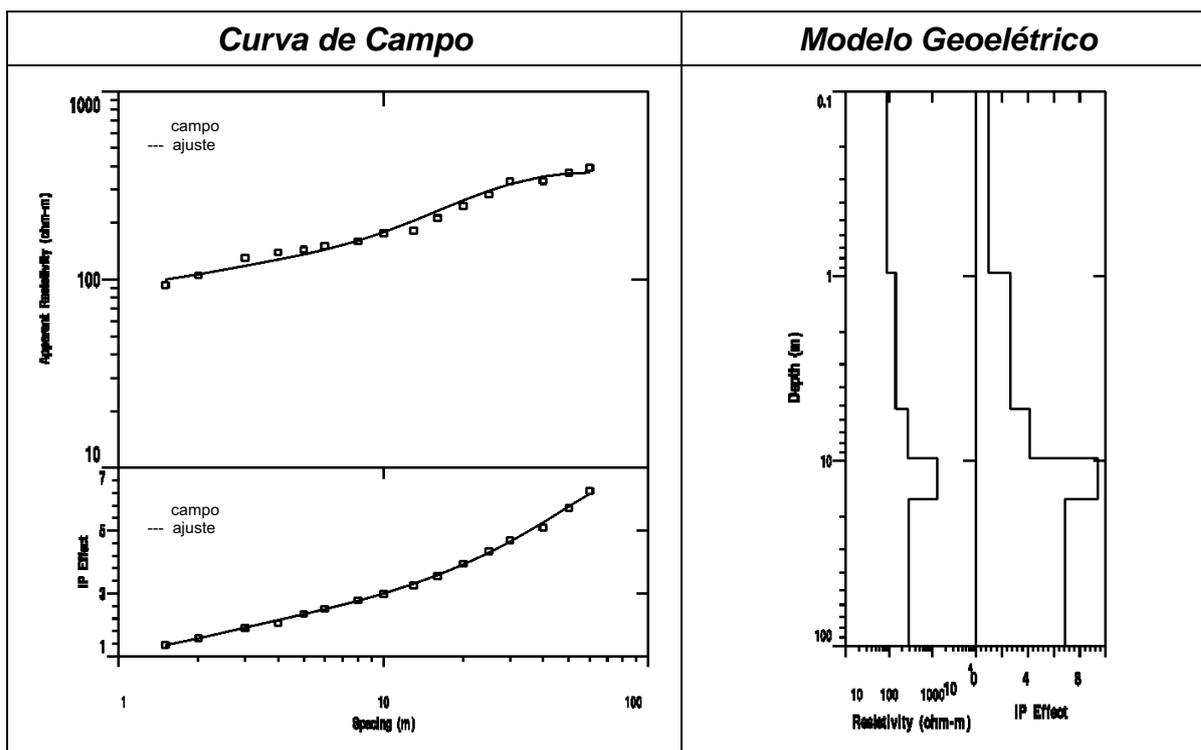


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 660.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	72.65	0.45	0.98	0.00	660.00	Solo areno-siltoso seco
2	149.17	2.86	4.73	0.98	659.02	Resíduos sólidos domiciliares
3	183.99	2.86	4.22	5.72	654.28	Solo silto-argiloso saturado
4	1272.5	8.80	5.72	9.93	650.07	Diabásio
5	268.10	3.96		15.65	644.35	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 660.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	0.13	0.69	0.00	658.00
2	2.14	4.00	0.69	659.30
3	3.37	4.21	4.70	655.30
4	9.13	5.33	8.91	651.09
5	3.13		14.24	645.76

Quadro C4 – 2007-01: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

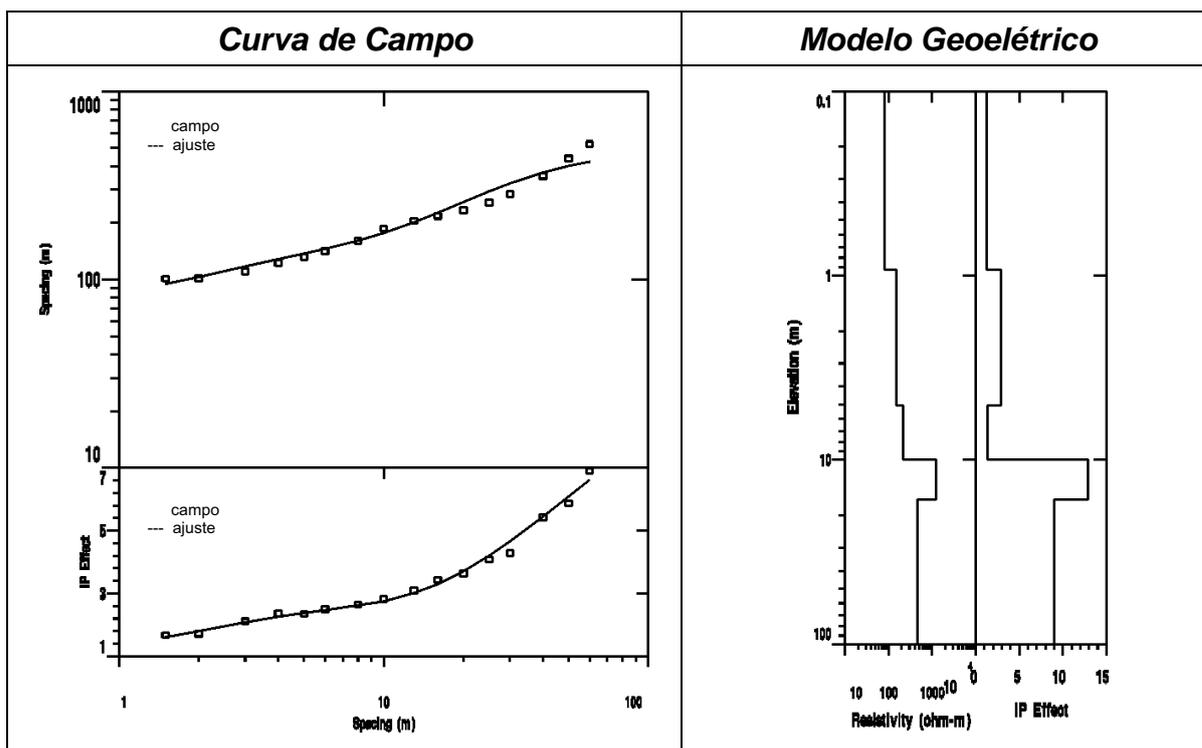


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 660.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	90.03	0.97	0.96	0.00	660.00	Solo areno-siltoso seco
2	141.47	2.68	4.26	0.96	659.04	Resíduos sólidos domiciliares
3	267.92	4.12	4.47	5.23	654.77	Solo silto-argiloso saturado
4	1307.3	9.37	6.45	9.70	650.30	Diabásio
5	287.37	6.87		16.15	643.85	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 660.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	1.03	1.01	0.00	658.00
2	2.65	4.24	1.01	658.99
3	4.33	4.73	5.24	654.76
4	9.05	6.58	9.97	650.03
5	7.19		16.55	643.45

Quadro C5 – 2007-02: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

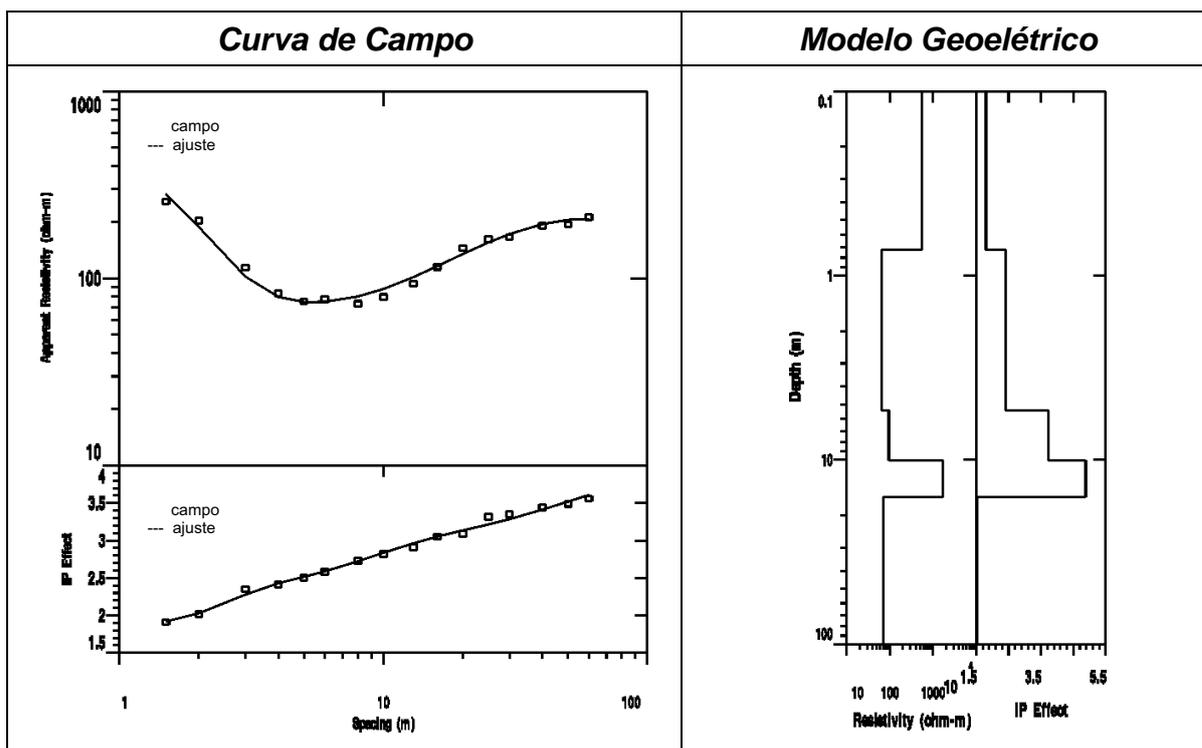


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 660.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	85.88	1.49	0.93	0.00	660.00	Solo areno-siltoso seco
2	135.81	2.32	4.68	0.93	659.07	Resíduos sólidos domiciliares
3	215.97	4.90	4.33	5.61	654.39	Solo silto-argiloso saturado
4	1217.90	9.20	6.53	9.94	650.06	Diabásio
5	460.47	8.73		16.47	643.53	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 660.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	1.36	1.00	0.00	658.00
2	2.68	5.84	1.00	659.00
3	3.83	4.30	6.84	653.16
4	8.92	7.92	11.14	648.86
5	13.11		19.06	640.94

Quadro C6 – 2007-03: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

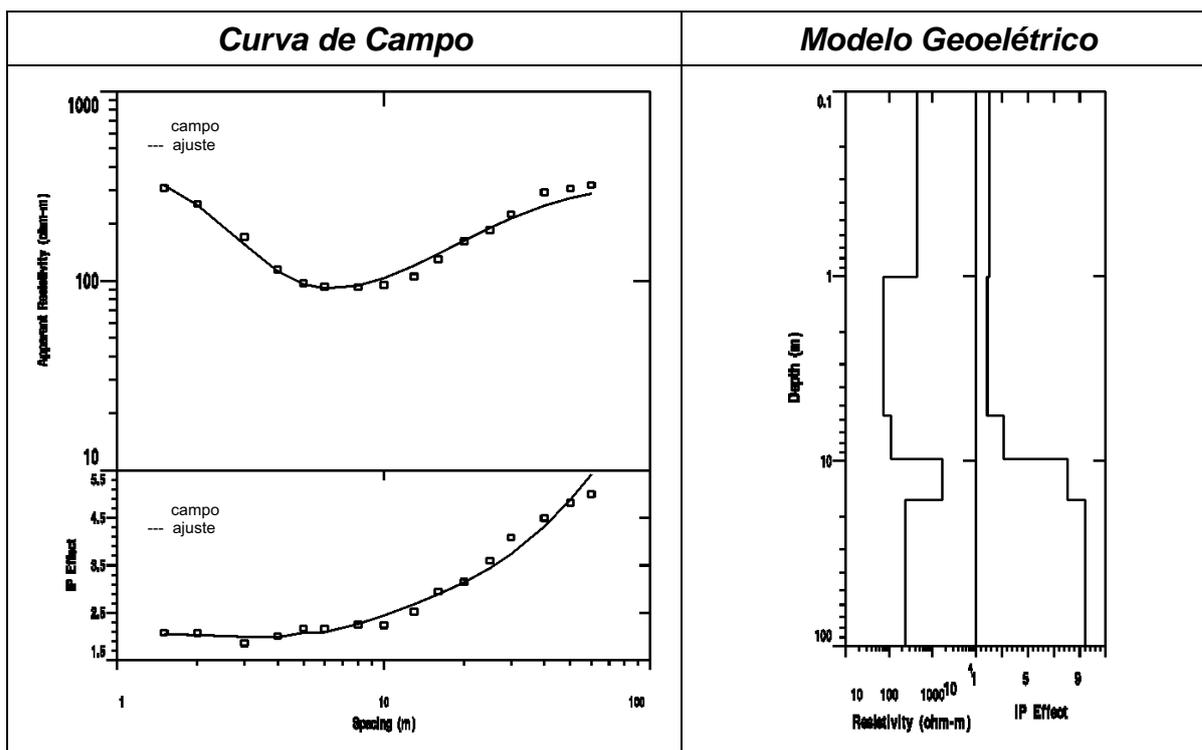


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 660.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	554.94	1.80	0.73	0.00	660.00	Solo areno-siltoso seco
2	64.43	2.41	4.69	0.73	659.27	Resíduos sólidos domiciliares
3	94.70	3.74	4.66	5.41	654.59	Solo silto-argiloso saturado
4	1708.4	4.88	5.81	10.07	649.93	Diabásio
5	70.55	1.53		15.89	644.11	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 660.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	1.77	0.77	0.00	658.00
2	2.54	4.85	0.77	659.23
3	2.23	2.53	5.62	654.38
4	7.80	4.54	8.15	651.85
5	1.19		12.69	647.31

Quadro C7 – 2006-01: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

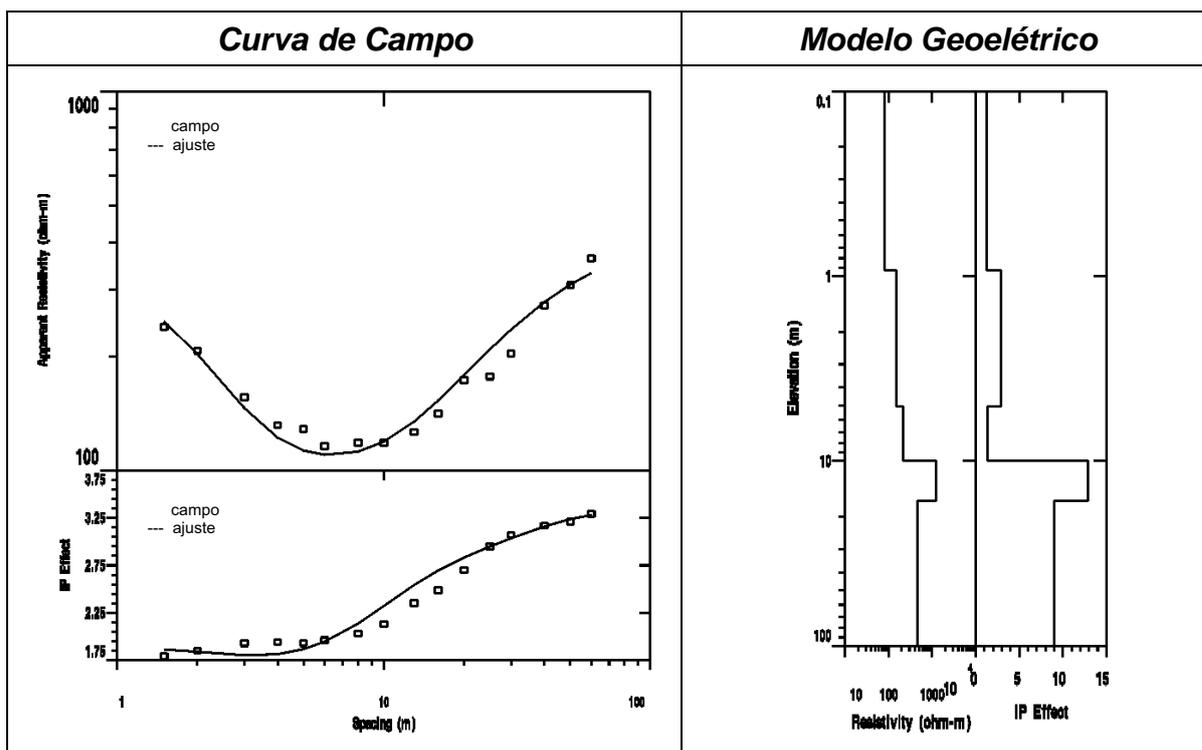


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 660.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	434.28	2.07	1.01	0.00	660.00	Solo areno-siltoso seco
2	72.73	1.88	4.70	1.01	658.99	Resíduos sólidos domiciliares
3	111.92	3.16	4.07	5.71	654.29	Solo silto-argiloso saturado
4	1681.7	8.06	6.41	9.78	650.22	Diabásio
5	241.21	9.39		16.18	643.82	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 660.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	2.02	1.59	0.00	658.00
2	2.05	2.35	1.59	658.41
3	1.78	6.06	3.94	656.06
4	10.15	3.13	10.00	650.00
5	5.21		13.13	646.87

Quadro C8 – 2006-02: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

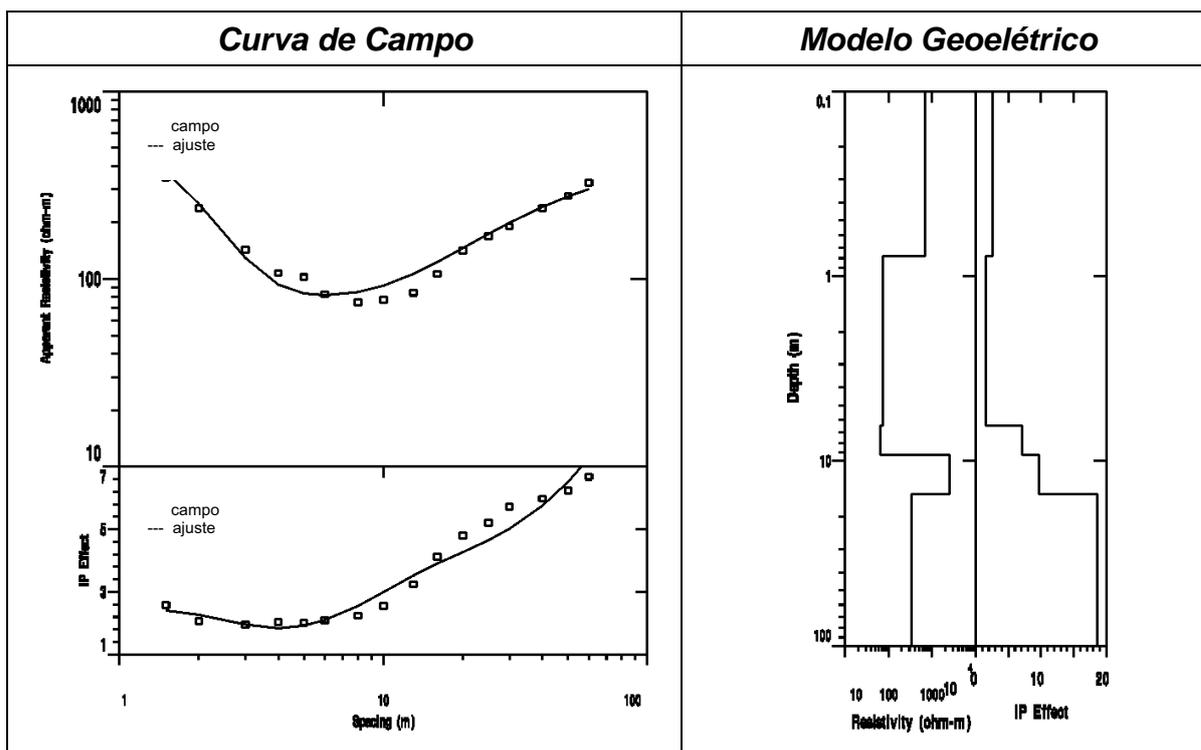


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 660.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	334.52	1.90	0.89	0.00	660.00	Solo areno-siltoso seco
2	97.39	1.71	4.72	0.89	659.11	Resíduos sólidos domiciliares
3	87.83	3.28	3.84	5.61	654.39	Solo silto-argiloso saturado
4	1674.1	7.17	6.40	9.45	650.55	Diabásio
5	362.39	2.02		15.85	644.15	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 660.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	1.78	0.80	0.00	658.00
2	1.90	7.11	0.80	659.20
3	2.59	3.38	7.91	652.09
4	9.94	6.6	11.29	648.71
5	1.83		17.95	642.05

Quadro C9 – 2006-03: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

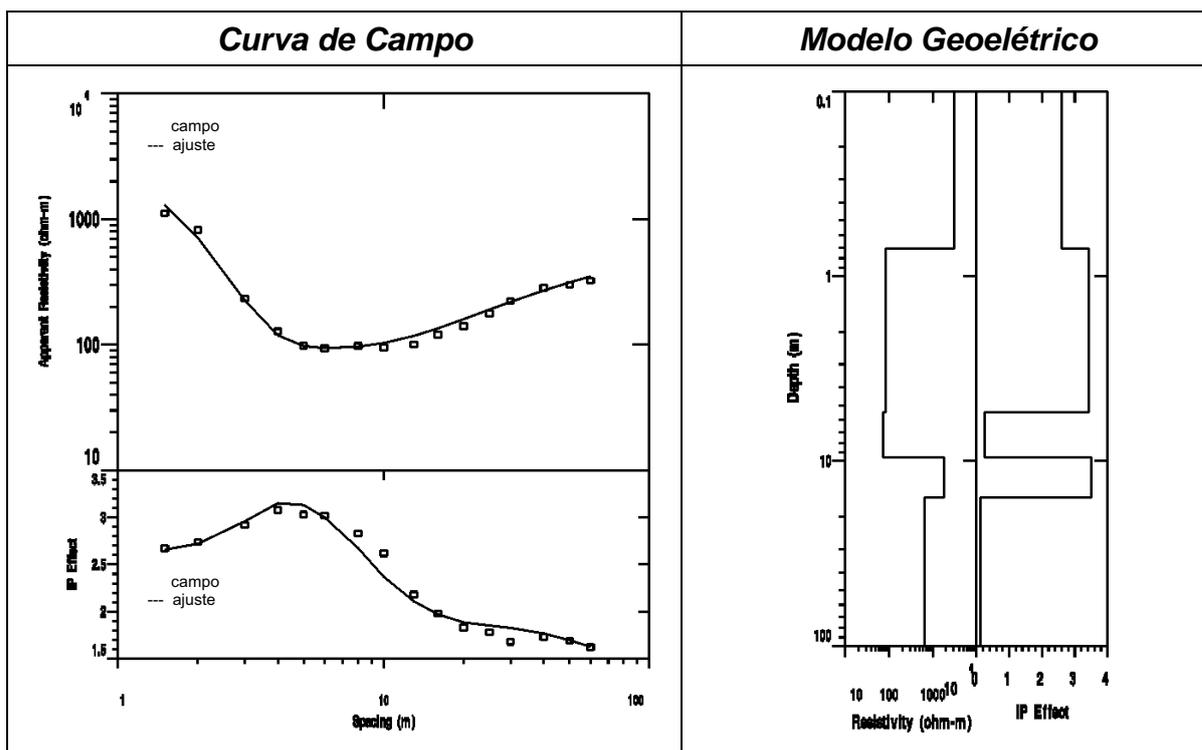


Resistividade e Cargabilidade			Cota: 659.50m			
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	686.50	2.55	0.78	0.00	659.50	Solo areno-siltoso seco
2	72.44	1.58	5.67	0.78	658.72	Resíduos sólidos domiciliares
3	65.55	7.08	2.78	6.45	653.05	Solo silto-argiloso saturado
4	2552.0	9.68	5.92	9.23	650.26	Diabásio
5	337.49	18.56		15.15	644.34	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.50m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	2.87	0.50	0.00	658.00
2	1.87	7.86	0.50	659.00
3	8.79	1.99	8.36	651.13
4	5.86	7.07	10.35	649.15
5	7.67		17.42	642.08

Quadro C10 – 2005-01: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

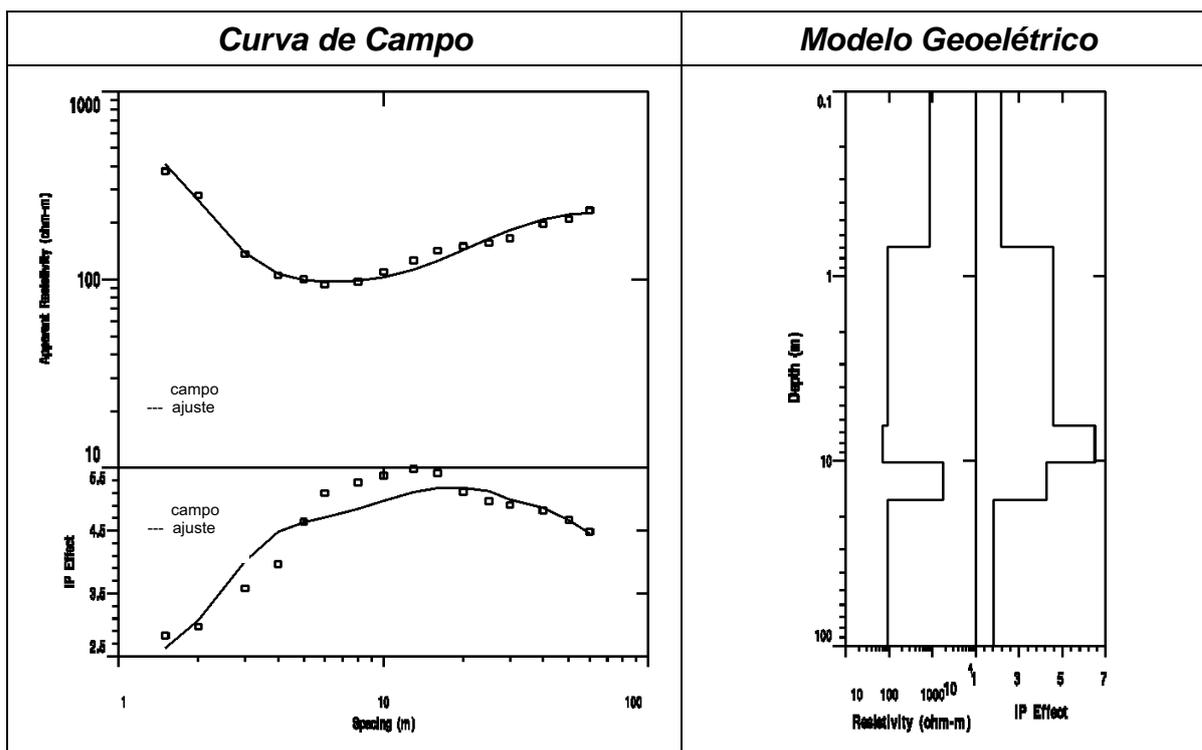


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 659.50m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	3228.7	2.61	0.71	0.00	659.50	Solo areno-siltoso seco
2	84.47	3.45	4.73	0.71	658.79	Resíduos sólidos domiciliares
3	74.47	0.20	4.15	5.44	654.06	Solo silto-argiloso saturado
4	1850.8	3.50	6.16	9.59	649.91	Diabásio
5	628.81	0.94		15.75	643.75	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.50m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	2.61	0.68	0.00	658.00
2	3.24	5.58	0.69	658.82
3	0.81	4.46	6.26	653.24
4	3.02	7.73	10.72	648.78
5	0.63		18.45	641.05

Quadro C11 – 2005-02: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

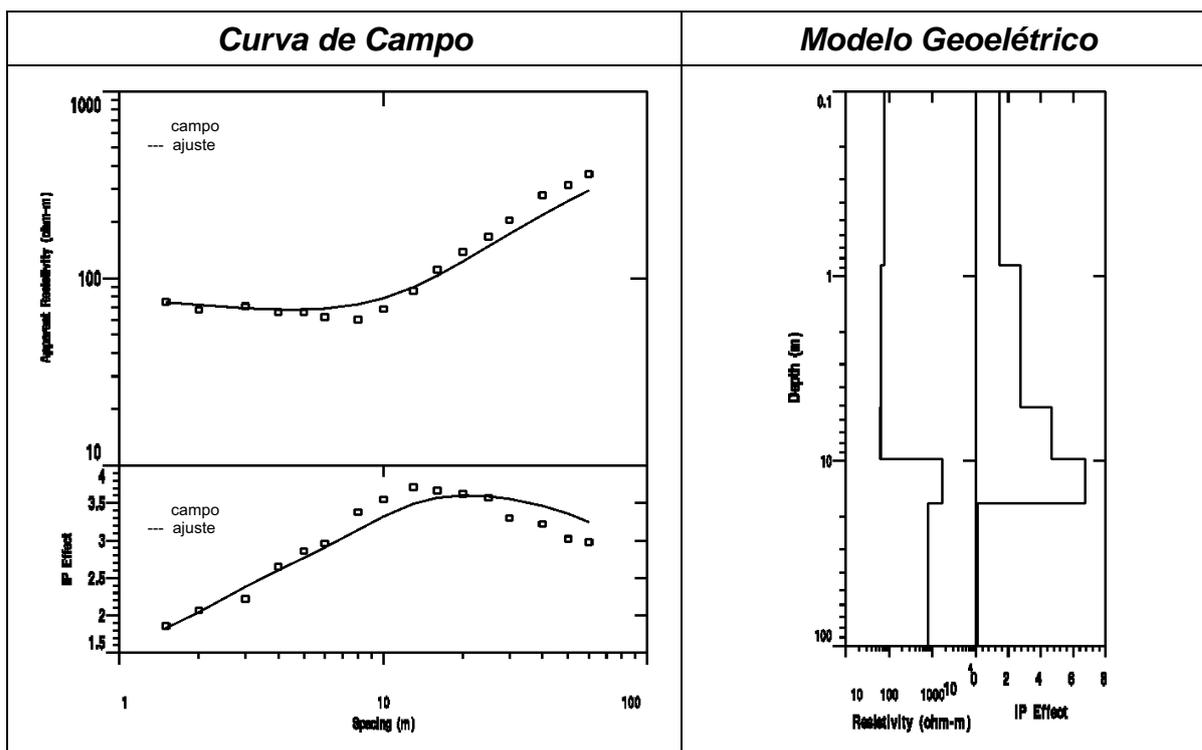


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 659.50m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	868.34	2.15	0.69	0.00	659.50	Solo areno-siltoso seco
2	90.65	4.56	5.77	0.69	658.80	Resíduos sólidos domiciliares
3	69.71	6.50	3.73	6.47	653.03	Solo silto-argiloso saturado
4	1781.8	4.25	6.05	10.20	649.30	Diabásio
5	91.201	1.80		16.25	643.25	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.50m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	2.69	1.03	0.00	658.00
2	3.96	1.45	1.03	658.47
3	5.84	5.41	2.47	657.03
4	4.13	5.52	7.88	651.62
5	2.66		13.41	646.09

Quadro C12 – 2005-03: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

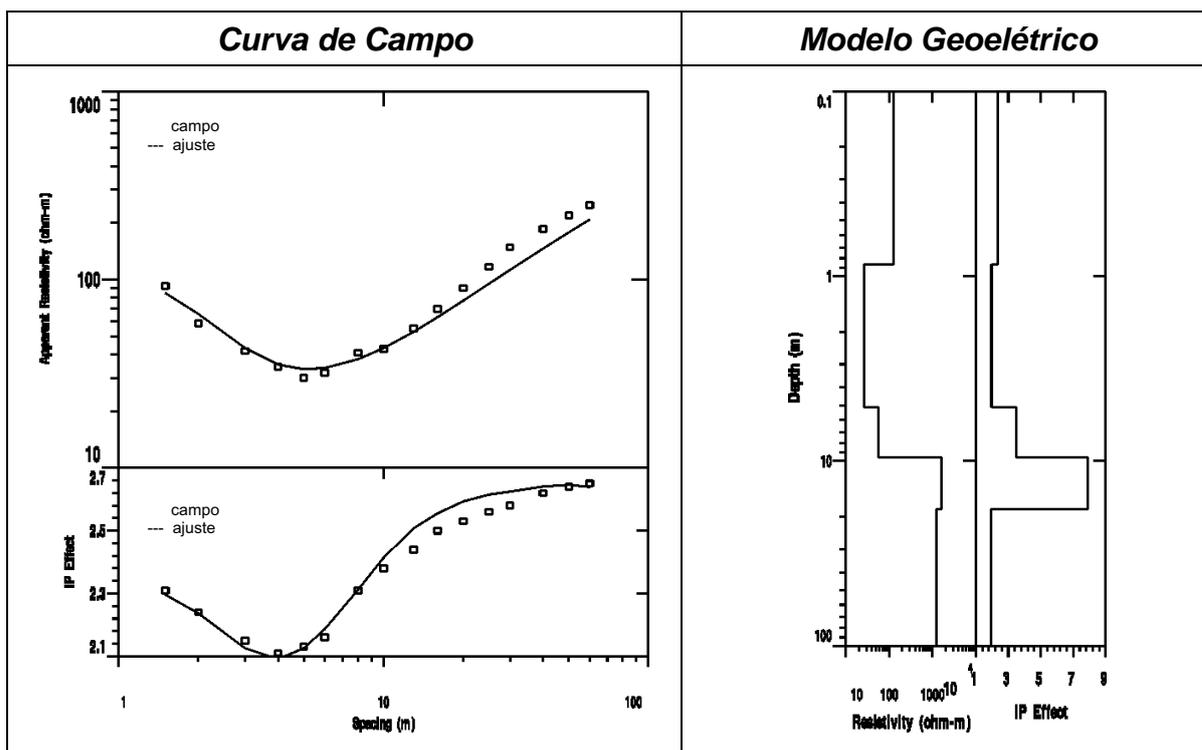


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 659.50m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	78.75	1.46	0.88	0.00	659.50	Solo areno-siltoso seco
2	63.97	2.77	4.24	0.88	658.62	Resíduos sólidos domiciliares
3	63.19	4.68	4.60	5.12	654.38	Solo silto-argiloso saturado
4	1696.6	6.71	7.18	9.72	649.78	Diabásio
5	791.41	0.97		16.90	642.59	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.50m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	1.71	1.14	0.00	658.00
2	2.64	2.53	1.14	658.36
3	4.67	4.80	3.66	655.84
4	5.74	3.39	8.46	651.04
5	0.98		11.85	647.65

Quadro C13 – 2004-01: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

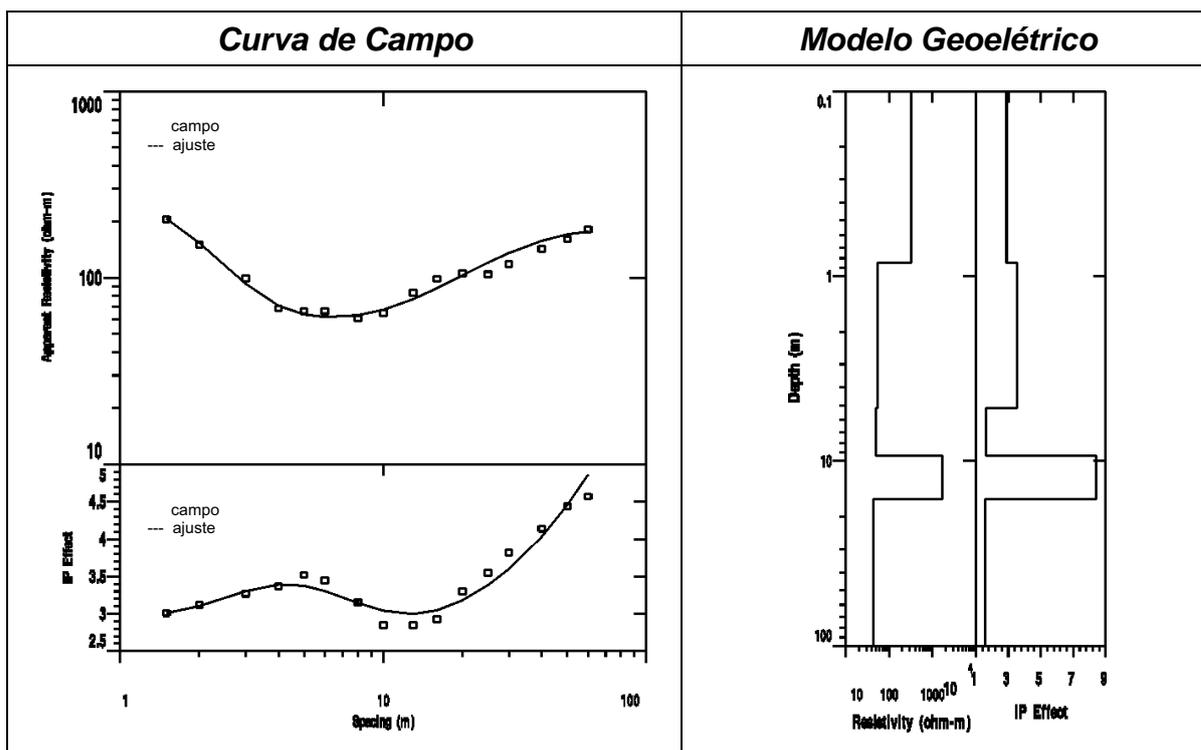


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 659.50m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	125.14	2.37	0.86	0.00	659.50	Solo areno-siltoso seco
2	26.45	1.97	4.24	0.86	658.64	Resíduos sólidos domiciliares
3	55.62	3.50	4.43	5.11	654.39	Solo silto-argiloso saturado
4	1624.2	7.87	8.66	9.54	649.96	Diabásio
5	1217.9	1.96		18.20	641.30	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.50m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	2.37	0.88	0.00	658.00
2	2.00	4.19	0.88	658.62
3	3.27	4.56	5.07	654.43
4	6.25	9.29	9.63	649.87
5	3.74		18.92	640.58

Quadro C14 – 2004-02: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

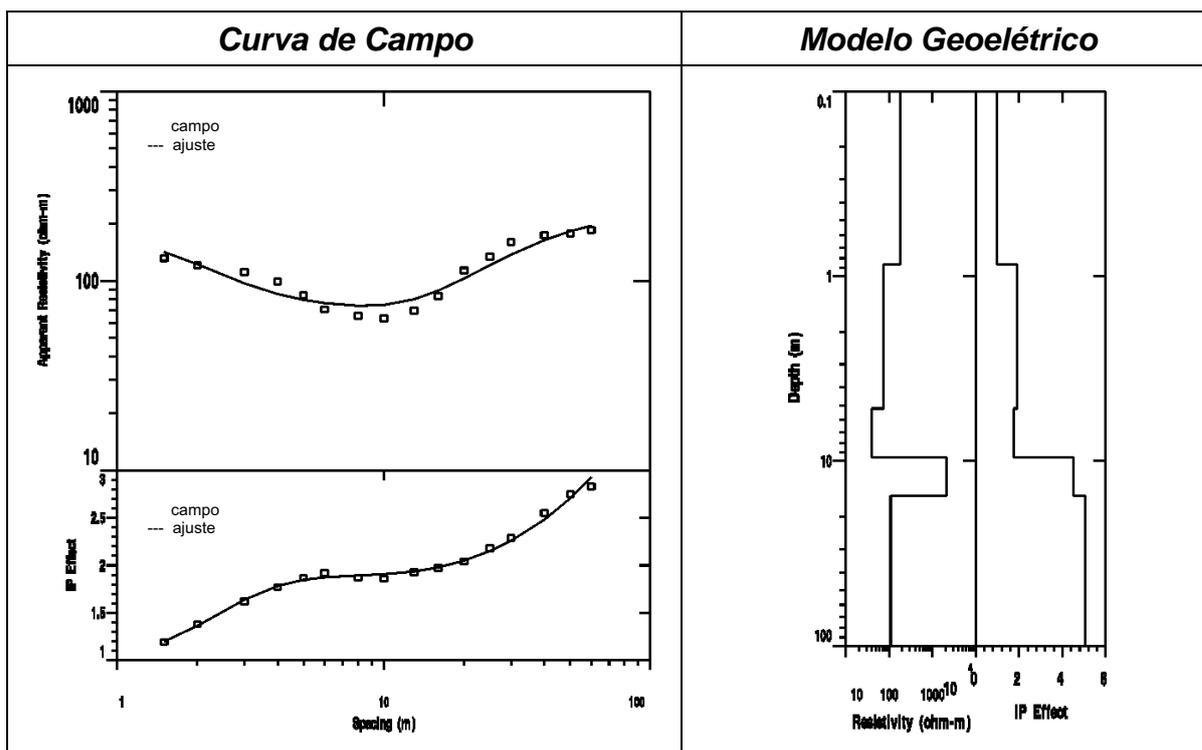


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 659.50m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	322.14	2.89	0.85	0.00	659.50	Solo areno-siltoso seco
2	54.42	3.59	4.32	0.85	658.65	Resíduos sólidos domiciliares
3	49.04	1.61	4.19	5.17	654.33	Solo silto-argiloso saturado
4	1653.9	8.43	6.66	9.36	650.14	Diabásio
5	42.99	1.58		16.02	643.48	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.50m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	2.93	1.60	0.00	658.00
2	3.34	0.87	1.60	657.90
3	2.16	7.73	2.47	657.03
4	5.65	8.22	10.21	649.29
5	5.13		18.43	641.07

Quadro C15 – 2004-03: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

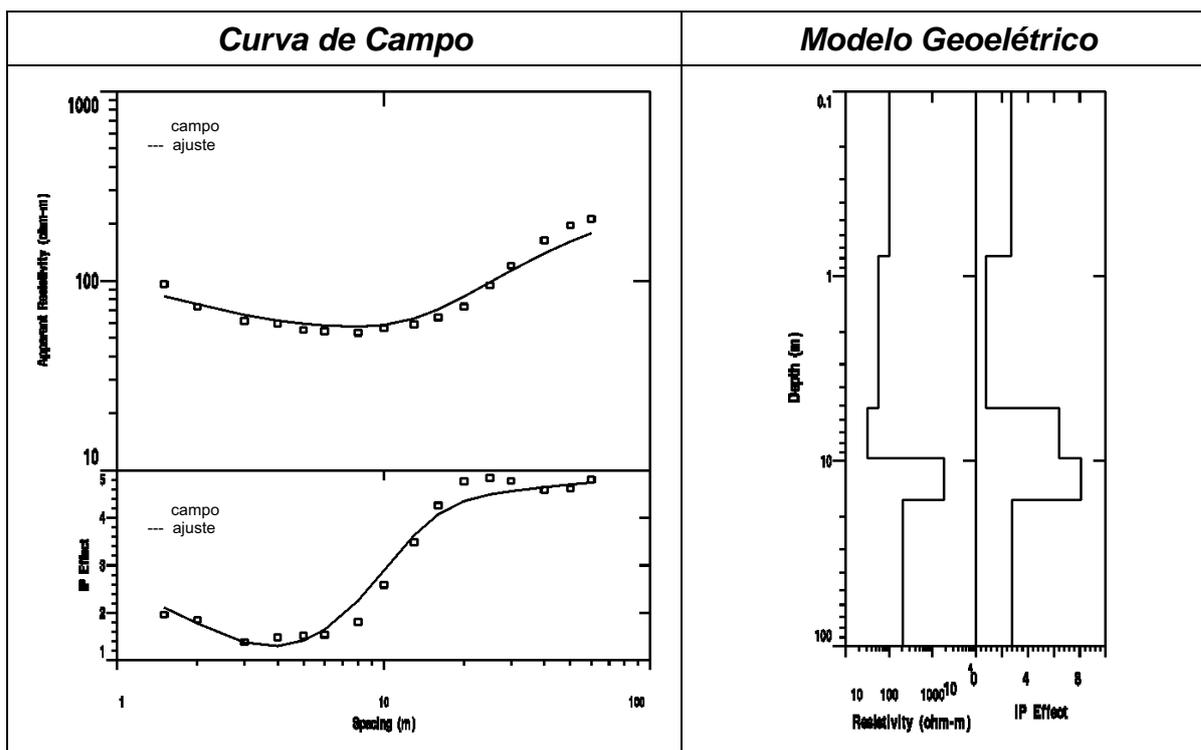


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 660.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	182.16	0.96	0.86	0.00	660.00	Solo areno-siltoso seco
2	74.13	1.91	4.34	0.86	659.14	Resíduos sólidos domiciliares
3	39.04	1.72	4.32	5.21	654.79	Solo silto-argiloso saturado
4	2071.4	4.80	5.90	9.53	650.47	Diabásio
5	113.32	4.47		15.43	644.57	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 660.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	0.97	0.87	0.00	658.00
2	1.92	4.32	0.87	659.13
3	1.69	4.30	5.19	654.80
4	4.91	5.74	9.49	650.51
5	4.01		15.23	644.76

Quadro C16 – 2003-01: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

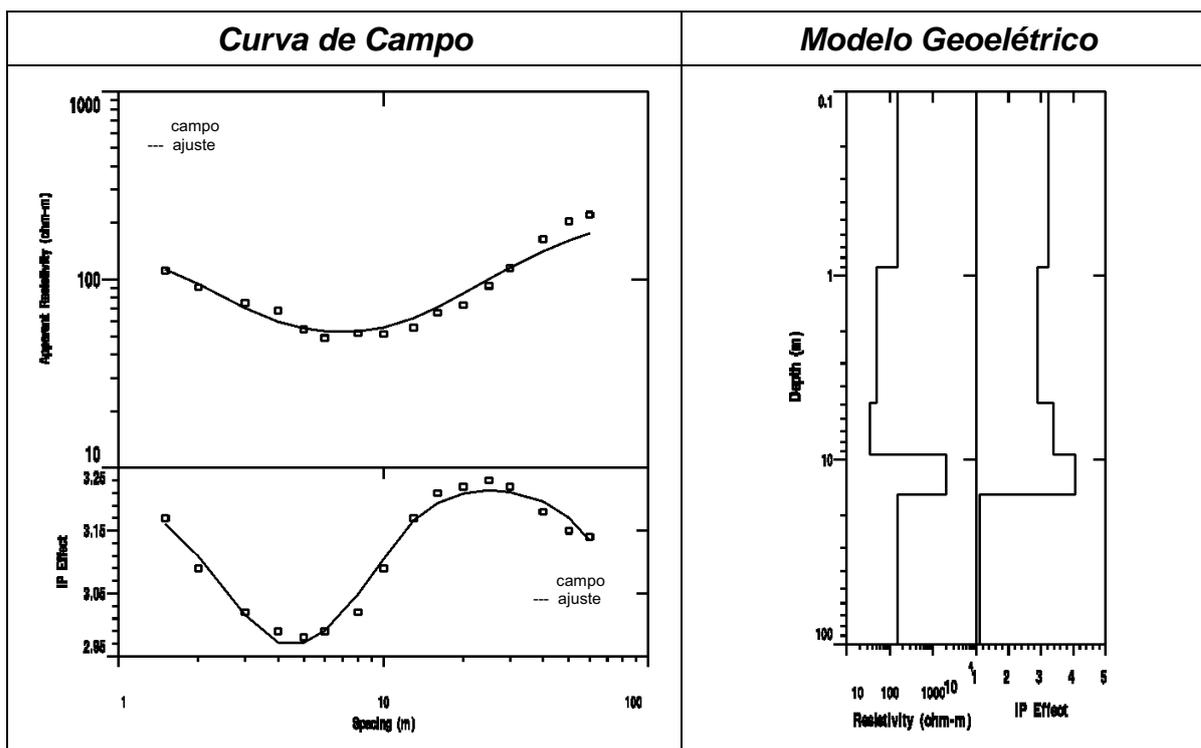


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 660.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	100.05	2.74	0.78	0.00	660.00	Solo areno-siltoso seco
2	57.34	0.80	4.42	0.78	659.22	Resíduos sólidos domiciliares
3	31.92	6.42	4.44	5.19	654.81	Solo silto-argiloso saturado
4	1823.3	8.07	6.55	9.63	650.37	Diabásio
5	205.03	2.77		16.18	643.82	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 660.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	2.61	0.67	0.00	658.00
2	1,26	3.50	0.67	659.33
3	5.69	3.35	4.17	655.83
4	4.26	6.48	7.52	652.47
5	2.72		14.00	645.99

Quadro C17 – 2003-02: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

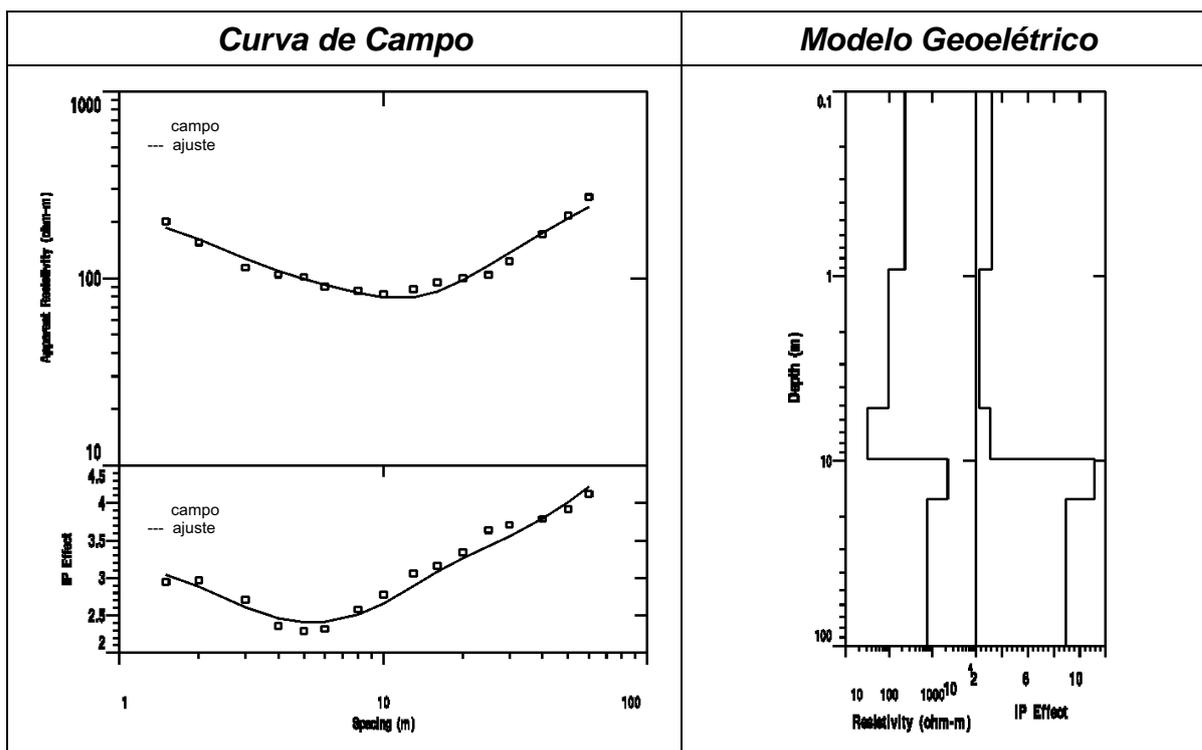


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 660.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	148.50	3.23	0.90	0.00	660.00	Solo areno-siltoso seco
2	48.86	2.89	4.00	0.90	659.10	Resíduos sólidos domiciliares
3	34.90	3.39	4.43	4.94	655.06	Solo silto-argiloso saturado
4	1978.5	4.06	6.10	9.37	650.63	Diabásio
5	148.32	1.10		15.47	644.53	Siltito

Obs.: Nível geológico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 660.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	3.22	0.93	0.00	658.00
2	2.90	4.30	0.93	659.07
3	3.43	4.18	5.23	654.77
4	4.01	6.13	9.41	650.59
5	1.09		15.53	644.46

Quadro C18 – 2003-03: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

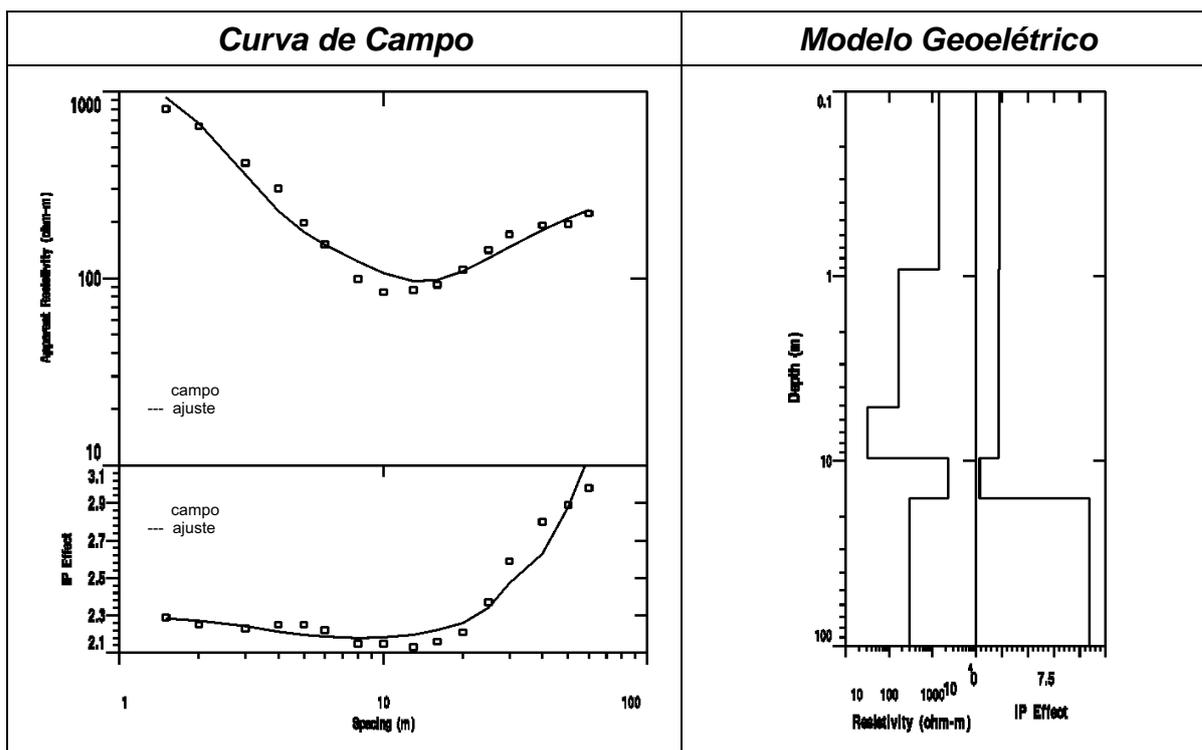


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 659.50m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	231.28	3.26	0.92	0.00	659.50	Solo areno-siltoso seco
2	95.34	2.26	4.25	0.92	658.58	Resíduos sólidos domiciliares
3	31.05	3.09	4.60	5.18	654.32	Solo silto-argiloso saturado
4	2252.7	11.14	6.28	9.78	649.72	Diabásio
5	761.69	8.95		16.05	643.44	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.50m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	3.26	0.99	0.00	658.00
2	2.11	3.85	0.99	658.51
3	3.42	4.58	4.84	654.66
4	9.86	6.81	9.42	650.08
5	7.21		16.23	643.26

Quadro C19 – 2002-01: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

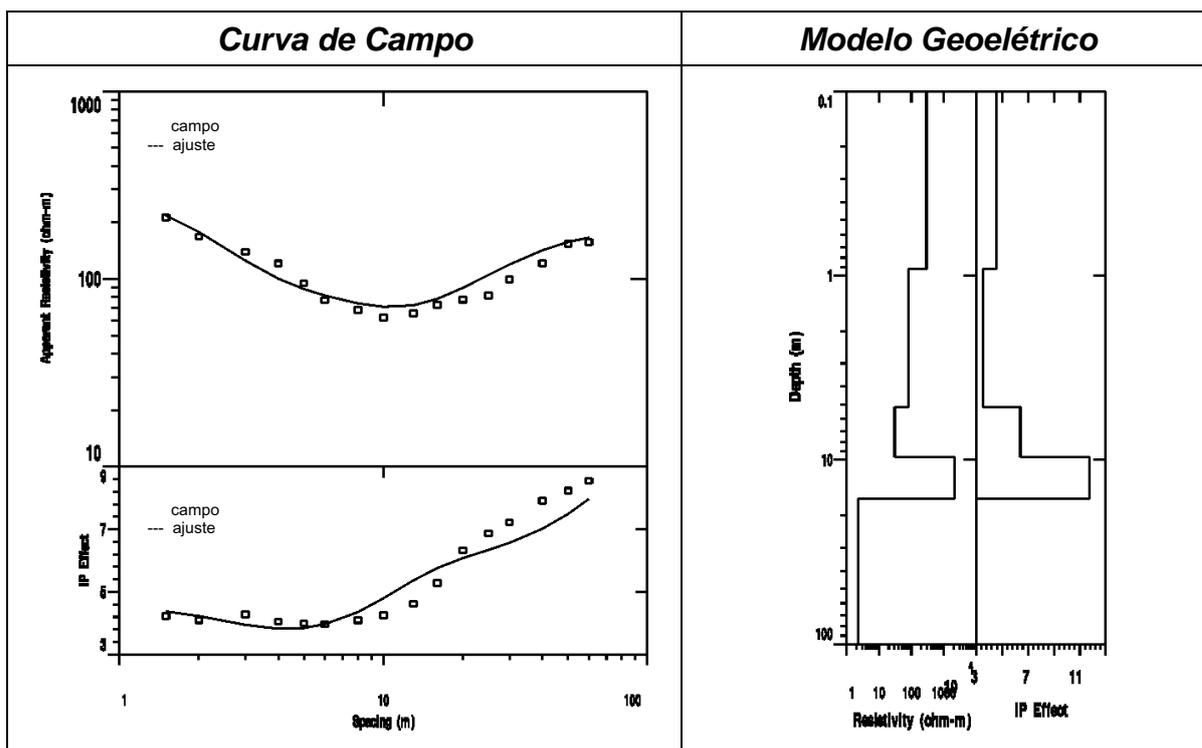


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 659.50m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	1413.2	2.29	0.92	0.00	659.50	Solo areno-siltoso seco
2	162.99	2.19	4.20	0.92	658.58	Resíduos sólidos domiciliares
3	31.05	2.16	4.51	5.13	654.37	Solo silto-argiloso saturado
4	2272.9	0.38	6.28	9.63	649.87	Diabásio
5	291.09	10.92		15.91	643.59	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.50m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	2.27	0.91	0.00	658.00
2	2.25	3.84	0.91	658.59
3	1.83	4.24	4.75	654.75
4	7.23	4.69	8.99	650.51
5	4.13		13.68	645.82

Quadro C20 – 2002-02: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

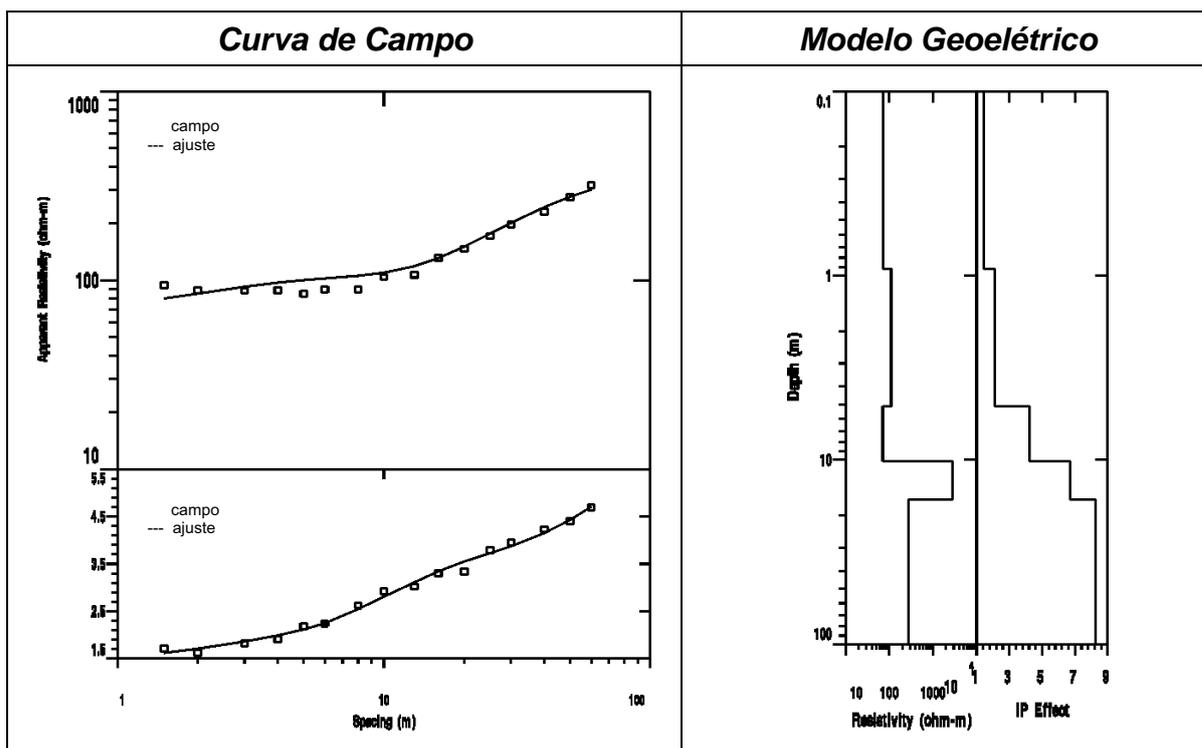


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 659.50m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	291.99	4.56	0.92	0.00	659.50	Solo areno-siltoso seco
2	81.80	3.54	4.24	0.92	658.58	Resíduos sólidos domiciliares
3	30.40	6.41	4.50	5.17	654.33	Solo silto-argiloso saturado
4	2199.9	11.75	6.52	9.66	649.84	Diabásio
5	2.2352	0.17		16.18	643.32	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.50m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	4.24	2.88	0.00	658.00
2	3.00	7.73	2.88	656.62
3	13.73	1.96	10.61	648.89
4	11.03	3.15	12.57	646.93
5	3.71		15.72	643.78

Quadro C21 – 2002-03: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

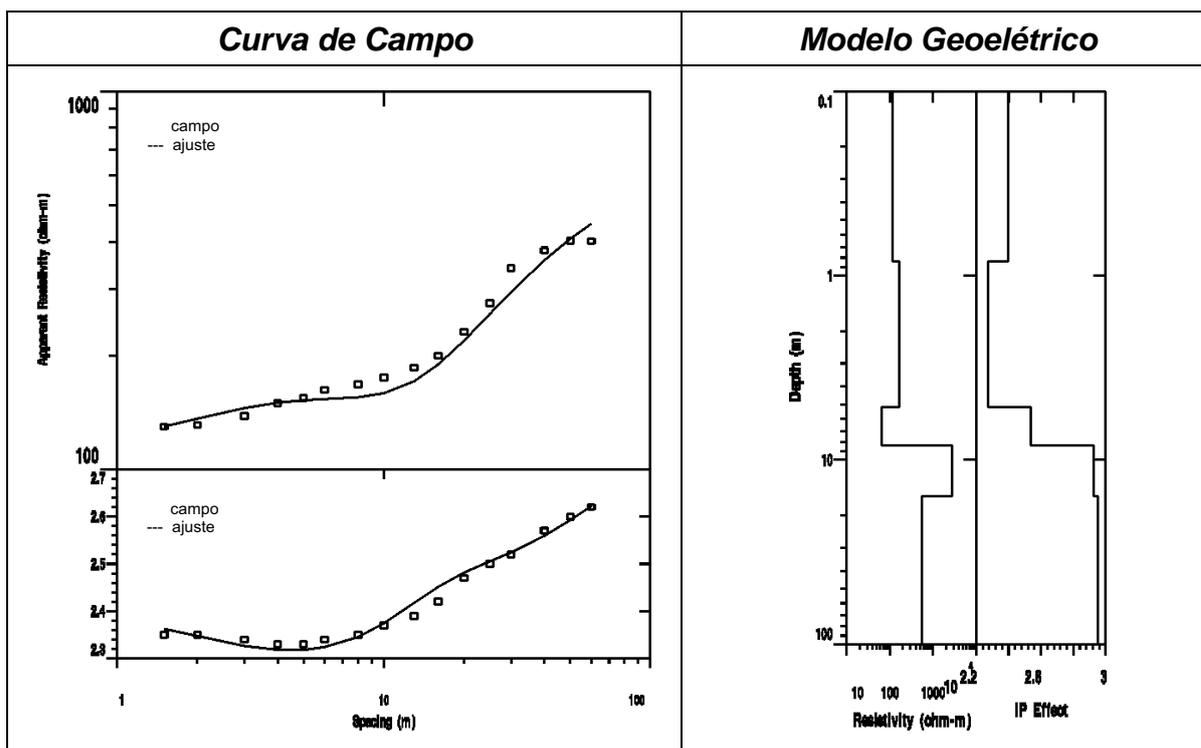


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 659.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	72.22	2.09	0.92	0.00	659.00	Solo areno-siltoso seco
2	110.66	1.58	4.18	0.92	658.08	Resíduos sólidos domiciliares
3	70.80	5.92	5.10	5.11	653.89	Solo silto-argiloso saturado
4	2849.0	9.20	6.28	10.20	648.80	Diabásio
5	1947.1	9.16		16.48	642.52	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	1.64	1.54	0.00	658.00
2	1.79	2.24	1.54	657.46
3	3.95	6.54	3.79	655.21
4	14.17	5.42	10.33	648.67
5	10.61		15.75	643.25

Quadro C22 – 2001-01: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

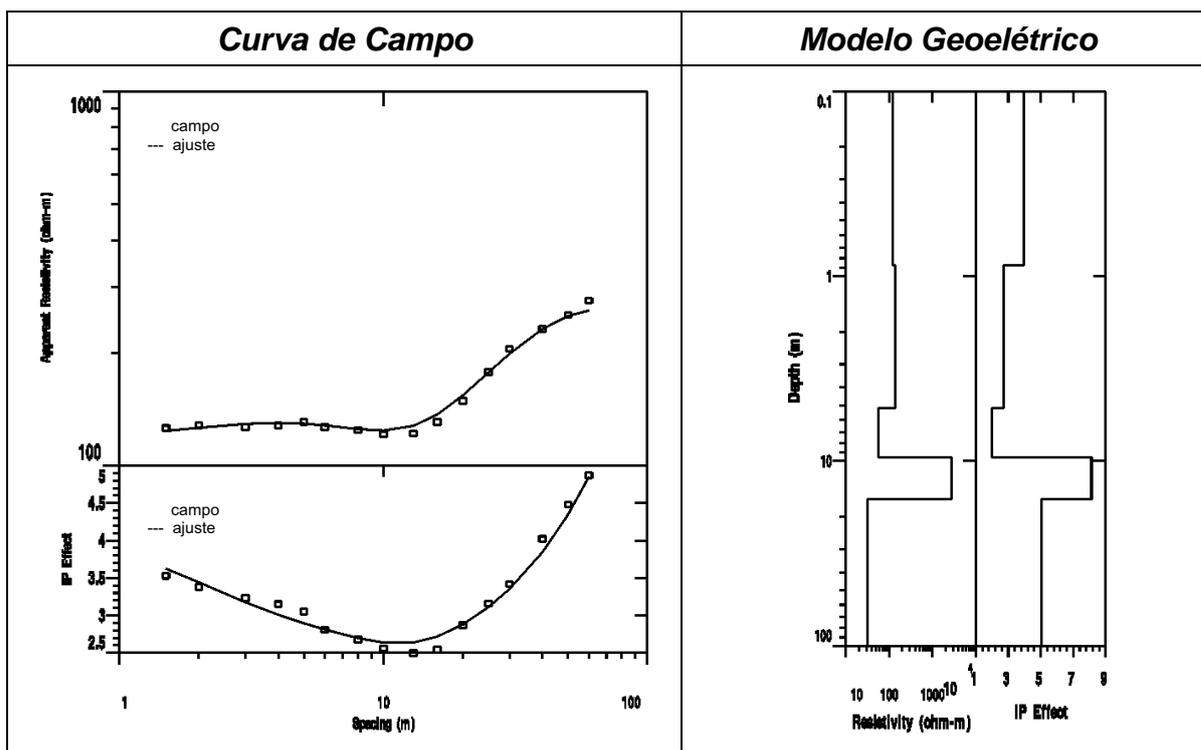


Resistividade e Cargabilidade				Cota: 659.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	117.60	2.39	0.84	0.00	659.00	Solo areno-siltoso seco
2	165.89	2.27	4.32	0.84	658.16	Resíduos sólidos domiciliares
3	65.28	2.54	3.19	5.16	653.84	Solo silto-argiloso saturado
4	2794.1	2.93	7.42	8.35	650.65	Diabásio
5	459.52	2.85		15.77	643.23	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	2.37	0.85	0.00	658.00
2	2.30	4.41	0.85	658.15
3	2.46	3.1	5.25	653.75
4	3.15	7.53	8.44	650.56
5	2.81		15.97	643.03

Quadro C23 – 2001-02: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).



Resistividade e Cargabilidade				Cota: 659.00m		
Nível	Resistividade (ohm.m)	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	119.01	3.97	0.87	0.00	659.00	Solo areno-siltoso seco
2	137.98	2.71	4.30	0.87	658.13	Resíduos sólidos domiciliares
3	56.67	2.00	4.41	5.17	653.83	Solo silto-argiloso saturado
4	2729.0	8.12	6.57	9.58	649.42	Diabásio
5	31.046	5.06		16.15	642.85	Siltito

Obs.: Nível geolétrico descrito em termos de predominância do material geológico/antropogênico.

Somente cargabilidade		Cota: 659.00m		
Nível	Polarização Induzida (msec)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)
1	3.65	1.02	0.00	658.00
2	2.98	2.47	1.02	657.98
3	1.81	4.68	3.49	655.51
4	8.07	6.32	8.17	650.83
5	4.42		14.49	644.51

Quadro C24 – 2001-03: Curva de campo, modelo, interpretação da resistividade e cargabilidade conjunta (acima) e interpretação somente da cargabilidade (abaixo).

APÊNDICE D

CAMINHAMENTO ELÉTRICO SOBRE AS VALAS

PSEUDO-SEÇÕES

SEÇÕES CALCULADAS

MODELO DE INVERSÃO

- RESISTIVIDADE -

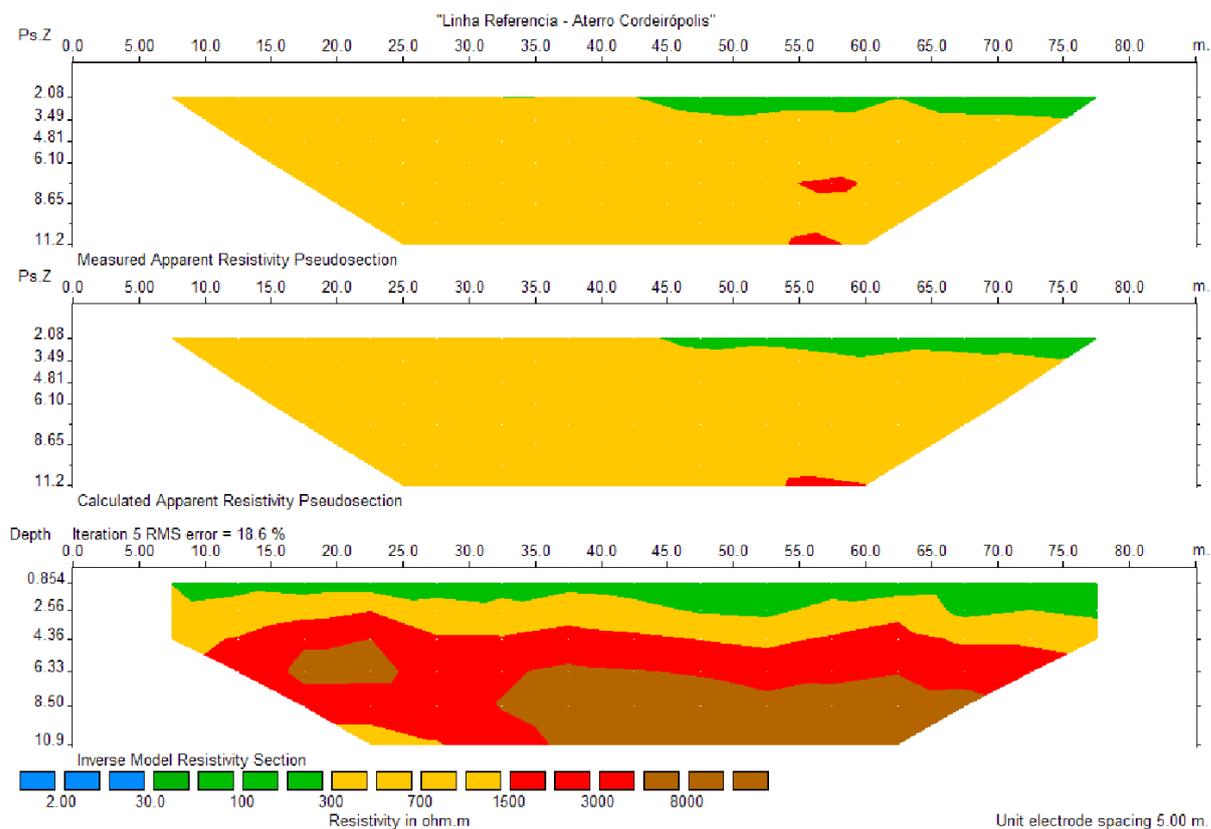


Figura D1 – Linha referencia - resistividade

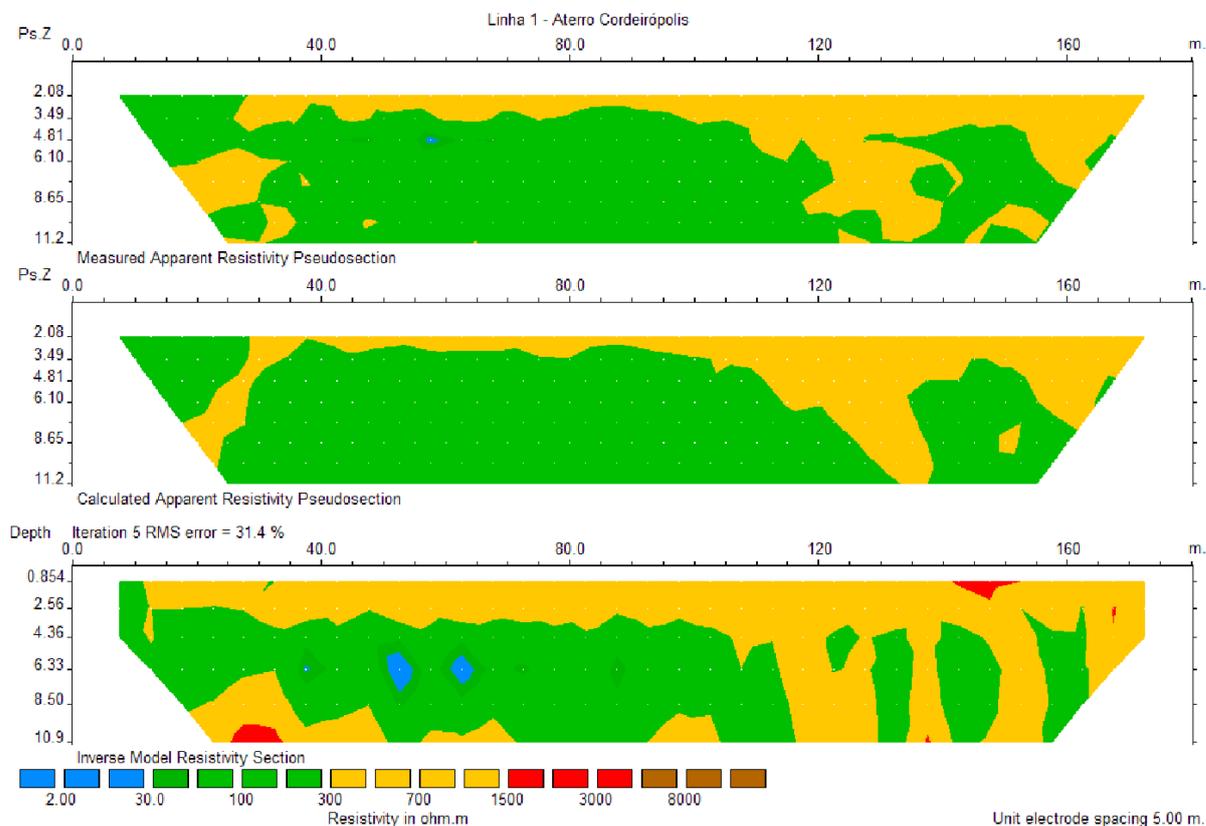


Figura D2 – Linha 1 - resistividade

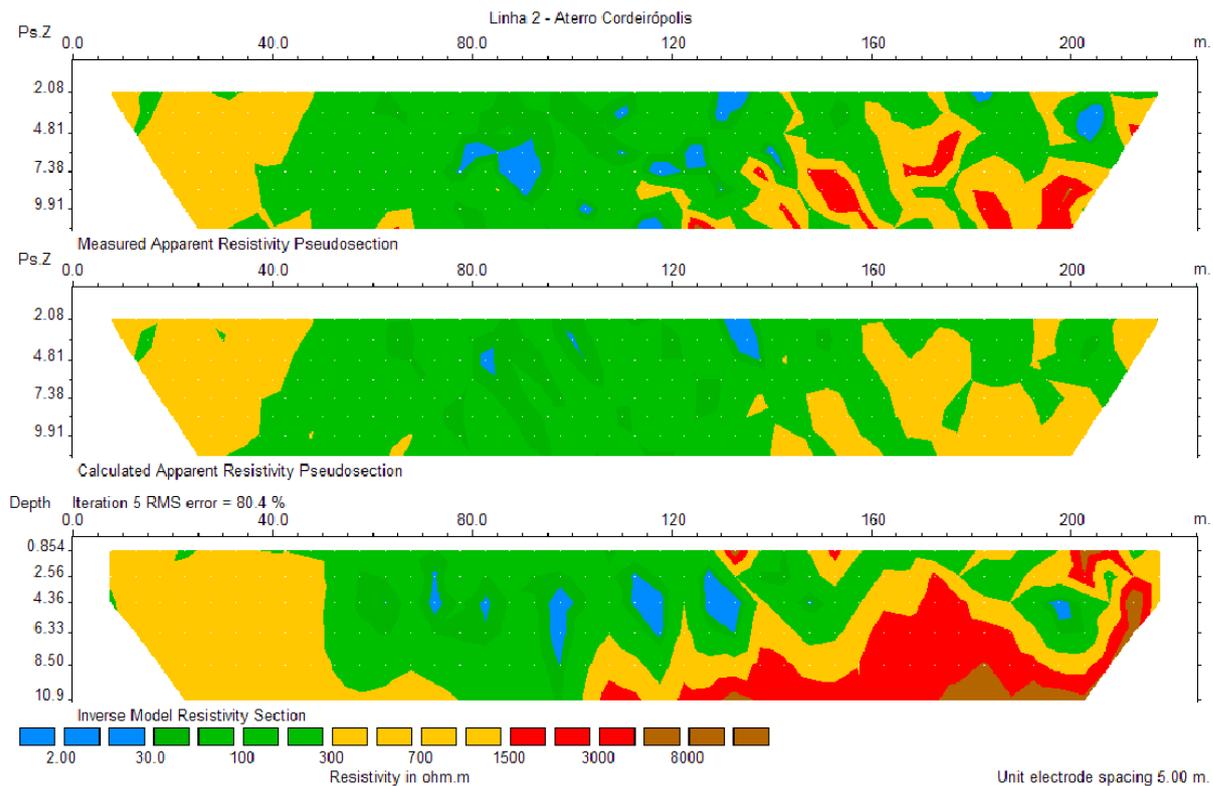


Figura D3 – Linha 2 - resistividade

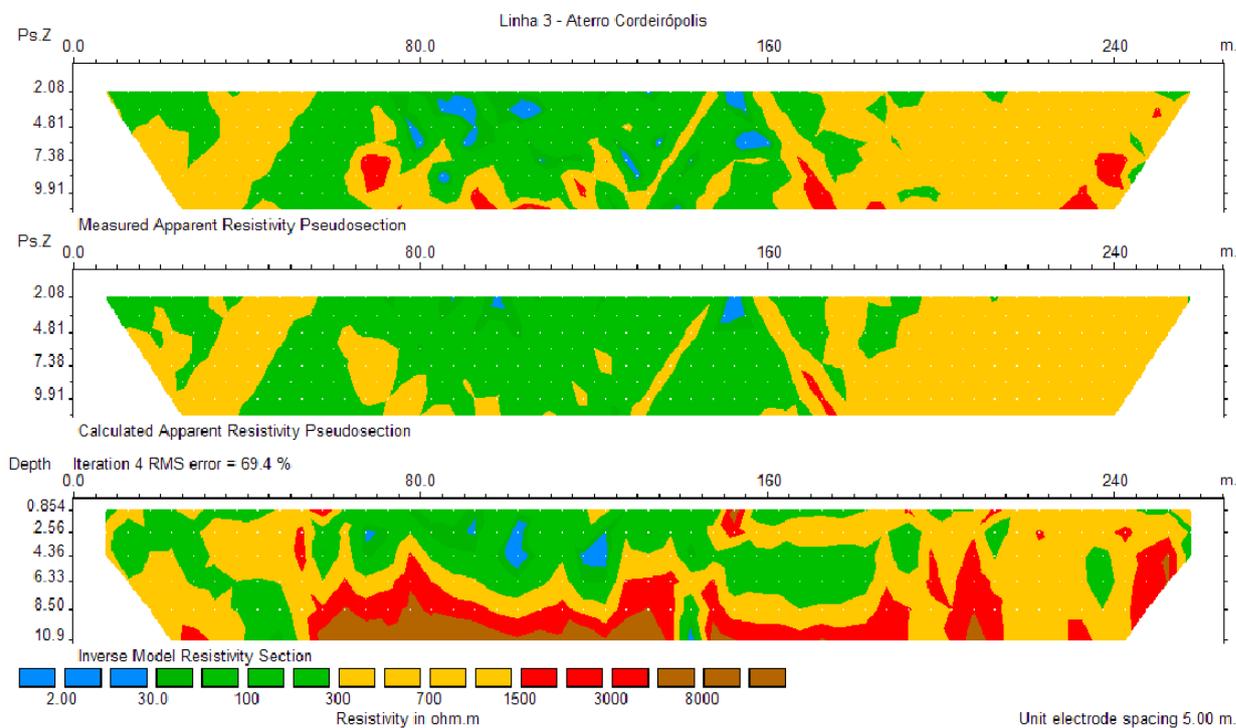


Figura D4 – Linha 3 - resistividade

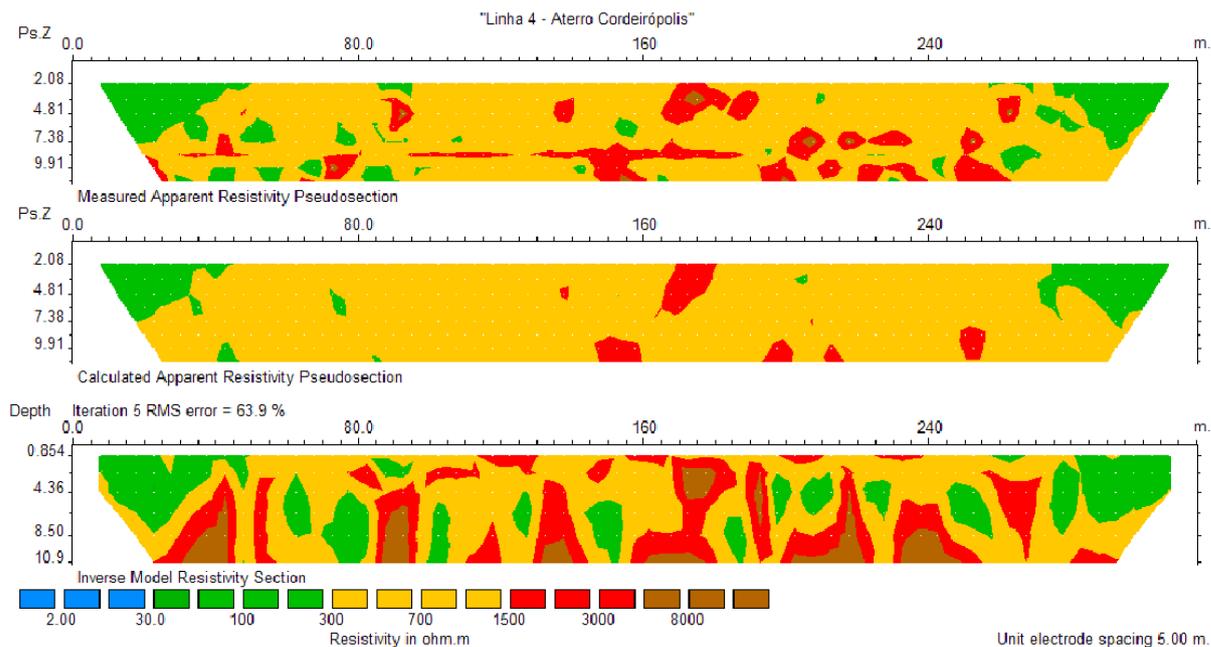


Figura D5 – Linha 4 - resistividade

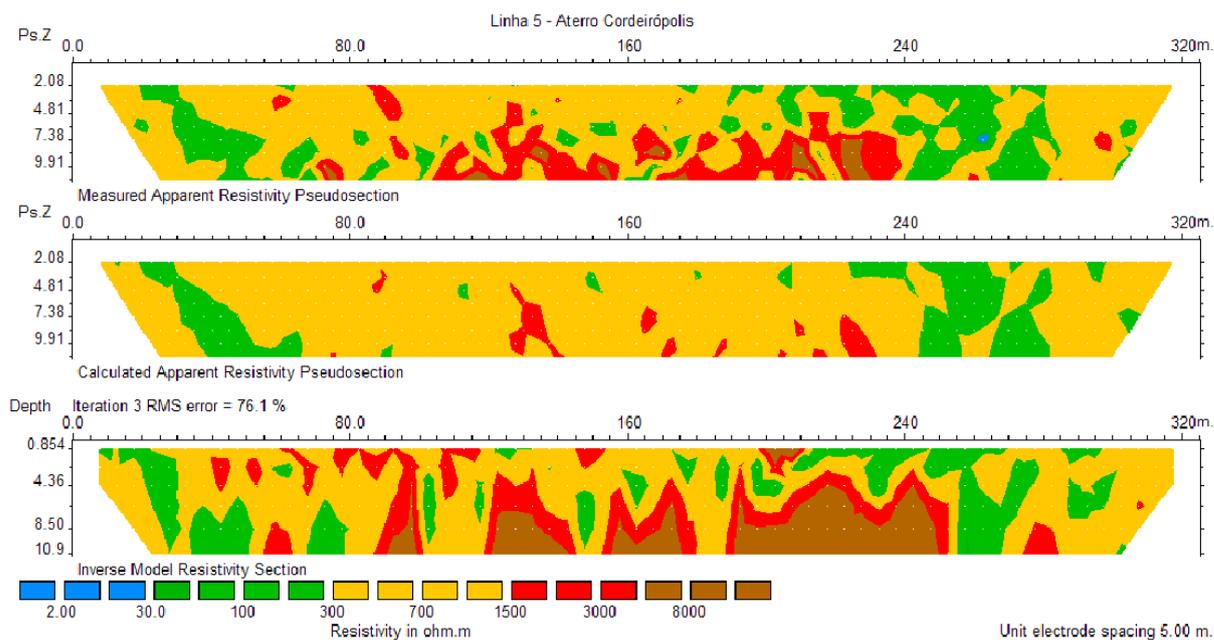


Figura D6 – Linha 5 - resistividade

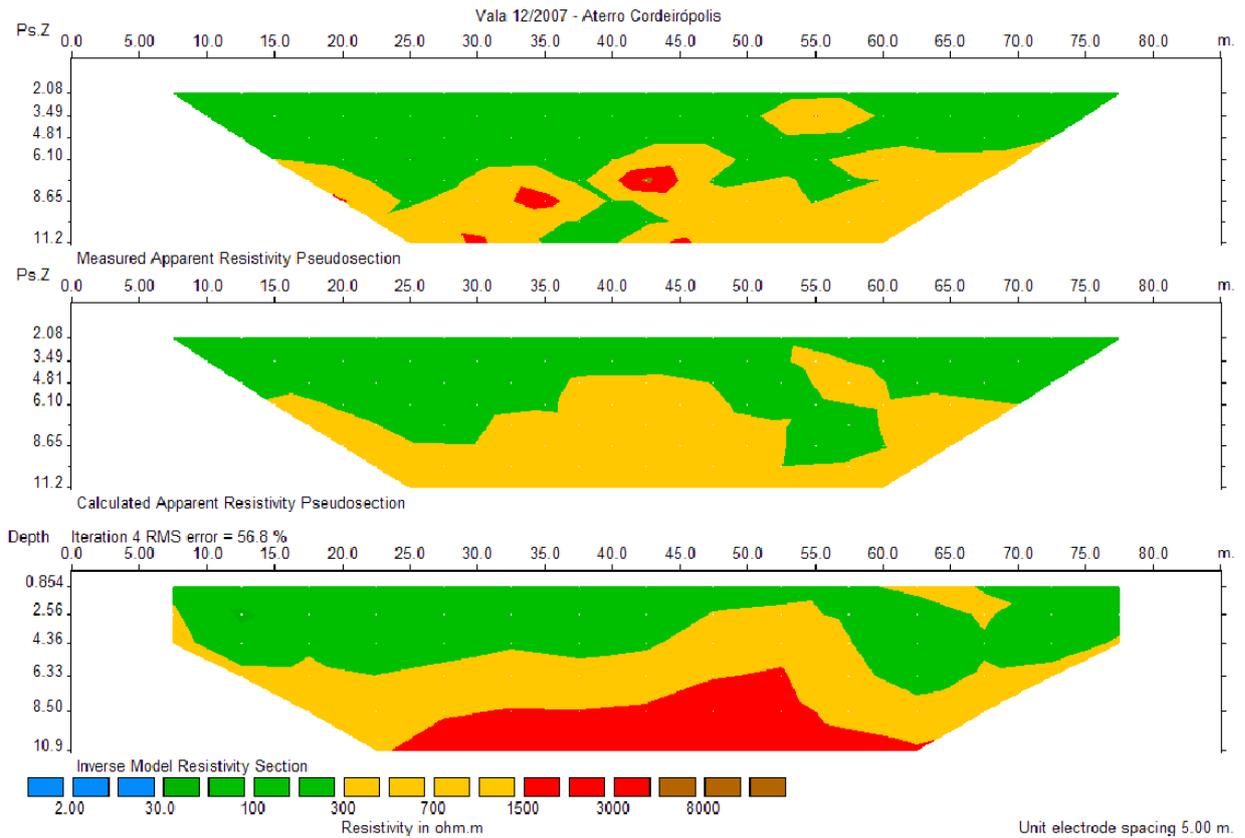


Figura D7 – Linha 2007 - resistividade

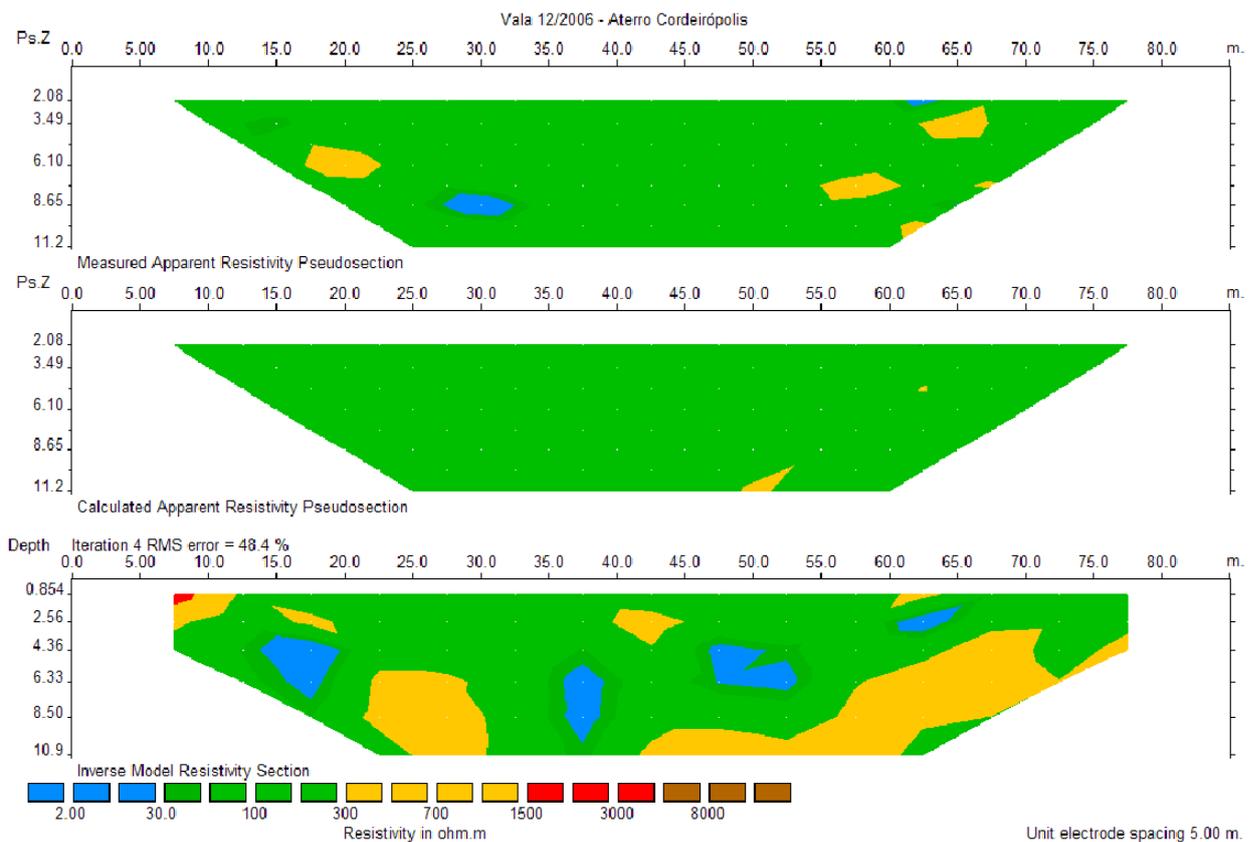


Figura D8 – Linha 2006 - resistividade

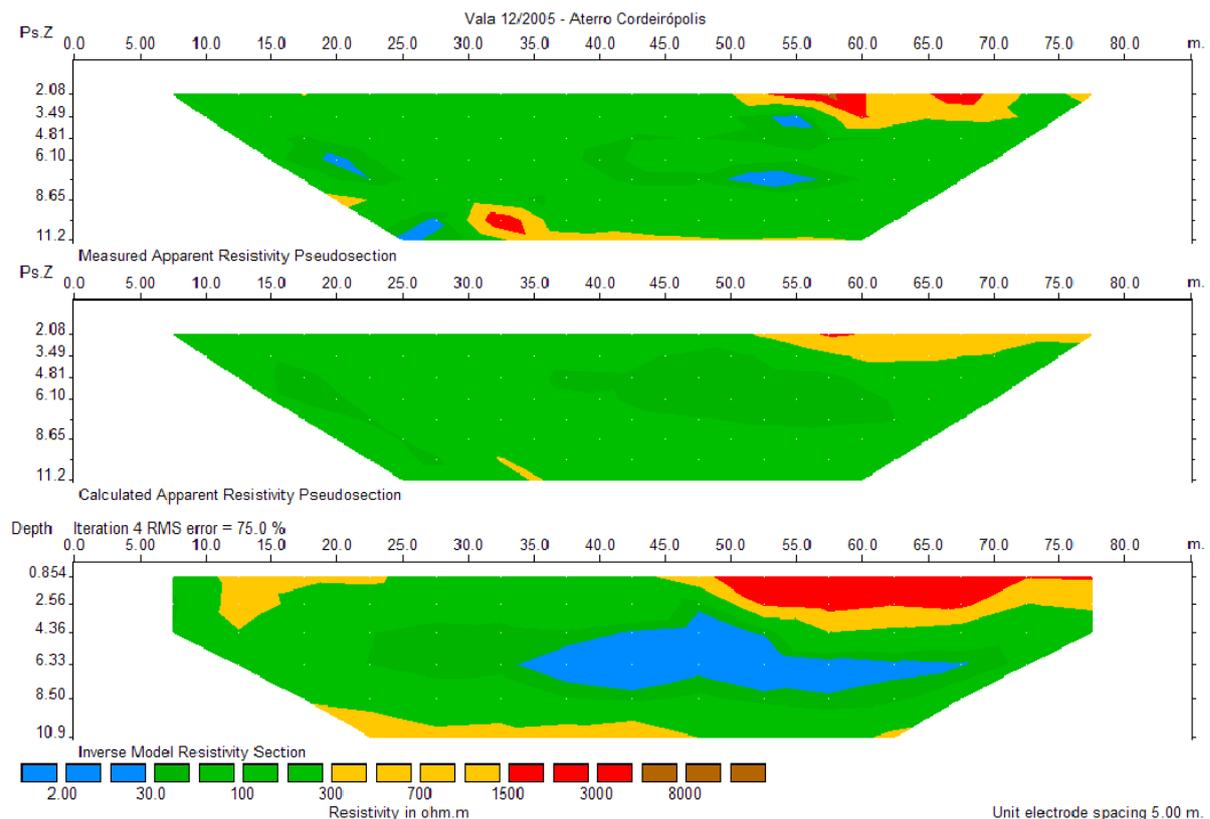


Figura D9 – Linha 2005 - resistividade

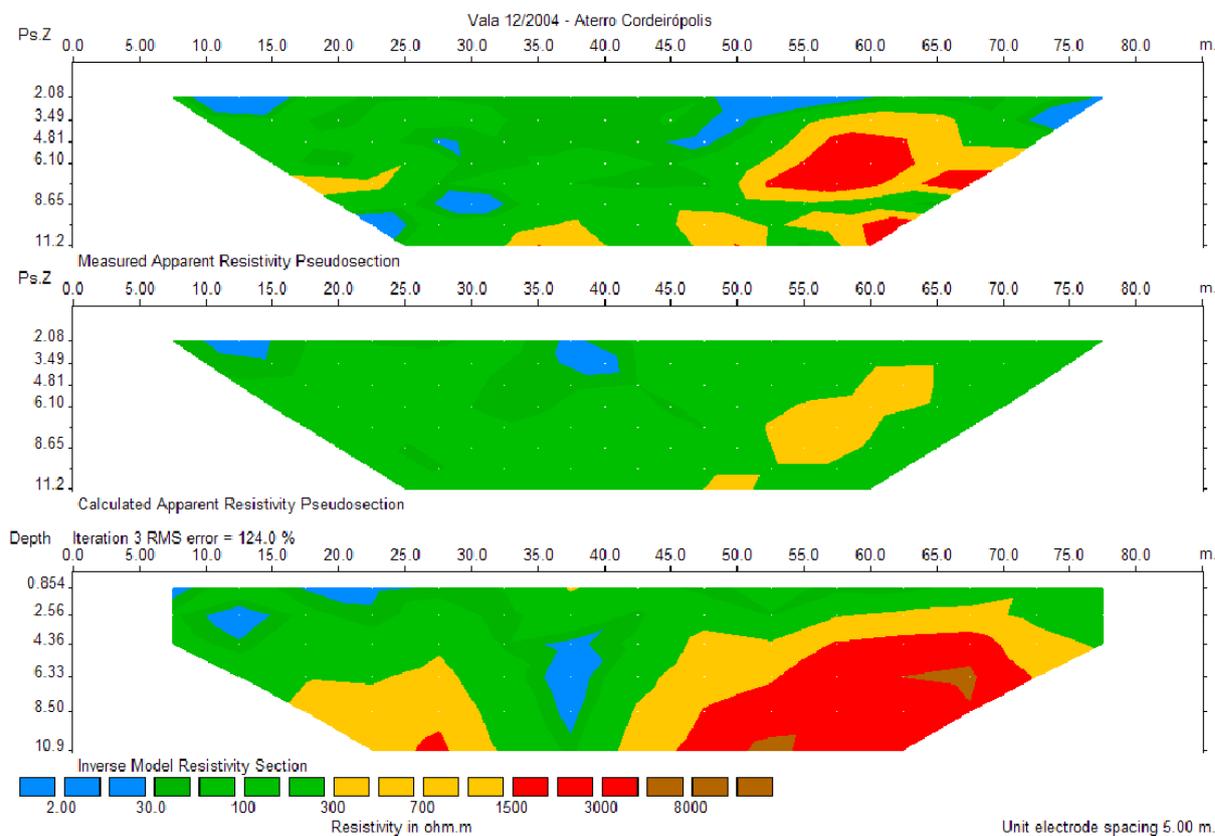


Figura D10 – Linha 2004 - resistividade

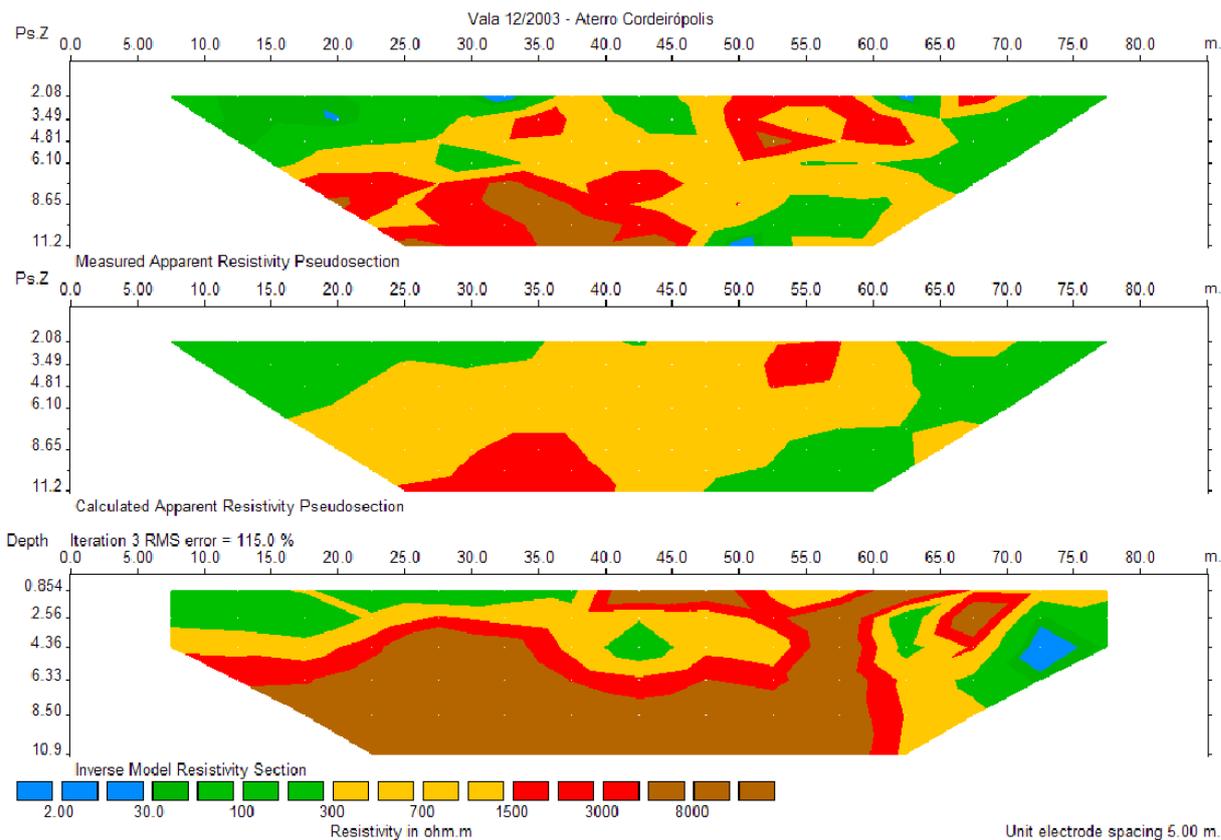


Figura D11 – Linha 2003 - resistividade

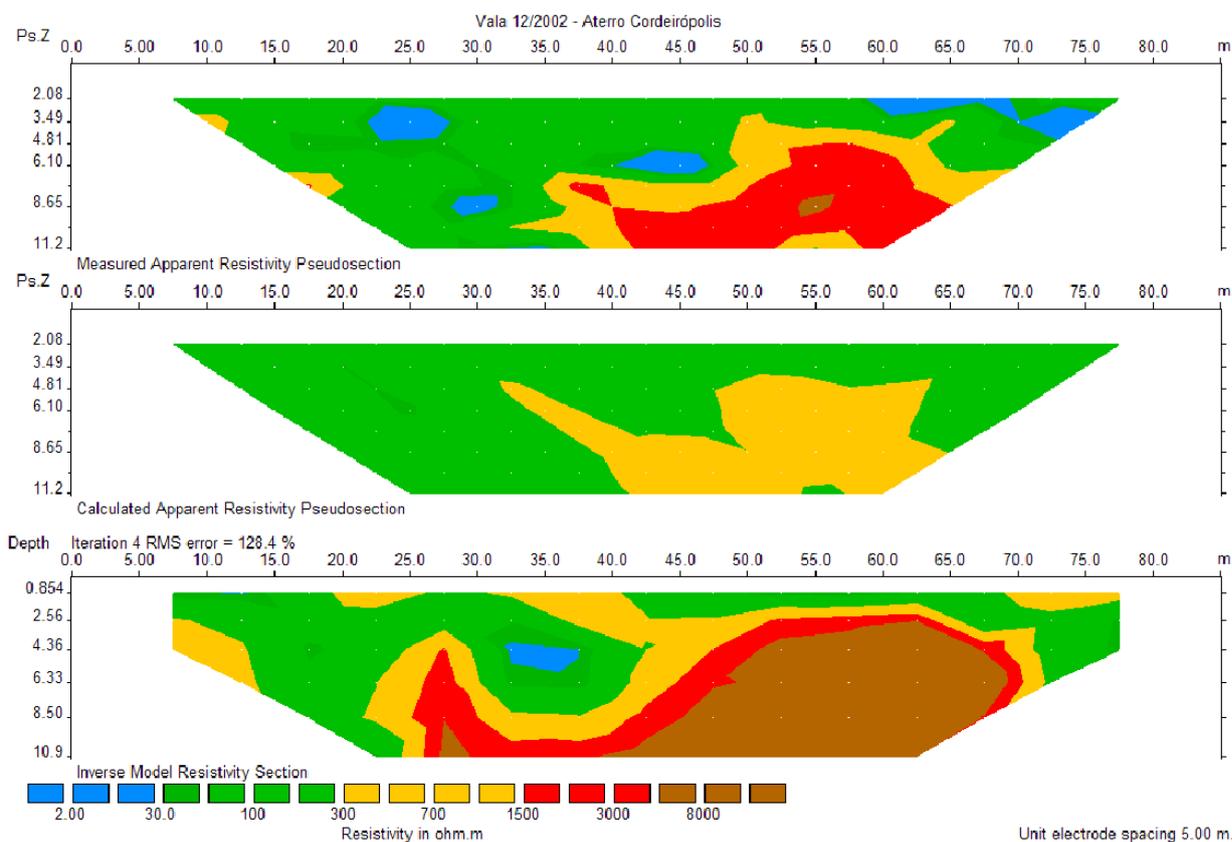


Figura D12 – Linha 2002 - resistividade

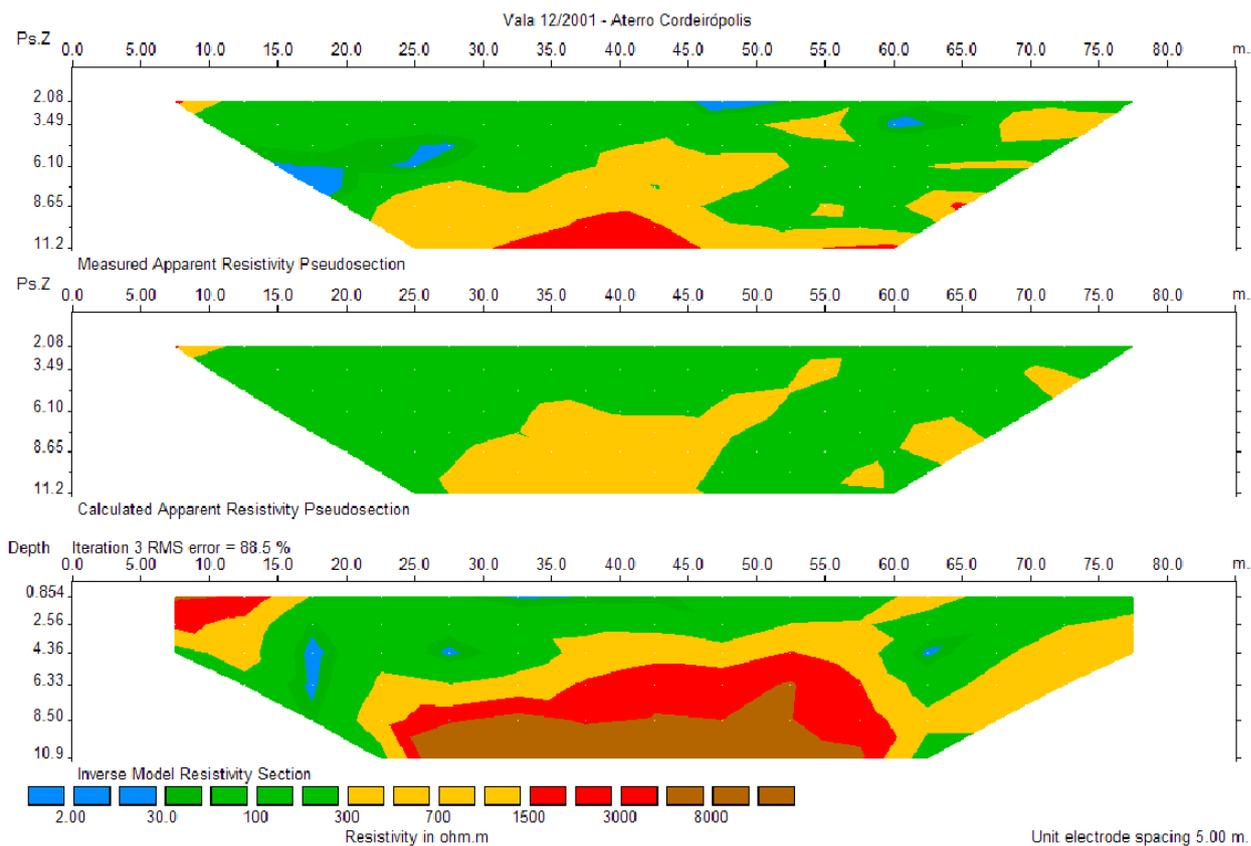


Figura D13 – Linha 2001 - resistividade

APÊNDICE E

CAMINHAMENTO ELÉTRICO SOBRE AS VALAS

PSEUDO-SEÇÕES

SEÇÕES CALCULADAS

MODELO DE INVERSÃO

- CARGABILIDADE -

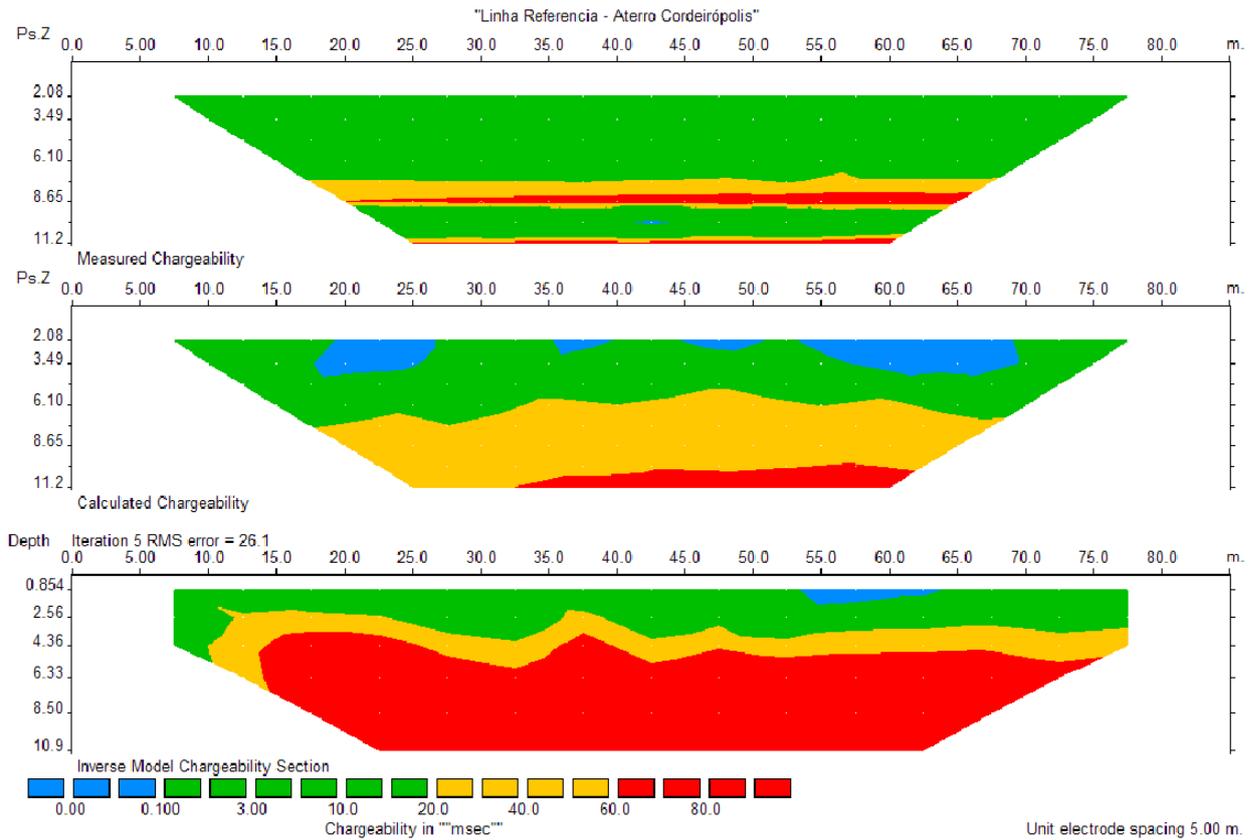


Figura E1 – Linha referencia - cargabilidade

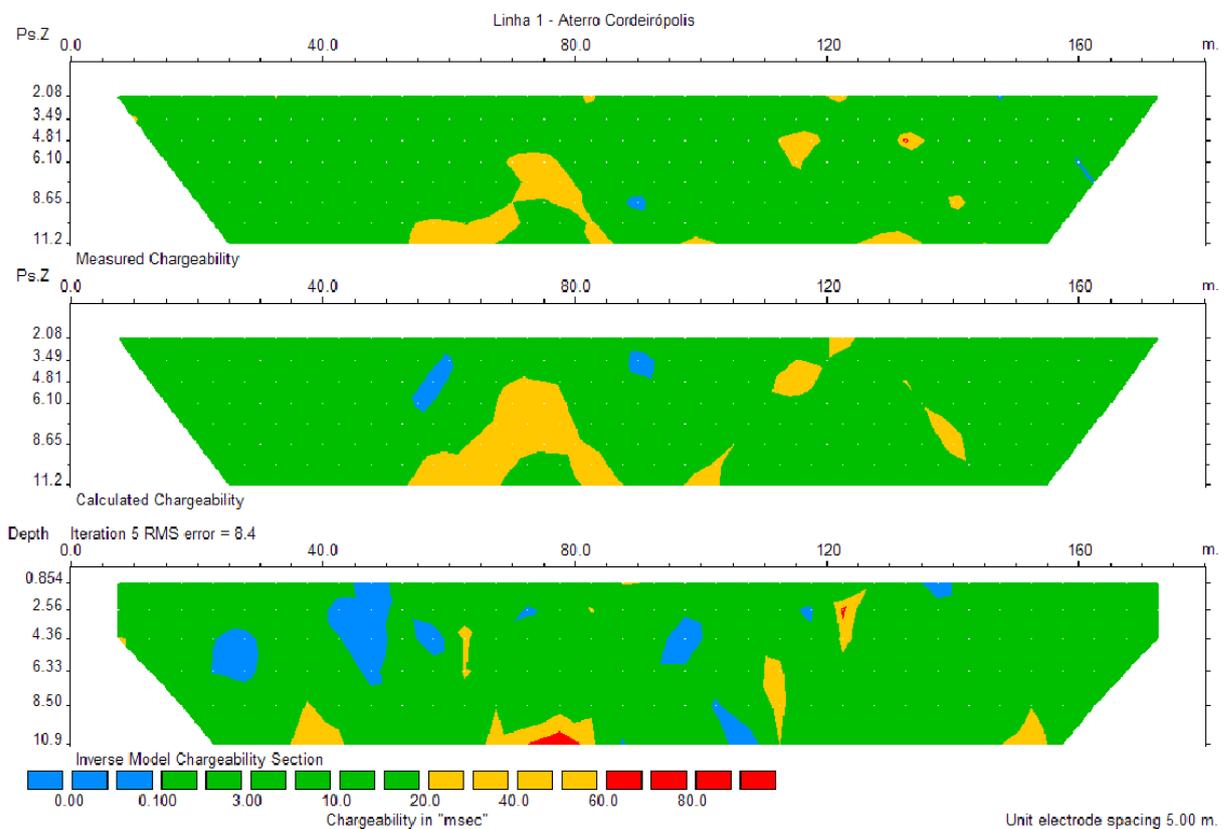


Figura E2 – Linha 1 - cargabilidade

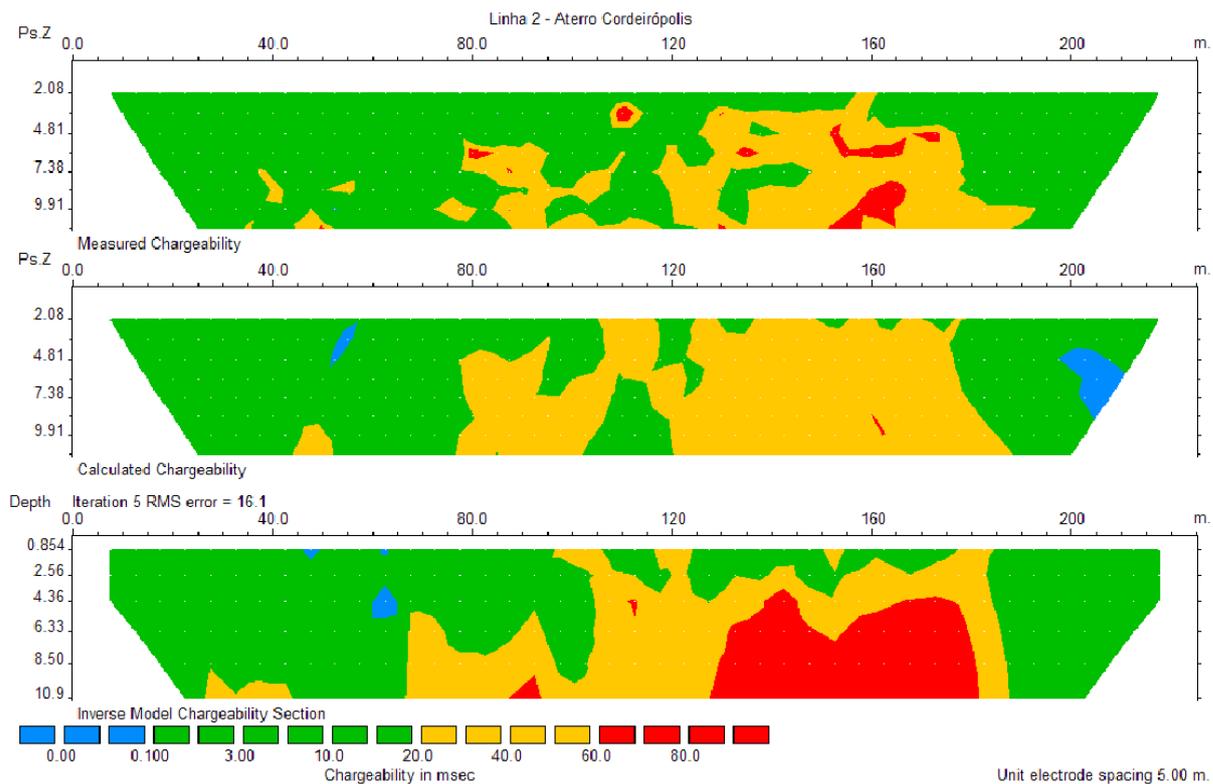


Figura E3 – Linha 2 - cargabilidade

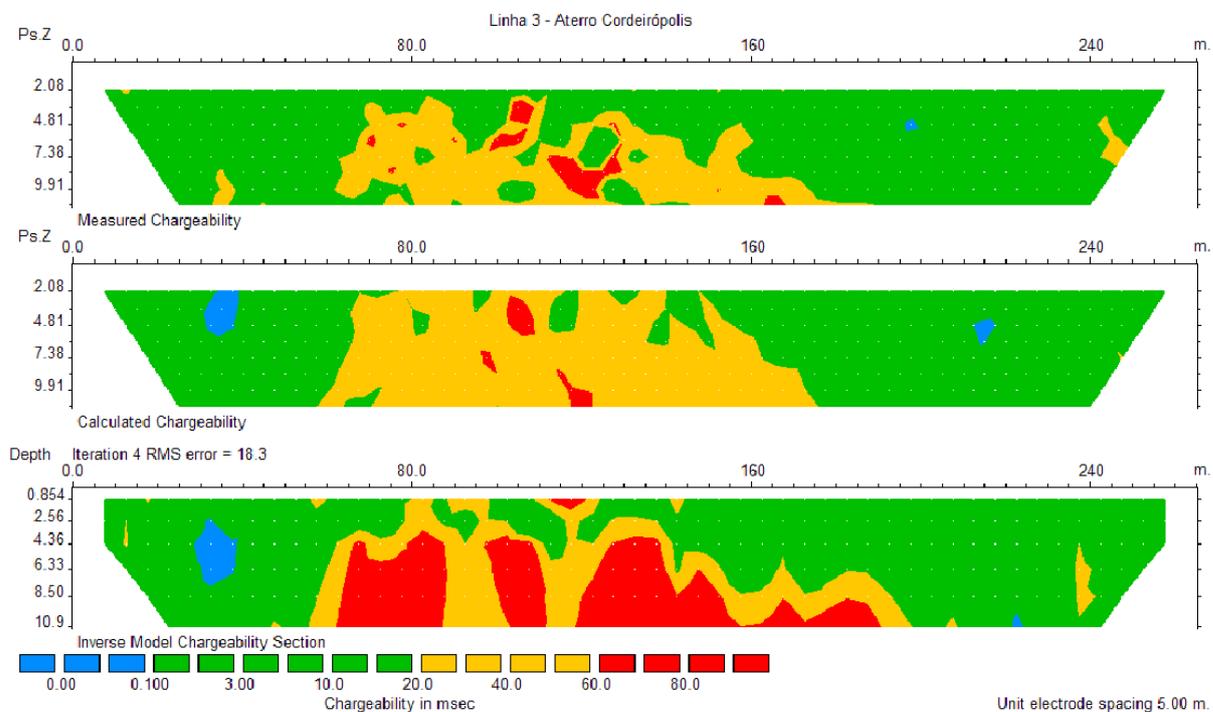


Figura E4 – Linha 3 - cargabilidade

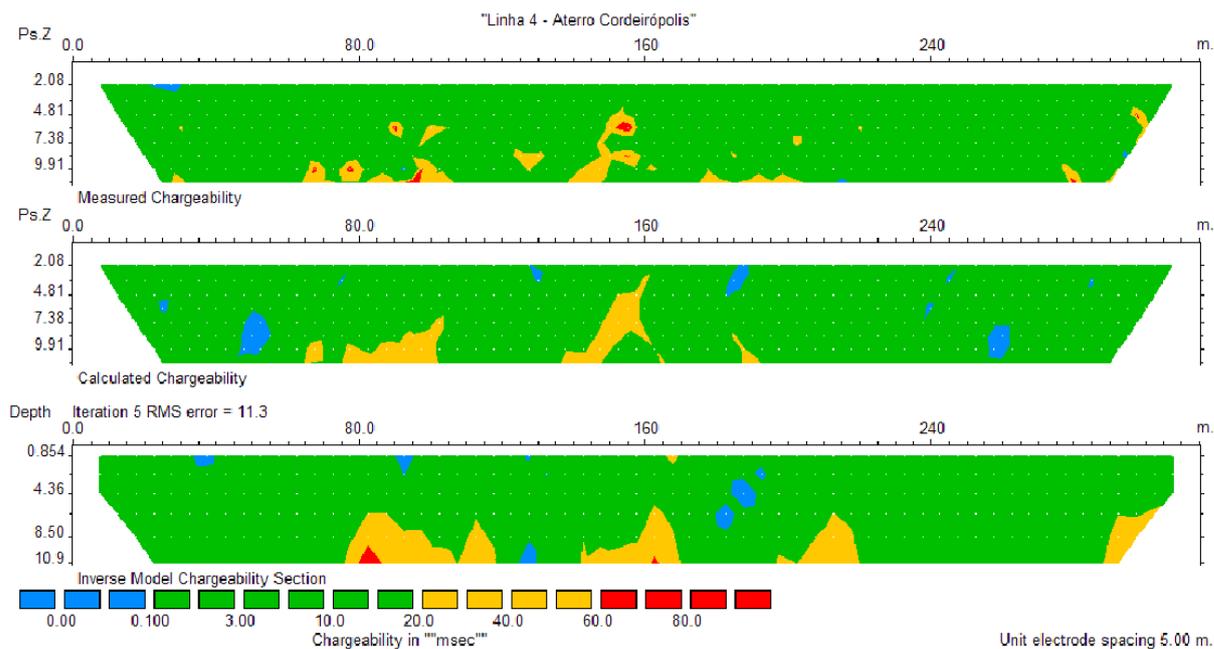


Figura E5 – Linha 4 - cargabilidade

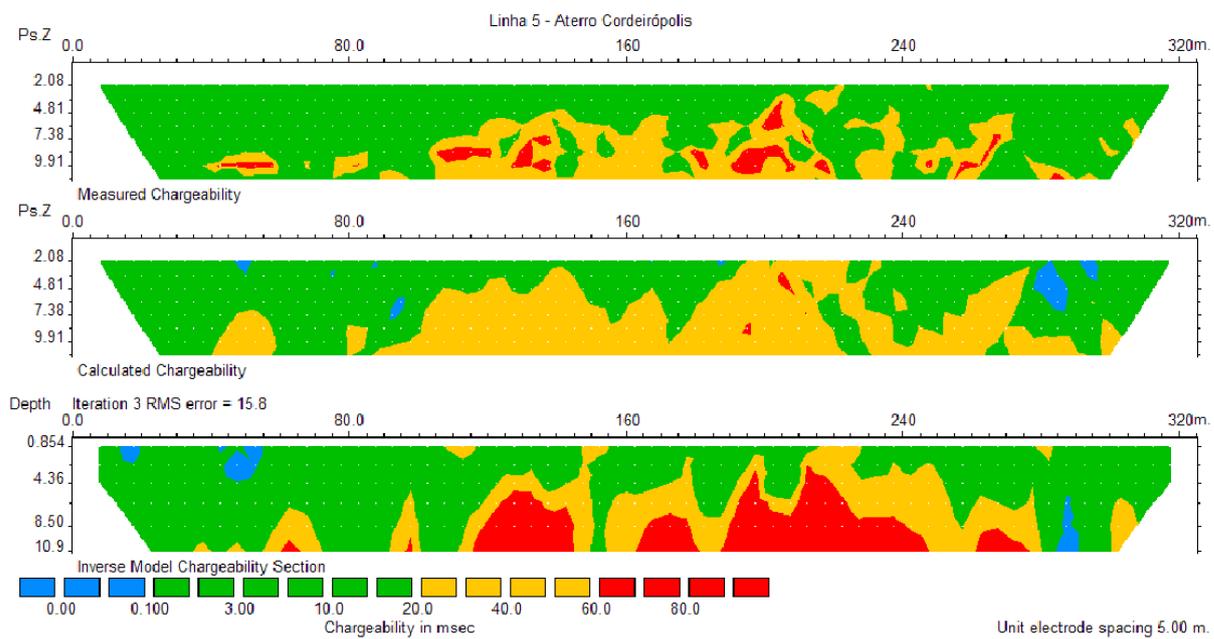


Figura E6 – Linha 5 - cargabilidade

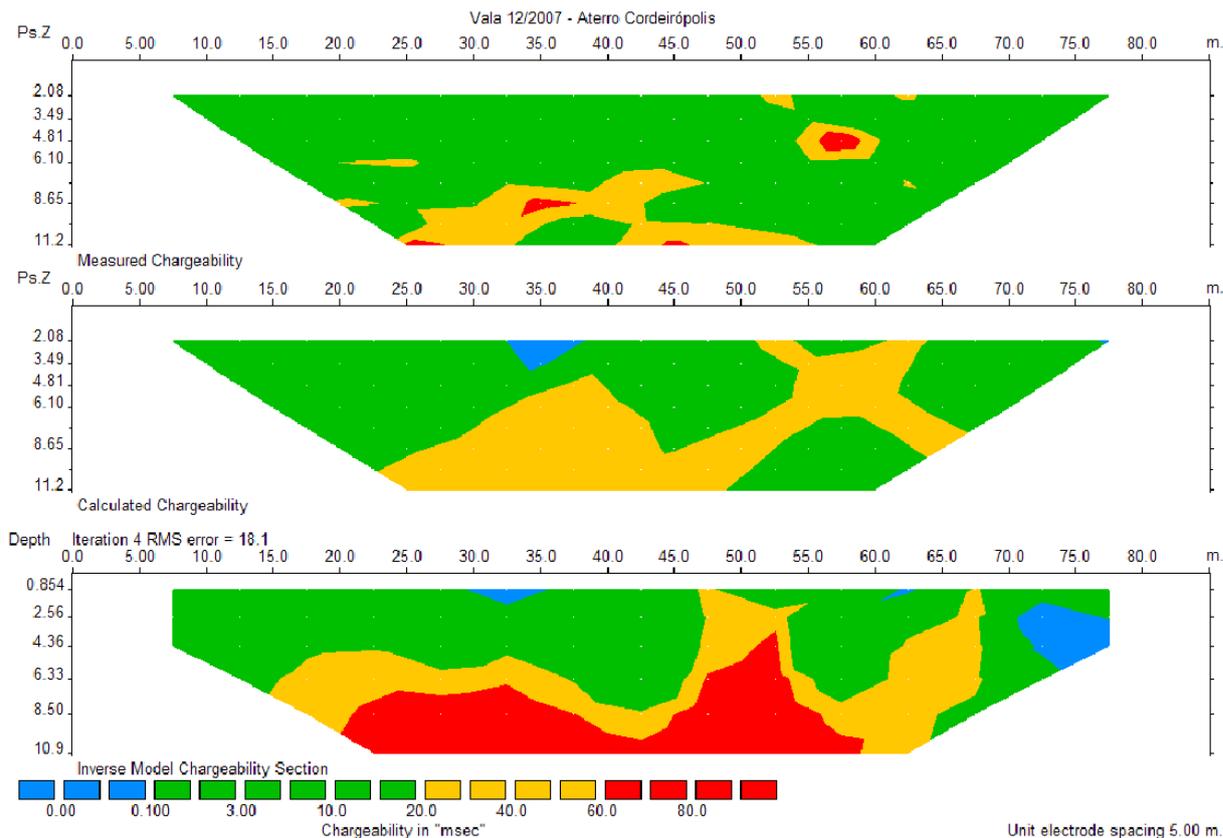


Figura E7 – Linha 2007 - cargabilidade

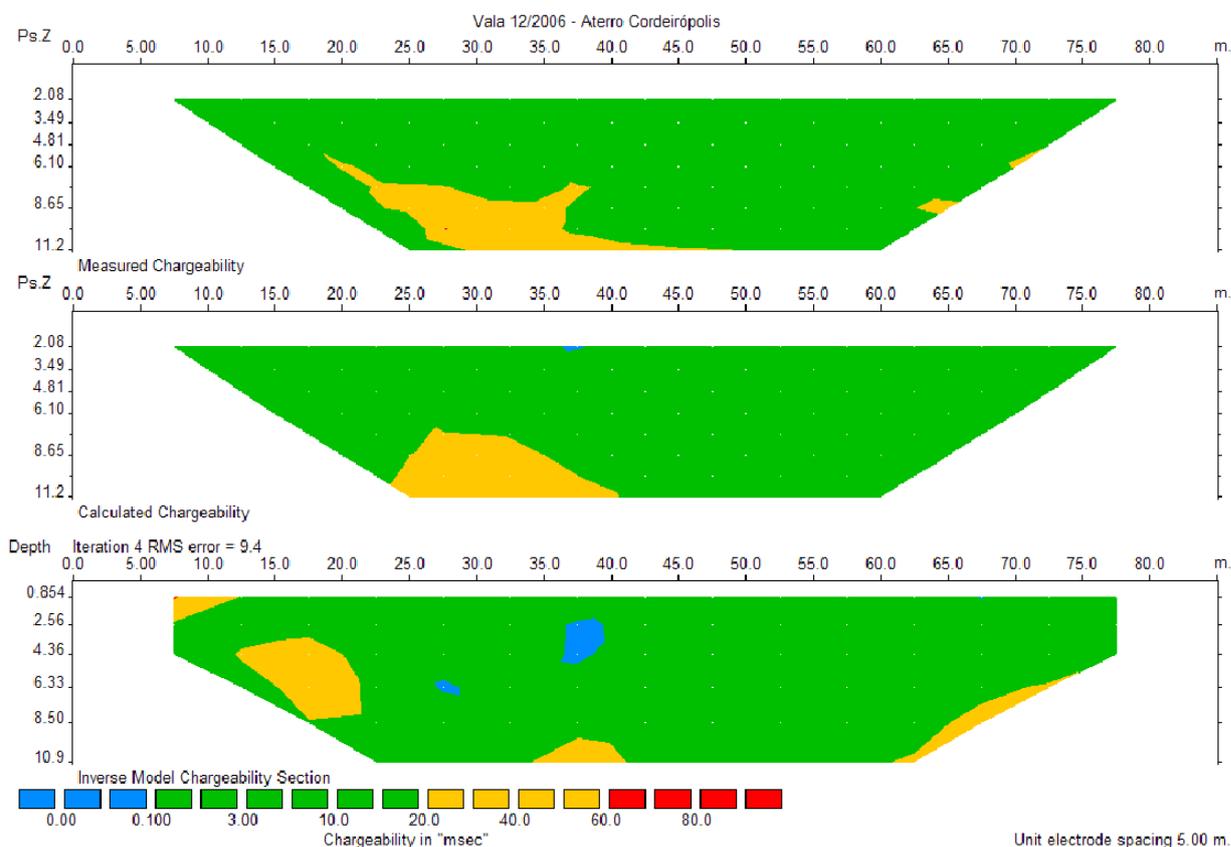


Figura E8 – Linha 2006 - cargabilidade

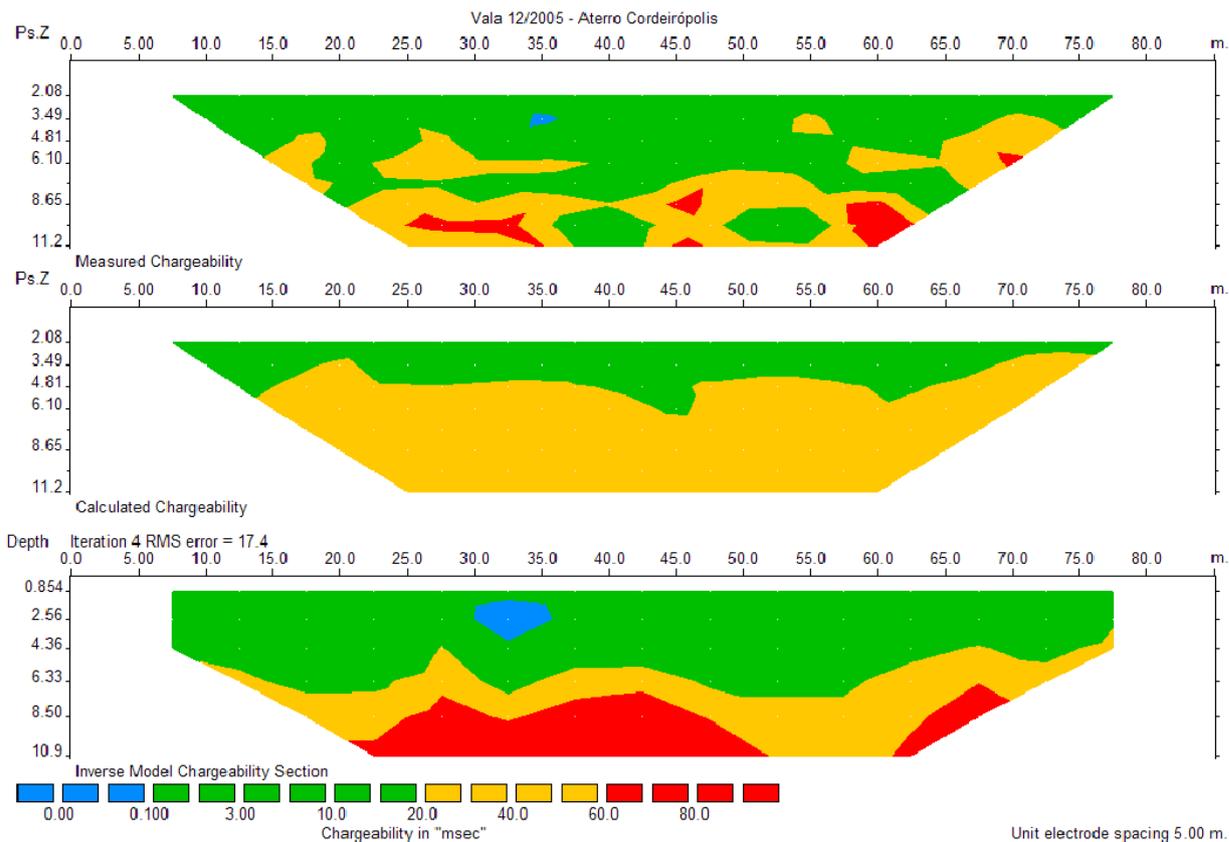


Figura E9 – Linha 2005 - cargabilidade

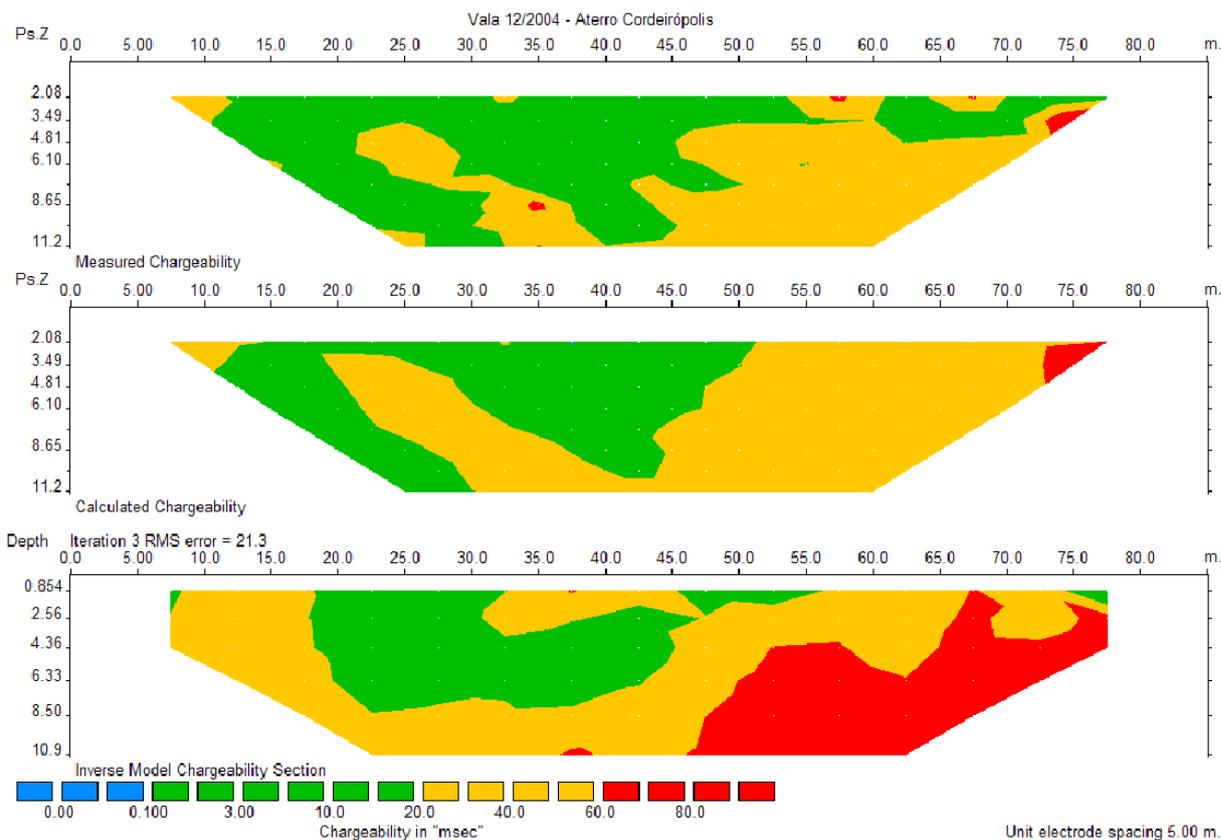


Figura E10 – Linha 2004 - cargabilidade

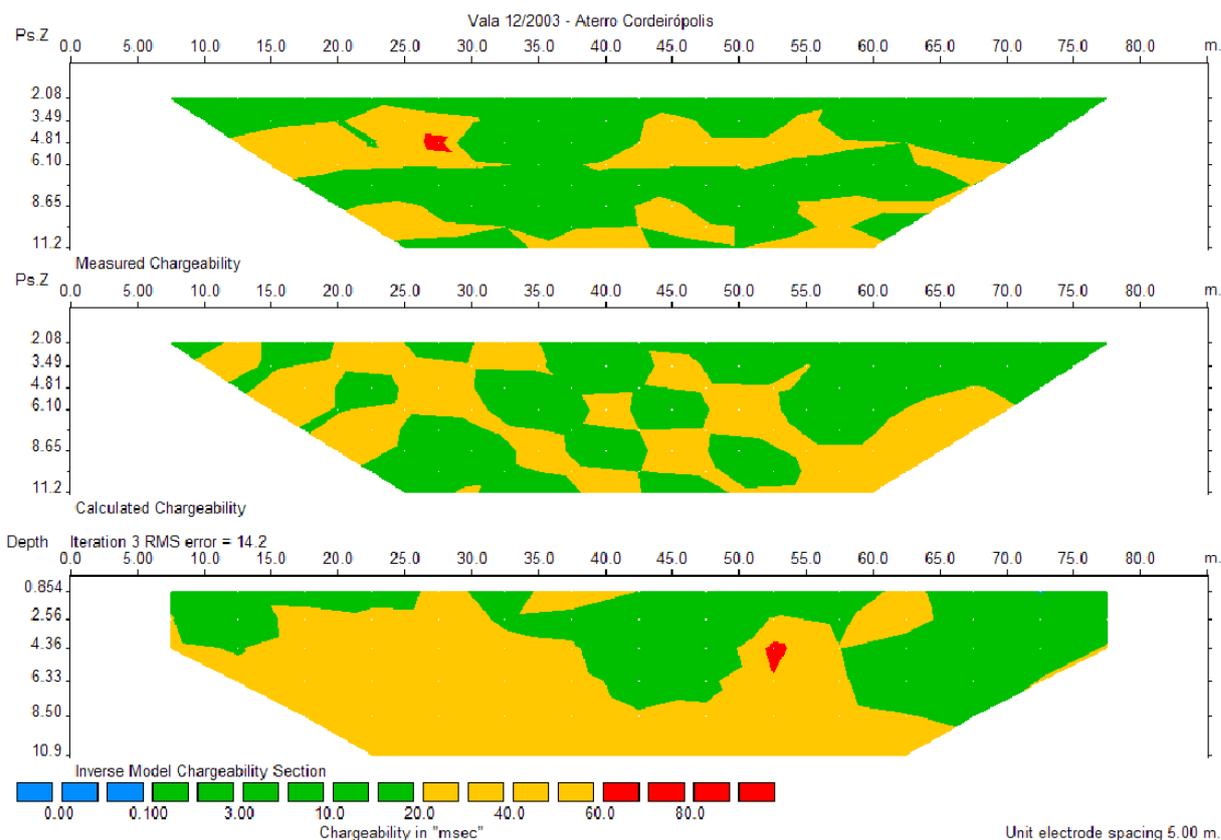


Figura E11 – Linha 2003 - cargabilidade

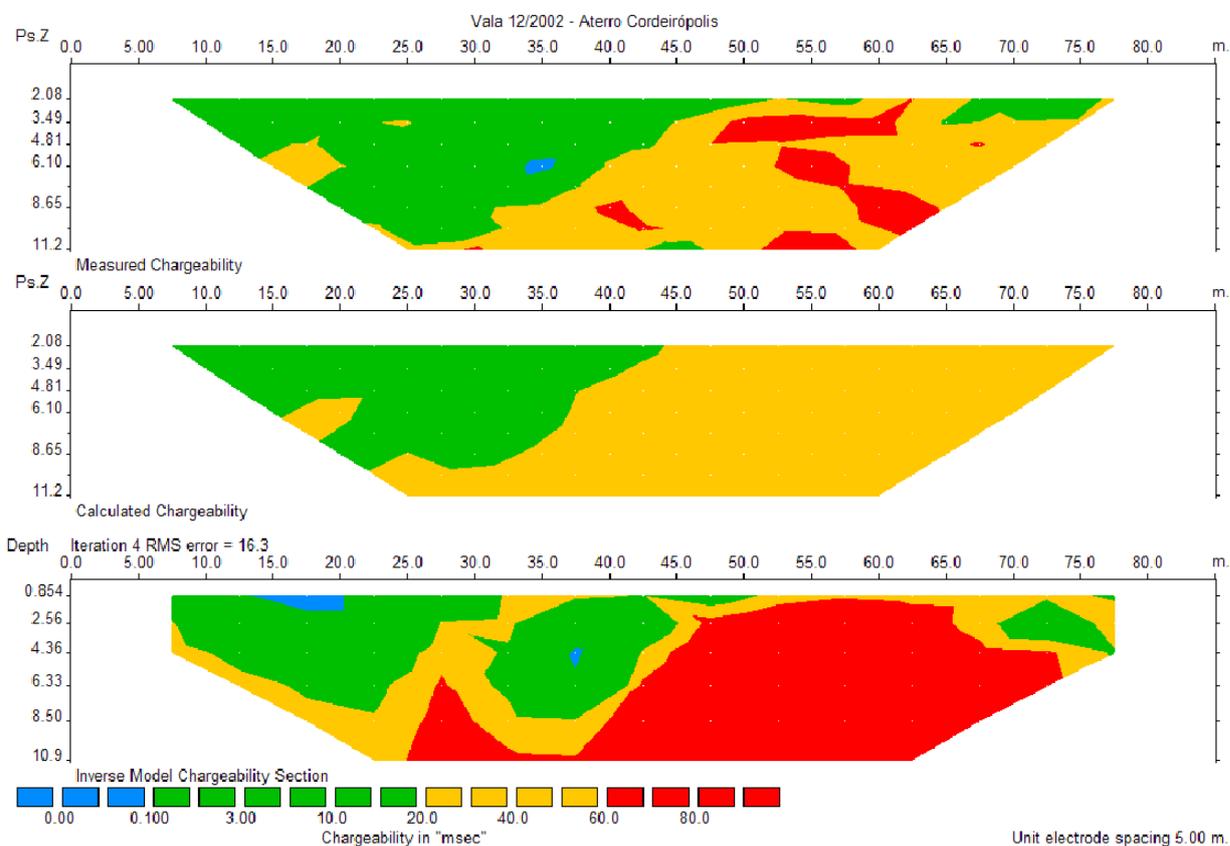


Figura E12 – Linha 2002 - cargabilidade

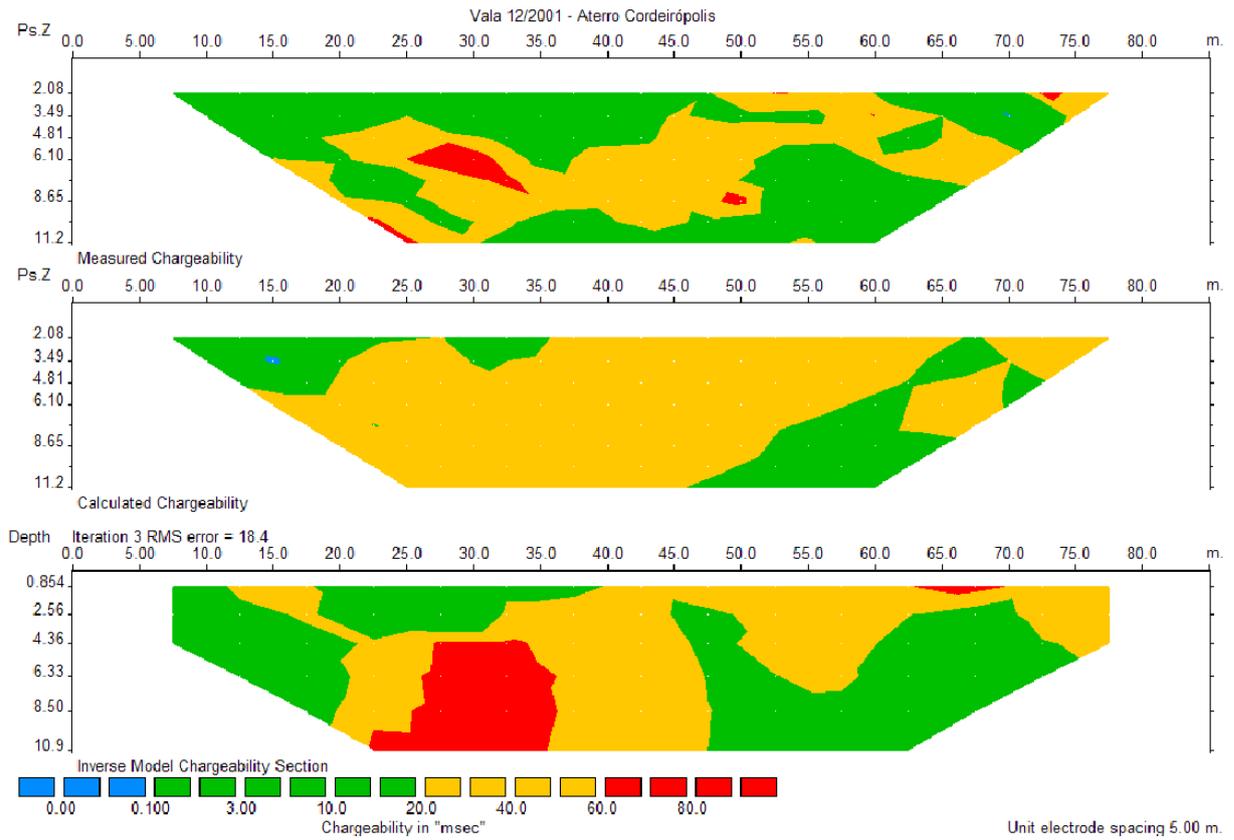


Figura E13 – Linha 2001 - cargabilidade