

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

MÉTODOS GEOELÉTRICOS APLICADOS A INVESTIGAÇÃO DE
PLUMA DE CONTAMINÇÃO PROVENIENTE DE DEPÓSITO DE
CARCAÇAS DE ANIMAIS EM PIRASSUNUNGA-SP

Paulo Eduardo Esteves de Camargo

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

Co-orientador: Dr. Fernando Augusto Saraiva

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2013/39)

SÃO PAULO

2013

TF
C172
PEE.m
e.2

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

MÉTODOS GEOELÉTRICOS APLICADOS A INVESTIGAÇÃO DE
PLUMA DE CONTAMINÇÃO PROVENIENTE DE DEPÓSITO DE
CARCAÇAS DE ANIMAIS EM PIRASSUNUNGA-SP

Paulo Eduardo Esteves de Camargo

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

Co-orientador: Dr. Fernando Augusto Saraiva



MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2013/39)

DEDALUS - Acervo - IGC



30900031965

SÃO PAULO

2013

De acordo:

prof. Dr. Faraco Gallas
Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

Paulo Eduardo Esteves de Camargo
Paulo Eduardo Esteves de Camargo

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. José D. F. Gallas por todo apoio e suporte em todas as etapas do Trabalho de Formatura estando sempre presente e com grande disponibilidade para o atendimento de dúvidas e revisões dos textos do Projeto Inicial, Relatório de Progresso e Monografia. Por toda a ajuda no processamento dos dados e utilização de programas de inversão de dados.

Ao meu co-orientador Dr. Fernando Augusto Saraiva por toda ajuda e suporte na elaboração do trabalho em todas as etapas principalmente na aquisição dos dados e aplicação dos métodos empregados neste trabalho de formatura.

Ao meu amigo Diego Daniel Silva mestrando na área de Geofísica que me ajudou muito no tratamento e inversão dos dados estando sempre disponível para me auxiliar.

Aos meus amigos em geral que de alguma forma me incentivaram e me ajudaram em alguma parte dessa jornada.

À minha família que sempre me deram todo apoio e incentivo fazendo com que eu nunca pensasse em desistir.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
Localização.....	2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
Geologia Regional.....	3
Geologia Local	3
Trabalhos anteriores.....	5
METODOLOGIA.....	7
Eletrorresistividade.....	7
Caminhamento Elétrico (arranjo dipolo-dipolo).....	7
Sondagem Elétrica Vertical (SEV).....	8
MATERIAIS E MÉTODOS	9
Aquisição dos dados	9
Processamento dos dados.....	11
RESULTADOS OBTIDOS	12
INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	19
CONCLUSÕES.....	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20
ANEXO	23
SEÇÕES MODELADAS DE RESISTIVIDADE	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A,B = eletrodos de correntes

M,N = eletrodos de potencial

ΔV = diferença de potencial

I = intensidade de corrente

K = coeficiente geométrico

L = espaçamento ou abertura entre eletrodos de corrente e potencial

n = níveis de investigação

SEV = sondagem elétrica vertical

RMS = *root mean square*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Localização da área de trabalho, modificado de Google earth 2013.....	2
Figura 3. Arranjo do tipo dipolo-dipolo (Gallas, 2000).	8
Figura 4.Arranjo do tipo Schlumberger (Gallas, 2000).....	9
Figura 5.Equipamento Terrameter 300B.	10
Figura 6.Localização dos perfis de levantamento de dados, modificado de Google earth 2013.....	10
Figura 7. Resistivímetro multieletrodo marca IRIS, modelo Syscal Switch Pro.....	11
Figura 8. Localização das SEVs, dos caminhamentos elétricos na área estudada.	13
Figura 9. Resultados da SEV 1 próxima à cava.	13
Figura 10. Resultados da SEV 2.....	14
Figura 11. Resultados da SEV 3.....	14
Figura 12. "bad data" removidos.	15
Figura 13. Seção medida, calculada e modelada do perfil A.....	16
Figura 14. Seção medida, calculada e modelada do perfil B.	16
Figura 15. Seção modelada Perfil A e B.....	18

RESUMO

Os problemas ambientais relacionados às águas subterrâneas têm mostrado bastante importância nos últimos anos, principalmente os relacionados à percolação de chorume e, mais recentemente, de necrochorume. Sendo assim, um crescente número de estudos vêm sendo realizados tanto na caracterização dos contaminantes originados destas substâncias quanto no comportamento destes no solo. Para o estudo do comportamento destes poluentes, os métodos geofísicos, em especial os elétricos, têm apresentado resultados satisfatórios. Este trabalho de formatura empregou a eletrorresistividade com a técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV), e a técnica do Caminhamento Elétrico a jusante de uma cava destinada à deposição de carcaças de animais no campus da Universidade de São Paulo em Pirassununga-SP. O objetivo foi o de encontrar e interpretar valores anômalos de resistividade e então relacioná-los a possível contaminação. As SEVs foram aplicadas para a caracterização dos estratos e possíveis estruturas horizontais do subsolo, principalmente a determinação do nível freático. O caminhamento elétrico foi utilizado para determinação de variações ao longo de perfis e, assim, determinar a extensão lateral das anomalias, através da medição da resistividade elétrica do solo. Como o necrochorume possui sais dissolvidos em sua composição, sua presença faz com que a resistividade do solo diminua significativamente em relação às regiões sem contaminantes. Os níveis do aquífero freático obtidos a partir dos dados das SEVs foram condizentes com os dados de um poço de monitoramento na área estudada. Quanto às seções geradas a partir do Caminhamento Elétrico, estas apresentaram locais com baixas resistividades e foram interpretadas como correlacionáveis à contaminação por necrochorume proveniente das carcaças depositadas na cava.

ABSTRACT

The environmental problems related to groundwater have been of great importance in the last few years, mainly those related to the percolation of leachate and, more recently, necroleachate. Therefore, an increasing number of studies have been done in order to gather more information about the characteristics of the contaminants from these substances as well as the behavior of these contaminants in the ground. To study the behavior of these pollutants, the geophysical methods, especially the electrical ones, have shown satisfactory results. For this graduation paper, the following techniques have been applied: electrical resistivity with Vertical Electrical Sounding (VES) and Laying of Cables downstream a cave aimed at depositing animal carcasses on the University of São Paulo campus. The objective of this study was to find and interpret anomalous resistivity values and then relate them to the possible contamination. VES has been applied to characterize strata and possible underground horizontal structures, and to determine of the level of groundwater. Laying of Cables was used to determine the variations throughout a sections and thus determine the side extension of the anomalies by measuring the electrical resistivity of the ground. Since necroleachate has salts dissolved in its composition, its presence makes the ground resistivity decrease significantly in relation to the region free of contaminants. The levels of the groundwater aquifers obtained from VES data match the data from a monitoring well in the area studied. The sections generated by Laying of Cables presented sites with low resistivity and were interpreted as correlated to the contamination by necroleachate from the carcasses deposited in the cave.

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O gerenciamento de recursos hídricos no Brasil privilegiou o aproveitamento de águas superficiais ao invés das águas subterrâneas por motivos culturais, econômicos e tecnológicos. Devido ao uso indiscriminado e ao aumento da poluição das águas superficiais, verifica-se uma maior atenção para o aproveitamento das águas subterrâneas e consequentemente as fontes poluidoras destas, Peixinho (1997).

Segundo Manoel Fº (1997), diversas são as fontes poluidoras de águas subterrâneas relacionadas ao meio antrópico como atividades industriais, domésticas e agrícolas. Há também outros meios de contaminação menos perceptíveis, porém, com grande potencial que são os cemitérios e as áreas destinadas à disposição de carcaças de animais, sendo esta última a abordada neste estudo.

O corpo humano após a morte sofre inúmeras transformações realizadas por bactérias e enzimas. Esse conjunto de modificações é denominada putrefação e tem como resultado a dissolução gradual dos tecidos em gases, líquidos e sais, Matos (2001). O mesmo se aplica para outros animais.

O necrochorume é o nome dado ao líquido gerado pela decomposição dos corpos e é desta forma que a contaminação pode atingir o aquífero. Este líquido possui cor castanho-acinzentado, textura viscosa, odor forte, grande quantidade de sais, agentes patogênicos e pode percolar o solo junto com a água das chuvas, Matos (2001).

Segundo Gandolfo (2007), a grande diferença entre os valores da resistividade do necrochorume e o meio natural favorece o uso de métodos geoelétricos que são mais práticos na aquisição de dados, realizam leituras em diversas profundidades e por se tratar de um métodos indiretos os custos são menores.

Este trabalho de formatura teve como objetivo identificar valores anômalos de resistividade do subsolo que possam estar relacionados à contaminação por necrochorume proveniente de carcaças de animais abatidos e usados em experimentos do curso de veterinária da Universidade de São Paulo no campus da USP de Pirassununga – SP. Para isso foram utilizados métodos geofísicos de eletrorresistividade com as técnicas da sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo.

Localização

O local onde foi executado o trabalho de campo está situado no município de Pirassununga, mais especificamente no campus da USP na região Leste-Nordeste do Estado de São Paulo, cujas coordenadas são, 21°56'21" Sul e 47°27'35" Oeste.

A área de estudo está a cerca de 210 Km do município de São Paulo e o principal acesso se dá pela Rodovia Anhanguera (SP-330).

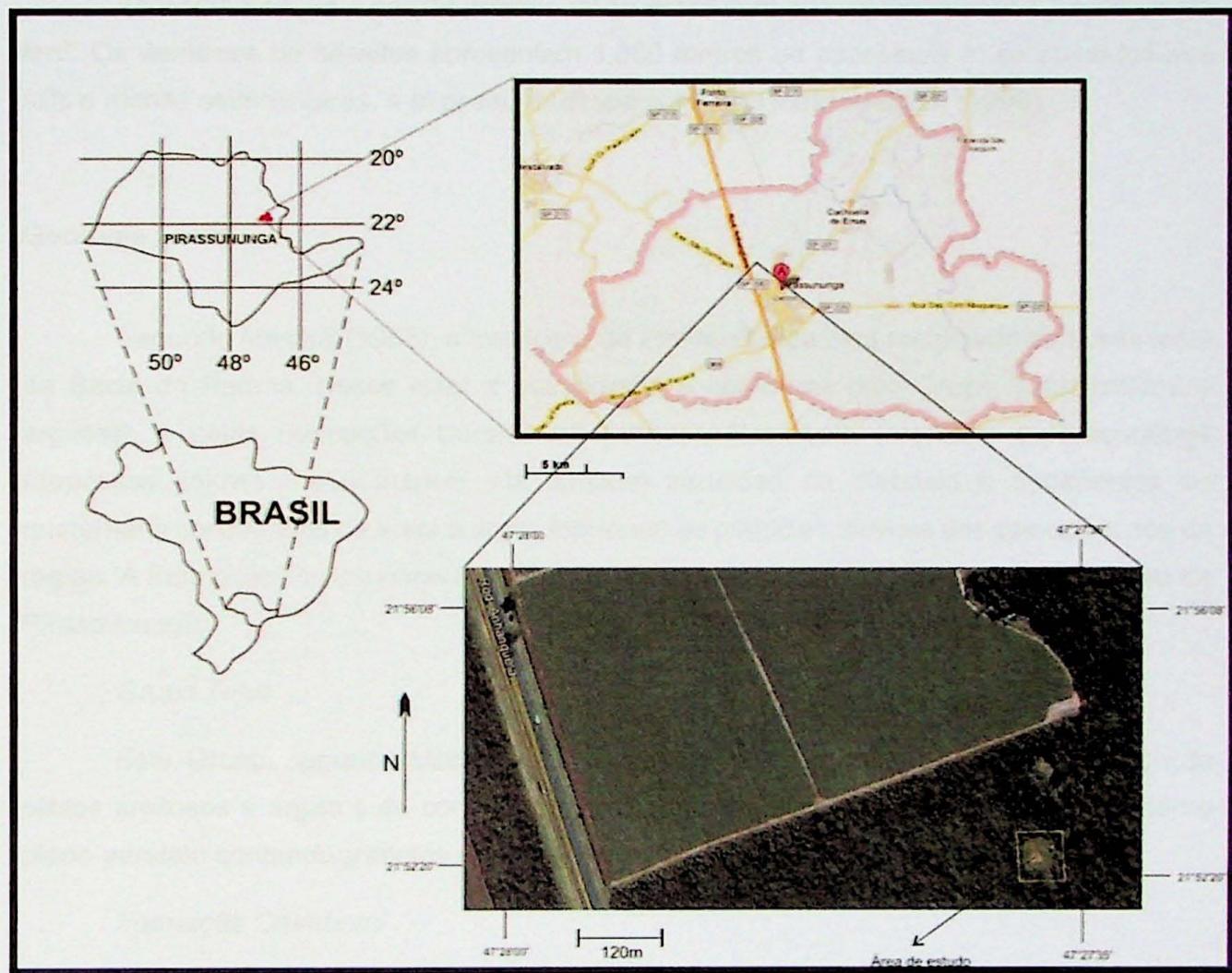


Figura 1-Localização da área de trabalho, modificado de Google earth 2013.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Geologia Regional

A área estudada está inserida na borda leste da Bacia do Paraná que, segundo Zalán (1999), é uma bacia do tipo intracratônica com acumulação de rochas sedimentares e vulcânicas cujas idades vão desde o Ordoviciano até o Cretáceo.

Esta Bacia ocupa a porção meridional do Brasil com aproximadamente 1,1 milhões de km². Os derrames de basaltos apresentam 1.300 metros de espessura e, se somados aos sills e rochas sedimentares, a espessura ultrapassa 6.000 metros, Zalán (1999).

Geologia Local

Segundo Massoli (1983), o município de Pirassununga está localizado na borda leste da Bacia do Paraná. Nesse local a estratigrafia é composta pelo Grupo Tatuí (siltitos e argilitos), e pelas Formações Corumbataí (siltitos), Pirambóia (arenitos) e Piraçununga (depósitos colúvio - eluvionares). Há também intrusões de diabásio e sedimentos do quaternário constituídos de areia e argila formando as planícies aluviais dos principais rios da região. A Formação Piraçununga e o diabásio cobrem a maioria do território do município de Pirassununga.

Grupo Tatuí

Este Grupo, segundo Massoli (1983), é caracterizado na região pela presença de siltitos argilosos e argilitos de cor marrom chocolate, de estrutura maciça ou acamamento plano-paralelo contendo grânulos e seixos esparsos predominantemente de quartzo.

Formação Crumbataí

A Formação Corumbataí é constituída por siltitos e argilitos com cores marrom, rosa, creme, cinza e às vezes esverdeados com estrutura maciça ou com acamamento plano-paralelo e faturamento conchoidal. Essas rochas podem intercalar arenitos finos, argilitos e siltitos carbonáticos formando camadas centimétricas. Há também camadas milimétricas de argilitos com presença de gretas de contração intercaladas com siltitos indicando variações nos paleoclimas, Massoli (1983).

Formação Pirambóia

Segundo Caetano-Chang (2003), a Formação Pirambóia estende-se de maneira contínua pelo Estado de São Paulo por toda depressão periférica paulista, com gênese sedimentar dominantemente fluvial.

Na região de Pirassununga essa formação é constituída por arenitos finos a muito finos de coloração rosada com grãos mal selecionados pouco argilosos com estrutura maciça ou estratificada, Massoli (1983).

Formação Piraçununga

É constituída por sedimentos de coloração castanho clara com ausência de estruturas sedimentares, areno-argilosos e mal selecionados. Na porção basal geralmente há uma linha de seixos de quartzo, quartizito e limonita sobrepostos discordantemente sobre a Formação Corumbataí.

A figura 2 mostra o mapa geológico do município de Pirassununga.

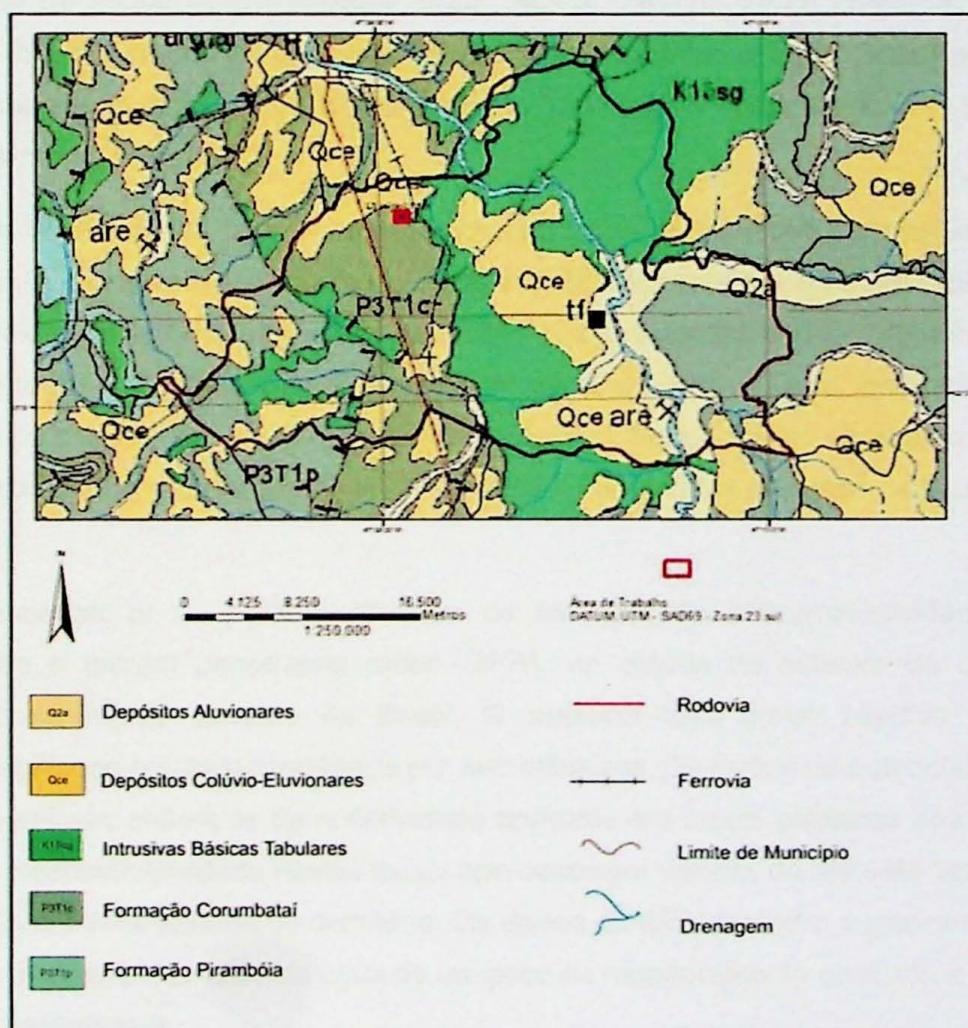


Figura 2. Mapa Geológico de Pirassununga. Modificado de IPT, 1981.

Trabalhos anteriores

Os métodos de prospecção indireta, como os métodos geoelétricos, são amplamente abordados em estudos aplicados e acadêmicos, principalmente em situações relacionadas à contaminação de água subterrânea devido a sua praticidade no geral e na qualidade dos resultados obtidos.

Mendes (1987) apresentou sua tese de doutorado cujo tema abordado foram as técnicas de geofísica aplicada no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas, utilizando métodos de eletrorresistividade e eletromagnético. Este trabalho foi um dos primeiros a utilizar métodos geofísicos no estudo de contaminação de aguas subterrâneas.

Pacheco et al.(1991) monitoraram as características bacteriológicas do lençol freático em três cemitérios escolhidos a partir de critérios geológicos e hidrogeológicos demonstrando o potencial de contaminação desses locais. Nesse trabalho foram coletadas também 67 amostras da área interna do cemitério. Os cemitérios escolhidos foram: Vila Formosa e Vila Nova Cachoeirinha, localizados no município de São Paulo e Areia Branca em Santos – SP, respectivamente.

Elis (1999) avaliou a aplicabilidade dos métodos geoelétricos para estudos de áreas destinadas à disposição de resíduos. Este trabalho apresentou diversas aplicações dos métodos elétricos assim como suas limitações. Os resultados obtidos demonstraram que esses métodos podem estabelecer grande base de dados, são práticos, facilmente manuseados e ágeis na aquisição de dados em campo. Sendo assim, o trabalho concluiu que esses métodos têm grande potencial de aplicação nos estudos de áreas para disposição de resíduos.

Bastianon et al. (2000) aplicaram os métodos de eletrorresistividade, potencial espontâneo e *ground penetrating radar* (GPR), no estudo do subsolo de um cemitério localizado na região sudeste do Brasil. O trabalho teve como objetivo investigar a contaminação das águas subterrâneas por necrochoume. Os dados de potencial espontâneo indicaram valores anômalos de resistividade aparente em locais próximos aos túmulos. Os dados de eletrorresistividade nestes locais apresentaram valores de até sete vezes menores em relação a outros lugares do cemitério. Os dados do GPR também sugeriram a presença de contaminantes e a análise da água de um poço de monitoramento detectou a presença de bactérias patogênicas.

Braz et al.(2000), através do método de eletrorresistividade com o arranjo Wenner, identificaram a direção e o sentido da pluma de contaminação por necrochorume na área do cemitério São José localizado no município de Belém – PA. Dessa forma, concluiu-se que as

águas migram em direção aos poços freáticos existentes em residências localizadas ao lado do cemitério, o que os tornam impróprios tanto para potabilidade quanto para balneabilidade.

Matos (2001) avaliou a ocorrência e o transporte de microrganismos no aquífero freático do cemitério Vila Nova Cachoeirinha localizado na zona norte do município de São Paulo. Esse trabalho mostrou que as amostras de água do aquífero possuíam bactérias e vírus provenientes das sepulturas e que a condutividade elétrica do solo aumentava principalmente próximo aos túmulos com menos de um ano e que estão localizados na região de menor cota e mais próximos do aquífero. O trabalho foi dividido em etapas de laboratório e de campo, onde foram usadas técnicas geofísicas de investigação como sondagem elétrica vertical e caminhamento eletromagnético.

Gallas *et al.* (2005) tiveram como objetivo detectar anomalias ou assinaturas geofísicas que pudessem estar relacionadas à pluma de contaminação no subsolo e no lençol freático oriunda de uma aterro sanitário a montante da área estudada localizada no município de Londrina-PR. Os resultados obtidos foram satisfatórios, ou seja, detectaram anomalias, podendo assim mapear a possível pluma de contaminação.

Lago *et al.* (2006) mostraram a potencialidade de métodos geofísicos como eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo para a caracterização geoambiental da área do aterro sanitário da cidade de Bauru – SP. Os resultados obtidos mostraram que a aplicação conjunta dos métodos eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo possui um grande potencial na caracterização geoambiental da área tornando possível a identificação da pluma de contaminação e a orientação na locação de investigações por métodos diretos.

Castro (2008) utilizou sondagens elétricas verticais (SEVs), GPR e EM-34 para obter a caracterização hidrogeológica da região do cemitério Bom Jardim no município de Fortaleza – CE. Nesse caso, o levantamento multidisciplinar permitiu a caracterização do substrato rochoso em diferentes níveis de investigação e diferentes resoluções. A rocha não alterada e o regolito sobrejacente foram caracterizados pelas SEVs e pelos perfis eletromagnéticos e as camadas mais superficiais pelo GPR. O resultado não foi conclusivo para a detecção de necrochorume devido ao baixo volume desse líquido e a influência de contaminação do aquífero por fossas sépticas da região.

Silva *et al.* (2009) aplicaram o método da eletrorrestividade para e delimitação de áreas potencialmente impactadas por necrochorume no cemitério municipal de Vila Rezende em Piracicaba – SP. Nesse local as condições para a percolação do necrochorume são desfavoráveis devido à predominância de material argiloso. Porém, as condições são favoráveis para a ocorrência do fenômeno conservativo de saponificação e expansão lateral da pluma de contaminação. Este trabalho concluiu que a eletrorrestividade é uma importante

metodologia indireta para a avaliação da contaminação em cemitérios e principalmente na investigação e delimitação de plumas de contaminação.

Saraiva (2010) empregou os métodos de eletrorresistividade, eletromagnético e o georadar comparando seus resultados no acompanhamento da formação da pluma de contaminação por necrochorume proveniente de carcaças de animais em área vizinha do atual estudo, demonstrando ampla superioridade do método de eletrorresistividade sobre os outros.

METODOLOGIA

Eletrorresistividade

Existem muitos métodos de levantamento elétrico, sendo que alguns usam campos do interior da Terra e outros que utilizam correntes geradas artificialmente. O método de eletrorresistividade é usado no estudo de descontinuidades horizontais, verticais e também na detecção de corpos tridimensionais com condutividade elétrica anômala. É amplamente usado em investigações na engenharia, hidrogeologia e geologia ambiental, Kearey *et al*, (2009).

Segundo Costa (2012), os minerais presentes no solo possuem propriedades elétricas como potencial elétrico, condutividade elétrica e resistividade elétrica. Dentre essas, a resistividade elétrica é a mais relevante, pois é a propriedade que apresenta maior variação a ser medida.

A prospecção elétrica, segundo Costa (2012), fundamenta-se nos efeitos produzidos pela passagem de uma corrente elétrica gerada artificialmente através de solos e rochas. Essa corrente (I) é transmitida por um par de eletrodos A e B ligados a um emissor. Após feito isso é realizada a medida da diferença de potencial (ΔV) entre dois eletrodos M e N.

Segundo Kearey *et al*, (2009), os instrumentos de levantamento de resistividade são projetados para medir a resistividade do solo, que é dada pela fórmula $\rho = K \left(\frac{\Delta V}{I} \right)$. Neste caso “K” é um coeficiente que depende do arranjo utilizado nos eletrodos e é determinado pela fórmula genérica, $K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$.

Caminhamento Elétrico (arranjo dipolo-dipolo)

Segundo Gandolfo (2007), o arranjo dipolo-dipolo é o mais utilizado entre os inúmeros arranjos existentes.

Neste arranjo, segundo Gallas (2000), é possível estudar variações laterais no subsolo, sendo aplicável para detecção de contatos geológicos verticais ou inclinados, diques, mineralizações falhas e/ou fraturas. Outra aplicação é a caracterização de aquíferos e de depósitos de areia e cascalho, delineando seus limites.

O caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo consiste no alinhamento dos eletrodos de corrente A e B e dos eletrodos de potencial ou recepção M e N em um mesmo perfil. Sendo assim, esse arranjo é definido pelos espaçamentos $L=AB=MN$. Nesse caso, as medidas são feitas em vários níveis de investigação ($n=1,2,3\dots$) e interpoladas, tornando possível a elaboração de uma pseudo-seção de resistividade aparente.

A figura 3 ilustra o quadripolo ABMN no arranjo dipolo-dipolo.

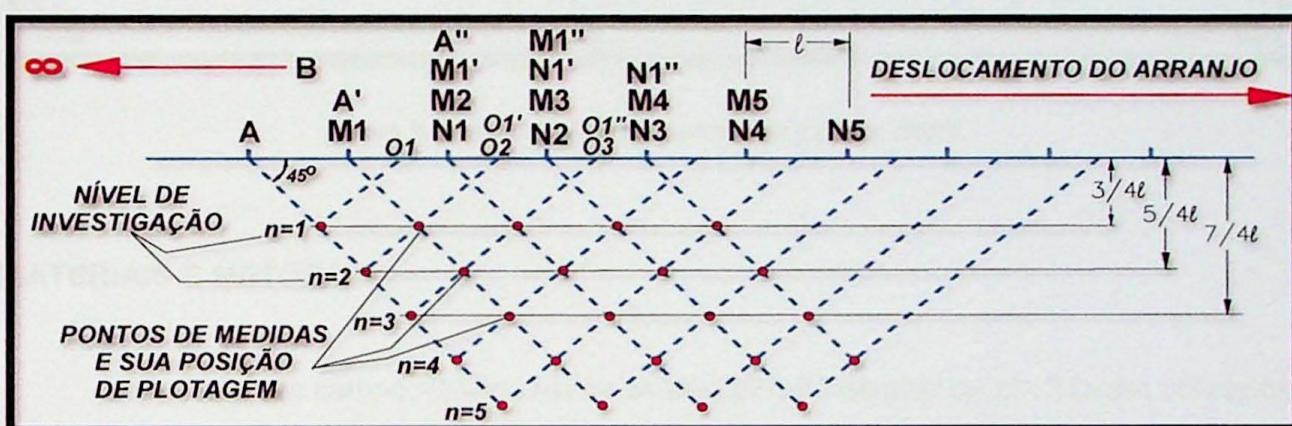


Figura 2. Arranjo do tipo dipolo-dipolo (Gallas, 2000).

Segundo Gandolfo (2007), neste arranjo os dados são obtidos através de uma série de medidas mantendo-se o espaçamento dos dipolos de emissão (AB) e recepção (MN) e afastando os eletrodos de recepção (MN) dos de emissão (AB).

Quanto maior o afastamento entre os dois tipos de eletrodos, maior é a profundidade de investigação onde o limite de valor aceitável das leituras de potencial são aquelas superiores ao nível de ruído presente no local, Gandolfo (2007).

Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

Essa técnica é utilizada para o variação vertical efetuada através das medidas das resistividades abaixo do ponto estudado. Na SEV, com arranjo Schlumberger, o centro do quadripolo (eletrodos de potencial, M e N na Figura 4) é mantido fixo à medida que os

eletrodos de corrente (A e B na Figura 4) se afastam. Com o aumento da distância entre os eletrodos, a corrente elétrica circulará a profundidades maiores que nas medições anteriores. Nesse arranjo a profundidade investigada varia aproximadamente entre 1/4 a 1/10 da distância entre os eletrodos de corrente.

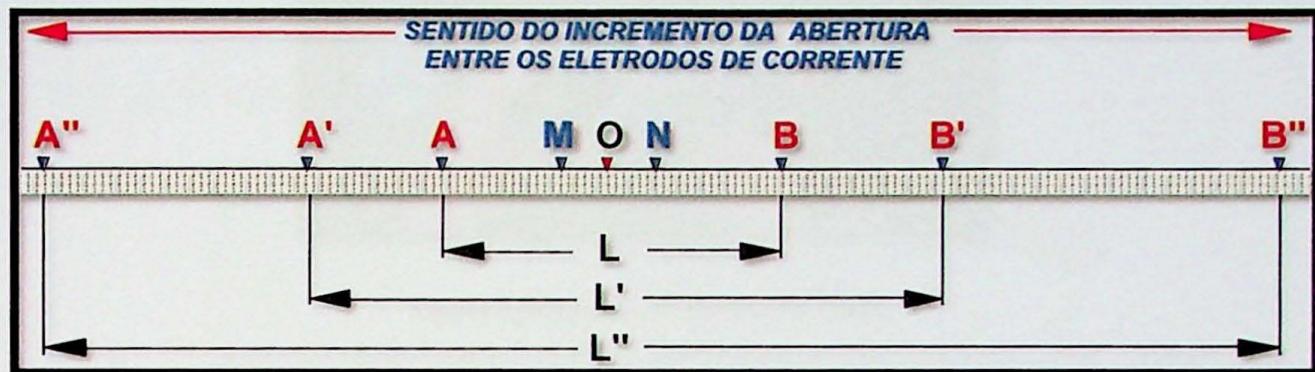


Figura 3. Arranjo do tipo Schlumberger (Gallas, 2000).

MATERIAIS E MÉTODOS

No trabalho de campo realizado entre os dias 22 a 25 de abril de 2013 foram utilizados os equipamentos Terrameter SAS 300B para execução de sondagens elétricas verticais (SEV) e o resistivímetro multieletrodo marca IRIS, modelo Syscal Switch Pro®, com 48 canais para o caminhamento elétrico. Os dados foram tratados e processados pelos softwares RES2DINV e SURFER 8.0.

Aquisição dos dados

Os dados foram obtidos próximos à cava destinada à disposição de carcaças de animais de modo a caracterizar da melhor maneira a área estudada. Sendo assim, foram realizadas três sondagens elétricas verticais (SEVs), SEV 1, SEV2 e SEV3 com o arranjo *Schlumberger* para a determinação do nível da água subterrânea e outras possíveis caracterizações geoelétricas. Para a coleta de dados de resistividade foi utilizado o aparelho Terrameter 300B como ilustra a figura 5.

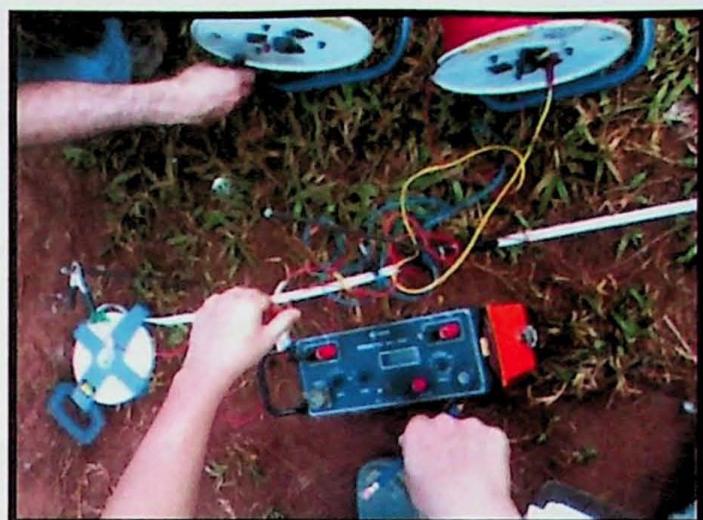


Figura 4. *Equipamento Terrameter 300B.*

Foram efetuados dois perfis de levantamento de dados por caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo. O primeiro perfil (perfil A) teve 180m de extensão e arranjo com 37 eletrodos devido à limitação física ocasionada pela mata e o segundo perfil (perfil B) 240m de extensão e arranjo com 48 eletrodos. Em ambos os casos o espaçamento utilizado entre os eletrodos foi de 5,0m. A Figura 6 mostra a localização dos dois levantamentos em relação à área estuda.

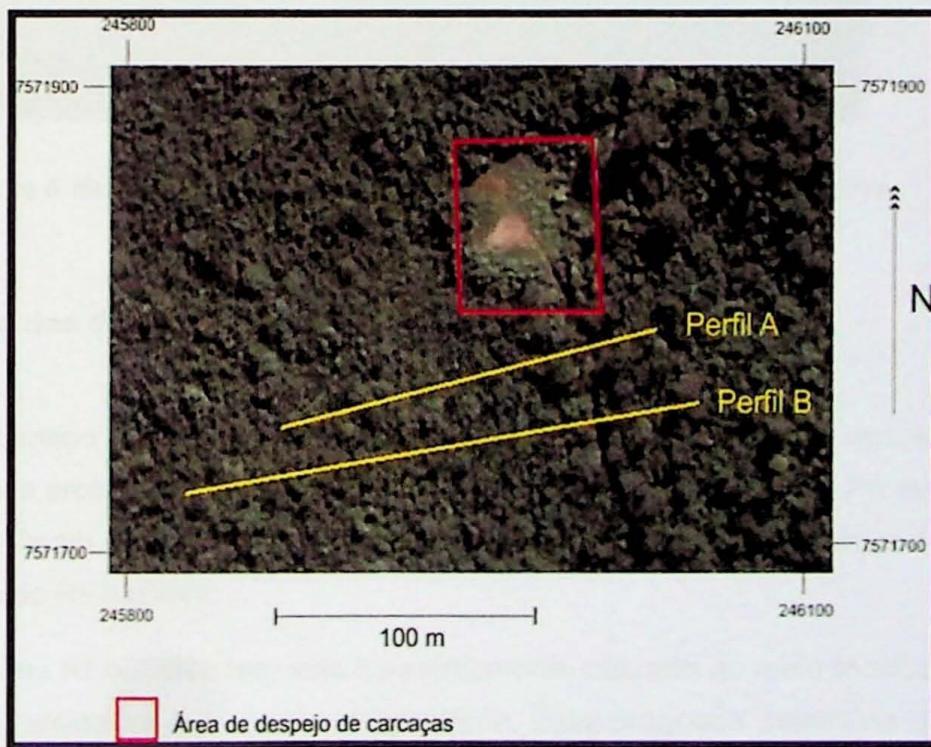


Figura 5. *Localização dos perfis de levantamento de dados, modificado de Google earth 2013.*

Os dados foram obtidos através do resistivímetro multieletrodo marca IRIS, modelo Syscal Switch Pro®, com 48 canais mostrado na figura 7.

Esse aparelho efetua as medidas de maneira rápida e prática sendo possível posicioná-lo no início, meio ou fim do perfil. No caso o aparelho ficou no centro da linha para facilitar o deslocamento do operador em caso de erro na medida em algum eletrodo.

O aparelho ainda permite montar diversos arranjos com até 48 canais cuja programação dos arranjos é feita no computador e posteriormente colocadas no aparelho.

Sendo assim, foram realizadas 525 leituras no perfil A com arranjo de 37 eletrodos e 906 leituras no perfil B com arranjo de 48 eletrodos.



Figura 6. Resistivímetro multieletrodo marca IRIS, modelo Syscal Switch Pro.

Processamento dos dados

Após o término dos levantamentos, os dados foram transferidos do aparelho para o computador. Esse procedimento foi feito por um software próprio da (IRIS), Prosys II. Desta forma, os dados foram exportados em formato DAT e tratados em outro software de inversão de dados chamado RES2DINV.

O programa RES2DINV tem sido frequentemente utilizado no meio técnico-científico por diversas universidades e empresas de geofísica. Esse programa determina de maneira automática um modelo bidimensional (2D) de resistividade elétrica em subsuperfície utilizando os dados obtidos no caminhamento elétrico, Gandolfo (2007).

Segundo Gallas *et al.* (2005), o software RES2DINV é um programa de inversão de dados de resistividade e polarização induzida que adota uma técnica rápida e eficiente baseada no método dos mínimos quadrados e “suavização vinculada” (smoothness-

constrained). Com isso, o RES2DINV é capaz de produzir, teoricamente, um modelo de subsuperfície em duas dimensões sem as distorções das pseudo-seções de resistividade aparente resultantes da geometria do arranjo eletródico utilizado

O programa RES2DINV utiliza dois tipos de métodos dos mínimos quadrados que são o Gauss-Newton padrão (*standard*) e o incompleto. O método Gauss-Newton calcula a solução exata da equação e o incompleto calcula uma solução aproximada, o que o torna mais indicado (rápido) para o processamento de um elevado número de dados, Gandolfo (2007).

Após o processamento dos resultados pelo programa RES2DINV, os dados foram exportados na forma de arquivos XYZ para o software SURFER 8, que é um programa interpolador de dados que permite uma melhor apresentação destes obtidos em campo, Gallas *et al*, (2005). Neste trabalho o SURFER 8.0 utilizou a Krigagem por se tratar de um processo de estimativas por médias móveis, de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes onde uma função denominada *variograma* trata os dados como interdependentes, tornando o modelamento dos dados mais fácil, Sturaro *et al*, (2000).

Os dados obtidos pelas sondagens elétricas verticais (SEVs) foram tratados pelo software IPI2Win. Este programa foi desenvolvido pela Faculdade de Geologia da Universidade Estadual de Moscou, Rússia, para interpretação automática das curvas geradas a partir dos dados das SEVs em diferentes tipos de arranjos como: Schlumberger, Wenner, Dipolo-dipolo e Polo-polo.

RESULTADOS OBTIDOS

A primeira etapa do trabalho de campo foi destinada à execução das sondagens elétricas verticais (SEVs) para determinação do nível da água em subsuperfície e a caracterização vertical do subsolo.

Foram realizadas três SEVs para a determinação do nível d' água, SEV1, SEV2 e SEV3. Vale ressaltar que em alguns pontos o solo estava muito compacto, dificultando a leitura da resistividade pelo aparelho.

A figura 8 mostra a localização das três sondagens elétricas verticais na área de estudo e as linhas de levantamento do caminhamento elétrico.

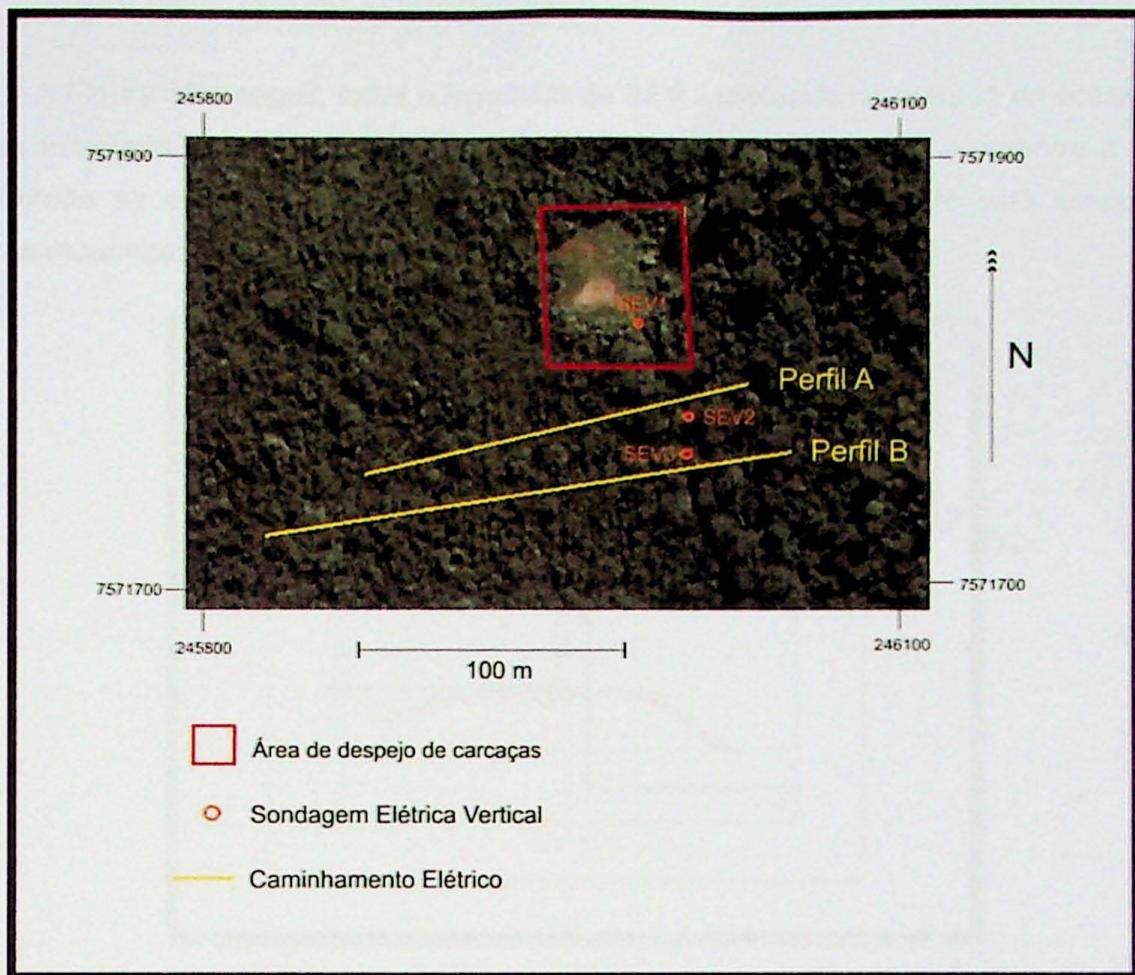


Figura 7. Localização das SEVs, dos caminhamentos elétricos na área estudada.

A Figura 9 abaixo mostra o resultado da SEV1 realizada bem ao lado da cava destinada à disposição das carcaças. A figura exibe duas inflexões, sendo a primeira a 6,3m de profundidade relacionada provavelmente a alguma mudança brusca do subsolo e a segunda a 9,25m e relacionada ao nível da água subterrânea.

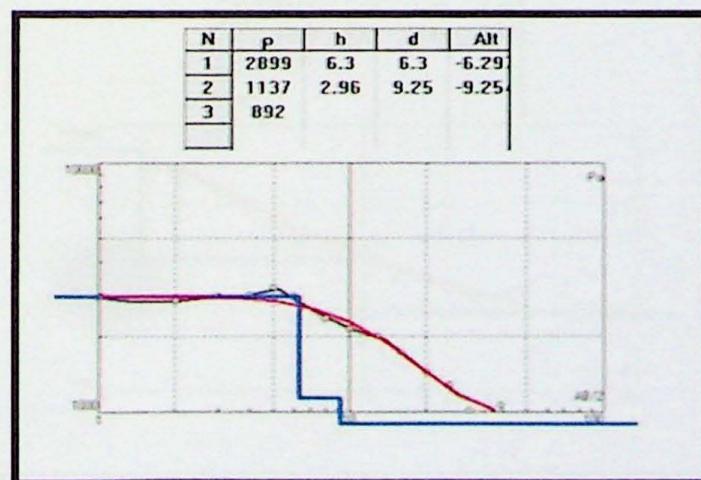


Figura 8. Resultados da SEV 1 próxima à cava.

A Figura 10 a seguir, exibe o resultado da SEV 2 efetuada na estrada de acesso para a área estudada. A imagem também apresenta duas inflexões sendo a primeira a 8,92m, relacionada ao nível freático e a segunda a 12,3m, que possivelmente está associada a alguma mudança de material no solo.

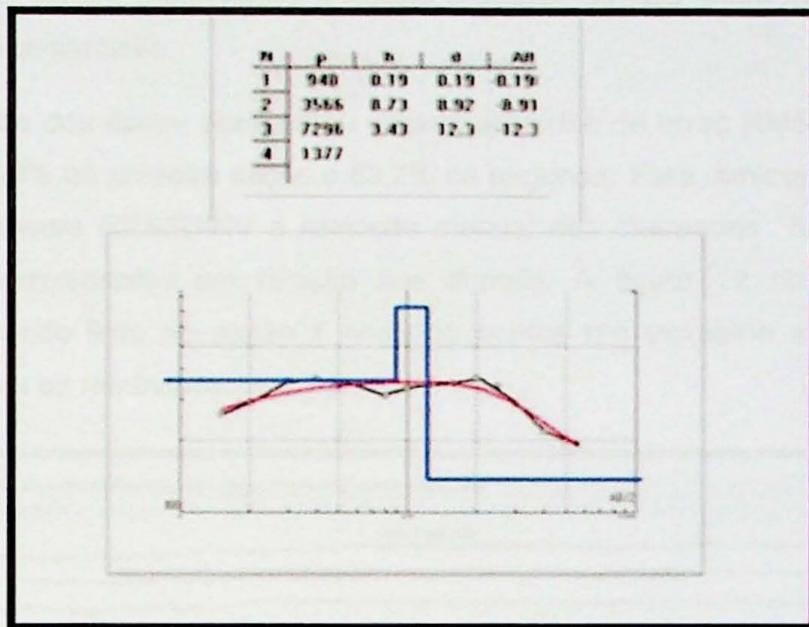


Figura 9. Resultados da SEV 2.

A Figura 11 abaixo exibe os resultados da terceira sondagem elétrica vertical (SEV 3) também realizada na estrada de acesso à área. A imagem apresenta duas inflexões onde a primeira está a 1,48m e deve estar relacionada a alguma interferência e a segunda a 8,78m de profundidade, valor esse próximo aos encontrados nas outras duas SEVs e também relacionada ao nível de água subterrânea.

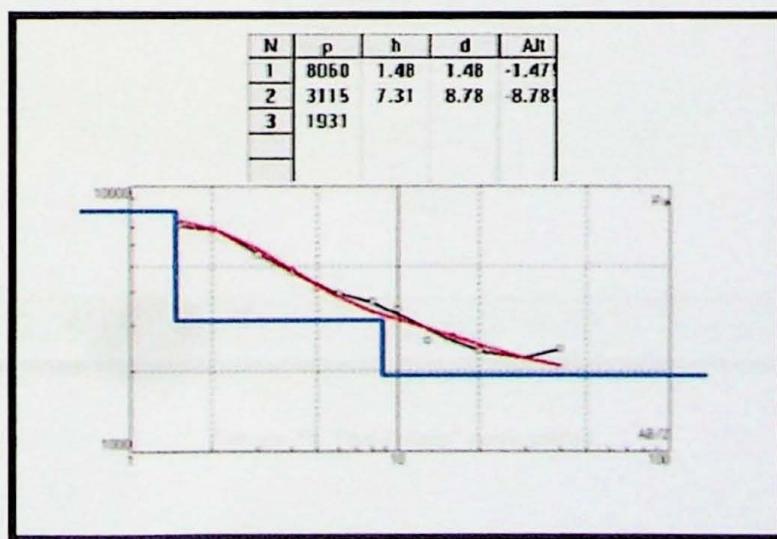


Figura 10. Resultados da SEV 3.

Após realizadas as sondagens elétricas verticais, a segunda parte do trabalho foi destinada à execução do caminhamento elétrico. Nessa etapa foram efetuados dois levantamentos, sendo eles denominados de Perfil A e Perfil B.

A *priori* seriam executados levantamentos geofísicos empregando os métodos de eletrorresistividade e eletromagnético. Porém, considerou-se que os levantamentos eletromagnéticos seriam redundantes e menos precisos, ou seja, iriam fornecer dados com menor qualidade e precisão.

A inversão dos dados apresentou valores elevados de erros RMS nas duas seções sendo eles de 53% na primeira seção e 83,2% na segunda. Para diminuir esses valores foi efetuado no software RES2DINV a remoção manual dos chamados “*bad data*”, ou seja, valores muito discrepantes em relação aos demais. A figura 12 abaixo mostra esse procedimento sendo feito na seção 1 onde os pontos em vermelho seguidos de linhas pontilhadas foram os removidos.

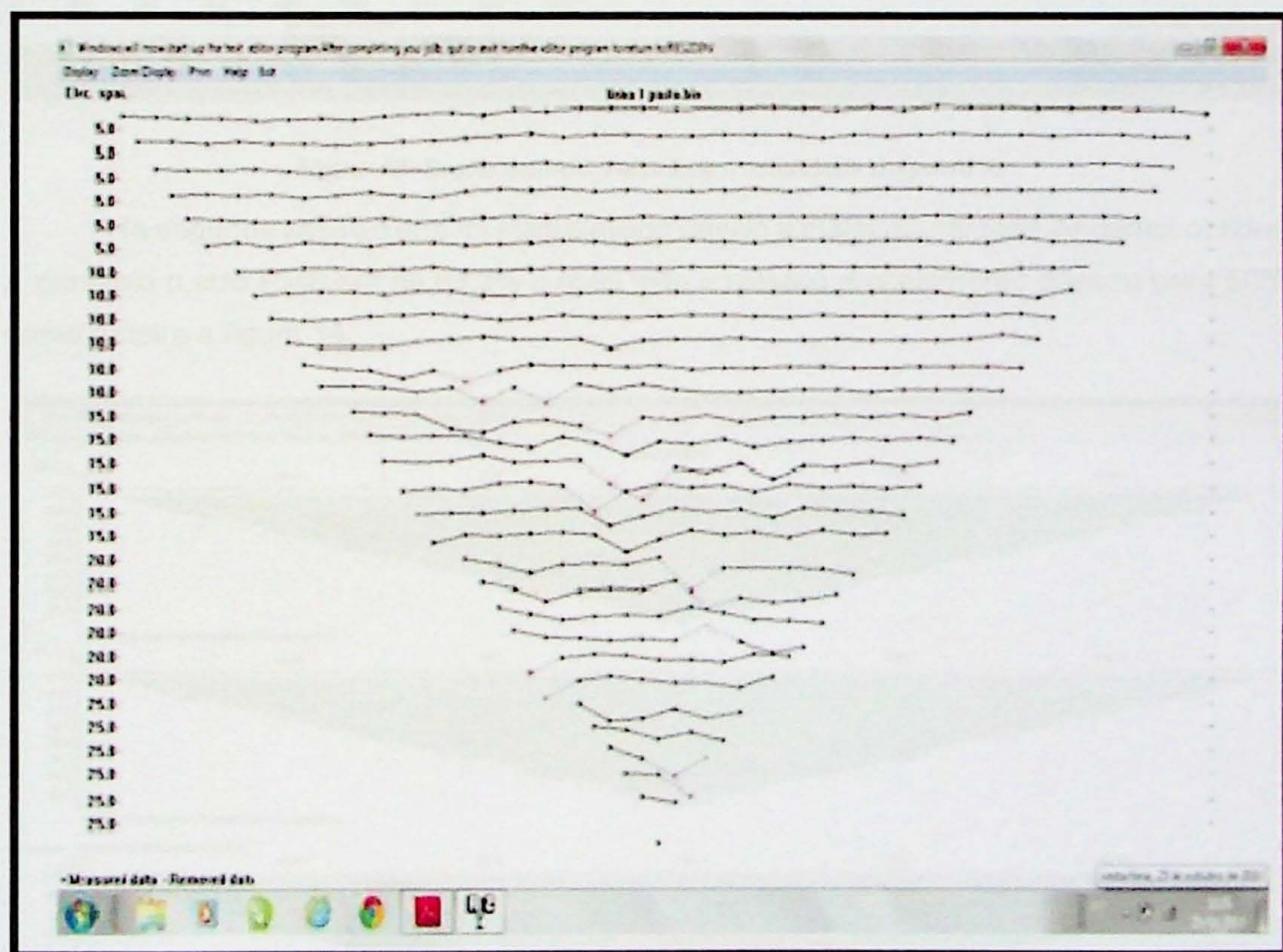


Figura 11. "bad data" removidos.

Porém, mesmo com esse procedimento a diminuição do erro foi de apenas 20,2% passando para um erro RMS (*root mean square*) de 32,8% como mostra a figura 13.

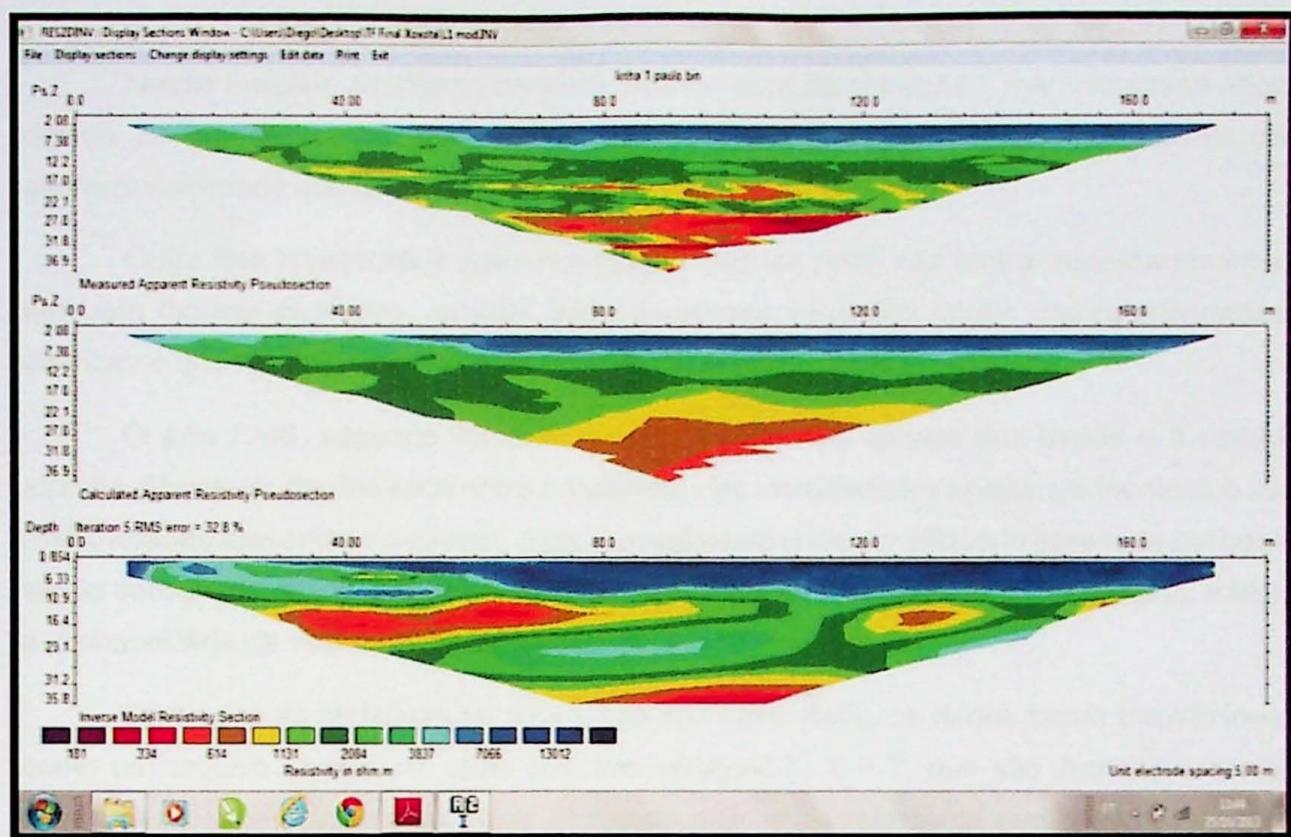


Figura 12. Seção medida, calculada e modelada do perfil A.

Na segunda seção o erro foi mais elevado devido a maior quantidade de dados obtidos. A princípio o erro RMS era de 83,2% e após feito o mesmo procedimento passou para 50%, como mostra a figura 14.

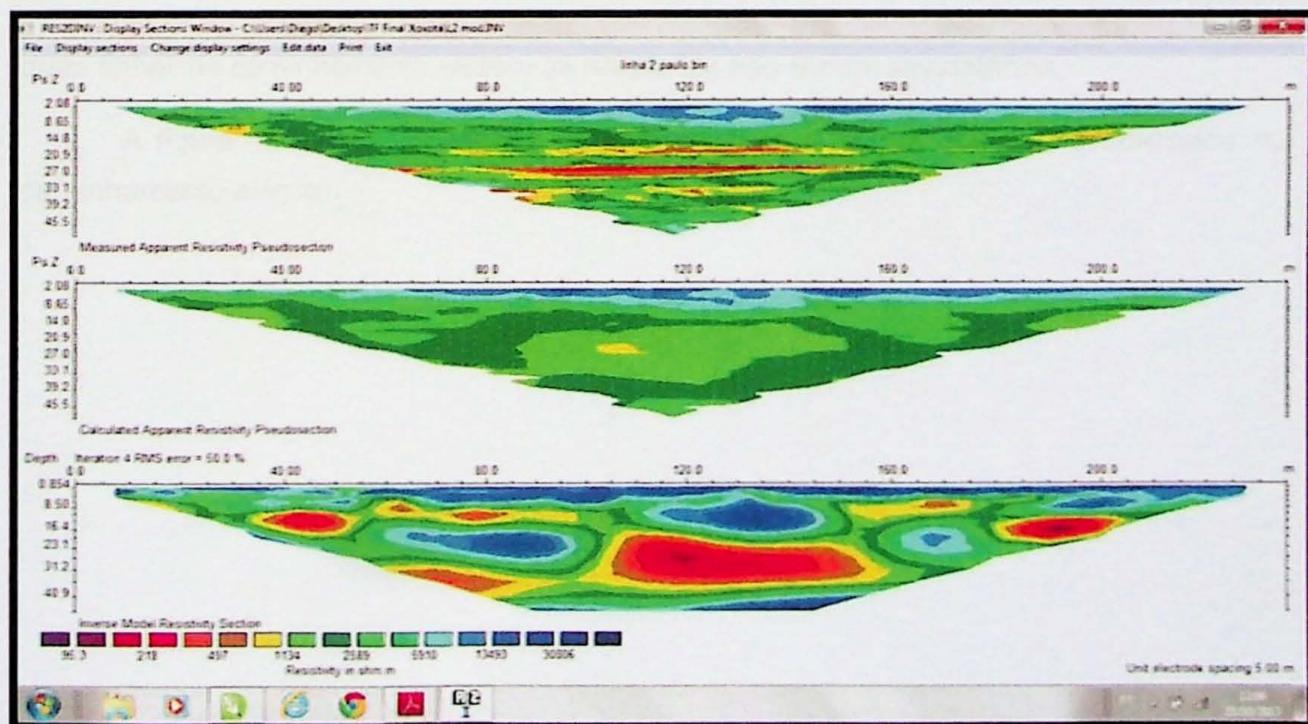


Figura 13. Seção medida, calculada e modelada do perfil B.

Nesse trabalho os valores de RMS, mesmo após as correções, mantiveram-se altos devido ao grande número de medidas efetuadas e a elevada variação dos valores de eletrorresistividade que condizem com a realidade do local estudado.

Outro fato importante é que um pequeno valor de RMS não indica necessariamente um bom modelo geológico, ou seja, pode apresentar variações irreais das resistividades elétricas e que não condizem com a realidade, Gandolfo (2007).

O erro RMS, segundo Gandolfo (2007), é o erro de ajustes dos dados e é obtido através do cálculo da diferença entre o logaritmo das resistividades aparentes medidas e as resistividades aparentes calculadas. Esse procedimento pode ser efetuado para toda pseudo-seção constituída de "n" dados. Dessa forma, quanto maior o número de dados obtidos, maior a probabilidade de valores altos de RMS.

Efetuadas as tentativas de diminuição dos erros RMS, os dados foram transferidos como um arquivo no formato *excel* com três variáveis X, Y e Z, que são respectivamente distância na superfície, profundidade de investigação e os valores de resistividade, para o software SURFER 8 onde foram geradas as duas seções modeladas, Perfil A e Perfil B.

Foram efetuadas apenas dois levantamentos por caminhamento elétrico devido as condições do local a jusante da área destinada à disposição de carcaças de animais. O local é coberto por uma densa vegetação, o que tornou a execução das medidas muito demorada impossibilitando a efetuação de outros levantamentos. Com isso também não foi possível gerar mapas de resistividade para visualização em planta das resistividades, pois com apenas duas linhas de caminhamento elétrico os resultados não seriam satisfatórios.

A figura 15 mostra as seções modeladas geradas apartir dos dados coletados no caminhamento elétrico.

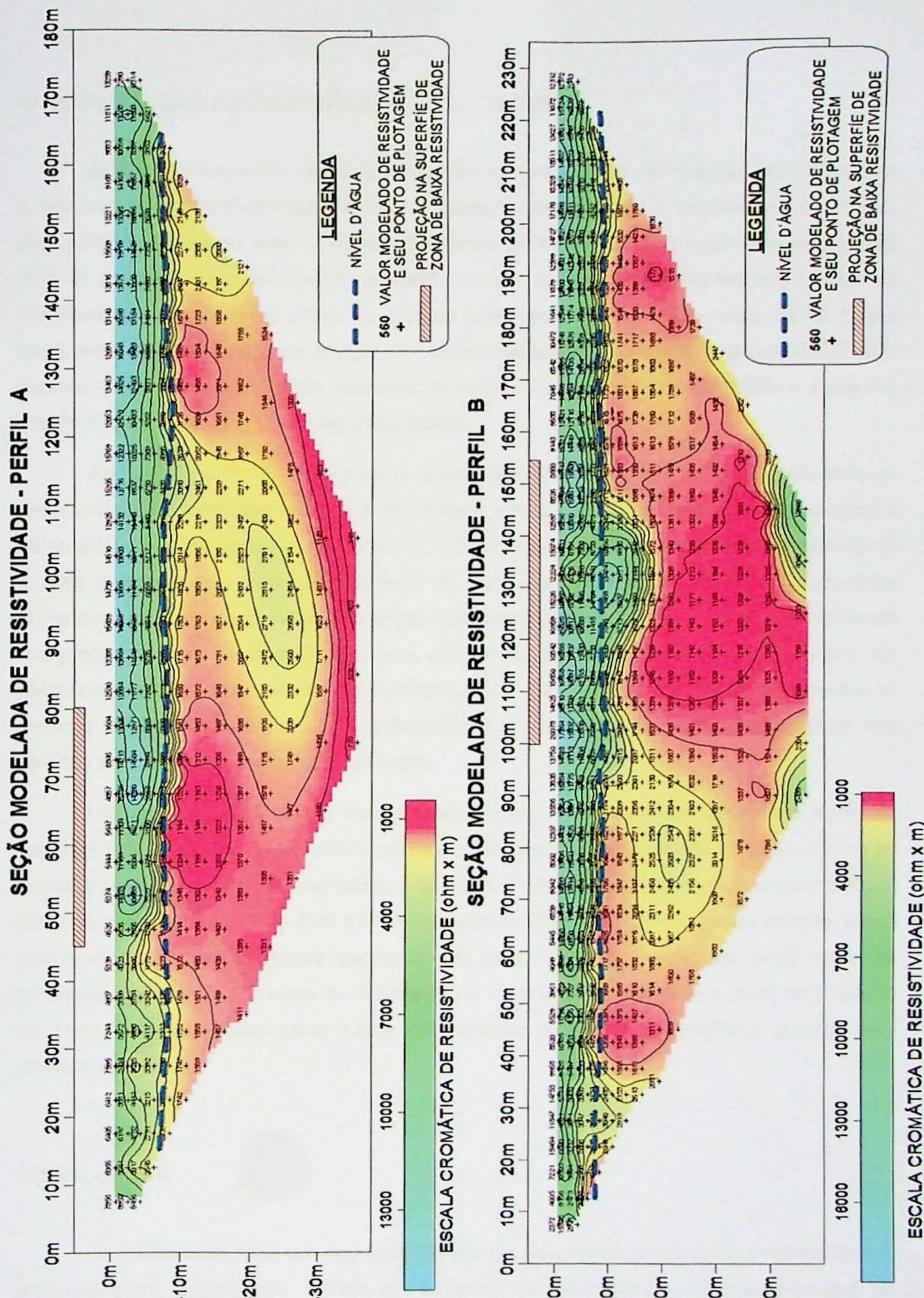


Figura 14. Seção modelada Perfil A e B

INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As SEVs forneceram inflexões indicativas do nível d'água com valores bem próximos, o que aumenta a confiabilidade nos dados obtidos. Sendo assim, é possível estipular uma profundidade média do nível da água subterrânea em torno de 9,0m, valor este que condiz com as imagens geradas através dos dados obtidos no caminhamento elétrico e poço de monitoramento próximo à área. As demais inflexões apresentadas pelas SEVs foram interpretadas como mudança brusca das características físicas do subsolo na SEV1 que ocorreu a 6,3m de profundidade, assim como na SEV 2 a 12,3m de profundidade e a alguma interferência na SEV3 a 1,48m de profundidade.

Analizando o Perfil A na figura 15, é possível identificar a diminuição significativa da resistividade em torno dos 9,0m de profundidade, sendo correlacionável aos valores obtidos pelas SEVs. Nessa mesma seção entre 10 e 20m de profundidade e entre as estacas de 45 e 80m ilustrada pela barra de projeção da zona de baixa resistividade na superfície, encontram-se os menores valores de resistividade presentes no aquífero. Esses valores foram interpretados como assinatura geofísica do contaminante, pois os sais dissolvidos no necrochorume diminuem os valores de resistividade. Os valores tornam a diminuir entre as estacas 125 e 135m e em maiores profundidades a partir dos 30m mas possivelmente são devidos às características geológicas locais.

No perfil B (figura 15), o nível d'água também foi traçado em torno dos 9,0m de profundidade. Observando o perfil B nota-se a concentração de baixas resistividades entre as profundidades 10 e 20m entre as estacas 40 e 55m e mais à frente no caminhamento elétrico entre as profundidades 15 e 25m e entre as estacas 185 e 200m onde esses valores foram relacionados às características geológicas do local. Mais ao centro do perfil entre as profundidades 20 e 35m e entre as estacas 110 e 150m onde foi colocada a barra de projeção da zona de baixa resistividade foram relacionadas à assinatura geofísica gerada pelo contaminante.

CONCLUSÕES

Os métodos aplicados nesse trabalho tiveram resultados satisfatórios mostrando seu potencial para investigação indireta em subsuperfície, detectando valores anômalos de resistividade possibilitando a correlação destes com contaminantes provenientes das carcaças de animais.

As três sondagens elétricas verticais apresentaram valores bem próximos, o que permitiu a estipulação do nível d'água em torno de 9,0m. Quanto aos estratos horizontais, não foi possível relacioná-los à mudança de litologia, mas sim a mudanças nas características físicas do subsolo que podem estar ou não relacionadas a diferentes tipos litológicos. Observa-se no mapa geológico (figura 2) que a área estudada encontra-se na borda dos depósitos colúvio-eluvionares da Formação Piraçununga que apresenta espessura variável, podendo chegar a 15m, obtida por sondagem, segundo Massoli (1983), mas os dados obtidos não são conclusivos quanto a isso.

As seções geradas a partir dos dados obtidos no caminhamento elétrico mostraram uma diminuição brusca da resistividade do solo por volta de 9,0m, aumentando ainda mais a confiabilidade na determinação do nível d'água. As seções apresentam também valores de resistividade elétrica com baixos valores que foram relacionadas a assinaturas geofísicas dos contaminantes.

Finalizando, ressalta-se que neste trabalho não foram efetuadas perfurações de poços e coleta de água para análises químicas. Desta forma, os resultados aqui apresentados constituem-se como orientativos e otimizadores de futuras investigações diretas no sentido de confirmar a presença dos contaminantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASTIANON, D., MATOS, B.A., AQUINO, W. F., PACHECO, A., MENDES, J. M. B. 2000. Geophysical surveying to investigate groundwater contamination by cemetery. Symposium on the Application of Geophysical to Engineering and Environmental Problems, Arlington, p. 709-708.
- BRAZ V, BECKMANN M & COSTA E SILVA L.M. 2000. Integração de resultados bacteriológicos e geofísicos na investigação da contaminação de águas por cemitérios. In: I Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas, Fortaleza.
- CAETANO-CHANG, M. R., WU, F. T., 2003. Diagênese de Arenitos da Formação Pirambóia no Centro-Leste Paulista. UNESP, Geociências. V.22, P. 33-39.
- CASTRO, D. L. 2008. Caracterização geofísica e hidrogeológica do cemitério Bom Jardim, Fortaleza – CE. *Revista Brasileira de Geofísica*. São Paulo, v. 26, n. 3, Set. Disponível em<<http://www.scielo.br/scielo.php?script>>. Acessado em 19 Mar. 2013.
- COSTA W.D. 2012. Investigações para obras de barragens. In: WALTER DUARTE COSTA. *Geologia de Barragens*. São Paulo: Oficina de Textos, P.127-129.

ELIS, V.R., 1999. Avaliação de aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, UNESP (Rio Claro). 246p.

FILHO, J.M. 1997. Contaminação das Águas Subterrâneas. In: FERNANDO A.C. FEITOSA, JOÃO MANOEL FILHO. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: REFO, P. 109.

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., TAIOLI, F., SILVA, S.M.C.P., COELHO, O.G.W. & PAIM, P.S.G., 2005. Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(1): 51-59.

GANDOLFO, O. C. B. 2007. Um estudo do imageamento geoelétrico na investigação rasa.Tese (Doutorado em Geociências, Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 215p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. 1981, Mapa Geológico do Estado de São Paulo, São Paulo. Escala 1:500.000.

KEAREY, P. 2009. Levantamento elétrico. In: PHILIP KEAREY, MICHAEL BROOKS, IAN HILL. *Geofísica de Exploração*. São Paulo: Oficina de Textos, P. 315-353.

LAGO, A.L., ELIS, V.R., GIACHETI, H.L., 2006. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru - SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(3): 357-374.

MASSOLI, M. 1983. Geologia da folha de Piraçununga, SP. *Rev. Inst. Geol. Dec. vol.4, no.1-2*, p.25-51.

MATOS, B. A., 2001. Avaliação da Ocorrência e do Transporte de Microrganismos no Aquífero Freático do Cemitério d Vila Nova Cachoeirinha, Município de São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

MENDES , J. M. B., 1987. Técnicas Geofísicas Aplicadas no Mapeamento e Monitoramento da Poluição e Contaminação de Águas Subterrâneas. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 196p.

PACHECO, A., MENDES, J. M. B.; MARTINS, T.; HASSUDA, S.; KIMMELMAN, A. A., 1991, Cemeteries: a potential risk to groundwater. *Water Science and Technology*, 24, (11): 97-104.

PEIXINHO, F.C. 1997. Apresentação. In: FERNANDO A.C. FEITOSA, JOÃO MANOEL FILHO. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: REFO, P. 01.

SARAIVA, F. A., 2010. Avaliação de Métodos Geofísicos no Comportamento Espacial de Plumas de Necrochorume. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

SILVA, W.C., FILHO, W. M., MOREIRA, A. M., 2009, Emprego do método da eletrorresistividade no estudo da contaminação subterrânea do cemitério municipal de Vila Rezende, Piracicaba – SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27 (3): 389 - 399.

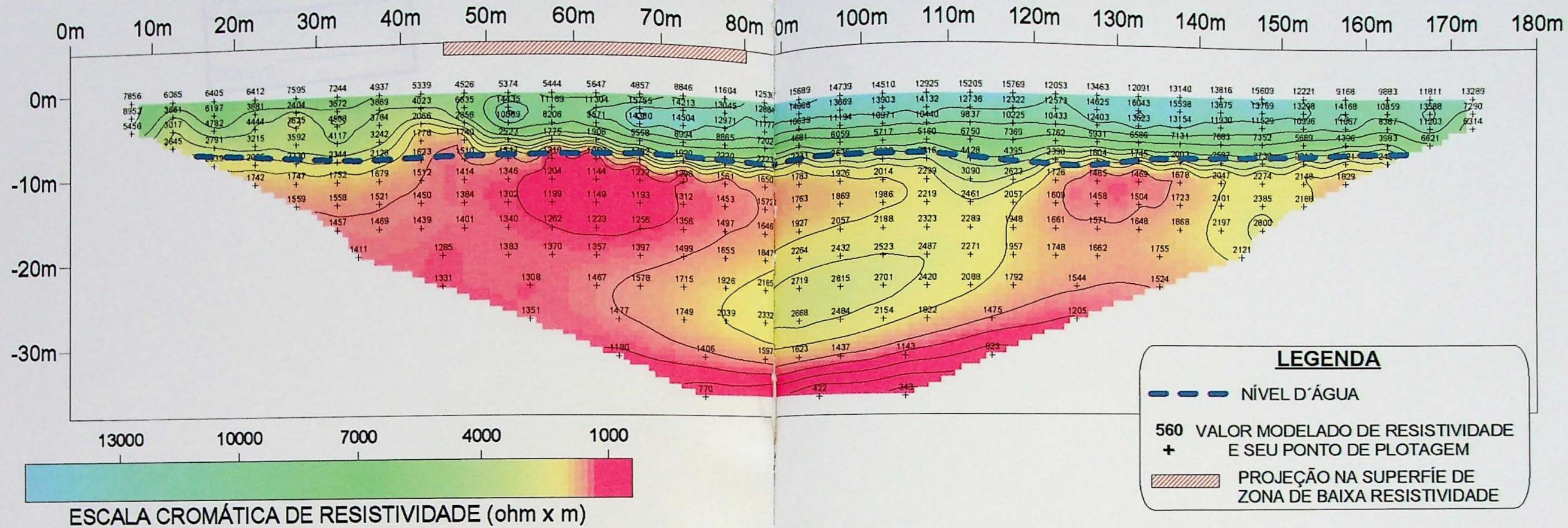
STURARO, J. R.; LANDIM, P. M. B. & RIEDEL, P. S. (2000), O emprego da técnica geoestatística da krigagem indicativa em Geotecnia Ambiental: *Revista Solos e Rochas*, 23 (3):157-164.

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

ANEXO

SEÇÕES MODELADAS DE RESISTIVIDADE

SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE - PERFIL A



SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE - PERFIL B

