

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**DETECÇÃO POR ELETORRESISTIVIDADE DE POSSÍVEL PRESENÇA DE
CONTAMINANTES NO SUBSOLO DO CAMPUS DA USP-PIRASSUNUNGA**

Lucas Henrique dos Santos

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2016 / 29)

SÃO PAULO
2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



**DETECÇÃO POR ELETRORRESISTIVIDADE DE POSSÍVEL PRESENÇA DE
CONTAMINANTES NO SUBSOLO DO CAMPUS DA USP-PIRASSUNUNGA**

Monografia de Trabalho de Formatura

(TF-16/29)

IGc-Instituto de Geociências



Detecção por eletorresistividade de possível presença d
contaminantes no subsolo do campus da

M27118

Aluno: Lucas Henrique dos Santos

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

São Paulo

2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**DETECÇÃO POR ELETORRESISTIVIDADE DE POSSÍVEL PRESENÇA DE
CONTAMINANTES NO SUBSOLO DO CAMPUS DA USP-PIRASSUNUNGA**

De acordo,



Lucas Henrique dos Santos



Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

São Paulo

2016

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus pela minha vida maravilhosa.

Ao Gallas, pela orientação, histórias engraçadas e boas indicações de livros.

Ao Fernando, pelo grande auxílio na etapa de campo e na confecção deste trabalho.

Aos meus pais, Cleusa e Odair, que sempre me deram amor e ensinaram-me a aprender com os erros. O carinho dela e a determinação dele são meu guia.

Aos meus irmãos, Cleber e Hélder, e às minhas irmãs, Viviane e Luciane, por estarem ao meu lado nessa jornada e, claro, terem cuidado muito bem deste caçula aqui.

À Paulina, por ser a melhor namorada, amiga e parceira que eu poderia encontrar.

Aos meus amigos e amiga Mett, Salviano, Qualquer, Thiago e Isa pela amizade, risadas, pizzas nos bons e velhos tempos de Buraco.

Aos meus grandes amigos Welzin Su e Free, por terem a honra da minha presença no campo, nas aulas e nos rolês, além de todas as risadas e alívios a cada entrega e apresentação de trabalho e fim de campo.

Ao Seiji, Milani, Avatar, Xuçrute, Mormaço, Garçonete e todo o pessoal da 55 pela convivência, areiões e campos.

Para todos que contribuíram de alguma maneira na conclusão deste trabalho e não foram citados, meu sincero obrigado.

1. Introdução	1
2. O homem e o sonho	2
3. O sonho e a realidade	3
4. O sonho e a vida	4
5. O sonho e a morte	5
6. O sonho e a arte	6
7. O sonho e a ciência	7
8. O sonho e a religião	8
9. O sonho e a política	9
10. O sonho e a economia	10
11. O sonho e a cultura	11
12. O sonho e a sociedade	12
13. O sonho e a natureza	13
14. O sonho e o homem	14
15. O sonho e o futuro	15
16. O sonho e o passado	16
17. O sonho e o presente	17
18. O sonho e o amanhã	18
19. O sonho e o hoje	19
20. O sonho e o sempre	20
21. O sonho e o nunca	21
22. O sonho e o talvez	22
23. O sonho e o nunca mais	23
24. O sonho e o sempre mais	24
25. O sonho e o talvez mais	25
26. O sonho e o nunca mais mais	26
27. O sonho e o sempre mais mais	27
28. O sonho e o talvez mais mais	28
29. O sonho e o nunca mais mais mais	29
30. O sonho e o sempre mais mais mais	30
31. O sonho e o talvez mais mais mais	31
32. O sonho e o nunca mais mais mais mais	32
33. O sonho e o sempre mais mais mais mais	33
34. O sonho e o talvez mais mais mais mais	34
35. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais	35
36. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais	36
37. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais	37
38. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais	38
39. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais	39
40. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais	40
41. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais	41
42. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais	42
43. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais	43
44. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais	44
45. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais	45
46. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais	46
47. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais	47
48. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais	48
49. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais	49
50. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	50
51. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	51
52. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	52
53. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	53
54. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	54
55. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	55
56. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	56
57. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	57
58. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	58
59. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	59
60. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	60
61. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	61
62. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	62
63. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	63
64. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	64
65. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	65
66. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	66
67. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	67
68. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	68
69. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	69
70. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	70
71. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	71
72. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	72
73. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	73
74. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	74
75. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	75
76. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	76
77. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	77
78. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	78
79. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	79
80. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	80
81. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	81
82. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	82
83. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	83
84. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	84
85. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	85
86. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	86
87. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	87
88. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	88
89. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	89
90. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	90
91. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	91
92. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	92
93. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	93
94. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	94
95. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	95
96. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	96
97. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	97
98. O sonho e o nunca mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	98
99. O sonho e o sempre mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	99
100. O sonho e o talvez mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais mais	100

O homem é do tamanho do seu sonho.
(Fernando Pessoa)

Sumário

1.RESUMO	1
2.ABSTRACT	2
3.INTRODUÇÃO	3
4.LOCALIZAÇÃO	3
5.OBJETIVOS	6
6.FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
6.1.Geologia regional	6
6.1.1.Bacia do Paraná	6
6.2.Geologia local.....	7
6.3.Trabalhos anteriores	8
7.MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
7.1.Procedimentos de campo	9
7.1.1. Caminhamento Elétrico (CE).....	9
7.1.2.Sondagem Elétrica Vertical (SEV)	10
7.2.Equipamentos de campo	10
7.2.1. Terrameter SAS4000, ABEM	10
7.2.2.SYSCAL PRO, Iris Instruments.....	11
7.3.Processamento dos dados	12
8.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	13
8.1.Sondagem Elétrica Vertical	13
8.2.Caminhamento Elétrico	15
9.CONCLUSÕES	21
10.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

1.RESUMO

Esse Trabalho de Formatura teve como objetivo detectar contaminantes no subsolo da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia - USP em Pirassununga e para isso foram aplicadas duas das principais técnicas de investigação do método de eletrorresistividade: o Caminhamento Elétrico (CE) e a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) com arranjos dipolo-dipolo e Schlumberger, respectivamente.

A área estudada foi uma lagoa de rejeitos do matadouro-escola dentro do campus e está geologicamente situada na Bacia do Paraná em sua porção nordeste, onde afloram rochas vulcânicas e sedimentares (Saraiva, 2010), compostas pelo Grupo Tatuí (siltitos, argilitos) e formações Corumbataí (siltitos), Pirambóia (arenitos) e Pirassununga (areias), além de intrusões de diabásio e sedimentos quaternários (areias, argilas) (Massoli, 1983).

O método geofísico da eletrorresistividade é baseado no contato galvânico com o solo de quatro eletrodos, A e B de corrente elétrica e dois eletrodos receptores M e N, onde é medida a voltagem ou diferença de potencial (ddp ou ΔV). A resistividade é o parâmetro essencial para interpretação dos dados e ela é calculada através da fórmula $\rho_a = K (\Delta V/I)$, sendo K (adimensional) o fator geométrico, a voltagem (ΔV) em volts e a corrente (I) utilizada em ampères.

A técnica do CE determina variações laterais na condutividade do terreno, detectando fraturas, contatos inclinados de camadas de rochas, paleocanais (Parasnis, 1995). Neste projeto, essa técnica será útil principalmente para determinar a extensão da possível contaminação e sua origem. Os equipamentos utilizados para a medida da resistividade foram *Terrameter System SAS 4000* (ABEM) e *SYSCAL PRO* (Iris Instruments).

A técnica SEV determina heterogeneidades verticais das resistividades baseadas na profundidade (Gandolfo, 2007), muito útil para determinar estratos e contatos horizontais de camadas de rochas e, no caso deste projeto, nível d'água e profundidade da possível contaminação. Apenas o *Terrameter System SAS 4000* foi usado para as SEVs.

Os resultados obtidos em campo foram processados pelos *softwares* IPI2WIN, RES2DINV e pelo Surfer, produzindo seções modeladas de resistividade e mapas de distribuição em planta das resistividades para determinar os limites da pluma, a sua direção e origem, além de identificar o fluxo e o nível d'água.

2.ABSTRACT

This Graduation's Work aimed to detect contaminants in the subsurface of the Faculty of Veterinary Medicine and Animal Science - USP in Pirassununga. Thereby, two major techniques of electrical resistivity methods were applied: the Resistivity Profiling and the Vertical Electrical Sounding (VES) with dipole-dipole and Schlumberger configuration, respectively.

The study area is a pond tailings of a slaughterhouse-school inside the campus and it is geologically located in the Paraná Basin in its northeastern portion where outcrop volcanic and sedimentary rocks (Saraiva, 2010), composed by Tatui group (siltstones, argillites) and Corumbatai formations (siltstones), Piramboia (sandstones) and Pirassununga (sand), and diabase intrusions and quaternary sediments (sands, clays) (Massoli, 1983).

The geophysical method of electrical resistivity is based on galvanic contact with the ground of four electrodes A and B, electric current, and two receiving electrodes, M and N, which is measured the voltage or potential difference (ddp or ΔV). Resistivity is the essential parameter for data interpretation and it is calculated by ρ_a formula = $K (\Delta V / I)$, where K (adimensional) is the geometric factor, the voltage (ΔV) in volts and the current (I) used in ampères.

The Resistivity Profiling technique determines lateral variations in terrain conductivity, detecting fractures, inclined contact of rock layers, paleochannels (Parasnis, 1995). In this monograph, this technique is especially useful for determining the extention of possible contamination and its origin. The equipment used for the measurement of resistivity were Terrameter System SAS 4000 (ABEM) and SYSCAL PRO (Iris Instruments).

The SEV technique determines vertical heterogeneities of resistivity based on depth (Gandolfo, 2007), very useful for determining geological strata, horizontal contacts of rock layers and in this project, water level and depth of possible contamination. Only Terrameter System SAS 4000 was used.

The results obtained in the field work have been processed by the free softwares IPI2WIN and RES2DINV and the Surfer, producing modeled sections of resistivity and distribution maps in plant of resistivity to determine the boundaries of the plume, its direction and origin, and identify the flow and water level.

3.INTRODUÇÃO

A questão de poluição ambiental tem sido alvo de muitas discussões no mundo atual. Desde poluição atmosférica à contaminação de água subterrânea, o assunto deve ser tratado com muito cuidado e ideias novas para que as pesquisas científicas mudem o cenário atual, que não é favorável para nós, nem para as gerações futuras e nem para os outros seres vivos.

A preocupação com a questão da contaminação das águas subterrâneas é mais recente que a poluição atmosférica e torna-se mais alarmante quando há racionamento de água em um centro urbano como ocorrido em São Paulo no início ano de 2015, quando o problema foi parcialmente solucionado com obras de engenharia. Lembrando que a água subterrânea é uma ótima alternativa como produção substituta e/ou complementar de água e, em alguns casos, até principal.

Uma área contaminada (CETESB, 2001) pode ser definida como um local ou região onde existe contaminação comprovada pela introdução de qualquer substância que nela tenha sido depositada, acumulada, armazenada, enterrada ou infiltrada de forma planejada, acidental ou até mesmo natural. Essa contaminação pode concentrar-se em diversos locais, inclusive no subsolo e em aquíferos.

Há muitas maneiras de identificar poluições em terrenos e em subsuperfície, por exemplo, através de meios diretos, tais como amostragem de solo, poços de monitoramento de água subterrânea e de meios indiretos, como levantamentos geofísicos. Dentre esses métodos, a eletrorresistividade tem o seu destaque com as técnicas de Caminhamento Elétrico (CE) e Sondagem Elétrica Vertical (SEV). Essas técnicas foram utilizadas para identificar a contaminação no local estudado.

4.LOCALIZAÇÃO

A área do trabalho de campo foi na cidade de Pirassununga, dentro do campus da USP, situada a aproximadamente 215 km distante da cidade de São Paulo e o acesso se dá primeiramente pela rodovia dos Bandeirantes e depois pela BR-050. A Figura 1 ilustra a localização do campus na cidade de Pirassununga dentro do Estado de São Paulo.

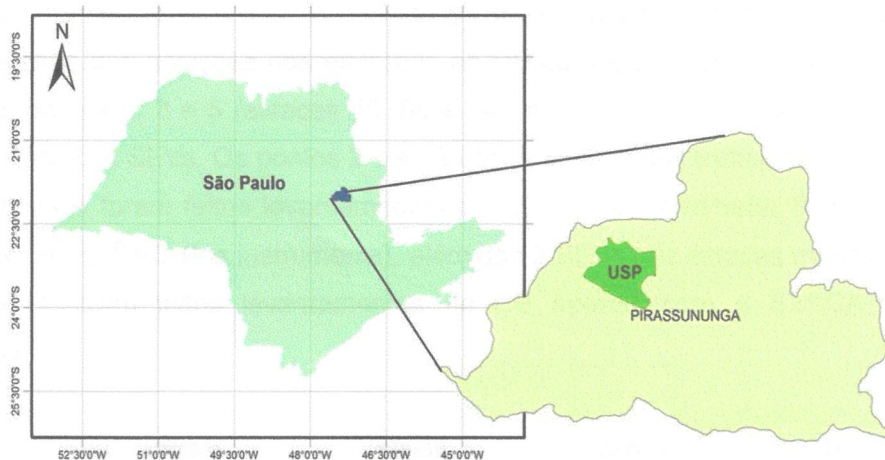


Figura 1: Localização da Universidade de São Paulo no município de Pirassununga e no Estado de São Paulo.

A lagoa estudada (ampliação na Figura 2) está localizada próxima ao matadouro que a utiliza para descarte de efluentes originados dos abates de animais e limpeza das carcaças. A definição dela foi feita após encontrar a que era a mais acessível dentre as 8 lagoas destacadas na Figura 2.

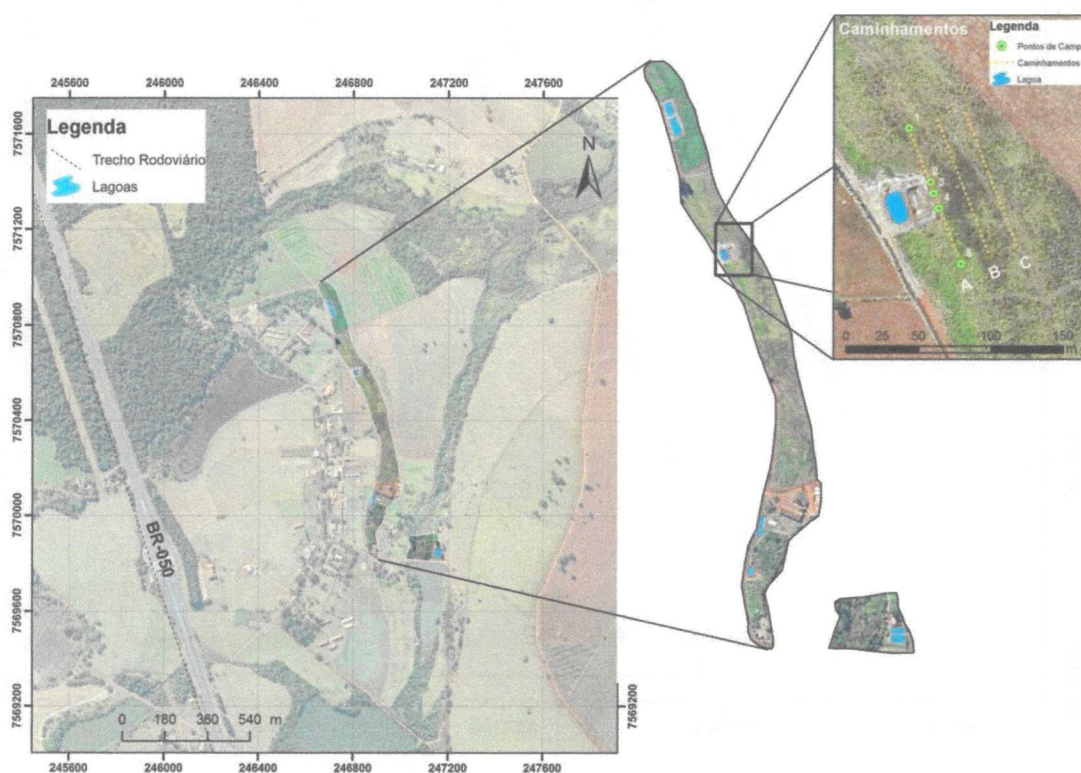


Figura 2: Destaque da localização da lagoa estudada neste trabalho e posição das linhas A,B e C dos caminhamentos feitos. Fonte: Google earth®.

A figura 3 apresenta a ampliação da figura 2, detalhando-a. É possível identificar as linhas de levantamentos A, B e C, os pontos de campo e a lagoa. Os pontos de campo de 1 a 5 são algumas das posições dos eletrodos no CE começando da posição 40 metros, ou ponto 1. Os pontos 1, 3 e 5 (estacas 40, 90 e 140 metros, respectivamente) são os locais onde foram feitas as SEVs. Os pontos 2 e 4 são as projeções dos limites da lagoa.

Na linha A foram feitos levantamentos de CE com o *Terrameter System SAS 4000* (ABEM) e *SYSCAL PRO* (Iris Instruments), além das 3 SEVs nas estacas mencionadas. Nas linhas B e C foram feitos levantamentos de CE apenas com o *SYSCAL PRO* (Iris Instruments).

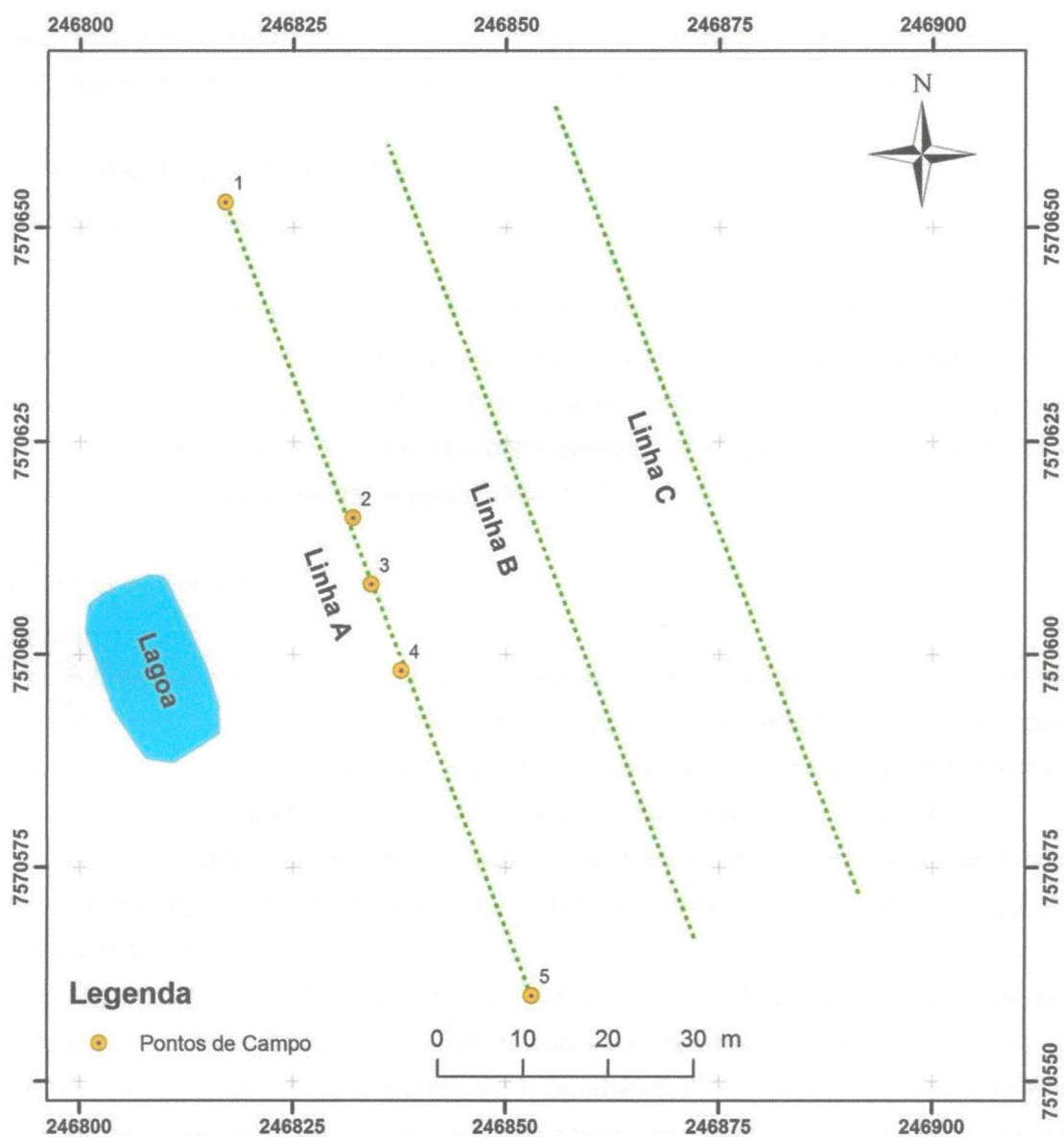


Figura 3: Georreferenciamento da lagoa alvo dos estudos. Fonte: QGis®.

5.OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi investigar a área a jusante da lagoa alvo com as técnicas de Caminhamento Elétrico e Sondagem Elétrica Vertical para identificar se havia contaminação em subsuperfície ou não. Com os dados gerados em campo e posterior processamento deles, a pluma de contaminantes foi identificada, determinando-se a extensão e direção de propagação da mesma.

O autor obteve o domínio das técnicas geofísicas utilizadas, além de agora conseguir tratar e interpretar os dados gerados em campo e elaborando, através dos *softwares* usados, pseudo-seções e seções modeladas de resistividade. Além disso, construíram-se mapas das resistividades para interpretar o resultado e assim determinar os limites da pluma, a sua direção e origem, além da identificação do fluxo e o nível d'água.

6.FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

6.1.Geologia regional

A área está situada na Bacia do Paraná em sua porção nordeste onde afloram rochas vulcânicas e sedimentares das eras Paleozóica, Mesozóica e Cenozóica (Saraiva, 2010), essas compostas pelo Grupo Tatuí (siltitos, argilitos) e formações Corumbataí (siltitos), Pirambóia (arenitos) e Pirassununga (areias), além de intrusões de diabásio e sedimentos quaternários (areias, argilas) (Massoli, 1983).

6.1.1.Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é uma região sedimentar que inclui porções territoriais do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai, totalizando 1,5 milhão de quilômetros quadrados e com forma ovalada com eixo maior N-S, com seus entornos definidos por limites erosivos relacionados na maior parte com a geotectônica do continente (Milani *et al.*, 2007).

Milani e Ramos (1998) definiram-na como uma bacia intracratônica típica com sedimentação suportada por embasamento consolidado, o mesmo resistente a esforços de margens de placas.

Segundo Milani (1997), o arcabouço estratigráfico da Bacia do Paraná pode ser estudado através de unidades que englobam toda a sua formação, cerca de 400 milhões de anos, são elas: Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru, as três primeiras representam ciclos transgressivo-regressivos paleozóicos, já as restantes representam rochas sedimentares continentais associadas com ígneas.

Com a toda a sua extensão, a Bacia do Paraná comporta rochas com as mais variadas características. Os litotipos que podem ser observados em resumo são

principalmente conglomerados quartzosos, diamictitos, arenitos finos a grossos, folhelhos e rochas ígneas como basaltos, andesitos e riolitos. As texturas também variam e podem-se encontrar estruturas como estratificações cruzadas de cunho fluvial e do tipo *hummocky*, aspecto ferruginoso e fossilífero de folhelhos.

6.2.Geologia local

A folha de Piraçununga (Massoli, 1983) encontra-se na região leste-nordeste do Estado de São Paulo apresenta uma geomorfologia bastante suave em grande parte da área por se encontrar em uma região de depressão. O substrato rochoso é formado pelas Fm. Corumbataí e pelo Grupo Tatuí com cobertura de sedimentos da Fm. Pirassununga e intrusões básicas.

O Grupo Tatuí apresenta siltitos com muita argila e argilitos quartzosos maciços e com estratificação plano-paralela.

A Formação Corumbataí é representada por siltitos e argilitos coloridos, com as suas cores rosadas, marrons com estratificação plano-paralela ou maciços, apresentando fraturamento conchoidal. Há níveis fossilíferos encontrados em siltitos evidenciando fragmentos de peixes e moldes de conchas. O contato entre as unidades Fm. Corumbataí e o Grupo Tatuí não pode ser visto na região por causa da intrusão de diabásio entre elas.

A Formação Irati não aflora na folha, mas está presente através de testes de sondagens visando captação de água subterrânea. Apresenta majoritariamente folhelhos e calcários como litotipos principais, além de restos fossilíferos de *Mesosaurus brasiliensis*.

A Formação Pirambóia constitui-se de arenitos finos a muito finos, rosados, mal selecionados e apresenta estrutura maciça, plano-paralela e cruzada. O contato com a Fm. Corumbataí se faz normalmente através de falhas.

As rochas intrusivas básicas presentes na folha de Piraçununga englobam grande parte da área, apresentando formas como de lacólito e sills. A rocha principal é diabásio, podendo conter xenólitos de granitos.

A Formação Pirassununga constitui-se de sedimentos inconsolidados, sem estruturas sedimentares e areno-argilosos com a granulação entre areia fina e silte, apresentando na base faixas mais grossas com seixos e cascalhos.

6.3.Trabalhos anteriores

Existem muitas bibliografias sobre este tema contextualizando a teoria em métodos práticos, mostrando casos reais que obtiveram sucesso ao detectar contaminações. Há também livros essenciais muito bem aceitos pela comunidade geofísica.

Orellana (1972), Telford et al. (1990), Parasnis (1997) são obras que abordam os princípios da geofísica aplicada explicando de maneira singular os métodos geofísicos, inclusive eletrorresistividade, e também os livros apresentam as técnicas de levantamento mais vantajosas para hidrogeologia e outras situações.

Gallas (2000) é o doutorado do mesmo e apresenta uma ampla pesquisa e revisão dos métodos de eletrorresistividade, potencial espontâneo (SP) e polarização induzida (IP) com aplicação em várias áreas, inclusive em hidrogeologia. Além disso, o trabalho evidencia a empregabilidade da eletrorresistividade no estudo de casos de contaminação e outras utilidades, como definir o fluxo das águas subterrâneas ou o nível d'água local.

Gandolfo & Gallas (2005) utilizaram levantamento 2D e 3D de dados de eletrorresistividade e comprovaram a eficiência do método com possíveis aplicações em hidrogeologia, geotecnia e em meio ambiente.

Gallas et al. (2005) realizaram levantamentos geofísicos de eletrorresistividade a jusante de um aterro sanitário em Londrina, detectando e mapeando pluma de contaminação por chorume. Foram realizados 6 levantamentos de CE com arranjo dipolo-dipolo e abertura $AB=MN=20$ metros. O processamento dos dados foi feito com os softwares RES2DINV e Surfer para confecção de pseudo-seções de resistividade aparente e seções modeladas de resistividade. Foi ainda possível estabelecer correlação entre as zonas de resistividade mais baixas e contaminação por chorume, pois o contaminante é rico em íons e a condução elétrica na natureza ocorre principalmente de forma iônica.

Braga (2006) é a tese de livre docência do mesmo e tem o objetivo geral de detalhar a utilização adequada dos métodos geoeletricos na hidrogeologia, com foco em contaminação de solos, rochas e águas subterrâneas e também captação de águas subterrâneas para abastecimento em geral. As técnicas de campo de SEV (arranjo Schlumberger) e CE (dipolo-dipolo) foram descritas em detalhe, fornecendo informações relevantes na análise e interpretação dos dados das pseudo-seções de resistividade aparente e seções modeladas de resistividade. Além disso, foram apresentados casos reais de contaminação em aterros por disposição, de maneira equivocada, de resíduos.

Saraiva (2010) é um projeto que mostrou resultados ótimos em delimitar pluma de contaminação de necrochorume com eletrorresistividade na cidade de Pirassununga e a região é próxima a que foi estudada neste trabalho. Além disso, outro detalhe relevante do trabalho é que foram alocados poços de monitoramento para coleta de amostras de água em locais pré-definidos pela eletrorresistividade, mostrando outra utilidade desse método.

Gallas et al. (2011) compararam e avaliaram a eficiência dos métodos polarização induzida (IP) e eletrorresistividade em detectar pluma de contaminação em aterro e usaram metodologias como arranjos dipolo-dipolo e processamento de dados com o software RES2DINV.

7. MATERIAIS E MÉTODOS

7.1. Procedimentos de campo

No campo foram definidas três linhas de caminamento elétrico paralelas entre si e distantes de 20 metros uma da outra, todas com direção NW-SE e a jusante da lagoa, nomeadas de linhas A, B e C. As SEVs foram efetuadas ao longo da linha A, nas metragens de 40, 90 e 140 metros. Foram feitos quatro caminhamentos elétricos, um utilizando o equipamento ABEM, na linha A, e outros três caminhamentos com o SYSCAL PRO, nas linhas A, B e C. A lagoa está posicionada próxima à linha A, entre as posições 80 metros e 100 metros.

7.1.1. Caminhamento Elétrico (CE)

O caminamento elétrico feito com *Terrameter System SAS4000* teve comprimento de 160 metros com a configuração dipolo-dipolo e distância entre eletrodos $AB=MN=10$ metros. O arranjo dipolo-dipolo é baseado em dois eletrodos de transmissão A e B e dois eletrodos de recepção M e N e medidas são tomadas mantendo na posição fixa os eletrodos AB e movendo os eletrodos MN ao longo do perfil. É definido com as seguintes dimensões: $L_1=AB$, $L_2=MN$, $OQ=$ distância entre os centros de AB e MN, onde os deslocamentos devem ser iguais a L e a investigação chegando a diferentes níveis de profundidade (n) (Gallas, 2000) (Figura 4).

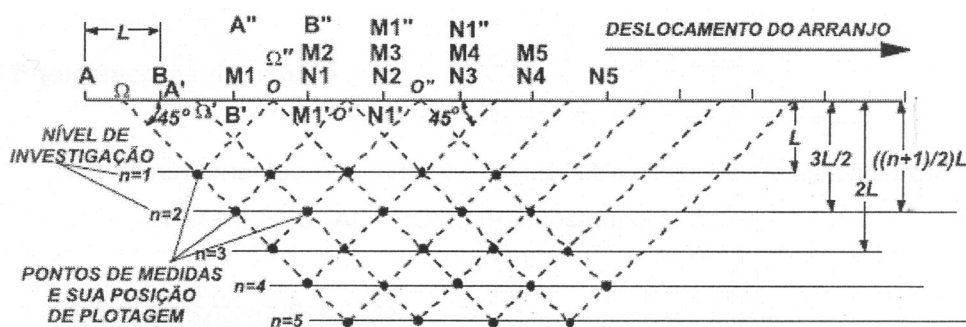


Figura 4: Ilustração do arranjo dipolo-dipolo. Extraído de Gallas (2000).

Os pontos de plotagem das resistividades medidas encontram-se na intersecção a 45° das linhas imaginárias que se prolongam para baixo a partir das origens Ω e O , indicando uma profundidade teórica atingida por aquele ponto de medida (profundidade = $(n+1)L/2$, sendo $n = 1; 2; 3$, etc.) (Gallas, 2000). Neste estudo foram medidos 6 níveis de investigação.

Os caminhamentos com o SYSCAL PRO tiveram 200 metros de extensão com 40 eletrodos posicionados a cada 5 metros.

7.1.2. Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

O arranjo Schlumberger foi usado para a SEV e essa técnica usa dois eletrodos de transmissão A e B e dois de potencial M e N para as medidas em um ponto central na superfície (O). Para efetuar as medidas precisa-se mover os eletrodos de transmissão AB e assim, aumentando a distância entre eles e os eletrodos de medida MN, sendo que os 4 eletrodos devem estar ao longo do mesmo perfil (Gallas, 2000) (Figura 5).

O sinal pode ficar muito fraco à medida que aumenta a distância entre os eletrodos, mas para isso pode-se aumentar a distância entre MN e repetir a medida do ΔV na mesma distância AB, processo chamado de embreagem (Gallas, 2000).

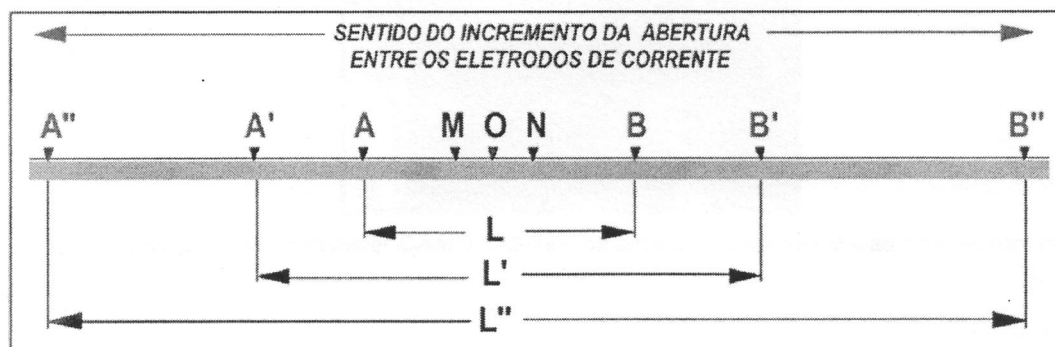


Figura 5: Imagem do arranjo Schlumberger. Extraído de Gallas (2000).

7.2. Equipamentos de campo

Nos levantamentos de campo foram utilizados os resistivímetros Terrameter SAS4000 da ABEM e o SYSCAL PRO da IRIS Instruments.

7.2.1. Terrameter SAS4000, ABEM

O equipamento (Figura 6) consegue operar em três modos diferentes: modo de investigação por resistividade, polarização induzida e potencial espontâneo, mas nesse

projeto foi utilizado apenas o modo de resistividade para o caminhamento elétrico e para a sondagem elétrica vertical. O seu funcionamento consiste em transmitir corrente ao solo, controlada pelo operador, através de dois eletrodos de corrente e a seguinte medição do valor da resistência ($\Delta V/I$) com dois eletrodos de potencial. No campo foi utilizado um adaptador multicanal conectado diretamente no aparelho que possibilita conectar 4 pares de eletrodos de potencial. O valor tem a unidade ohms, com seus limites de medição de 0,05 miliohms a 1999 kiloohms. A resistividade é calculada com a multiplicação do fator geométrico K com o resultado do equipamento.



Figura 6: Equipamento *Terrameter System SAS4000* da empresa sueca ABEM e as bobinas com os fios utilizados.

7.2.2. SYSCAL PRO, *Iris Instruments*

O equipamento (Figura 7) é um moderno resistímetro capaz de fazer investigações como o caminhamento elétrico e a sondagem elétrica vertical desse projeto, e ir além, como investigações em movimento ou em investigações em rios e ou oceanos para aquisição da resistividade. No caso desse estudo, utilizou-se um cabo onde são conectados os eletrodos, (40 eletrodos distantes 5 metros um do outro), que medem a resistividade em até 10 eletrodos simultaneamente. Além disso, o aparelho faz as medidas mudando automaticamente as distâncias dos eletrodos, permitindo montar diferentes arranjos, aumentando significativamente o número e a certeza dos dados. É possível ainda fazer imagem 2D e 3D dos dados obtidos em seu *display*, ferramenta útil que possibilita

interpretações preliminares no campo. Os comandos, em sua maioria, são feitos no aparelho, mas há a possibilidade de utilização de um computador para programação prévia do levantamento.

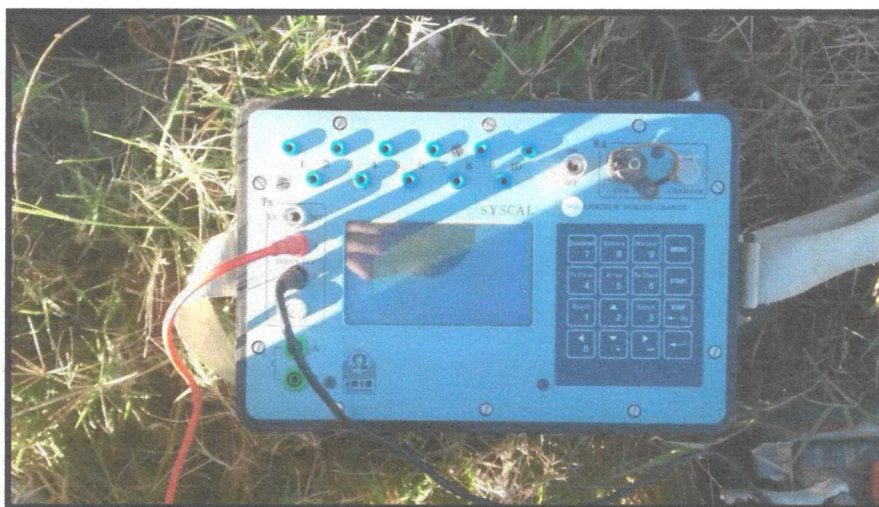


Figura 7: Equipamento SYSCAL PRO da fabricante Iris Instruments.

7.3. Processamento dos dados

Para o processamento de todos os dados obtidos em campo foram usados RES2DINV, IPI2WIN e Surfer.

Os dados de resistividade do caminhamento elétrico foram tabelados e depois processados primeiramente pelo RES2DINV, programa de inversão de dados bidimensional que gera seções modeladas de resistividade que, teoricamente, estariam distribuídos realisticamente em subsuperfície. Os resultados do RES2DINV foram exportados como arquivos de formato XYZ, adequado para o Surfer, e então interpolados através do método da krigagem. Foi possível fazer a interpolação das seções com os dados brutos e modelados gerados pelo equipamento ABEM e seções com dados modelados e mapas em planta com os resultados do SYSCAL PRO.

Os dados do campo adquiridos com as SEVs foram processados pelo IPI2WIN. Este programa permite a inversão dos dados gerando um modelo unidimensional coerente e, em tese, realístico. Os dados adicionados no programa são $AB/2$ e $MN/2$, (aberturas entre eletrodos de corrente A e B e de potencial M e N), gerando um gráfico bilogarítmico $AB/2 \times$ resistividade. O layout do programa permite aos usuários que sejam feitas alterações que melhoram o modelo, como adição/eliminação no número de estratos geolétricos. A embreagem também foi utilizada para obter o melhor dado de campo e modelo possíveis, diminuindo a distância entre os eletrodos de corrente e potencial, com o objetivo de aumentar o sinal da corrente e melhorar a medida.

8.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com os dados de campo são figuras processadas nos softwares IPI2WIN, RES2DINV e Surfer. Seguem abaixo as discussões a respeito delas.

8.1.Sondagem Elétrica Vertical

Foram feitas três SEVs nas proximidades da lagoa do matadouro com distância de 50 metros entre cada uma delas, a primeira está na posição 40 metros do caminhamento elétrico, a segunda na posição 90 metros e a última na posição 140 metros da linha A.

Na SEV estaca 140 metros, Figura 8, pode-se observar cinco estratos geoeletricos com o primeiro tendo cerca de 0,75 metros de espessura e resistividade de 218 ohms.metro, interpretado como a camada mais superficial. O segundo estrato apresenta resistividade de 1517 ohms.metro, solo mais resistivo e seco, e profundidade da base a 5,02 metros. O terceiro estrato geoeletrico apresenta resistividade menor, cerca de 425 ohms.metro e profundidade da base de 16,6 metros. Esta passagem do segundo para o terceiro estrato geoeletrico pode ser interpretada como nível d'água. Ao final da curva verifica-se uma "subida" (aumento de resistividade), de 8 ohms.metro para 123 ohms.metro que indica uma mudança de estrato geoeletrico à profundidade de 48m.

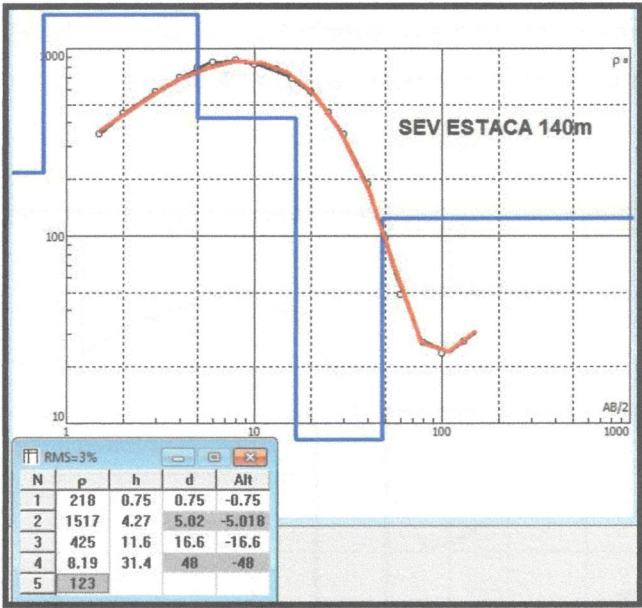


Figura 8: SEV feita na estaca da linha A na posição de 140 metros.

A SEV na estaca 90 metros, Figura 9, apresenta cinco estratos geoeletricos com o primeiro apresentando 230 ohms.metro e profundidade da base de 0,75 metro. O segundo estrato apresenta resistividade de 674 ohms.metro, sendo caracterizado por um sedimento

mais arenoso e seco, sendo assim mais resistivo. No terceiro estrato a resistividade cai para 178 ohms.metro, indicando que na profundidade de 4,85 metros está o nível d'água. Na profundidade de 45 metros ocorre o aumento de resistividade de 4,28 para 117 ohms.metro ao fim da curva e mudança de composição geológica, tornando a porção mais resistiva.

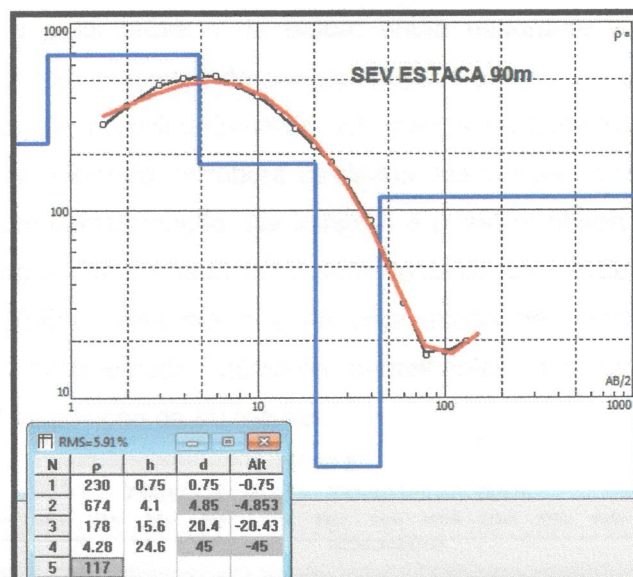


Figura 9: SEV feita na estaca da linha A na posição de 90 metros.

A Figura 10 mostra a SEV feita na estaca de 40 metros. Ela é bastante similar às outras, o que é justificado por ter o nível d'água interpretado, aproximadamente, em 5,2 metros, além de na profundidade de 47 metros, ocorrer o aumento da resistividade de 6,58 para 105 ohms.metro.

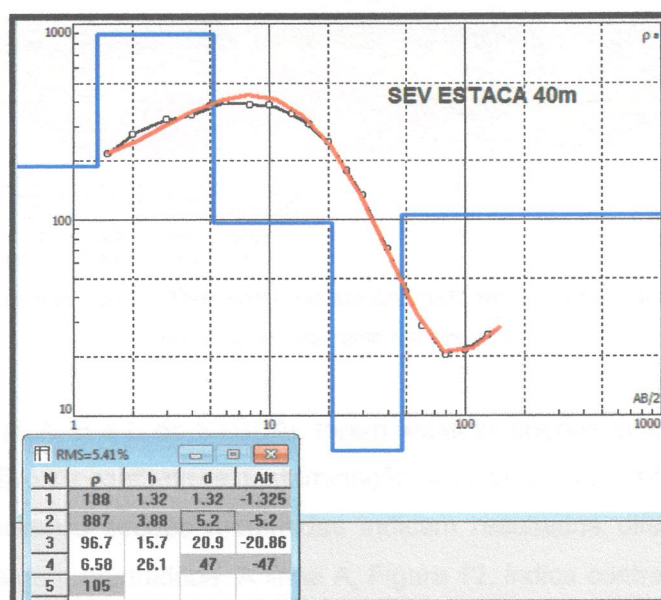


Figura 10: SEV feita na estaca da linha A na posição de 40 metros.

8.2. Caminhamento Elétrico

A linha A teve seus dados adquiridos de duas formas, uma com *Terrameter System* SAS4000 e outra com SYSCAL PRO e as outras linhas tiveram seus dados adquiridos apenas pelo SYSCAL PRO.

A linha A é a mais próxima da lagoa, então espera-se ver mais contraste de resistividade causado pela presença de contaminante. Pode-se ver que na Figura 11 que isso ocorre já a partir de, aproximadamente, 2,5 metros na pseudo-seção e 4 metros na seção modelada. Essa anomalia corrobora os dados das curvas de resistividade e indicam uma clara relação com contaminação. Na imagem é possível observar que entre 70 e 80 metros, próximo à lagoa, na camada de resistividade de cor verde-amarelada está com aproximadamente 380-650 ohms.metro e há uma queda de resistividade, para 70-200 ohms.metro na cor avermelhada, números semelhantes aos números da curva de resistividade da SEV na posição de 90 metros.

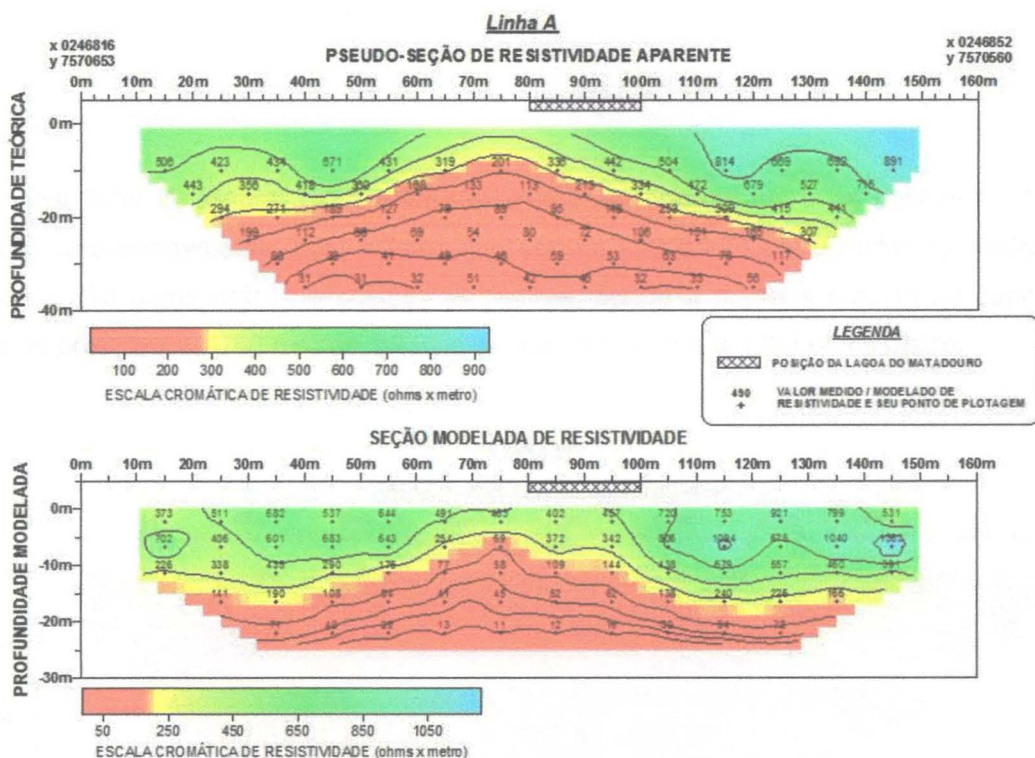


Figura 11: Caminhamento elétrico com *Terrameter System* SAS4000 feito na linha A apresentando as seções de resistividade aparente e modelada.

Com as linhas A, B e C do SYSCAL foram feitas as seções modeladas e elaborados mapas, com o objetivo de confirmar a contaminação em extensão e profundidade.

As três figuras de seções modeladas indicam resultados diferentes na faixa dos primeiros 10 metros de profundidade. A linha A, Figura 12, indica contrastes de resistividade com anomalia de baixa, em torno da posição de 70-100 metros, com valores de 100 ohms.metro aproximadamente.

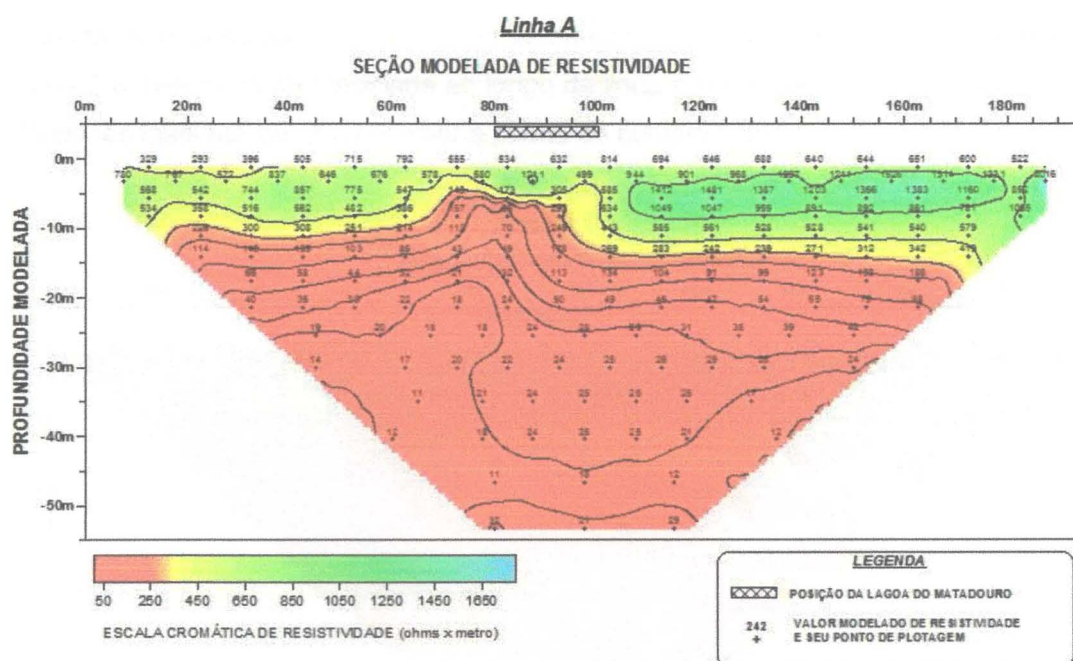


Figura 12: Caminhamento elétrico com SYSCAL PRO feito na linha A.

Na linha B, Figura 13, a anomalia está mais pontual entre as posições 70 e 90 metros, aproximadamente, com valores que vão de 792 a 273 ohms.metro na posição 70 metros e 313 ohms.metro na posição 90 metros, sendo a primeira medida na superfície. Entre as posições 75-180 metros, há valores que vão de 491 a 2989 ohms.metro.

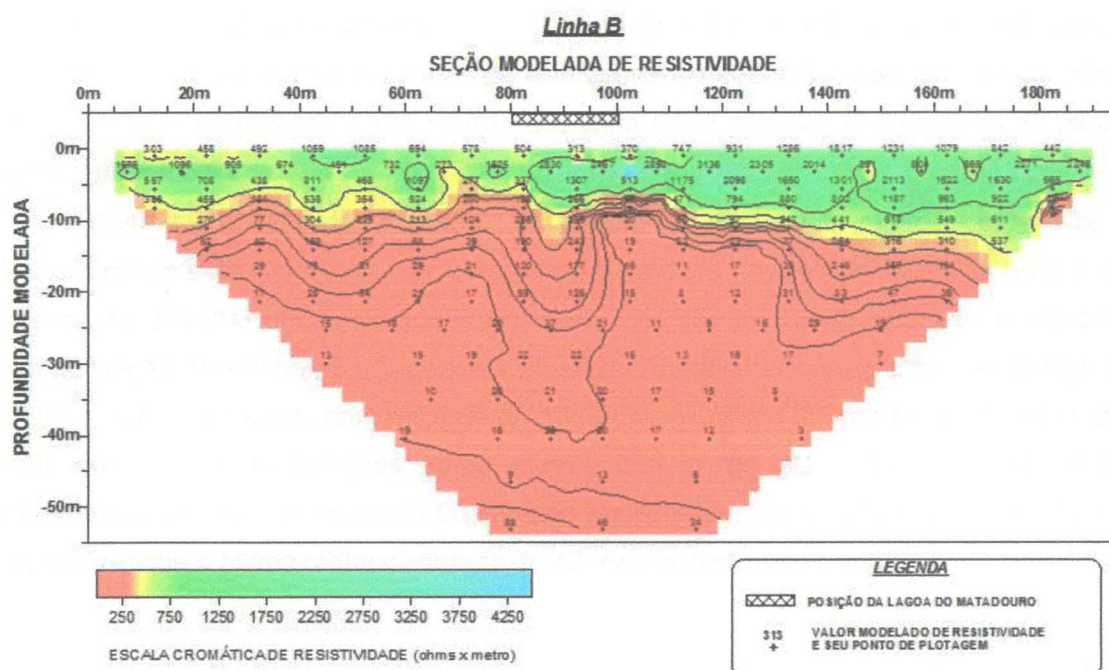


Figura 13: Caminhamento elétrico com SYSCAL PRO feito na linha B.

Já na linha C, Figura 14, as resistividades estão distribuídas de maneira mais homogênea e é possível ver que há uma camada de resistividade mais elevada nos primeiros 6-8 metros de profundidade ao longo da linha e então há a queda para valores de resistividades mais baixos, podendo ser a pluma de contaminantes.

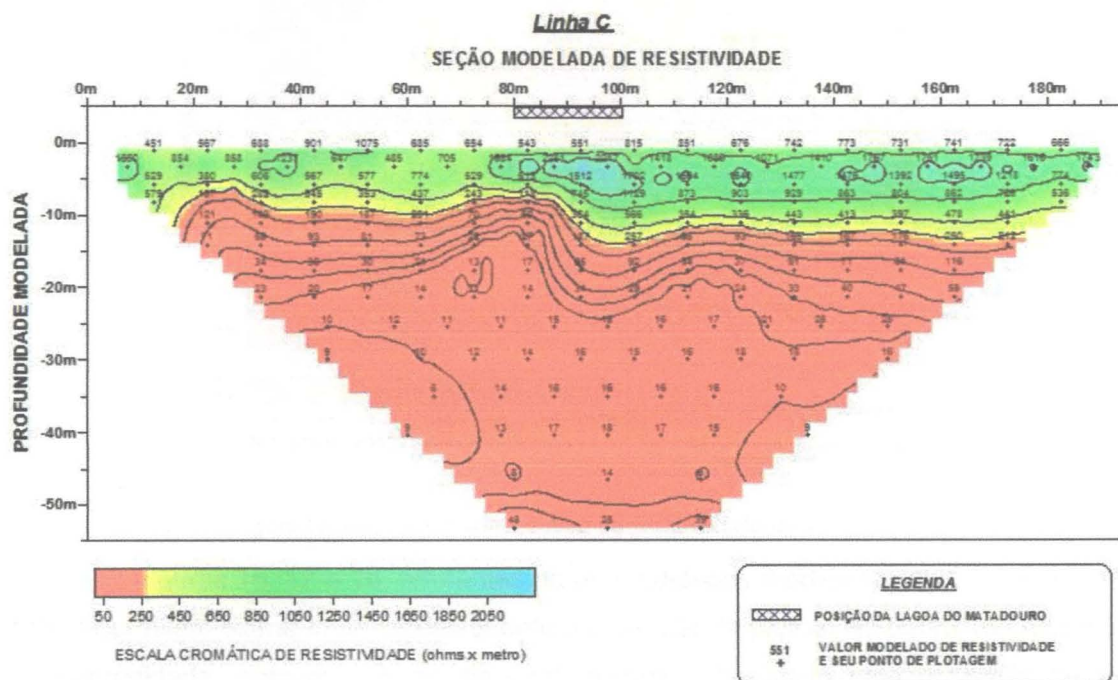


Figura 14: Caminhamento elétrico com SYSCAL PRO feito na linha C.

Abaixo encontram-se os mapas em planta feitos com as linhas A, B e C dos caminhamentos elétricos feitos com o SYSCAL PRO. A linha A está mais próxima à lagoa e está na coordenada Y=0. As linhas de levantamentos estão distantes 20 metros entre si, com a linha B na posição Y=20 metros e a linha C na posição Y=40 metros. O exagero vertical utilizado foi de 2X.

Conforme observado na Figura 15, na profundidade de 1,11 metros, percebe-se que a resistividade está distribuída com certa homogeneidade nas proximidades da linha A, com valores de 300-700 ohms.metro aproximadamente, não indicando qualquer evidência de contaminação. Nas linhas B e C pode-se visualizar resistividades mais altas nas posições de 40-60 e 120-170 metros, com máxima de 1658 ohms.metro. Há uma faixa de resistividade mais baixa entre as posições 65-90 metros que chega até a linha C, mas não foi interpretada como início da pluma porque não houve queda significativa de resistividade e é improvável que a pluma tenha dispersão de 40 metros nos níveis iniciais.

VISTA EM PLANTA DA LAGOA DO MATADOURO NA PROFUNDIDADE DE 1,11 m

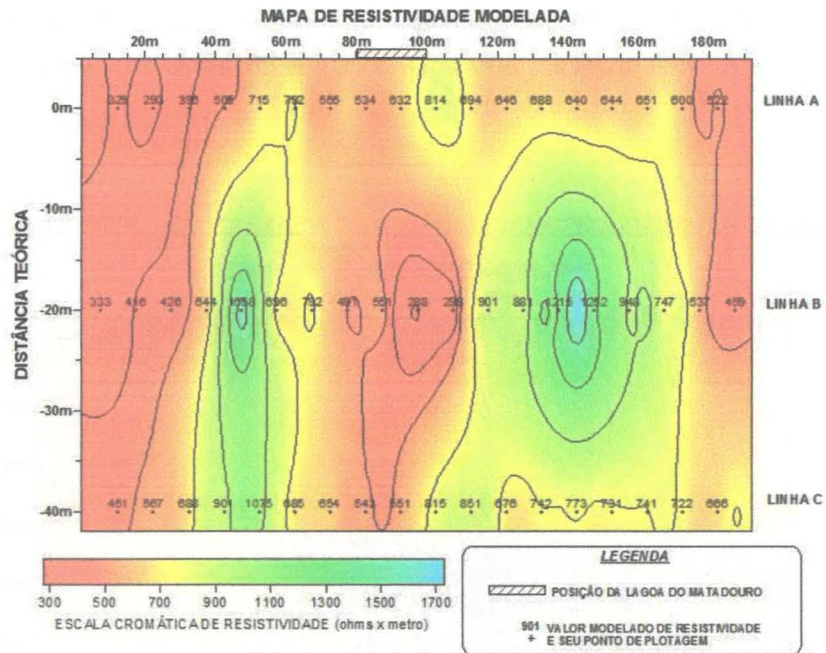


Figura 15: Mapa em planta da área na profundidade de 1,11 metros.

As Figuras 16, 17 e 18, referentes às profundidades modeladas de 3,33, 5,67 e 8,24 metros permitem extrair informações quanto à extensão da pluma. Na figura 16, 3,33 metros de profundidade, nota-se o início da contaminação observado pela anomalia de baixa resistividade nas proximidades da lagoa, entre as posições 60-80 metros e entre 90-120 metros. A contaminação segue seu fluxo em direção a NW e chega à linha B com resistividade de 273 ohms.metro.

VISTA EM PLANTA DA LAGOA DO MATADOURO NA PROFUNDIDADE DE 3,33 m

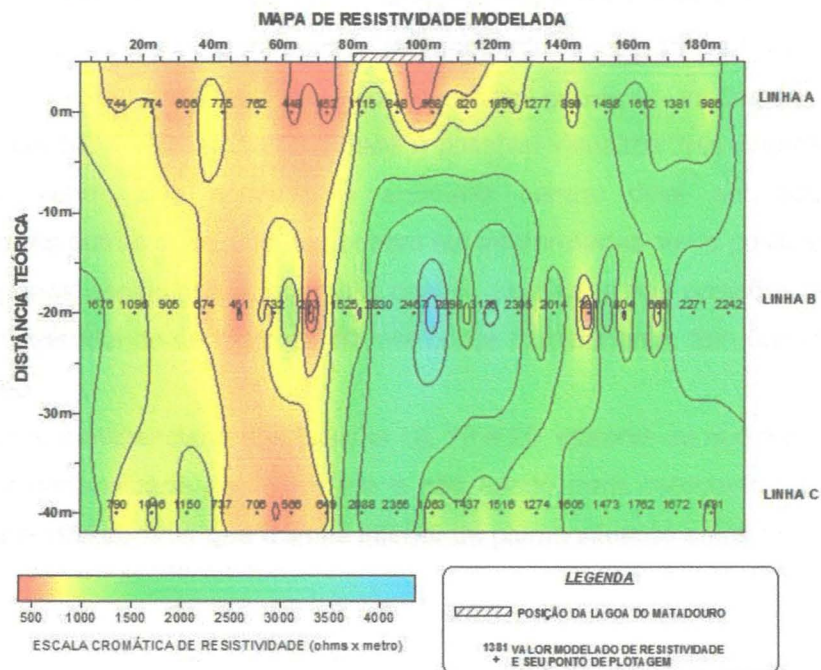


Figura 16: Mapa em planta da área na profundidade de 3,33 metros.

A Figura 17 diz respeito às resistividades na profundidade modelada de 5,67 metros, indicando um contraste de resistividade bem visível, alertando sobre a presença de contaminante na posição entre 65 a 100 metros que inicia na linha A e estende-se até a linha B.

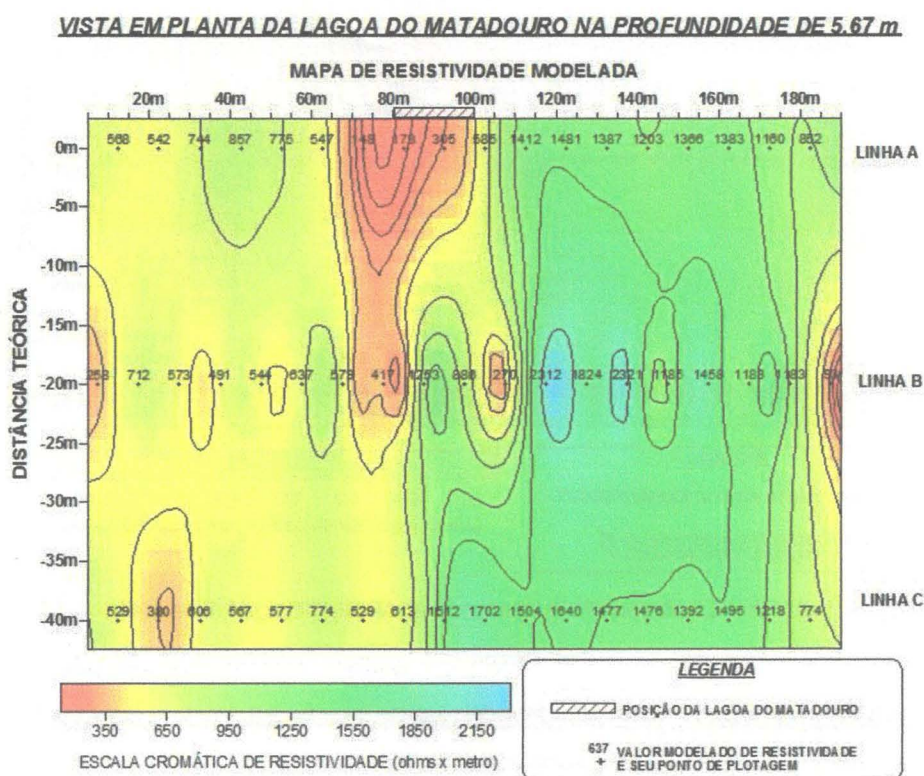


Figura 17: Mapa em planta da área na profundidade de 5,67 metros.

A Figura 18 a seguir representa a profundidade modelada de 8,24 metros e, para efeito de comparação, ainda está no terceiro estrato geolétrico modelado pela curva de resistividade das SEVs. Nessa profundidade é possível visualizar três anomalias de baixas resistividades, sendo que somente a anomalia central deve ser ocasionada pela contaminação. As outras duas, laterais, podem ser interpretadas como possíveis causas não antrópicas, apenas geológicas. A anomalia central, localizada nas posições de 65 metros e 100 metros e estendendo-se mais de 40 metros de comprimento, tem formato alongado e até homogêneo.

Conforme é evidenciado nas Figuras 18, 19 e 20, observa-se que a contaminação se estende até a profundidade de 11 metros e não sendo mais detectada na Figura 20 (21 metros). Isto permite concluir que o limite inferior da pluma situa-se entre 11 e 21 metros.

VISTA EM PLANTA DA LAGOA DO MATADOURO NA PROFUNDIDADE DE 8.24 m

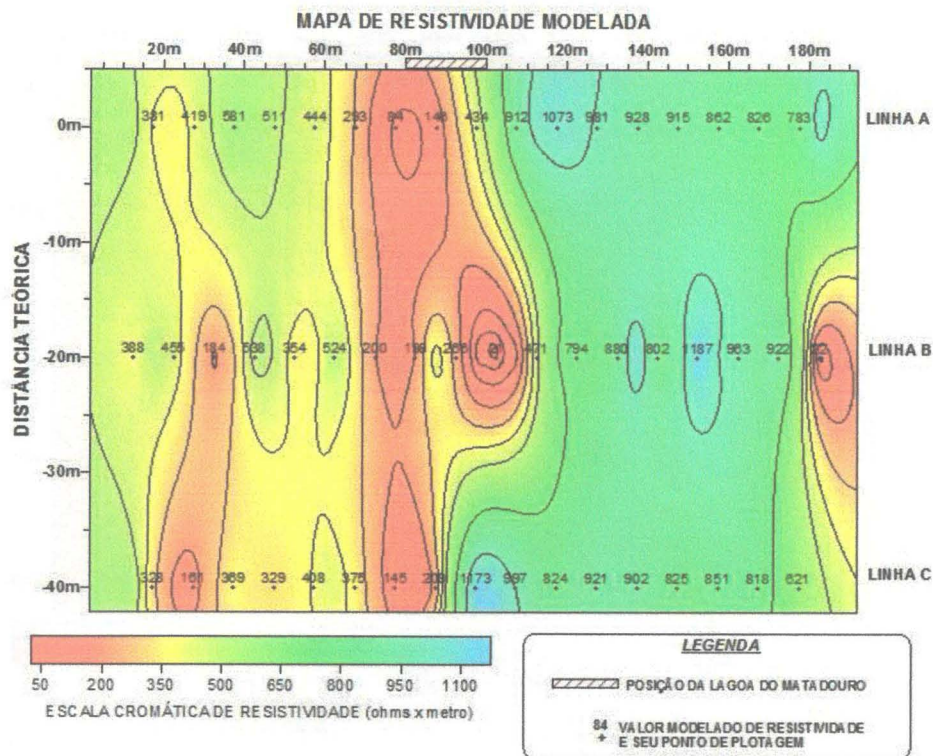


Figura 18: Mapa em planta da área na profundidade de 8,24 metros.

VISTA EM PLANTA DA LAGOA DO MATADOURO NA PROFUNDIDADE DE 11.0 m

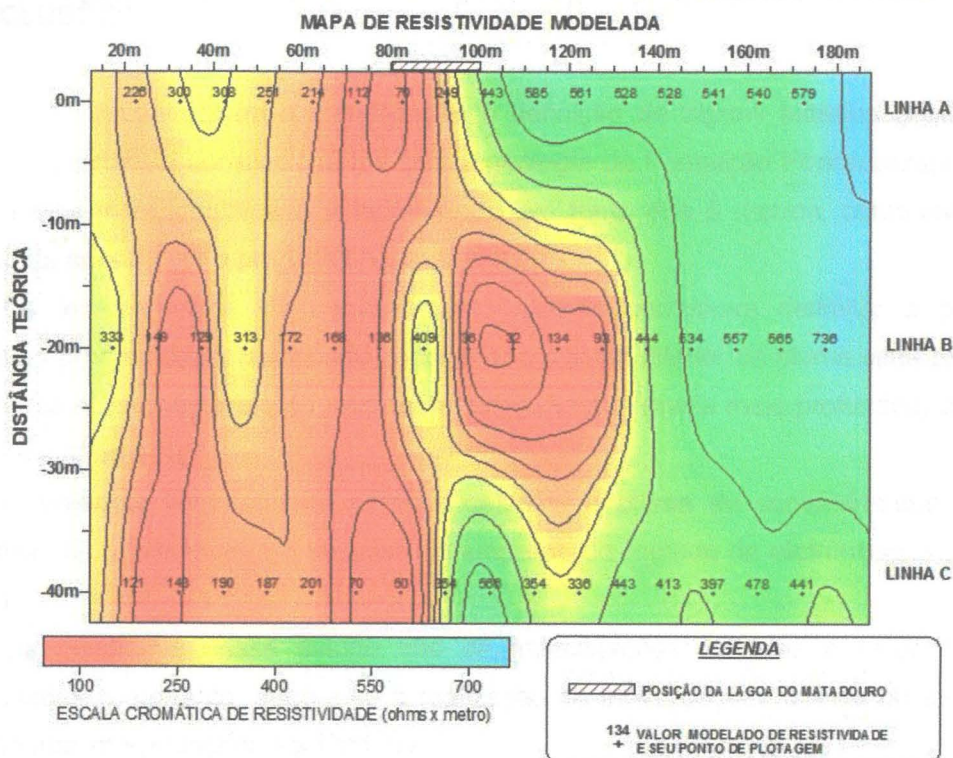


Figura 19: Mapa em planta da área na profundidade de 11,0 metros.

VISTA EM PLANTA DA LAGOA DO MATADOURO NA PROFUNDIDADE DE 21,32 m

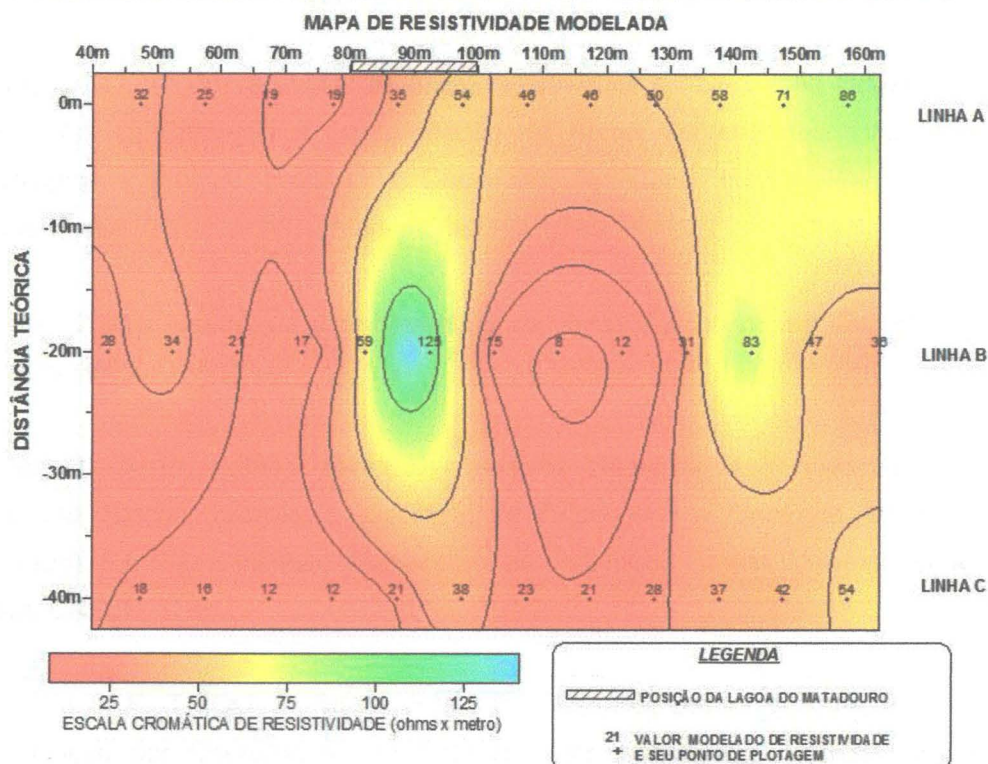


Figura 20: Mapa em planta da área na profundidade de 21,32 metros.

9.CONCLUSÕES

As SEVs permitiram a identificação e definição de alguns estratos geológicos do local, sendo possível correlacioná-los com a geologia da Formação Pirassununga. O nível d'água também foi identificado e interpretado em torno dos 5 metros, compatível com a geologia da área e com o processamento dos dados.

Os levantamentos de caminhamento elétrico permitiram delimitar a pluma em extensão e profundidade, permitindo concluir que o limite inferior da pluma situa-se entre 11 e 21 metros e apresenta até 40 metros de extensão nos níveis mais profundos, com o seu fluxo direcionado a NW.

O presente levantamento permitiu delimitar a pluma de contaminantes de forma tridimensional, o que mostra o sucesso do emprego do método da eletrorresistividade para este fim.

Os resultados desse estudo são de investigações indiretas e estão sujeitos a ambiguidades e, portanto, sugere-se a realização de investigações diretas na área para a definição das interpretações aqui obtidas.

10.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, A.C.O., (2006). *Métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida Aplicados nos Estudos da Captação e Contaminação de Águas Subterrâneas: Uma Abordagem Metodológica e Prática*. Tese (Livre Docência). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, UNESP.

CETESB, (2001). *Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas* (2a ed.). CETESB, São Paulo. 389p.

GALLAS, J. D. F., (2000). *Principais Métodos Geoelétricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, UNESP. 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*, vol. 23(1), 2005.

GALLAS, J. D. F., TAIOLI, F., MALAGUTTI FILHO, W., (2011). Induced polarization, resistivity, and self-potential: a case history of contamination evaluation due to landfill leakage. *Environ Earth Sci.*, 63, 251-261.

GANDOLFO, O. C. B., GALLAS, J. D. F., (2005). Eletrorresistividade 3D – Uma avaliação preliminar da técnica. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 23(2), 2005.

GANDOLFO, O. C. B., (2007). *Um estudo do imageamento geoelétrico na investigação rasa*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, USP. 215p.

MASSOLI, M, (1983). Geologia da folha de Piraçununga, SP. *Rev. IG.*, São Paulo, jan./dez., vol.4 (1/2), 25-51.

MILANI, E.J. (1997). *Evolução Tectono-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu Relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental*. Tese (Doutorado). Rio Grande do Sul: Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

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.

MILANI, E.J., MELO, J.H.G., SOUZA, P.A., FERNANDES, L.A., FRANÇA, A.B., (2007). Bacia do Paraná. *B. Geoci. Petrobrás*, Rio de Janeiro, v.15, n. 2, p. 265-287.

ORELLANA, E., (1972). *Prospección geoelectrica em corriente continua*. Madrid: Paraninfo, 523p.

PARASNIS, D.S. (1995). *Principles of applied geophysics* (5a ed.). London: Chapman & Hall, 429p.

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

SARAIVA, F.A., (2010). *Avaliação de métodos geofísicos no comportamento espacial de Plumas de Necrochorume*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, USP.

