

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE ÁREA CONTAMINADA A  
JUSANTE DE LAGOA DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS NO CAMPUS DA  
USP EM PIRASSUNUNGA-SP**

Gabriel Souza Cruz

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

Co-orientador: MSc Diego Daniel Silva

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2015/19)**

SÃO PAULO

2015

TF  
C957  
GS.c

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



**CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE ÁREA CONTAMINADA A  
JUSANTE DE LAGOA DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS NO CAMPUS DA  
USP EM PIRASSUNUNGA-SP**

Gabriel Souza Cruz

Orientadora: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

Co-orientador: MSc Diego Daniel Silva

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2015/19)**

IGc-Instituto de Geociências



Caracterização geoelétrica de área contaminada a jusante  
de lagoa de disposição de resíduos n

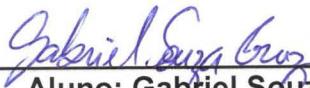
M26510

SÃO PAULO  
2015

Universidade de São Paulo

Instituto de Geociências

CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE ÁREA CONTAMINADA A JUSANTE DE LAGOA  
DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS NO CAMPUS DA USP EM PIRASSUNUNGA-SP



Aluno: Gabriel Souza Cruz

De acordo.



Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2015/19)

SÃO PAULO

2015

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, amigos e professores e a todos aqueles que ao longo desta jornada contribuíram para este tão desejado momento.

Só tenho a agradecer aos meus pais Edina e Jailton, que ao longo dessa graduação nunca mediram esforços para que este sonho fosse concretizado. Agradeço também ao meu irmão Marcus que sempre me apoiou no que pode. Meus avós Anísio, Odete e Nega que também contribuíram de forma especial para que este dia chegasse.

Não posso também deixar de citar meu mestre que sempre esteve presente para auxiliar, ensinar e aconselhar. Obrigado Gallas por me orientar neste trabalho e ter tido esse espírito fraternal desde sempre.

Obrigado Fyona pela grande ajuda no trabalho, te desejo muito sucesso em todas as novas empreitadas de sua vida.

Agradeço a todos os moradores da República Astenosfera, onde vivi por 6 anos da minha vida e tive inúmeros momentos felizes! Espero voltar depois de muito tempo e ver que a república ainda existe. Rumo aos 20 anos!

Ofereço este trabalho também à família Geobinho, amigos que espero manter a amizade sempre. Que permaneçamos unidos com churrascos e confraternizações!

Obrigado a todos, levo vocês na memória e no coração.

## SUMÁRIO

I. LISTA DE FIGURAS .....	v
II. LISTA DE TABELAS .....	v
III. LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS .....	vi
1. RESUMO .....	1
2. ABSTRACT .....	1
3. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....	2
3.1. Localização .....	2
4. TRABALHOS ANTERIORES .....	4
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	6
5.1. Materiais .....	6
5.2. Métodos .....	6
5.2.1. Caminhamento Elétrico (CE) .....	7
5.2.2. Sondagem elétrica vertical (SEV) .....	9
6. ÁREA DE ESTUDO E ATIVIDADE REALIZADA EM CAMPO .....	10
6.1. Área de Estudo .....	10
6.2. Atividades realizadas em campo .....	13
7. RESULTADOS OBTIDOS .....	16
7.1. Sondagens Elétricas Verticais .....	16
7.2. Caminhamento Elétrico .....	20
7.2.1. Mapas 2d de investigação .....	24
8. CONCLUSÃO .....	25
9. REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	27

## I. LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geológico da Folha Piraçununga, editado de Massoli (1983) .....	3
Figura 2 - Ilustração da técnica CE com arranjo D-D, retirado de (Becegato et. al., 2009).....	8
Figura 3 - Imagem que ilustra a construção de uma pseudo-seção (Becegato et. al., 2009)..	9
Figura 4 - Arranjo Schlumberger (adaptado de Telford et. al., 1990).....	10
Figura 5 – Localização da área de estudo (marcada em vermelho). Extraído e adaptado de Wikipédia e Google Earth .....	11
Figura 6 – Área de estudo com as possíveis fontes e contaminação. Extraído e adaptado do Google Earth e fotos do local.....	11
Figura 7 - Reservatório 01, fonte da contaminação estudada.....	12
Figura 8 - Terrameter SAS 300B, utilizado para as SEVs.....	13
Figura 9 - Equipamento utilizado para obtenção de dados no caminhamento elétrico ABEM Terrameter SAS 4000, 04 canais.....	14
Figura 10 - Syscal Pro (Iris Instruments) 10 canais, utilizado para comparar resultados com medições realizadas com 04 canais.....	15
Figura 11 - Posicionamento das SEVs e CE.....	16
Figura 12 - SEV 01.....	17
Figura 13 - SEV 02.....	18
Figura 14 - SEV 03.....	19
Figura 15 - Seção de caminhamento elétrico, (L00).....	20
Figura 16 - Seção de caminhamento elétrico, (L15).....	21
Figura 17 - Seção de caminhamento elétrico, (L30).....	22
Figura 18 – LINHA 00 obtida com o uso do equipamento SYSCAL PRO (Iris Instrument)...	23
Figura 19 - Mapas de níveis de investigação .....	24

## II. LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grandezas envolvidas.....	7
Tabela 2 - Coordenadas dos vértices da lagoa 01.....	12
Tabela 3 - Coordenadas dos pontos das SEVS.....	13
Tabela 4 - Pontos iniciais e finais de linhas de CE.....	15

### III. LISTA DE ABREVIAÇÕES E SÍMBOLOS

$\Omega$  = resistência elétrica

$\rho$  = resistividade elétrica efetiva

$\rho_a$  = resistividade elétrica aparente

A,B = eletrodos de correntes

M,N = eletrodos de potencial

$\Delta V$  = diferença de potencial

I = intensidade de corrente elétrica

K = coeficiente geométrico

L = espaçamento ou abertura entre eletrodos (corrente ou potencial)

n = níveis de investigação (n=1, 2,...)

D-D = arranjo dipolo-dipolo

SEV = sondagem elétrica vertical

CE = caminhamento Elétrico

## 1. RESUMO

Este trabalho consiste em aplicar o método geofísico de eletrorresistividade para avaliar anomalias de subsuperfície ocasionadas pela possível contaminação oriunda de laboratórios, laticínios e abatedouros que se localizam a montante das lagoas do campus da USP, campus de Pirassununga, no interior do estado de São Paulo, identificando a área atingida pela pluma poluente, direção de fluxo da mesma e sua delimitação.

Para serem atingidos os objetivos, as técnicas utilizadas foram de Caminhamento Elétrico (CE) e Sondagem Elétrica Vertical (SEV), nos arranjos dipolo-dipolo (D-D) e *Schlumberger*, respectivamente. Os resultados obtidos mostram que há contrastes de resistividade entre a área contaminada (resistividades baixas) e não contaminada.

A metodologia aplicada no projeto é eficiente, não invasiva, rápida e largamente utilizada devido ao seu relativo baixo custo.

**Palavras Chaves:** contaminação, eletrorresistividade, poluente, Pirassununga.

## 2. ABSTRACT

The present research derives from the application of geophysical method of electroresisitividade to asses subsurface anomalies arising from the potential contamination caused by laboratories, dairies and abattoirs which are located upward the waste ponds from USP Pirassununga campus, in the state of São Paulo, identifying the contamination area, its size and flow direction.

To get the objectives, the technics used were Electric Profiling (EP) and Vertical Electric Sounding (VES), in dipole-dipole (D-D) and *Schlumberger* arrays respectively. The results shows resistivity contrasts between contaminated areas (low resistivity) and the not contaminated.

The mythology applied in the project is efficient, not invasive, fast and widely used due its low cost.

**Keywords:** contamination, electrical resistivity, pollutant, Pirassununga.

### 3. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Devido à crescente preocupação social relativa ao meio ambiente, o presente trabalho busca caracterizar contaminação no subsolo e águas subsuperficiais causada por atividade antrópica mal planejada, tais como despejo indevido de produtos químicos ou deposição de resíduos de matadouro, laticínio etc em áreas não adequadas. O estudo foi realizado em uma área a jusante de lagoa que está dentro do campus da USP de Pirassununga, próximo ao Departamento de Zootecnia e consistiu na aplicação do método de eletrorresistividade para detectar anomalias correlacionáveis às possíveis contaminações.

O estudo geofísico da área foi um trabalho executado durante as atividades de campo da disciplina optativa GSA0519 (Geofísica Aplicada ao Estudo de Poluição Subterrânea). No referido trabalho foi empregado o método geofísico da eletrorresistividade e utilizadas duas técnicas diferentes. Na primeira usou-se sondagem elétrica vertical no arranjo *Schlumberger* com o intuito de aferir a profundidade do lençol freático. A segunda técnica foi o caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo para visualizar o comportamento da pluma de contaminação.

De forma geral as rochas e o subsolo são maus condutores de corrente elétrica, cujas resistividades seriam altas se não fossem a presença de poros e fraturas preenchidos por líquidos (Telford et al. 1990). Fluidos contaminantes como os que estão nas lagoas estudadas, ricos em matéria orgânica em decomposição contêm sais dissolvidos e, por essa razão, ao realizar-se estudos geofísicos com o método de eletrorresistividade apresentam alta probabilidade de serem detectados, uma vez que os íons dissolvidos em elevadas concentrações em subsuperfície podem ser detectados por diminuírem a resistividade elétrica nos locais afetados.

O estudo geofísico é muito comumente empregado para detectar áreas contaminadas de forma econômica, eficiente e relativamente rápida. Pois de forma indireta e não invasiva tem a capacidade de realizar investigações em subsuperfície e chegar a conclusões bastante satisfatórias.

#### 3.1. Localização

A área estudada está localizada próxima à borda leste da Bacia do Paraná, que segundo diversos autores tais como Milani e Ramos (1998) e Zalán (1999) foi definida como

uma bacia sedimentar intracratônica cuja as acumulações sedimentares seguem do Neo-Ordoviciano ao Neo-Cretáceo.

A Bacia no geral está localizada na porção meridional do Brasil, tem formato próximo ao ovalado, possui uma espessura que chega a atingir mais de 6.000 metros, sua área abrange 1,1 milhões de km<sup>2</sup> e é constituída por rochas ígneas, Zalán (2009).

Precisamente a área a estudada encontra-se no município de Pirassununga, leste da Bacia do Paraná, que segundo Massoli, (1993) a constituição da coluna estratigráfica é composta pelo Grupo Tatuí (siltitos e argilitos) e Formações Corumbataí (siltitos), Formação Pirambóia (arenitos) e Piraçununga (areias), além de intrusões de diabásio e sedimentos quaternários.

Ainda segundo Massoli, (1983), na Folha Piraçununga onde a área de estudo está inserida, 70% dos afloramentos são referentes a Formação Piraçununga (Terciário) e intrusões de diabásio. Na porção norte-nordeste da folha aflora a Formação Corumbataí (Permiano) que é recoberta pela Formação Piraçununga. A Formação Pirambóia (Triássico) e o Grupo Tatuí (Permiano) se restringem a porção norte e sudeste da folha.

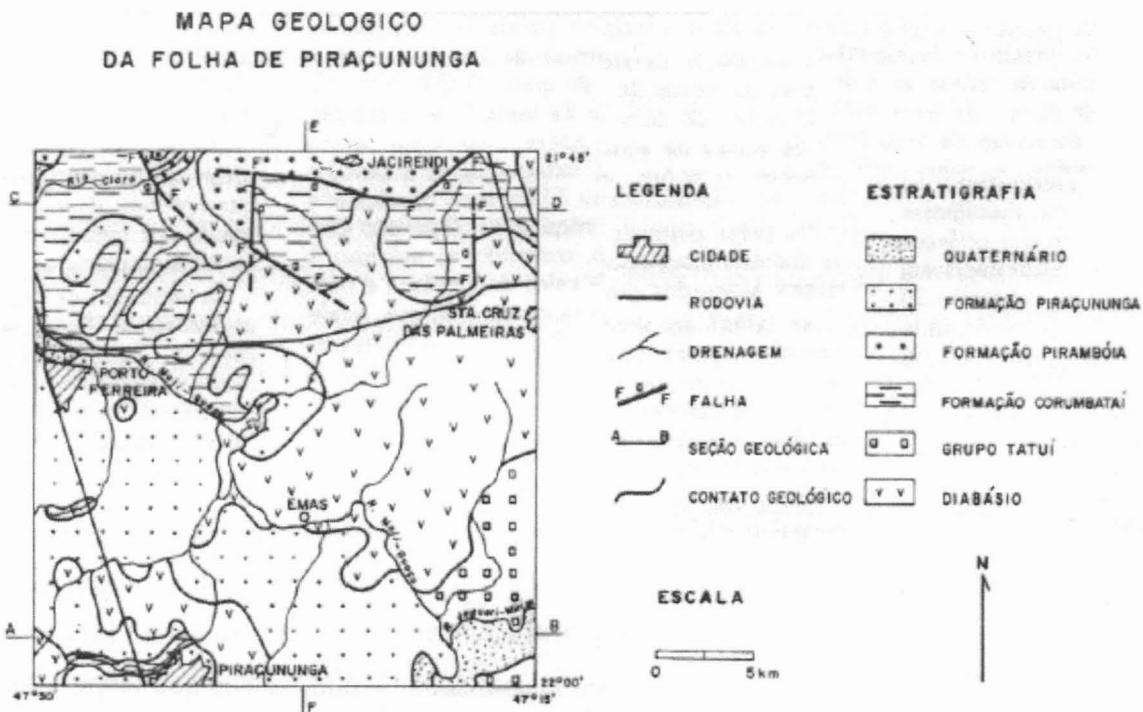


Figura 1 - Mapa geológico da Folha Piraçununga, editado de Massoli (1983).

## **Formação Corumbataí**

Os sedimentos dessa Formação são siltitos e argilitos de cores rosadas, marrons, mais raramente esverdeados, creme e acinzentados, maciços ou com acamamento plano paralelo, apresentando faturamento conchoidal. Pode haver intercalação de argilitos e siltitos carbonáticas, arenitos finos constituindo camadas centimétricas (Massoli, 1983)

## **Formação Piraçununga**

É característica por constituir sedimentos inconsolidados, cor castanho caro, sem estruturas sedimentares, areno-argilosos, granulação variando entre as frações de areia fina a silte grosso (com predomínio desta), muito mal selecionados. Localmente ocorrem camadas centimétricas de argilas e areias de cores amareladas e acinzentadas respectivamente (Massoli, 1983)

## **Intrusivas básicas**

O diabásio apresenta vasta área de exposição na folha Piraçununga, na margem direita do Rio Mogi Guaçu, notadamente entre o trecho compreendido entre Santa Cruz das Palmeiras e a Cachoeira de Emas. O corpo intrusivo tem forma de lacólito e em alguns pontos está associado a falhas. Em algumas localidades sua espessura chega a 150m (Massoli, 1983)

## **4. TRABALHOS ANTERIORES**

Para a realização deste trabalho foi consultada uma fundamentação bibliográfica que incorpora aspectos teóricos e práticos. A quantidade de publicações que tange o assunto é notável e continua a crescer, por isso a consulta de novas obras foi recorrente para a confecção deste trabalho.

Orellana (1972) e Telford et al. (1990). Duas obras teóricas, sendo a primeira de língua espanhola e a segunda de língua inglesa onde a geofísica, mais precisamente métodos geoelétricos são abordados de maneira vasta e minuciosa. Teorias e exemplos

práticos são destrinchados de maneira didática a fim de explanar de forma precisa os métodos.

Gallas (2000), que aborda de forma ampla os métodos geoelétricos e suas principais aplicações nas diversas áreas da geologia, apresentando resultados em casos reais com comprovada eficácia

Gallas et al (2001) trata de estudo geofísico aplicado em área urbana para a detecção de problema geotécnico no Parque do Ibirapuera em São Paulo, onde diversos métodos geofísicos foram aplicados incluindo o de eletrorresistividade. Nesta obra é utilizada e explicada a técnica de caminhamento elétrico assim como o arranjo dipolo-dipolo.

Gallas et al (2005) expõem uma vasta e detalhada explicação de métodos geofísicos, tais como SP e eletrorresistividade que foram utilizados no estudo de áreas de recalque no perímetro urbano de Taubaté, SP. Nesta pesquisa as áreas de recalque foram configuradas como aquelas que apareciam com baixa resistividade devido à presença de água que fora absorvida por argilas colapsíveis. Levantamentos utilizando técnicas de caminhamento elétrico (CE) e arranjo dipolo-dipolo foram utilizados para a confecção de diversas imagens e perfis.

Gallas et al. (2005) em trabalho realizado no município de Londrina, PR, onde ensaios de eletrorresistividade mostraram uma pluma de contaminação causada por um aterro sanitário. Nesta pesquisa os resultados mapearam com clareza a área contaminada a jusante do aterro sanitário, identificada pelas baixas resistividades.

Gandolfo (2007) em sua tese de doutorado visou realizar uma revisão e um aperfeiçoamento de métodos de aquisição e processamento de dados geofísicos. Esta obra contempla vários métodos geofísicos assim como as técnicas utilizadas para um melhor processamento de dados.

Becegato et al. (2009) tratam da poluição de águas subsuperficiais no município de Saudade do Iguaçu no Paraná, onde há contaminação devida à presença de um lixão desativado. A umidade natural do lixo, a água de constituição dos vários materiais e a dissolução natural de matéria orgânica são fatores que contribuem para o agravamento da situação. Neste trabalho o uso do método de geofísico de eletrorresistividade e o uso da técnica de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo ajudam de maneira prática e eficiente a ilustrar o que foi praticado também neste trabalho.

Camargo (2013) em seu trabalho de formatura trata sobre a questão da contaminação do solo devido ao descarte inapropriado de carcaças animais no campus da USP em Pirassununga. Este trabalho estuda plumas de contaminações em áreas próximas

das que foram agora estudadas e apresentou resultados que poderão ser comparados ao trabalho que agora foi desenvolvido.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1. Materiais

Para a aquisição de dados usando o método de eletroresistividade foram empregados os resistivímetros disponíveis no IGc, além milivoltímetro, eletrodos, fios, GPS, trena, bússola assim como outras ferramentas básicas. Já na fase de escritório foram utilizados softwares gratuitos ou disponibilizados no IGc para a edição de texto, tratamento e processamento de dados.

### 5.2. Métodos

Os trabalhos foram efetuados com o método da eletrorresistividade, que consiste em introduzir uma corrente elétrica no subsolo por meio de dois eletrodos denominados de A e B e medir a diferença de potencial causada pela passagem desta corrente por intermédio de dois eletrodos ditos M e N.

Conhecendo a disposição destes eletrodos no campo (distâncias entre eles), pode-se calcular a resistividade efetiva ( $\rho$ ) ou aparente ( $\rho_a$ ) (Gallas, 2003, Gallas *et. al.* 2000) empregando-se a relação

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K$$

onde  $K$  é um coeficiente que depende das dimensões e arranjo do quadripolo AMNB e é definido como

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

As grandezas envolvidas no método da eletrorresistividade são as da Tabela 1.

Tabela 1 - Grandezas envolvidas.

Grandeza	Símbolo	Unidade (S.I.)
Corrente Elétrica	I	Ampère
Resistividade	$\Omega$	Ohm.m
Comprimento	m	Metro
Diferença de Potencial	$\Delta V$	Volt

O método da eletrorresistividade pode ser empregado, dentre outras opções, segundo as técnicas de Caminhamento Elétrico (CE) e da Sondagem Elétrica Vertical (SEV), conforme Kearey *et al.* (2009) e Gallas (2003).

### 5.2.1. Caminhamento Elétrico (CE)

Esta é uma técnica empregada para a investigação horizontal de uma área onde há aquisição de dados a uma distância constante, mas que pode também atingir vários níveis de profundidade.

Sua maior finalidade é a detecção de variação lateral de resistividade. Sendo assim esta técnica é muito indicada para a investigação de diques, fraturamentos, falhamentos, corpos mineralizados ou qualquer outro corpo vertical que seja suscetível a esta técnica. Corpos de areia, cascalho e aquíferos também podem ser delimitados ao com este emprego (Gallas, 2000).

Normalmente o arranjo eletródico mais usado para essa técnica é o dipolo-dipolo (DD), onde o espaçamento entre os eletrodos de corrente (A e B) é o mesmo dos eletrodos de potencial (M e N), e a distância entre seus pontos médios é um múltiplo deste espaçamento (Becegato *et. al.*, 2009).

Para realizar um (CE) é necessário alinhar os eletrodos e deixá-los em contato galvânico com o solo, daí então posicionam-se os eletrodos de corrente (AB) numa base fixa enquanto move-se os eletrodos de potencial (MN). Em seguida deslocam-se os eletrodos de corrente (AB) para uma nova posição na mesma linha e então repete-se o procedimento por diversas vezes como é indicado na figura 2.

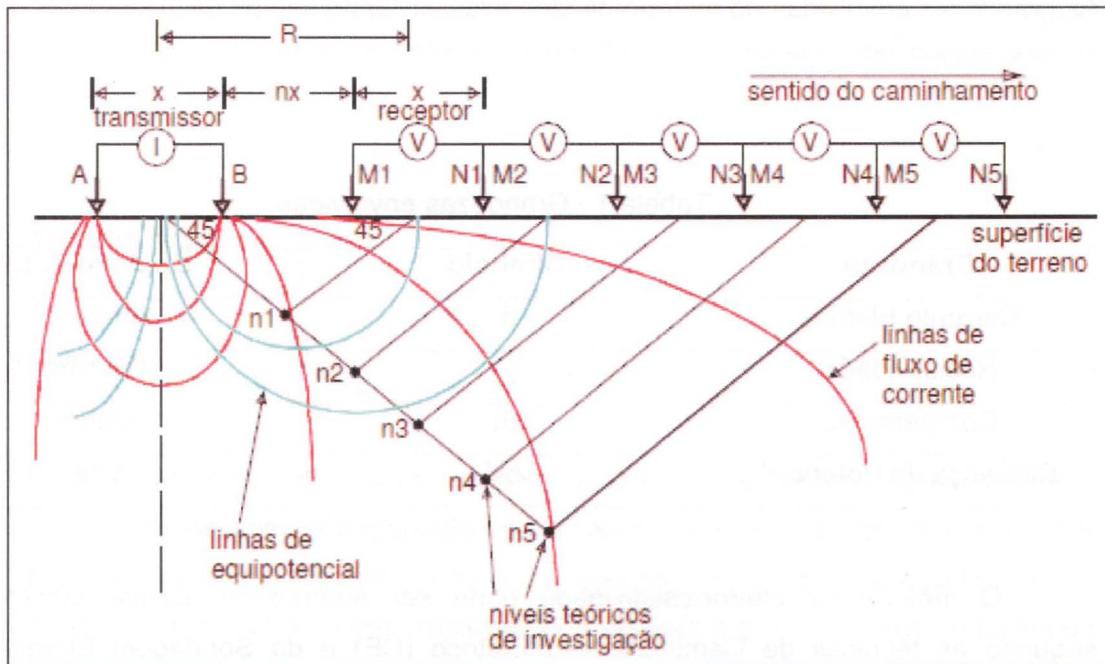


Figura 2 - Ilustração da técnica CE com arranjo D-D, retirado de (Becegato et. al., 2009).

Ao repetirmos o procedimento várias vezes teremos uma malha com diversos níveis de investigação e respectivas resistividades, sendo possível a construção de uma pseudo-seção, onde os valores de resistividade são plotados e interpolados por curvas de isovalores. Denomina-se esta forma de apresentação de dados como pseudo-seção pelo fato de que tratam-se de resistividades e profundidades aparentes (figura 3). A interpretação dos dados é feita com base na diferença entre as resistividades da malha, interpreta-se que porções onde a resistividade apresenta-se relativamente muito mais baixa que as adjacentes é foco da concentração de íons, provavelmente oriundos da contaminação.

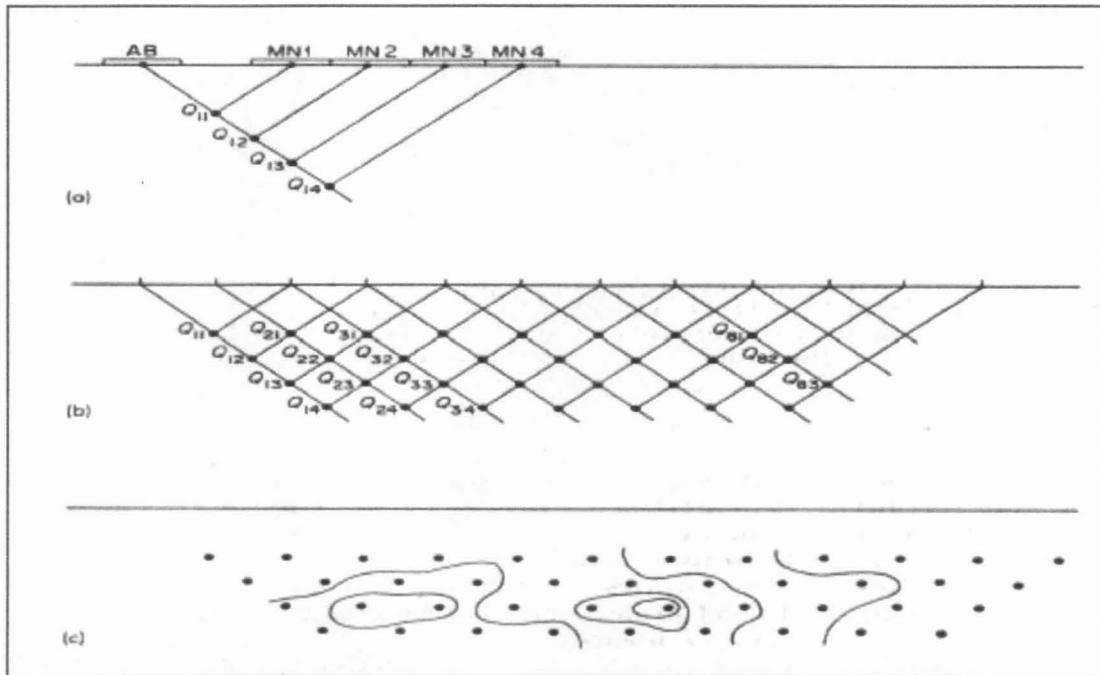


Figura 3 - Imagem que ilustra a construção de uma pseudo-seção (Becegato et. al., 2009).

### 5.2.2. Sondagem elétrica vertical (SEV)

A (SEV) tem como principal característica o estudo de meios estratificados, uma vez que sua maior atribuição é o estudo da distribuição vertical de camadas (Gandolfo, 2007). Em condições ideais esta técnica deve ser empregada em terrenos onde há homogeneidade lateral e planos subsuperficiais que mudam de características conforme o aumento de profundidade (Gallas, 2000).

A técnica tem como base o aumento das distâncias entre os eletrodos A e B em uma mesma direção enquanto M e N continuam fixos (Orellana, 1972). Com o aumento dessas distâncias (A e B) a captação de dados de resistividade passa a ser mais profunda conforme o espaçamento aumenta.

O ponto de atribuição das medidas é o ponto **P** entre **M** e **N**, e os resultados são apresentados na forma de curvas de resistividade, apresentados em gráficos bilogarítmicos. As medidas de resistividades aparentes são feitas no eixo Y das ordenadas e no das abscissas X, as aberturas AB/2.

O arranjo é constituído de dois eletrodos para a transmissão de corrente **A** e **B** e dois eletrodos de potencial **M** e **N** para a leitura das medidas, alinhados sobre um mesmo perfil de levantamento, devendo ser mantida a relação  $AB/MN \geq 5$ .

O arranjo Schlumberger é o mais comumente empregado na técnica da SEV e foi empregado neste trabalho.

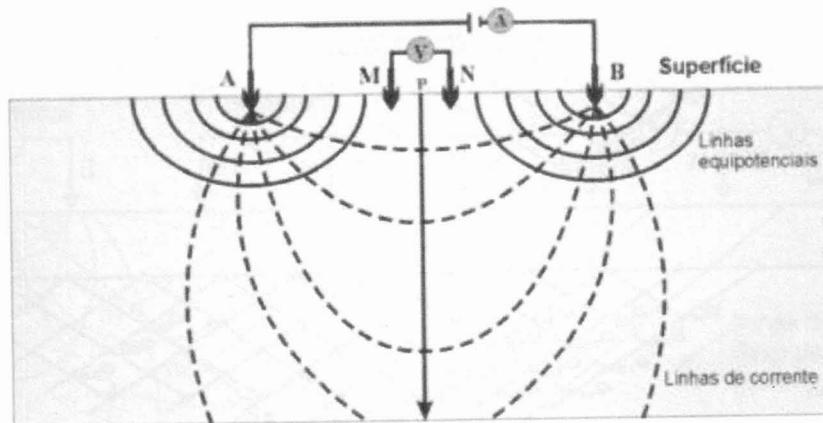


Figura 4 - Arranjo Schlumberger (adaptado de Telford et. al., 1990).

A interpretação dos dados obtidos é feita a partir do processamento de dados utilizando o software IPI2win. Nesse programa são elaborados gráficos bi-logarítmicos que apresentam três curvas onde são indicadas a espessura do estrato, a resistividade média medida em campo e finalmente a terceira curva (vermelha) que simboliza um ajuste feito no software para melhor aferir os dados obtidos.

## 6. ÁREA DE ESTUDO E ATIVIDADE REALIZADA EM CAMPO

### 6.1. Área de Estudo

A pesquisa de campo para a coleta de dados foi realizada no campus de Pirassununga da Universidade de São Paulo, que se encontra aproximadamente na porção leste do estado, a 215km da capital e tem seu acesso via Rodovia Anhanguera (SP-330).

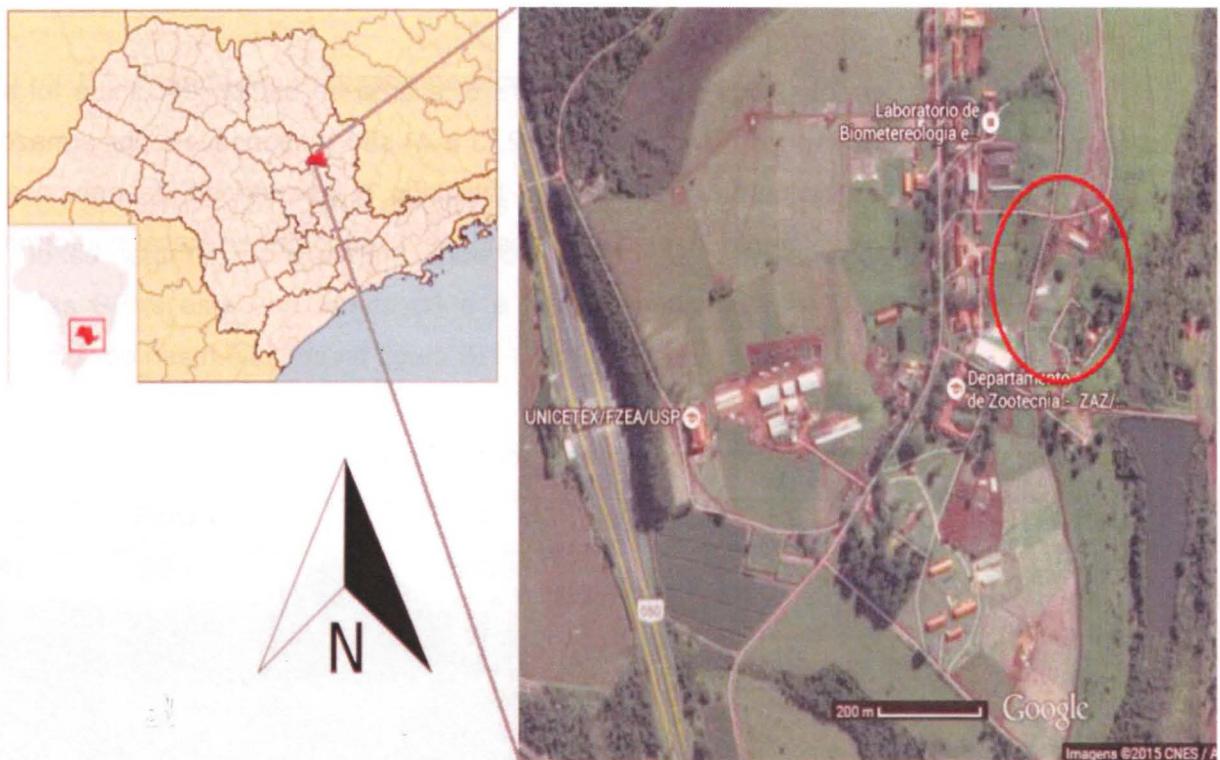


Figura 5 – Localização da área de estudo (marcada em vermelho). Extraído e adaptado de Wikipédia e Google Earth

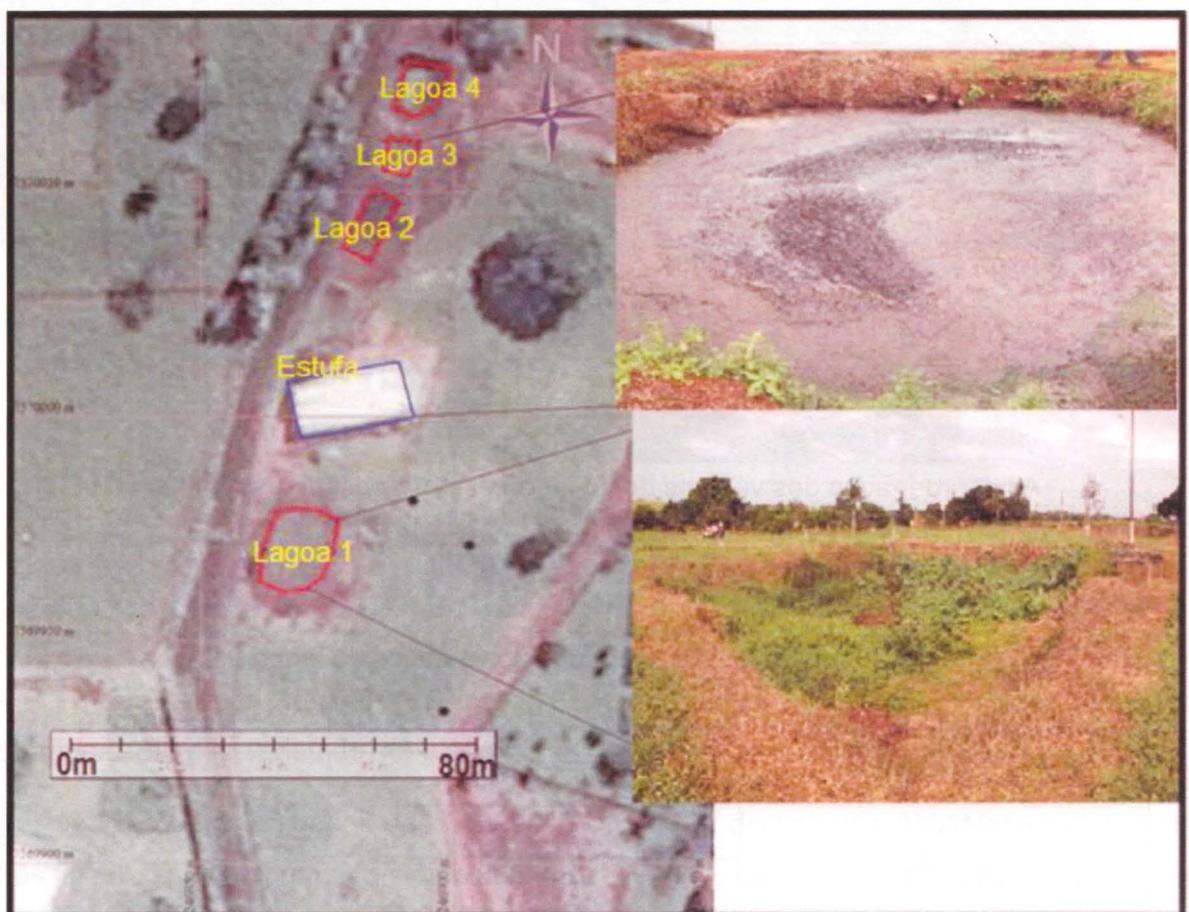


Figura 6 – Área de estudo com as possíveis fontes e contaminação. Extraído e adaptado do Google Earth e fotos do local.

Como é possível observar nas Figuras 5 e 6, a área de estudo escolhida foi a da lagoa de resíduos 1. As lagoas de resíduos (1, 2, 3 e 4) são responsáveis por armazenar dejetos oriundos de abatedouros, produção de laticínios e laboratórios de pesquisa da própria universidade. Atualmente a lagoa de resíduos 1 encontra-se seca conforme se observa na Figura 7.



Figura 7 - Reservatório 01, fonte da contaminação estudada.

As coordenadas dos vértices desta lagoa estão apresentadas na tabela 02.

Tabela 2 - Coordenadas dos vértices da lagoa 01.

X	Y	Datum
246871	7569973	WGS84
246868	7569956	
24854	7569958	
246862	7569973	

## 6.2. Atividades realizadas em campo

Em campo foram efetuadas três Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) para que fosse determinada a profundidade do lençol freático na área de trabalho. As coordenadas das SEVs estão na tabela 03 e a foto do equipamento **Terrameter SAS 300B** que foi utilizado nas medições na figura 8.

Tabela 3 - Coordenadas dos pontos das SEVs.

Ponto	X	Y	Datum
SEV1	246936	7570025	SAD69
SEV2	246903	7569971	WGS84
SEV3	246898	7569934	WGS84



Figura 8 - Terrameter SAS 300B, utilizado para as SEVs.

Para a obtenção de dados nessas SEVs utilizou-se o arranjo Schlumberger com uma abertura AB/2 que variou de 1,5 a 60m.

Após obter os dados das SEVs, na sequência do trabalho, foram montadas outras três linhas de caminhamento elétrico (L00, L15 e L30), no arranjo dipolo-dipolo sentido NE-NW, espaçadas de 15m entre si e com AB=MN=10m.

Para o levantamento dipolo-dipolo foi utilizado o equipamento **ABEM Terrameter SAS 4000** (figura 9), 4 canais. O objetivo deste levantamento foi a delimitação lateral da pluma e obter uma estimativa da profundidade atingida pela mesma.

Um levantamento com **Syscal Pro da Iris Instruments** (figura 10), também foi feito na L00 empregando-se o sistema multieletrodos, com os eletrodos espaçados a 3,5m uns dos outros. O objetivo do uso desse equipamento foi comparar os dados, uma vez que o Syscal Pro com dez (10) canais adquiriu um volume de dados muito maior comparado aos 4 canais do ABEM Terrameter System e 08 níveis de investigação.

O sistema multieletrodos é um sistema de aquisição de dados automático gerenciado por um software. A aquisição é realizada por um cabo com 48 eletrodos que são espaçados de 3,5m, neste caso. Com este aparato é possível fazer uma aquisição de dados com um espaçamento entre medidas e também múltiplos deste espaçamento (3,5m, 7,0m, p. ex.). Tudo é automático e, após a instalação do cabo, a coleta dos dados é extremamente rápida (cerca de 20 minutos, neste caso).



Figura 9 - Equipamento utilizado para obtenção de dados no caminhamento elétrico ABEM Terrameter SAS 4000, 04 canais.

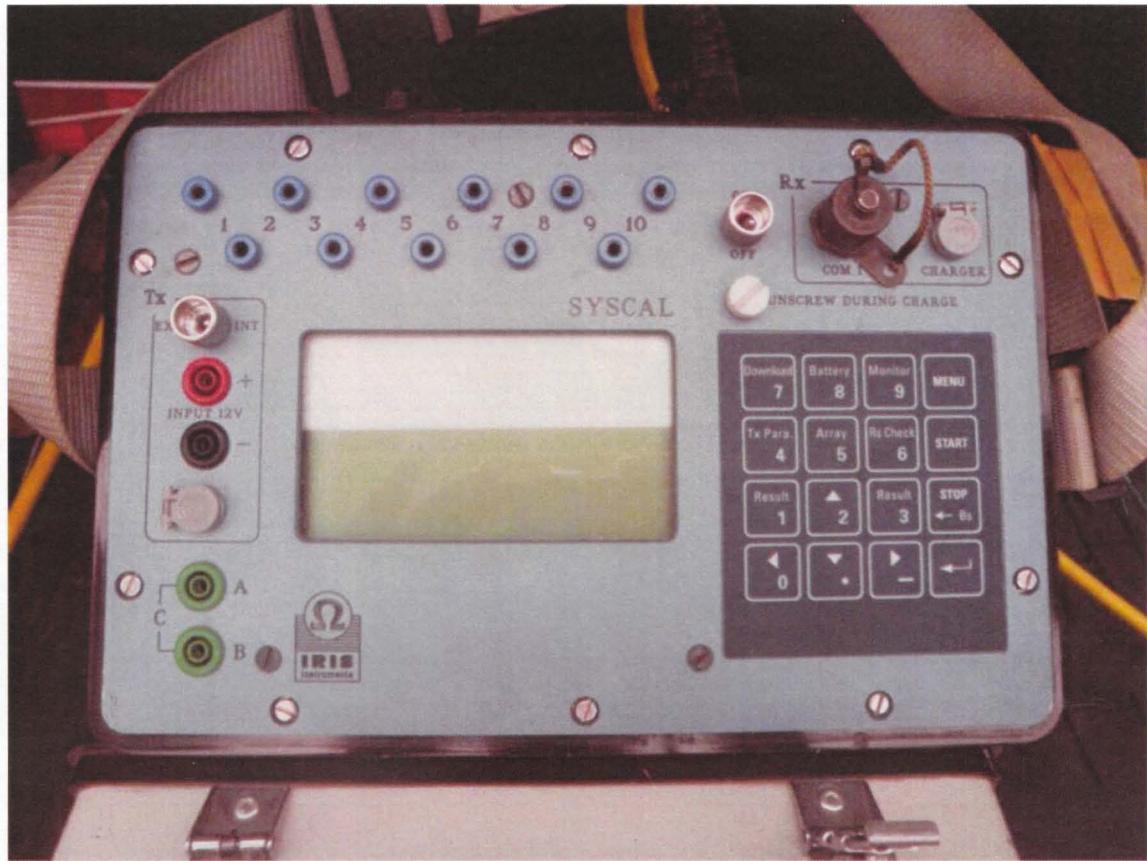


Figura 10 - Syscal Pro (Iris Instruments) 10 canais, utilizado para comparar resultados com medições realizadas com 04 canais.

Na tabela 04 são apresentados os pontos iniciais e finais das três (03) linhas de CE.

Tabela 4 - Pontos iniciais e finais de linhas de CE.

Linha	Ponto	X	Y	Datum
Linha 0	Inicial	246906	7570052	WGS84
	Final	246856	7569885	
Linha 15	Inicial	246923	7570048	WGS84
	Final	246870	7569888	
Linha 30	Inicial	246936	7570041	WGS84
	Final	246881	7569884	

Na figura 11 temos o posicionamento das três (03) SEVs e CE, tais como foram descritas nas tabelas 03 e 04.



Figura 11 - Posicionamento das SEVs e CE.

## 7. RESULTADOS OBTIDOS

### 7.1. Sondagens Elétricas Verticais

Para as três SEVs o mesmo procedimento foi executado. Com a ajuda do software IPI2win montou-se os gráficos bi-logarítmicos relativos a cada sondagem, figuras 12, 13 e 14. Nesse esquema  $\rho$  representa a resistividade aparente medida em ohm x metro ( $\Omega \cdot m$ ),  $d$  é profundidade da base da camada em metros e  $h$  a espessura do estrato geoelétrico. As linhas pretas são as curvas modeladas que se ligam a resistividade medida em campo (bolinhas), as linhas vermelhas são as curvas ajustadas (modeladas) e as azuis são a espessura da camada e sua resistividade aparente.

Na SEV 01 o melhor ajuste encontrado foi com 5 estratos geoelétricos e a interpretação dos dados é a seguinte:

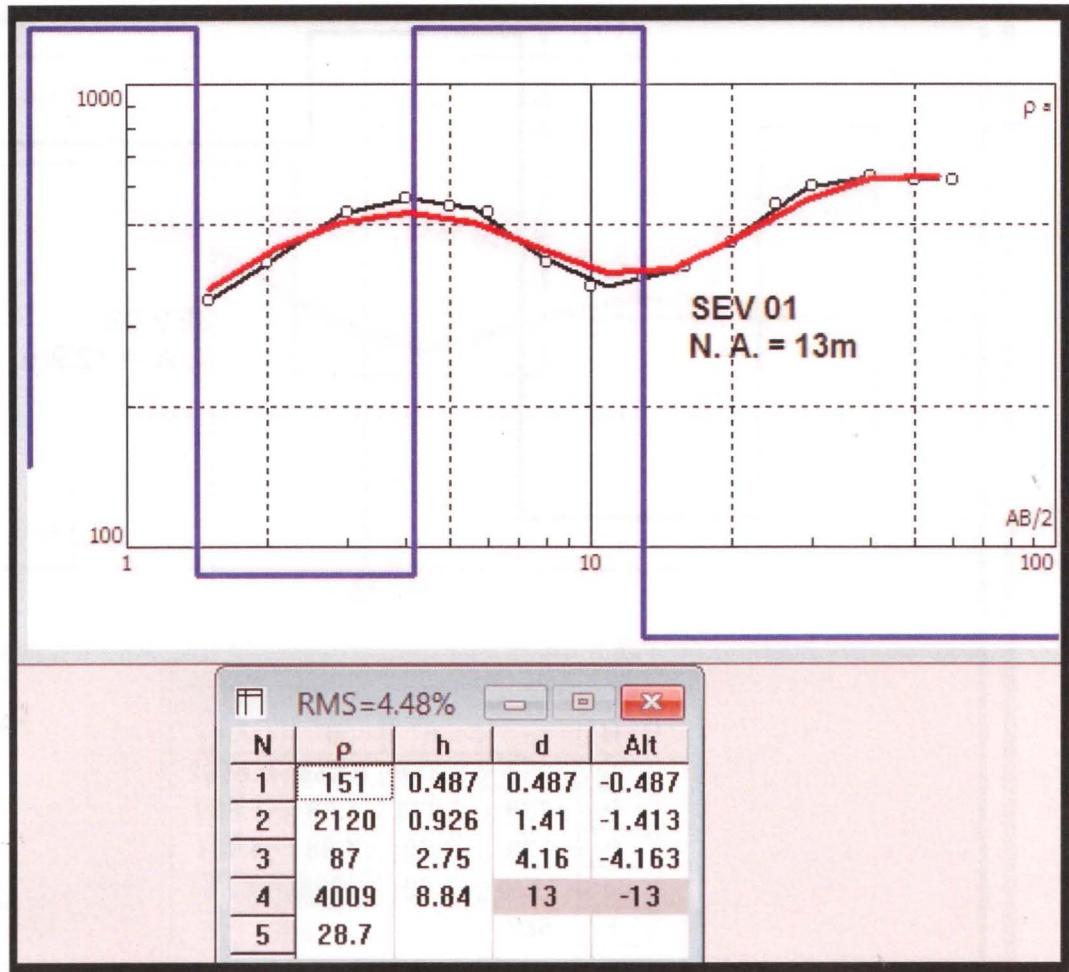


Figura 12 - SEV 01.

- 0m a 0.48m – Solo úmido com raízes de capim,  $\rho = 151 \Omega.m$ .
- 0,48m a 1,41 – Solo seco com resistividade alta,  $\rho = 2120 \Omega.m$ .
- 1,41 a 4,16m – Camada condutiva possivelmente sob efeito de agentes condutivos,  $\rho = 87 \Omega.m$ .
- 4,16m a 13m – Solo bastante resistente possivelmente argiloso, compacto e pouco permeável,  $\rho = 4009 \Omega.m$ .
- A partir de 13m – Zona saturada,  $\rho = 28,7 \Omega.m$ .

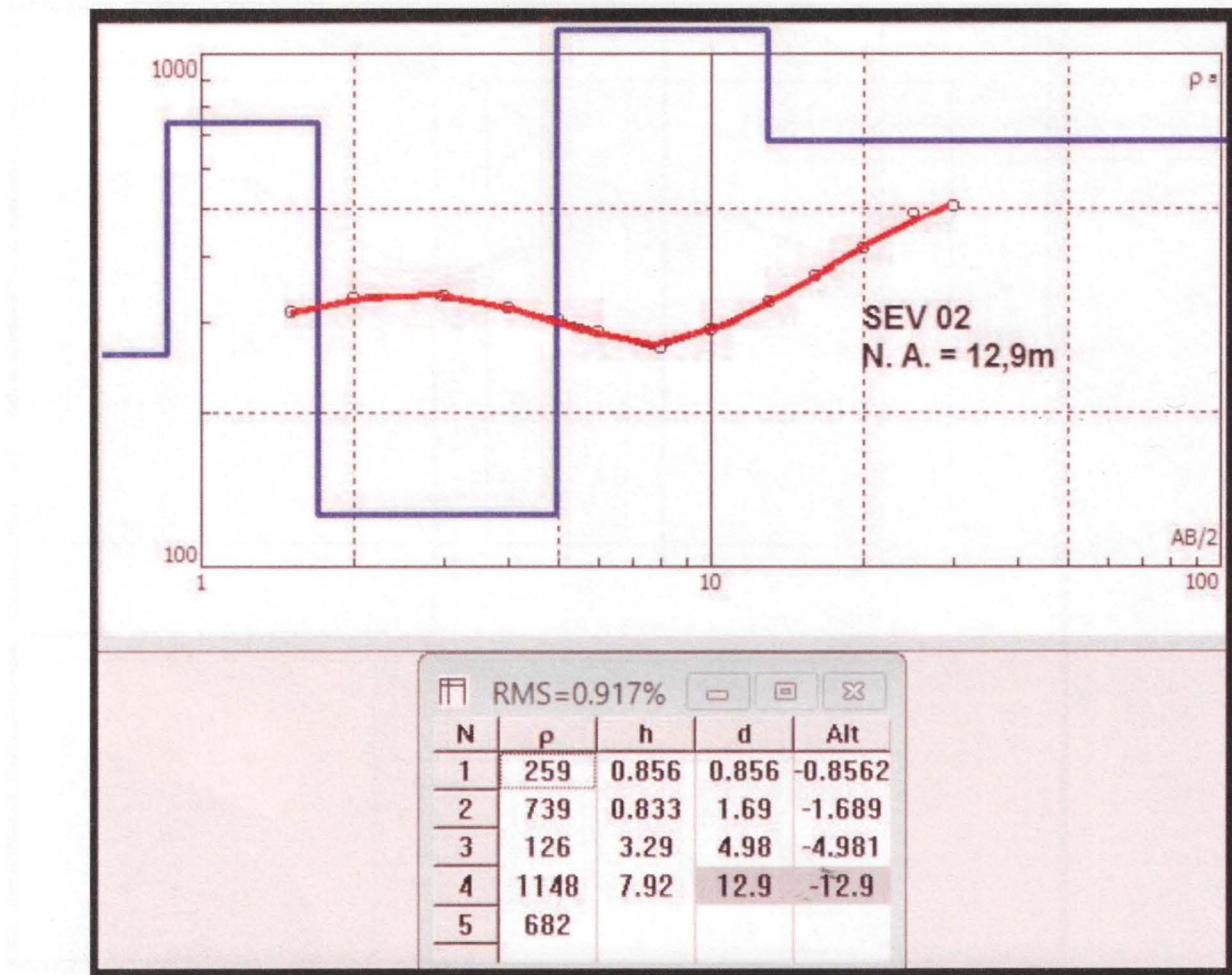


Figura 13 - SEV 02.

Na SEV 02, assim como na SEV 01, o melhor ajuste encontrado foi com 05 estratos geoelétricos e sua interpretação é:

- 0m a 0,85m – Solo úmido com raízes de capim,  $\rho = 259 \Omega \cdot m$ .
- 0,85 a 1,69 – Solo úmido sob efeito de capilaridade,  $\rho = 739 \Omega \cdot m$ .
- 1,69 a 4,98 – Camada de solo impregnada de agentes condutivos,  $\rho = 126 \Omega \cdot m$ .
- 4,98 a 12,9 – Solo bastante resistente possivelmente argiloso, compacto e pouco permeável,  $\rho = 1148 \Omega \cdot m$ .
- A partir de 12,9m – Zona Saturada,  $\rho = 682 \Omega \cdot m$ .

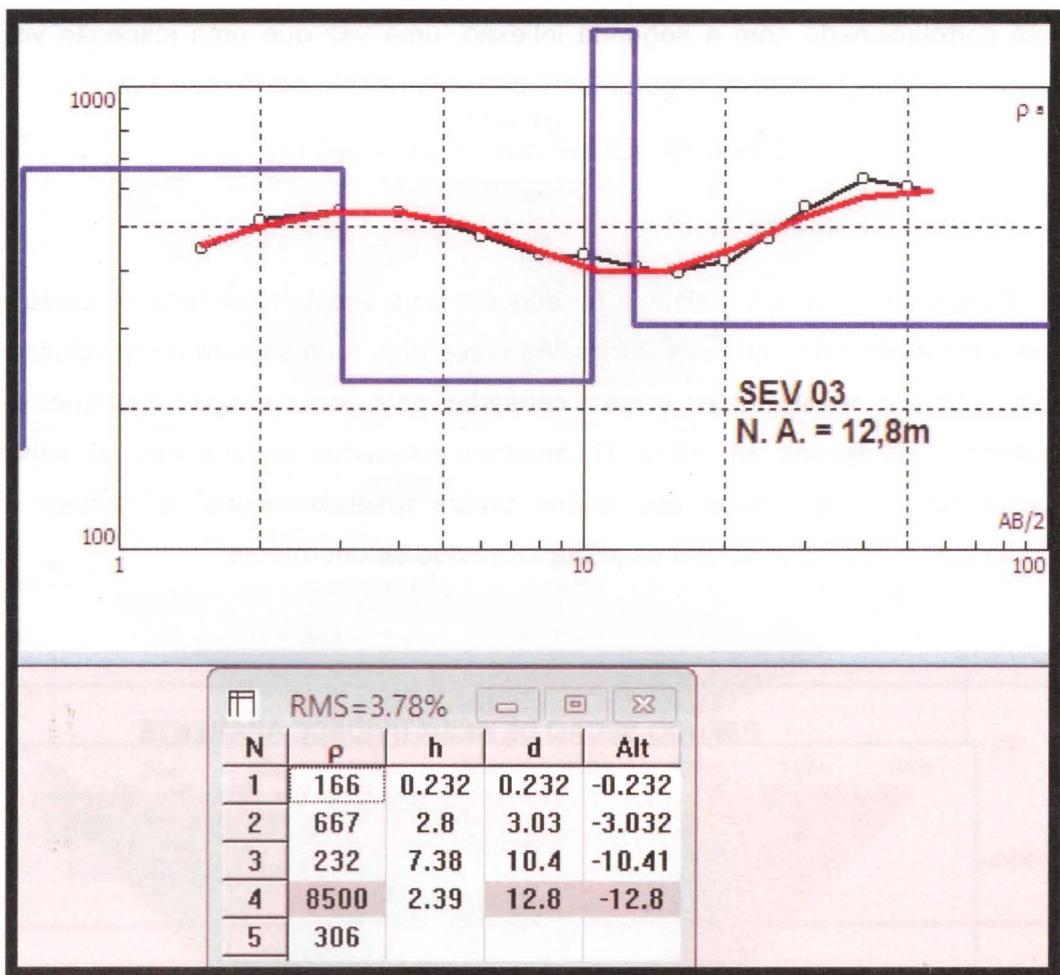


Figura 14 - SEV 03.

- 0m a 0,23 – Camada delgada de solo úmido com raízes de capim,  $\rho = 166\Omega.m$ .
- 0,23m a 3,0m – Solo sob possível influência de capilaridade,  $\rho = 667\Omega.m$ .
- 3,0m a 10,4m - Camada de solo impregnada de agentes condutivos,  $\rho = 232\Omega.m$ .
- 10,4m a 12,8m - Solo bastante resistente possivelmente argiloso, compacto e pouco permeável,  $\rho = 8500\Omega.m$ .
- 12,8m – Zona Saturada,  $\rho = 306\Omega.m$ .

O ligeiro rebaixamento do nível de água corrobora com o que é visto na topografia local, que apresenta suave declive na direção das SEV 1 para a SEV 3. O fato do nível de água estar relativamente profundo pode estar relacionado ao período de estiagem que estava ocorrendo na época.

A conclusão de que a zona saturada está a aproximadamente aos 13m de profundidade deve-se às interpretações das sondagens obtidas. Tendo em vista que as duas inflexões indicadas nos gráficos de resistividades mais baixas, optou-se por interpretar que o N.A.

está correlacionado com a segunda inflexão, uma vez que uma inspeção visual da área indica que o lençol freático seguramente não está raso (mais do que 10m).

## 7.2. Caminhamento Elétrico

Para o caminhamento elétrico foi adotada uma escala cromática de cores em (ohm.m) que varia entre cores quentes e frias. As cores frias representam resistividades altas, já as cores quentes resistividades baixas, causadas pela contaminação das lagoas de rejeito a montante. As figuras 15, 16 e 17 mostram os dados obtidos nas 03 linhas de CE e apresentam os resultados dos dados brutos (pseudo-seções) e também das seções modeladas a partir dos softwares já mencionados anteriormente.

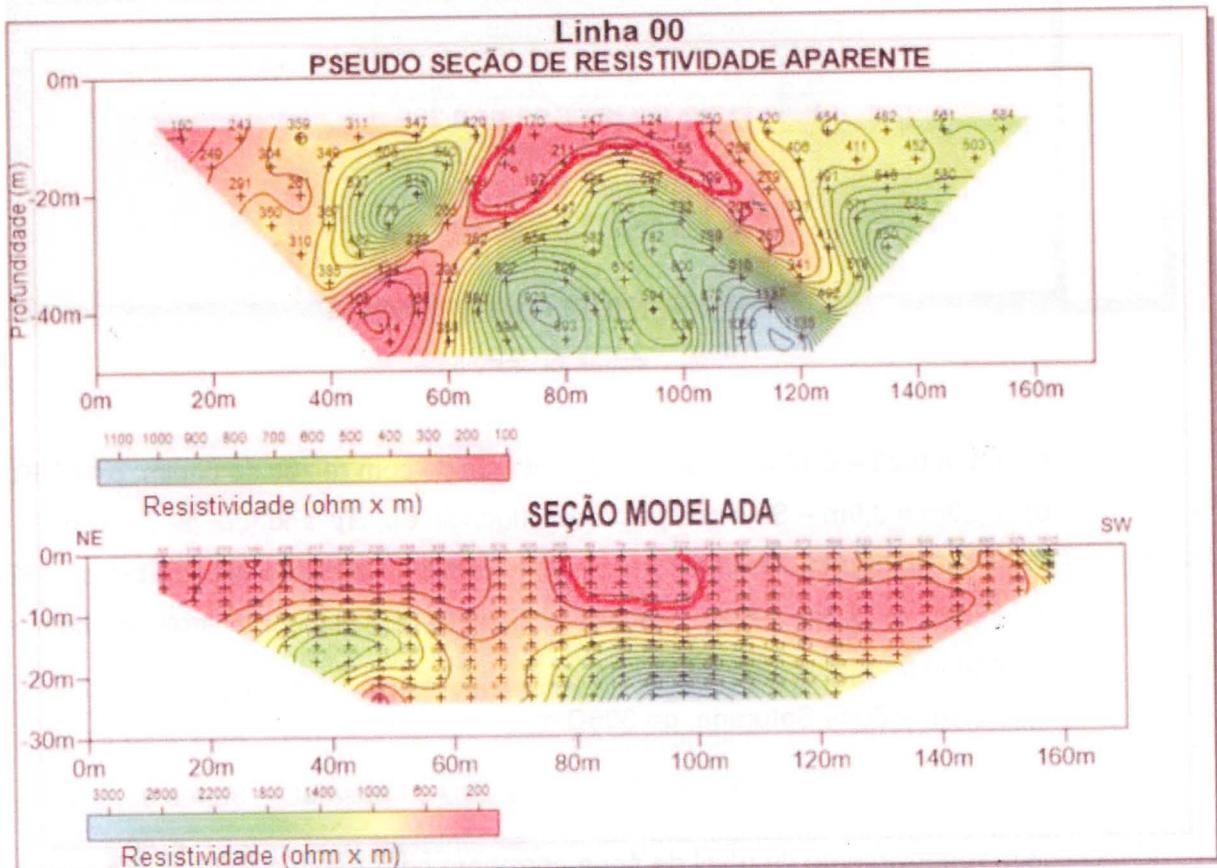


Figura 15 - Seção de caminhamento elétrico, (L00).

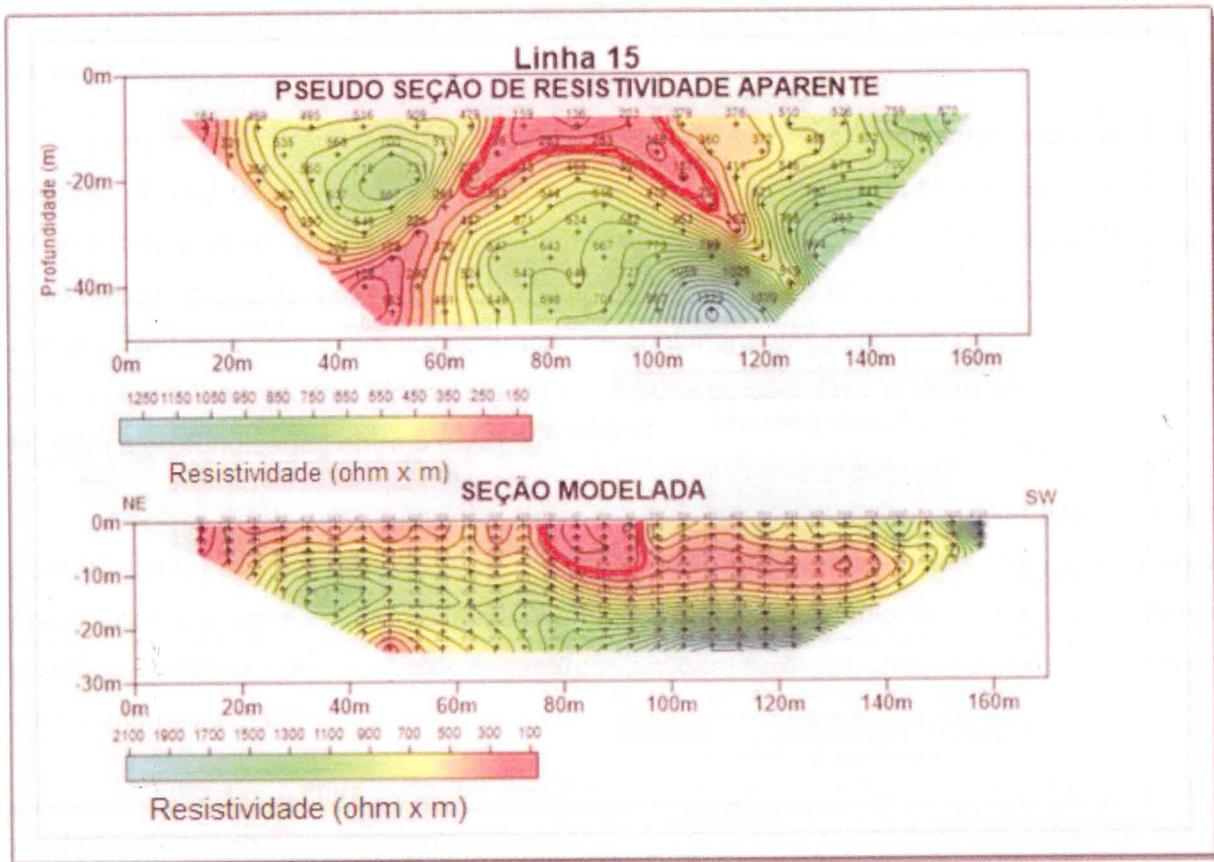


Figura 16 - Seção de caminhamento elétrico, (L15).

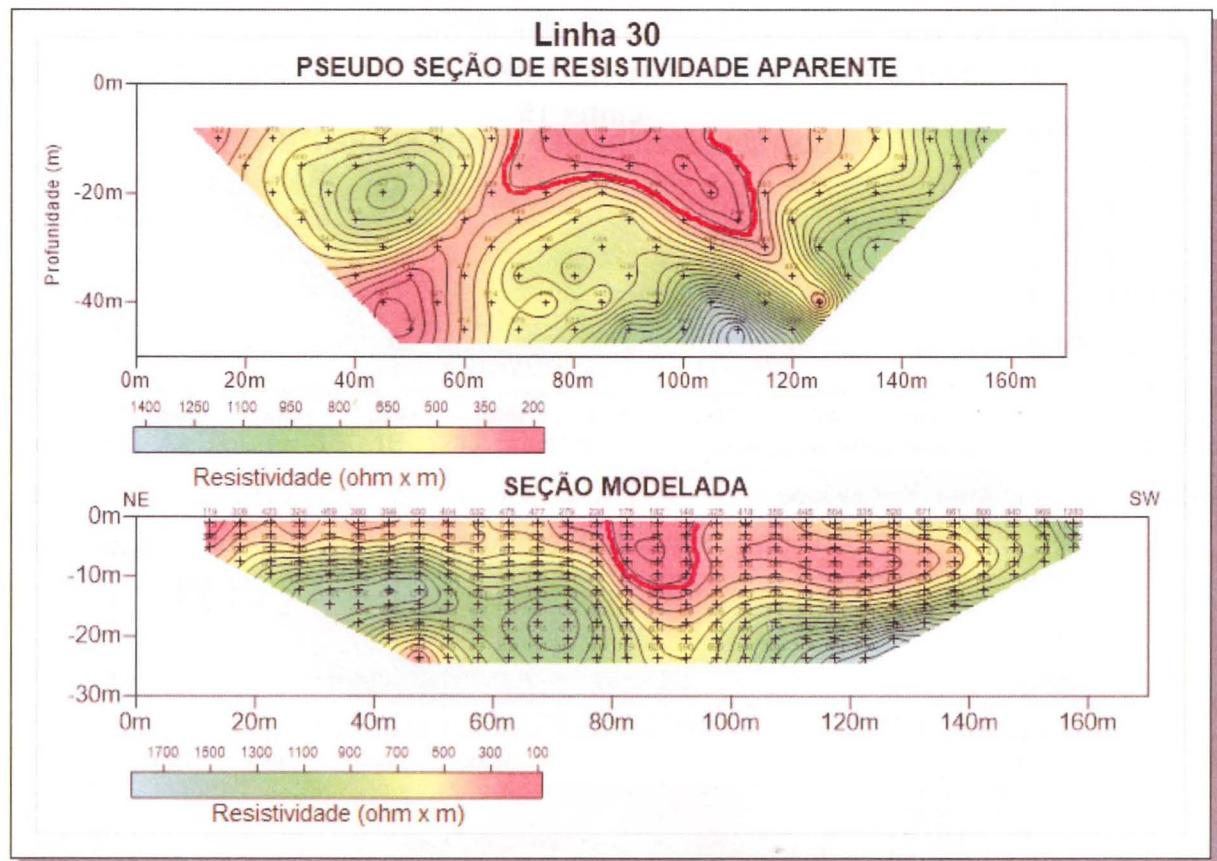


Figura 17 - Seção de caminhamento elétrico, (L30).

Observando as figuras 15, 16 e 17 percebe-se uma diferença entre os níveis de investigação entre as pseudo-seções de resistividade aparente para as seções modeladas. Isso se deve ao fato de que as pseudo-seções de resistividade aparente são geradas a partir da profundidade teórica de Hallof (1957), já as seções modeladas são geradas por inversão matemática feita pelo software RES2DINV usam como “default” as profundidades de Edwards (1977), que são aproximadamente a metade das profundidades teóricas estabelecidas por Hallof (1957).

Todas as seções apresentaram comportamentos parecidos onde há o predomínio de resistividades entre 600 a 1100 Ohm x m. Outra característica comum observada é o aumento de resistividade à medida que a profundidade também aumenta. As resistividades apresentam certa estratificação lateral, porém quando estão próximas aos trechos 80-100m e a profundidades baixas mostram uma súbita queda nos valores de resistividades que vão para ordens menores que 200 ohms.m. Essas quedas nos valores de resistividade são reflexos diretos da contaminação local por fluidos enriquecidos em íons, pois se enquadram diretamente com o posicionamento geográfico da lagoa de rejeitos.

Nas pseudo-seções de resistividade aparente é possível observar que a pluma de contaminação apresenta um padrão de comportamento em “V” invertido que lateralmente

varia de 60-120m e atinge profundidades maiores que 20m. Na Linha 30 observa-se uma diminuição no alcance lateral da pluma que fica entre 65-110m e também perde um pouco de seu padrão "V" invertido.

Nas seções modeladas os valores relacionados à contaminação são muito mais restritos do que os valores vistos nas pseudo-seções. Nessas seções não existe o padrão "V" invertido e as contaminações aparecem mais na forma de bolsões. Na Linha 00 a porção mais afetada por fluidos contaminantes está entre 80-100m e tem sua profundidade próxima aos 8m. Na Linha 15 a maior concentração de contaminantes está num bolsão entre 80-95m com profundidade de 7m. Finalmente na linha 30 a porção mais afetada encontra-se entre 80-90m a profundidades entre 5 e 7m.

As baixas resistividades observadas nas extremidades NE das seções estão possivelmente associadas às contaminações das lagoas adjacentes, sendo que mais precisamente à lagoa 2, que é exibida nas Figura 6 e 11. As medições realizadas iniciam-se próximas às zonas de influência desses contaminantes e por isso os dados apresentam essas anomalias a NE.

A título de comparação de resultados, na Linha 00 também foi realizada uma medição utilizando o equipamento Syscal Pro, que tem uma capacidade de coleta de dados muito maior do que o ABEM Terrameter SAS 4000. O objetivo era analisar se ao trabalhar com um equipamento mais antigo poderia haver algum efeito negativo ou discordância nos resultados obtidos, uma vez que o número de pontos levantados no SYSCAL é muito superior. Na figura abaixo temos o resultado obtido pela coleta de dados com o aparelho mais moderno.

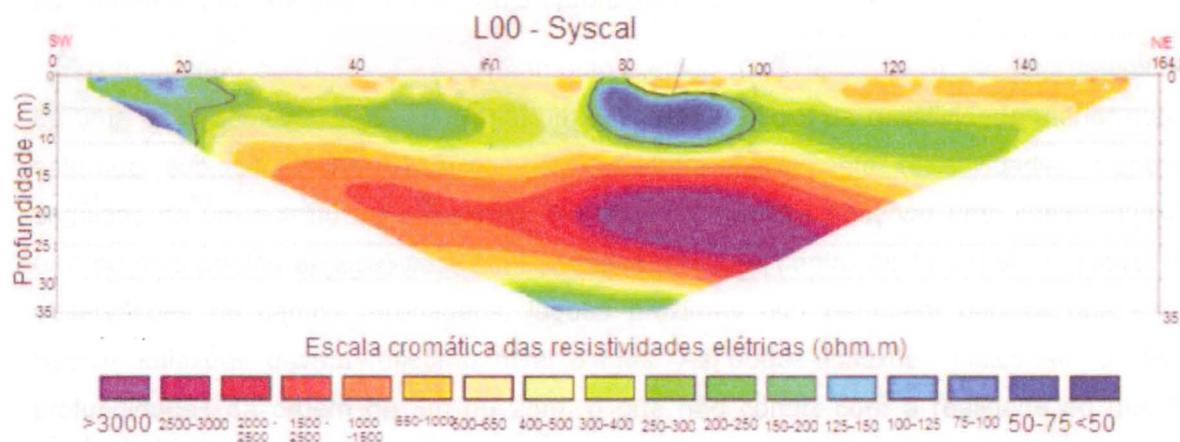


Figura 18 – LINHA 00 obtida com o uso do equipamento SYSCAL PRO (Iris Instrument)

Quando comparada a figura acima (18) com a seção modelada da Linha 00 (figura – 15) percebemos que há uma grande semelhança nos resultados. Em ambas as figuras a

concentração da contaminação está a cima dos 10m de profundidade. Nas duas imagens é possível notar que a pluma tem aproximadamente 20m de extensão e formas parecidas. Sendo assim, conclui-se que ao utilizar o equipamento Terrameter SAS 4000 o resultado obtido será muito semelhante aos resultados obtidos em equipamentos mais modernos. A diferença maior está na agilidade do levantamento de dados, o que em trabalhos comerciais extensos pode fazer alguma diferença.

### 7.2.1. Mapas 2d de investigação

Mapas 2D de diferentes níveis de profundidade da resistividade modelada foram elaborados para facilitar a visualização do comportamento em profundidade da pluma de contaminação. Esses dados são mostrados na figura 18.

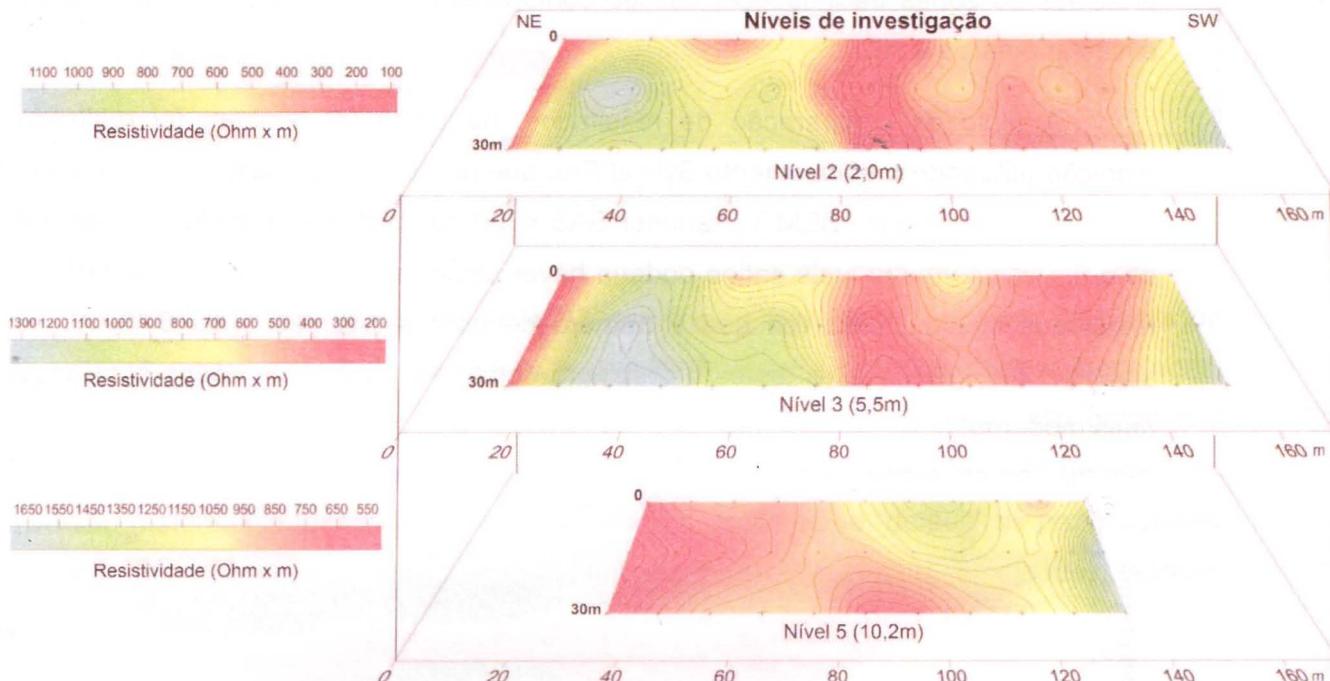


Figura 19 - Mapas de níveis de investigação

Na imagem observa-se que as zonas anômalas, de resistividade baixa, estão posicionadas em frente à lagoa 01. O efeito da contaminação tem aproximadamente 20m extensão e é mais efetivo a profundidades baixas.

Observando-se o comportamento das resistividades baixas associadas à contaminação, verifica-se que a mesma é mais rasa na linha 00, mais profunda na linha 15 e mais ainda na linha 30. A figura 18 busca sintetizar este comportamento tridimensional.

As baixas resistividades na extremidade NE são reflexos da contaminação oriunda da lagoa 02. No nível 5 a contaminação decorrente desta lagoa passa a sofrer um espalhamento. Nota-se que as resistividades não são tão baixas quanto àquelas causadas pela lagoa 1 (ao centro) o que indica que a contaminação neste local pode ser menos intensa.

## 8. CONCLUSÃO

Ao término deste trabalho chega-se à conclusão de que o método geofísico da eletrorresistividade é de suma importância para avaliações acuradas, rápidas e de baixo custo. As duas técnicas, CE e SEV, mostraram-se adequados para o tipo de pesquisa em que foram usados. Ambas chegaram a resultados pertinentes com o que era esperado.

No caminhamento elétrico os dados mostraram que realmente há uma contaminação local, pois nas três linhas de caminhamento observa-se plumas de baixa resistividade, o que sugere contaminação. As plumas quando mais próximas às lagoas mostraram-se mais concentradas e com extensão aproximada de 20m. Nas porções mais distais foi possível perceber um espalhamento do contaminante possivelmente causado por diluição do mesmo no lençol freático que gera dispersão do fluido. Devido ao fluxo natural de água subterrânea em direção à drenagem o poluente não consegue se concentrar em profundidade, o que gera menos dano em profundidades maiores.

As sondagens elétricas verticais possibilitam aferir a profundidade do nível de água subterrâneo que está abaixo dos 11m de profundidade.

Comparando os dados do caminhamento elétrico (CEs) com as SEVs, aparentemente há uma discrepância. Os CEs indicam um estrato superficial de resistividade menor que o saturado subjacente. As SEVs também mostram inicialmente resistividades menores seguidas de um estrato mais resistivo. No entanto, pode-se observar uma leve inflexão (um ou dois pontos apenas) para resistividades menores dentro deste estrato resistivo. As observações de campo (drenagens, lagoas próximas etc) permitem deduzir que estas leves inflexões devem refletir o nível d'água. As outras inflexões indicariam o NA a profundidades da ordem de 3m ou 25m, o que não condiz com a realidade do que foi observado em campo.

Vale lembrar que os métodos podem apresentar pequenos erros e variações pois são adquiridos de maneira indireta e sendo assim estão sujeitos a ruídos e interferências tais como presença de peças ou outro tipo de objetos soterrados e etc.

Por fim chegasse à conclusão que os dois métodos atenderam às expectativas e foram fundamentais para este trabalho. E que os dados aqui apresentados são livres e que poderão vir a ser utilizados no futuro para novos estudos na área.

## 9. REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BECEGATO, V. A., STEFANATO, R., FERREIRA, F. J. F., CUNHA, J. U., CABRAL, J. B. P. 2009. Investigações geofísicas aplicadas no lixão desativado do município de Saudade do Iguaçu – SP. *Revista Geográfica Acadêmica* v.3, n.1, 9p.
- CAMARGO, P.E.E., 2013. Métodos geoelétricos aplicados à investigação de pluma de contaminação proveniente de depósito de carcaças de animais em Pirassununga-SP, Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 23p.
- EDWARDS, L. S. A modified pseudo-section for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, v.3, p.78-95, 1977.
- GALLAS, J. D. F., 2000. Principais Métodos Geoelétricos e Suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, UNESP (Rio Claro). 174p.
- GALLAS, J. D. F., SANTORO, E., MESQUITA, N. N., DINIZ, H. N., SOUZA, L. A. P., Ensaios geofísicos em apoio ao diagnóstico de recalque de solo em área urbana ocorrido no município de Taubaté – SP. In: XXXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. p. 7. 2000.
- GALLAS, J. D. F., et al. Métodos e técnicas geoelétricos rasas na delimitação de área afetada por ruptura e, teto de túnel urbano. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, v 19, n. 1, p 33-46, Abril 2001
- GALLAS, J. D .F., TAIOLI, F., SILVA, S.M.C.P., COELHO, O.G.W. & PAIM, P.S.G., Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(1): 51-59, 2005.
- GANDOLFO, O. C. B., 2007. Um estudo do imageamento geoelétrico na investigação rasa. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 215p.
- HALLOF, P.G., 1957. On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. Ph.D. Thesis, MIT, Cambridge.
- MASSOLI, M, 1983. Geologia da folha de Piraçununga, SP. *Rev. Inst. Geol.*, jan./dez., vol.4, no.1-2, p.25-51.

MILANI, E.J., RAMOS, V.A., 1998. Orogenias Paleozóicas no domínio Sul-Occidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Rev. Bras. de Geociências*, dez., 28(4):473-484.

ORELLANA, E. *Prospección geoelectrica encorriente continua*. Madrid: Paraninfo, 523p, 1972.

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

ZALÁN, P. V., MANTOVANI, S.M., QUINTAS, M. C. L., Contribuição ao estudo da evolução da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 29 (2): 217-226, 1999.

