

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**MAPEAMENTO DE PLUMA DE CONTAMINAÇÃO EM LAGOA DE DISPOSIÇÃO  
DE RESÍDUOS NO CAMPUS USP DE PIRASSUNUNGA, SP**

André Ribeiro Barril

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas  
Co-orientador: Dr. Fernando Augusto Saraiva

**Monografia de Trabalho de Formatura  
(TF-12/02)**

São Paulo  
2012

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**MAPEAMENTO DE PLUMA DE CONTAMINAÇÃO EM LAGOA DE DISPOSIÇÃO  
DE RESÍDUOS NO CAMPUS USP DE PIRASSUNUNGA, SP**

TF – 12/02

**Aluno**  
André Ribeiro Barril

**Orientador**  
Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

**Co-orientador**  
Dr. Fernando Augusto Saraiva

São Paulo  
2012

## **AGRADECIMENTOS**

Um agradecimento geral a todas as pessoas que me ajudaram a trilhar esse perigoso caminho da graduação. Em especial ao meu orientador José Faraco Gallas, que foi durante esse periodo muito mais do que apenas um orientador.

Agradeço aos meus Pais e a minha namorada Juliany, meu grande e eterno amor. Sem eles nada disso seria possível.

## RESUMO

A Geofísica aplicada engloba um conjunto de métodos de investigação indireta que servem para avaliar o subsolo, determinando suas propriedades físicas e estruturas.

Este trabalho se utiliza de técnicas geofísicas, designadas métodos geoelétricos, para mapear uma pluma de contaminação e indicar sua direção de propagação. Tal pluma é gerada pela disposição de resíduos, oriundos de área destinada a suinocultura, em duas lagoas no campus USP do município de Pirassununga.

Os métodos geoelétricos são métodos de investigação rasa, baseados nas diferentes propriedades elétricas do subsolo. A escolha do método, portanto, necessariamente deve respeitar as características geológicas e hidrogeológicas da área investigada. Para mapear a pluma de contaminação e indicar sua direção de propagação, dois métodos geoelétricos foram definidos: Potencial Espontâneo (SP), através da técnica dos potenciais, e Eletrorresistividade (ER), por meio das técnicas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV), e Caminhamento Elétrico (CE).

Os ensaios geofísicos de Eletrorresistividade possibilitaram a identificação de anomalias de baixa resistividade, em seções de Caminhamento Elétrico (CE), delineando os limites da pluma de contaminação. Além disso tais ensaios viabilizaram a indicação da profundidade do nível freático e definição dos estratos geoelétricos que compõem a área, através da técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV). A direção de fluxo freático e, consequentemente, a direção de propagação da pluma de contaminação, foi estabelecida através de um ensaio de Potencial Espontâneo (SP), cuja interpretação se baseou na teoria dos potenciais de fluxo.

## ABSTRACT

The Applied geophysics includes a set of indirect research methods that serve to evaluate the subsurface, determining their physical properties and structures.

This work makes use of geophysical techniques, designated as geoelectrical methods, to map a plume of contamination and indicate its direction of propagation. This plume is generated by the disposal of waste from the area of pig farming in two lakes in campus USP, in the city of Pirassununga.

The geoelectrical methods are research methods of the shallow surface, based on the different electrical properties of the subsurface. The choice of method, therefore, must necessarily respect the geological and hydrogeological characteristics of the area investigated. To map the plume of contamination and indicate its direction of propagation, two geoelectrical methods were defined: Self Potential (SP), through the technique of potentials, and Electroresistivity (ER), using the techniques of Vertical Electrical Sounding (VES), and electrical profiling.

The tests of electroresistivity allowed identification of low resistivity anomalies in sections of electrical profiling technique delineating the boundaries of the plume of contamination. Furthermore these tests enabled the indication of the depth of the phreatic level and defining the strata geoelectrical in area, through the technique of vertical electrical sounding (VES). The direction of underground water flow and hence the direction of propagation of the plume of contamination has been established through a application of Self Potential (SP) technique, whose interpretation was based on the theory of potential flow.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área investigada em destaque na cor vermelha.....	3
Figura 2. Cronograma de atividades do trabalho de formatura.....	4
Figura 3. Localização da área de estudo .....	7
Figura 4. Localização da área de pesquisa. Modificado de I.G. (1981). Folha SF-23-V-C-V-3.....	15
Figura 5. Gráfico: concentração de NaCl x resistividade. Retirado de Auge (2008). 19	
Figura 6. Caminhamento Elétrico. Modificado de Ellis (1998). .....	20
Figura 7. Arranjo Shlumberger. Retirado de Braga (2002). .....	22
Figura 8. Potencial Espontâneo. Retirado de Orellana (1972). .....	24
Figura 9. Técnica dos gradientes. Retirado de Gallas (2000). .....	24
Figura 10. Técnica dos potenciais. Retirado de Gallas (2000). .....	25
Figura 11. Área de estudo com a indicação das linhas onde foram realizados os caminhamentos elétricos, L – 0, L – 20 e L – 40, e o levantamento de SP .....	27
Figura 12. Modelos geoelétricos das Sondagens Elétricas Verticais executadas na área de estudo.....	33
Figura 13. Mapa de isovalores de potencial espontâneo.....	35
Figura 14. Pseudo-Seção e Seção de resistividade L-0.....	37
Figura 15. Pseudo-Seção e Seção de resistividade L 20.....	38
Figura 16. Pseudo-Seção e Seção de resistividade L-40.....	39
Figura 17. Seções modeladas e interpretadas de Caminhamento Elétrico.....	41
Figura 18. Direções de propagação da pluma de contaminação, gerada pelas lagoas artificiais na área estudada. ....	43

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>2. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO E CRONOGRAMA DE ATIVIDADES.....</b>	<b>4</b>
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>6</b>
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>9</b>
4.1 Contexto Geológico Regional .....	9
4.1.1 Grupo Tubarão .....	10
4.1.2 Grupo Passa Dois .....	11
4.1.3 Grupo São Bento.....	12
4.1.4 Depósitos Cenozóicos.....	13
4.2 Geologia Local .....	14
4.3 Métodos Geoelétricos .....	15
4.3.1. Eletrorresistividade (ER) .....	16
4.3.2. Potencial espontâneo (SP).....	22
4.4 Métodos Geoelétricos e Meio Ambiente .....	25
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
5.1 Caminhamento Elétrico (CE) .....	28
5.2. Sondagem elétrica vertical (SEV) .....	29
5.3 Potencial espontâneo (SP) .....	30
<b>6. RESULTADOS.....</b>	<b>32</b>
6.1 Sondagem Elétrica Vertical.....	32
6.2 Potencial Espontâneo (SP).....	35
6.3 Caminhamento Elétrico (Ce).....	36
<b>7. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES .....</b>	<b>41</b>
<b>8. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>44</b>
<b>ANEXO I - Dados do Levantamento de Campo de Potencial Espontâneo (SP).....</b>	<b>48</b>
<b>ANEXO II - Dados do Levantamento de Campo de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) .....</b>	<b>50</b>
<b>ANEXO III - Dados do Levantamento de Campo de Caminhamento Elétrico (CE) ..</b>	<b>52</b>

## **1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS**

A sociedade caminha, de uma forma geral, a passos curtos para o uso sustentável do solo e água, problema iniciado após a revolução industrial em meados do século XIX. Embora nos últimos anos tenha havido uma maior conscientização sobre o tema e tenham sido criadas leis ambientais melhor elaboradas e mais rígidas, a insipiente fiscalização, o crescimento populacional concentrado nos centros urbanos e a proliferação de indústrias, que, via de regra, não levam em conta os efeitos nocivos de suas respectivas atividades, forçam os limites do meio ambiente, muitas vezes ultrapassando a capacidade assimilativa do mesmo. Portanto, métodos adequados de identificação das áreas contaminadas e remediação das mesmas se tornam cada vez mais importantes. Nesse contexto temos a geofísica aplicada, principalmente os métodos geoelétricos, como uma importante ferramenta na avaliação da existência de possíveis contaminações e seu dimensionamento espacial.

Os métodos geoelétricos vêm conquistando espaço principalmente por apresentarem baixos custos operacionais, quando comparados a outros métodos de investigação direta, e rápida execução, cobrindo grandes áreas em um intervalo de tempo relativamente curto. Além disso, proporcionam uma caracterização contínua e representativa, em oposição aos métodos diretos de investigação da subsuperfície, que são pontuais.

É objetivo deste trabalho o delineamento de uma pluma de contaminação gerada pela disposição de resíduos, oriundos de uma área destinada a suinocultura, em duas lagoas artificiais, fotografias 1 e 2, assim como, a indicação da direção de propagação de tal pluma. A área de estudo localiza-se no interior do campus da Universidade de São Paulo-USP do município de Pirassununga, figura 1.



Fotografia 1. Lagoa de disposição de resíduos



Fotografia 2. Lagoa de disposição de resíduos. As fotografias foram tiradas da mesma posição entre as lagoas.

Para atingir esse objetivo dois métodos geoelétricos foram escolhidos: potencial espontâneo (SP), se utilizando da técnica dos potenciais, e eletrorresistividade (ER), através das técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV), arranjo Schlumberger, e caminhamento elétrico (CE), arranjo dipolo-dipolo.

O ensaio de potencial espontâneo (SP) buscou identificar a direção de fluxo da água subterrânea. Os ensaios geofísicos de eletrorresistividade, o método que encontra maiores aplicações em estudos hidrogeológicos, segundo Gandolfo (2007), definiram contrastes de resistividade, objetivando determinar a extensão e a profundidade da pluma de contaminação, através da técnica de caminhamento elétrico (CE), e também a profundidade do nível da água, por meio das sondagens elétricas verticais (SEV).

O local de estudo é a área jusante às duas lagoas indicadas na figura 1.



Figura 1. Área investigada em destaque na cor vermelha.

## 2. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO E CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

O presente trabalho de formatura teve início já no final de 2011, com a definição da área de estudo, tipo de atividades a serem realizadas e o estabelecimento de metas. A partir das definições iniciais, houve o início da pesquisa bibliográfica, que se estendeu por todo o período destinado à confecção do trabalho de formatura.

A estrutura do trabalho de formatura é composta por etapas, figura 2, cada uma com seu respectivo peso na composição da avaliação final do mesmo. A primeira etapa do trabalho correspondeu à entrega do projeto inicial em abril deste ano. O projeto inicial teve como principal finalidade formalizar a proposta de trabalho, além de, através do conteúdo exigido, servir como base para o planejamento de todo o trabalho.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abri	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
Fundamentação Bibliográfica											
trabalhos de Campo											
Projeto Inicial											
Interpretações											
Relatório de Progresso											
Monografia											

Figura 2. Cronograma de atividades do trabalho de formatura.

Com o conhecimento adquirido nas etapas anteriores e a experiência prévia do orientador na área de estudo, foi feito o planejamento e traçado o escopo da "campanha" geofísica que seria realizada durante os trabalhos de campo. Foram definidos nessa etapa vários temas como: métodos geoelétricos utilizados, tamanho das malhas, espaçamento do dipolo, níveis de investigação, quantidade e localização das SEVs etc.

Os trabalhos de campo ocorreram entre os dias 18/06/2012 e 22/06/2012. Infelizmente as condições climáticas não foram favoráveis, ocorreu um grande volume de precipitação de chuvas. Tal fato impediu que todas as SEVs programadas fossem realizadas, porém, sem acarretar prejuízo ao objetivo a que se propunham.

A etapa seguinte do trabalho de formatura foi a entrega do relatório de progresso, programada para o início de agosto. Nessa etapa foi possível apresentar parcialmente os resultados dos trabalhos de campo já processados.

Os meses de agosto a outubro foram planejados para a elaboração da monografia do trabalho de formatura. Na monografia constam a caracterização da área, contexto geológico e hidrogeológico, compilação, integração e processamento de dados, análise e conclusões.

### **3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A área alvo de estudo é a área jusante às duas lagoas artificiais de disposição de resíduos, localizada em uma região predominantemente rural no interior do campus da Universidade de São Paulo-USP do município de Pirassununga, Estado de São Paulo, altura do Km 215 da Rodovia Anhanguera, SP 330 , figura 3.

O município Pirassununga se encontra na região nordeste do Estado de São Paulo, figura 3, o mesmo possui uma população de 70.138 habitantes, de acordo com o Censo 2010, e área de 727,942 km<sup>2</sup>. Os municípios limítrofes à Pirassununga são: Descalvado, Porto Ferreira, Santa Cruz das Palmeiras, Analândia, Mogi Guaçu, Aguaí, Leme e Santa Cruz da Conceição.

Pirassununga é atendida pelas seguintes rodovias: SP 330 – Rodovia Anhanguera, SP 225 - Rodovia Deputado Ciro Albuquerque/Deputado Rogê Ferreira, SP 201 - Rodovia Prefeito Euberto Nemésio Pereira de Godoy e SP 328 - Rodovia Pirassununga-Porto Ferreira.

O clima da região é classificado como tropical de altitude, Cwa na classificação climática de Köppen-Geiger, com média anual em torno de 21°C e período chuvoso entre outubro e março. O clima tropical de altitude é o tipo climático que predomina nos planaltos e serras do sudeste brasileiro. Esse tipo de clima é controlado por massas tropicais e equatoriais sofrendo influência também dos avanços e recuos de massas polares.

Pirassununga faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu. O Rio Mogi Guaçu nasce no Estado de Minas Gerais no município de Bom Repouso, e sua bacia hidrográfica possui uma área de drenagem total de 18.938 km<sup>2</sup>. Seus principais afluentes são os rios: Onça, Itupeva, Claro, Jaguari Mirim, Eleutério, do Peixe, do Roque, Bonito, Araras e Mogi Mirim. Além do Rio Mogi-Guaçu, atravessam o município de Pirassununga os seus afluentes: Rio Jaguari Mirim e Rio Mogi Mirim.

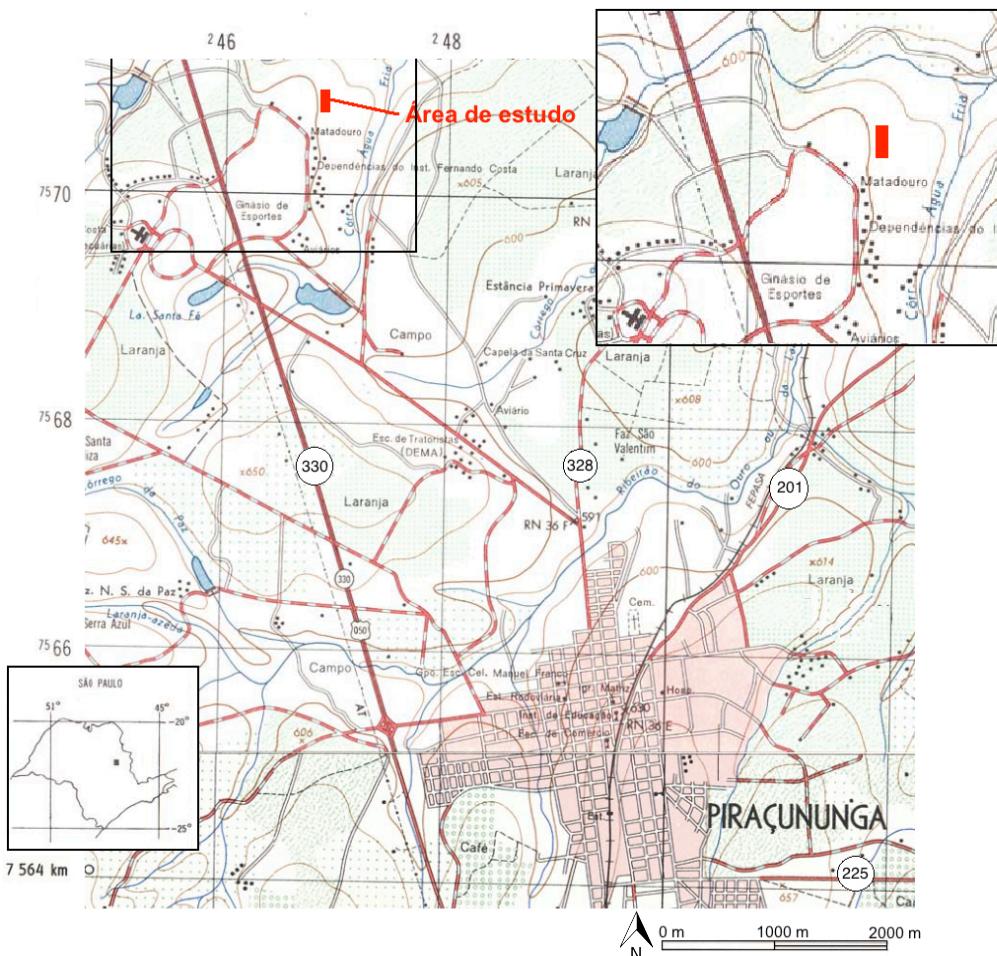


Figura 2. Localização da área de estudo, em vermelho, com destaque para as rodovias que atendem Pirassununga e os cursos d'água mais próxima à área investigada.

A área de estudo se situa entre dois cursos da água: o Córrego Tijucó Preto, ao norte da área, e o Córrego Água Fria, a sudeste, figura 3. Ambos distam aproximadamente 500m da área investigada. Uma pesquisa executada junto ao Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo - DAEE, indica usos diversos dos recursos hídricos fornecidos por esses Córregos como irrigação, hidroagricultura e pecuária. Nessa pesquisa também foi verificado quais são os aquíferos presentes em Pirassununga: Diabásico, Guarani, principalmente com a formação Pirambóia, e Tubarão, aquíferos sedimentares.

Geomorfologicamente Pirassununga se situa na Depressão Periférica Paulista. Segundo Almeida (1964), a Depressão Periférica é uma área sensivelmente rebaixada pela erosão, localizada entre as terras altas do planalto

atlântico e as cristas das cuestas basálticas. A maior parte da Depressão Periférica é composta por relevo suave e colinoso, porém, onde houve intrusão de rochas básicas, respectivas ao magmatismo Serra Geral, geralmente há a presença de relevo mais acidentado, na forma de morros, morros e até serras isoladas, principalmente na faixa Rio Claro-Araras-Pirassununga.

O município de Pirassununga apresenta uma boa variabilidade de classes de solos. De acordo com o mapa pedológico do Estado de São Paulo, Oliveira et al. (1999), as classes dominantes são: Latossolos Vermelhos distróficos e distroférricos, de textura argilosa, ambos A moderado e proeminente, de relevo suave ondulado e plano; e Latossolos Vermelho-Amarelos, distróficos, de textura média, argilosa e relevo suave ondulado.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Contexto Geológico Regional

A área investigada localiza-se na porção nordeste da Bacia do Paraná. A Bacia do Paraná, uma bacia intracratônica, possui uma forma ovalada, com eixo maior N-S, e área de aproximadamente 1.500.000 km<sup>2</sup>, dentre os quais aproximadamente 1.000.000 km<sup>2</sup> encontram-se em território brasileiro, o restante se divide entre o Paraguai oriental, o nordeste da Argentina e norte do Uruguai. A Bacia do Paraná, cujo nome deriva do Rio Paraná, possui registro sedimentar que compreende rochas depositadas do período Ordoviciano ao Cretáceo, abrangendo um intervalo de tempo entre 460 e 65 milhões de anos atrás. Esse pacote sedimentar-magmático atinge uma espessura em torno de 7000 m.

Os mecanismos de sua origem e evolução ainda são muito debatidos. Fulfaro et al. (1982 apud Milani, 2007), afirmam que um conjunto de calhas aulacogênicas teriam sido as precursoras da sedimentação cratônica. Segundo Zalán et al. (1990 apud Milani, 2007), a sinéclise teria como origem uma contração térmica após o Ciclo Brasiliano. Já Milani (2007), acredita que a origem da Bacia do Paraná se deu pela reativação de zonas de fraqueza do embasamento, de direção NE-SW, devido a interação da placa continental com a litosfera oceânica do Panthalassa e com uma série de terrenos alóctones na borda do continente, evento correspondente à Orogenia Oclóyica do Neo-Ordoviciano. A bacia teria nascido como uma bacia de ante-país, e o caráter de bacia intracratônica foi assumido paulatinamente.

Na área em estudo, porção nordeste da Bacia do Paraná, afloram, segundo Landim et al. (1980), o Subgrupo Itararé e a Formação Aquidauana, Formação Tatuí, do Grupo Tubarão, Formações Irati e Corumbataí, pertencentes ao Grupo Passa Dois.

#### 4.1.1 Grupo Tubarão

- **Subgrupo Itararé e Formação Aquidauana**

O Subgrupo Itararé, de idade permo-carbonífera, é coevo à Formação Aquidauana na Bacia do Paraná, apresentando contato interdigitado. O Subgrupo Itararé é composto por depósitos de origem glacial continental, glacial marinho, fluvial, deltáico, lacustre e marinho. O mesmo é representado por uma assembléia de rochas diversificada: arenitos de granulação variada, ritmitos, conglomerados, diamictitos, tilitos, siltitos e folhelhos.

Segundo Wu (1989), Os diamictitos ocorrem na parte inferior do Subgrupo, já os arenitos, de coloração acinzentada e granulometria variável, ocorrem nas partes inferior e superior. Nas porções média e superior do Subgrupo predominam sedimentos finos, incluindo siltitos, lamitos e arglitos.

Millani (2007), afirma que a sedimentação do Subgrupo Itararé em sua porção inferior esteve diretamente ligada ao degelo da calota polar, sendo caracterizada por depósitos em que foram importantes os mecanismos ligados a fluxos de massa e resedimentação.

A Formação Aquidauana é composta por rochas sedimentares que representam depósitos continentais, com variação granulométrica muito ampla, predominantemente arenitos vermelhos, médios a grossos, feldspáticos e subordinadamente arenitos finos, conglomerados, siltitos, folhelhos rítmicos e diamictitos.

Segundo Cottas (1983), a Formação Aquidauana na borda nordeste da Bacia do Paraná, é representada por dois membros distintos: Rio Capetinga, caracterizado por arenitos com intercalações de lamitos, cuja origem estaria ligada à progradação de leques aluviais em lagos periglaciais; e Rio Tambaú, representado por lamitos com raros corpos arenosos, cuja origem estaria ligada à deposições lacustres.

- **Formação Tatuí**

A Formação Tatuí, de idade Permiana, correlaciona-se às formações Palermo e Rio Bonito, que representam o início do ciclo pós-glacial nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Esta unidade é constituída predominantemente por pelitos, formando espessas camadas de siltitos argilosos e intercalando-se, subordinadamente, camadas de arenitos, calcários, folhelhos e sílex. Massoli (1983), cita que subjacentes aos siltitos ocorrem, localmente, arenitos finos, esbranquiçados, com poucos metros de espessura, exibindo estratificação cruzada de pequeno porte.

#### **4.1.2 Grupo Passa Dois**

.

O Grupo Passa Dois aflora principalmente na porção leste da Bacia do Paraná. O mesmo é composto pelas formações Iratí, Corumbataí e Rio do Rasto, esta última ocorrendo apenas no sul do país.

- **Formação Iratí**

A Formação Iratí, de idade Eo-permiana, em torno de  $278 \text{ Ma} \pm 2,2 \text{ Ma}$ , Santos et al. (2006 apud Milani, 2007), é composta por argilitos, folhelhos siltosos e siltitos, de coloração acinzentada, folhelhos pretos, muitas vezes pirobetuminosos, calcários, dolomitos e calcários dolomíticos de coloração amarelada, que podem se encontrar silicificados, sílex, na forma de concreções e leitos, além de conglomerados, de forma mais restrita. A formação é divididas em dois membros, segundo Schneider (1974): Taquaral, membro inferior, e Assistência, membro superior. De acordo com Hachiro (1991 apud Ferreira, 2005), a sedimentação da formação Iratí ocorreu em mares rasos, com ciclos transgressivo-regressivos de menor ordem subordinados à transgressão pós-glacial na Bacia do Paraná

- **Formação Corumbataí**

A Formação Corumbataí representa um amplo sistema de planície de marés, segundo Milani (2007). A mesma é composta por siltitos de tonalidades cinza, creme e verde claro, lentes de arenitos muito finos e leitos de calcário. Apresenta estratificação plano-paralela predominantemente, mas também estratificação cruzada de baixo ângulo e camadas maciças, além de outras estruturas sedimentares como flasers, hummocks e gretas de contração. Segundo Ferreira (2005), sua ocorrência se dá de forma bastante extensa no vale do Rio Corumbataí, sofrendo afunilamento nas regiões de Leme e Pirassununga

#### **4.1.3 Grupo São Bento**

O Grupo São Bento é representado pelas formações Pirambóia e Botucatu na base, uma seqüência essencialmente clástica, em que há preponderância de frações arenosas. No topo há o registro de espessas rochas extrusivas da Formação Serra Geral, além de diques e soleiras correlatas à esta formação.

- **Formação Pirambóia**

Na Formação Pirambóia predominam arenitos muito-finos a finos, siltosos, brancos, com seleção regular. Como estruturas sedimentares principais a Formação Pirambóia apresenta estratificações cruzadas de pequeno a grande porte, estratificações cruzadas acanaladas de baixo ângulo, além de estratificações plano-paralelas. Segundo Caetano-Chang (1997), a deposição é predominantemente eólica, englobando sistema fluvial marginal e leques aluviais no topo.

- **Formação Botucatu**

É constituída por arenitos, finos a médios, de cor cinza-avermelhado, com grãos arredondados ou subarredondados, bem selecionados, bimodais. Constituem um expressivo pacote arenoso, espessuras de até 50m, cujas estruturas sedimentares mais marcantes são estratificações cruzadas acanaladas de médio a grande porte, que são um indicativo de sedimentação em ambiente desértico.

- **Formação Serra Geral**

A Formação Serra Geral representa uma sucessão de derrames de lavas, predominantemente básicas. São comuns, associados ao magmatismo Serra Geral, diques, cortando a seção sedimentar, e níveis de soleiras, intercaladas principalmente às formações Iratí e Tatuí, Segundo IPT (1981), intrudidas segundo os planos de estratificação dos sedimentos paleozóicos.

A Formação Serra Geral é o resultado do magmatismo de fissura, ocorrido no Cretáceo Inferior (entre 120 e 130 milhões de anos), segundo Schneider, et al. (1974), que sinaliza o fim da evolução gondwânica da Bacia do Paraná.

#### **4.1.4 Depósitos Cenozóicos**

Na porção nordeste da Bacia do Paraná, além dos depósitos quaternários, eluviais, coluviais e aluviais, distribuídos ao longo de topos, encostas e vales, há também a presença de depósitos terciários: Formação Pirassununga, Formação Santa Rita do Passa Quatro e Formação Rio Claro.

Esses depósitos são, em sua maioria, representados por coberturas descontínuas, areno-argilosas, com aproximadamente 10m de espessura,

castanhas, com poucas estruturas sedimentares. Inclusive alguns autores consideram que todos esses depósitos compõem a Formação Rio Claro, devido às semelhanças granulométricas, mineralógicas, faciológicas e geomorfológicas, Melo et al. (1997).

A origem de tais depósitos, segundo Melo et al. (1997), pode estar ligada tanto a fatores climáticos quanto tectônicos.

## **4.2 Geologia Local**

A área investigada situa-se no município de Pirassununga, Estado de São Paulo, no interior do campus da Universidade de São Paulo-USP. Segundo Massoli (1983), a folha Pirassununga apresenta uma coluna estratigráfica composta pelas formações Tatuí, Corumbataí, Pirambóia e Pirassununga, além de intrusões de diabásio e sedimentos quaternários.

A área em que ocorreu a investigação, de acordo com a folha Pirassununga, Massoli (1983), pertence à Formação Pirassununga, figura 4.

- **Formação Pirassununga**

Segundo Massoli (1983), a Formação Pirassununga, de idade terciária, ou Piraçununga como prefere o autor, é composta por areias argilosas, sem estruturas sedimentares, com espessuras de até 15 m, apresentando na base uma linha de seixos ou cascalheira compostos por quartzo, quartzito e pedaços de limonita. Ferreira (2005), acrescenta que se tratam de sedimentos inconsolidados, pobramente selecionados, sde coloração vermelho-amarelada, com raras estratificações cruzadas tabulares. Além disso, Ferreira reconhece duas fácies principais: uma conglomerática, constituída por seixos de quartzo, quartzito e fragmentos de siltitos, e uma areno-argilosa, caracterizada por sedimentos mal selecionados e grãos de quartzo dispersos na matriz.

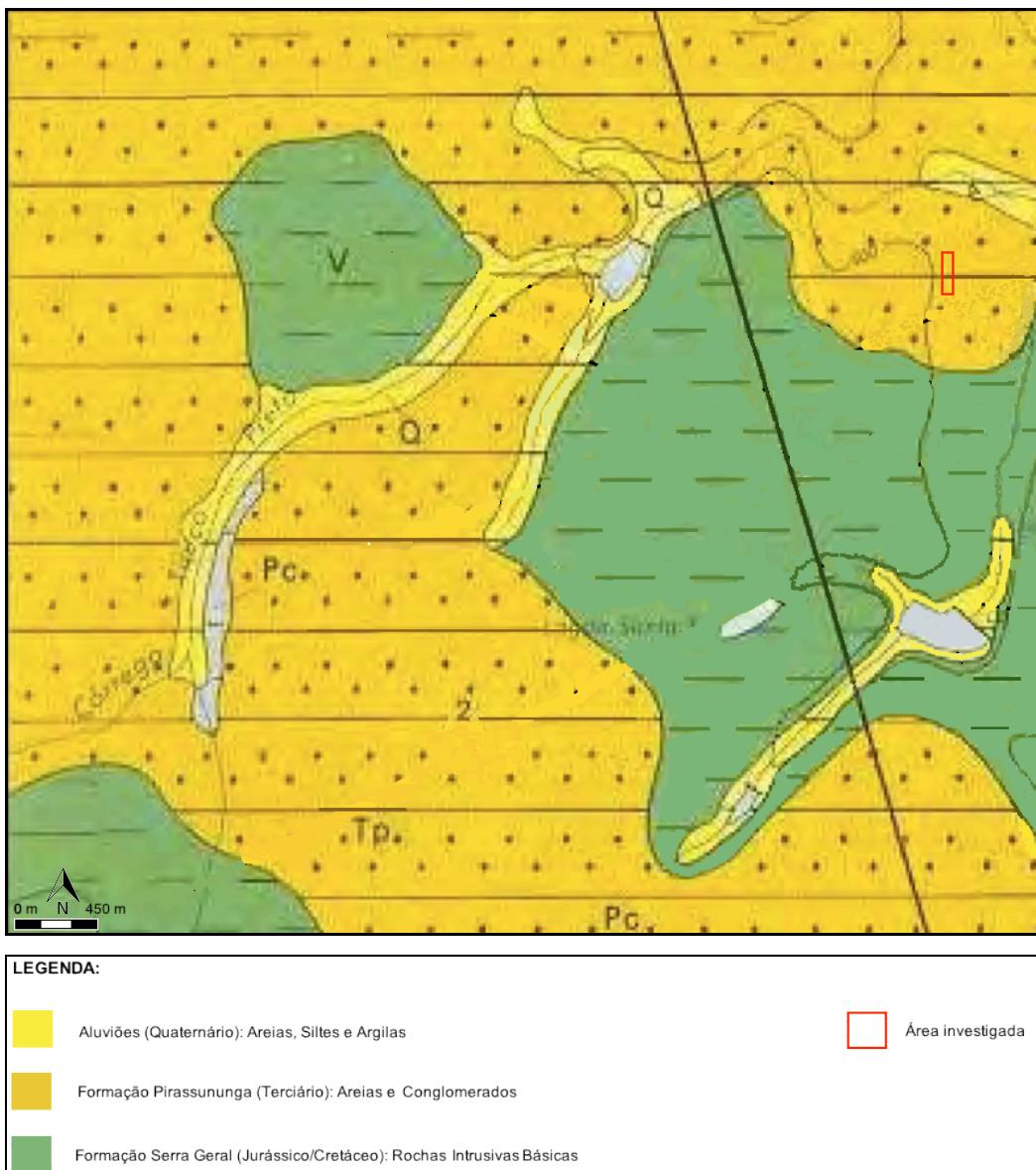


Figura 3. Localização da área de pesquisa. Modificado de I.G. (1981). Folha SF-23-V-C-V-3.

#### 4.3 Métodos Geoelétricos

Podemos afirmar que os métodos geoelétricos tiveram origem a partir do início do século XVIII, com a descoberta da resistência elétrica das rochas por Grey & Wheller, em 1720, e a condutividade do solo por Watson, em 1746 (Orellana, 1972). Mas foi somente em meados do século XX, motivado principalmente pela

prospecção mineral, que eles se desenvolveram e ganharam a importância que têm hoje.

Muitos trabalhos contribuíram para isso, como Parasnis (1970) e Orellana (1972), indicando os princípios teóricos e práticos da eletrorresistividade, posteriormente também abordado por Telford (1990).

#### 4.3.1. Eletrorresistividade (ER)

O método da eletrorresistividade é baseado na determinação do parâmetro físico resistividade elétrica. Tal parâmetro pode sinalizar algumas das características do ambiente geológico, contribuindo para a construção do conhecimento de seu verdadeiro estado e também de eventuais alterações do mesmo.

De acordo com Parasnis (1970), o método consiste em empregar uma corrente elétrica artificial no terreno através de dois eletrodos de corrente, denominados de A e B, estabelecendo desta forma uma distribuição de potencial, estudada através de eletrodos em que são medidas as diferenças de potencial geradas, eletrodos de potencial denominados M e N, permitindo inferir a distribuição da resistividade elétrica no subsolo do terreno. A resistividade é calculada através da seguinte expressão:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

onde:

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

Na expressão anterior  $\rho$  é a resistividade elétrica (ohm.m),  $K$  é o fator geométrico que depende da posição dos dipolos no terreno no momento do ensaio,

$\Delta V$  é a diferença de potencial entre os eletrodos M e N e, I é a intensidade de corrente que passa pelos eletrodos A e B.

Os eletrodos podem assumir diferentes disposições no terreno de acordo com os objetivos de cada técnica de investigação proposta, visando sempre a maneira mais confiável e o desenvolvimento mais rápido dos trabalhos. Essas diferentes disposições recebem o nome de "arranjos", e cada um deles apresenta suas próprias características, vantagens e desvantagens. As técnicas, o suporte prático do desenvolvimento do trabalho, são definidas de acordo com as características da área e principalmente os objetivos do estudo. As técnicas de investigação são divididas em 3 tipos: caminhamentos, sondagens e perfilagens.

No cálculo da resistividade há uma simplificação das condições do terreno, considerado homogêneo, que dificilmente ocorre na prática. Devido a essa aproximação o parâmetro medido é chamado resistividade aparente (pa) que, segundo Braga (2002), é a média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um determinado volume de material.

A propagação de corrente elétrica no subsolo ocorre de duas maneiras: através da condutividade eletrônica, onde o transporte de elétrons ocorre na matriz da rocha, e através de condutividade iônica, em que a propagação da corrente elétrica se dá pelo deslocamento de íons nas águas contidas nos poros de solos, sedimentos, rochas e também nas fraturas e fissuras de rochas.

As rochas são constituídas em sua maioria por minerais considerados isolantes, como as micas e o quartzo, fato que leva as mesmas, quando secas, a possuírem elevados valores de resistividade. A tabela 1, retirada de Ferreira (2002), exemplifica valores de resistividade e condutividade elétrica em rochas, solos, águas e substâncias químicas, evidenciando os fato das rochas serem classificadas, em geral, como isolantes. Entretanto, as rochas podem possuir poros, fraturas e fissuras preenchidos por eletrólitos, alterando o mecanismo principal de propagação de corrente elétrica, de condutividade elétrica para condutividade iônica, reduzindo drasticamente a resistividade elétrica das rochas.

Tabela 1 - Resistividade de rochas, solos, águas e substâncias químicas. Retirada de Ferreira (2002).

Material	Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )	Condutividade (Siemen/m)
<b>Rochas ígneas e metamórficas</b>		
Granito	$5.0 \times 10^3$ a $1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^{-6}$ a $2.0 \times 10^{-4}$
Basalto	$1.0 \times 10^3$ a $1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^{-6}$ a $1.0 \times 10^{-3}$
Ardósia	$6.0 \times 10^2$ a $4.0 \times 10^7$	$2.5 \times 10^{-8}$ a $1.7 \times 10^{-3}$
Mármore	$1.0 \times 10^2$ a $2.5 \times 10^8$	$4.0 \times 10^{-9}$ a $1.0 \times 10^{-2}$
Quartzito	$1.0 \times 10^2$ a $2.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^{-9}$ a $1.0 \times 10^{-2}$
<b>Rochas sedimentares</b>		
Arenito	$8.0 \times 10^1$ a $1.0 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4}$ a $1.25 \times 10^{-1}$
Folhelho	$2.0 \times 10^1$ a $2.0 \times 10^3$	$5.0 \times 10^{-4}$ a $5.0 \times 10^{-2}$
Calcário	$5.0 \times 10^1$ a $4.0 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3}$ a $2.0 \times 10^{-2}$
<b>Solos e águas</b>		
Argila	$1.0 \times 10^0$ a $1.0 \times 10^2$	$1.0 \times 10^{-2}$ a $1.0 \times 10^0$
Aluvião	$1.0 \times 10^1$ a $8.0 \times 10^2$	$1.25 \times 10^{-3}$ a $1.0 \times 10^{-1}$
Água fresca	$1.0 \times 10^1$ a $1.0 \times 10^2$	$1.0 \times 10^{-2}$ a $1.0 \times 10^{-1}$
Água do mar	$2.0 \times 10^{-1}$	$5.0 \times 10^0$
<b>Substâncias químicas</b>		
Ferro	$9.074 \times 10^{-8}$	$1.102 \times 10^7$
Cloreto de Potássio 0.01 M	$7.08 \times 10^1$	$1.413 \times 10^0$
Cloreto de Sódio 0.01 M	$8.43 \times 10^{-1}$	$1.185 \times 10^0$
Ácido Acético 0.01 M	$6.13 \times 10^0$	$1.63 \times 10^{-1}$

Segundo Braga (2002), a resistividade das rochas que possuem condutividade iônica é função decrescente da quantidade de água, da natureza dos sais dissolvidos e da porosidade total comunicante. Além disso, a resistividade das águas que saturam os materiais no subsolo é inversamente proporcional a concentração dos sais nessas águas. Na figura 5, um gráfico concentração de NaCl x resistividade, retirado de Auge (2008), temos uma indicação mais clara da influência dos sais dissolvidos com relação a resistividade da água, observando que para uma concentração de 0,01 g/L a resistividade tem valor de 400 ohm.m e para 100 g/L a resistividade diminui a 0,08 ohm, uma diferença de 4 ordens de grandeza.

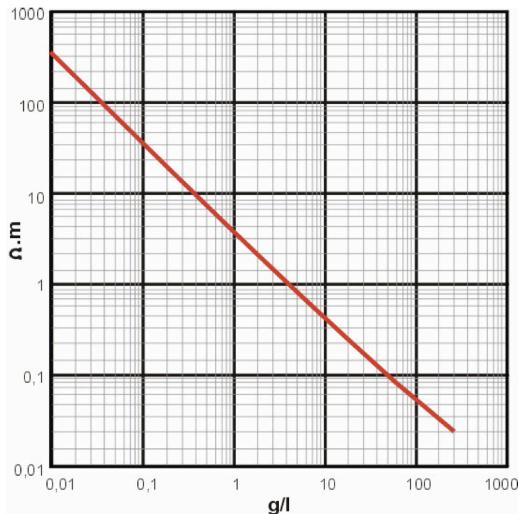


Figura 4. Gráfico: concentração de NaCl x resistividade. Retirado de Auge (2008).

São essas as condições que permitem a aplicação do método da eletrorresistividade em estudos ambientais e hidrogeológicos, já que tanto a presença de água, na zona saturada, quanto a presença de contaminantes ricos em sais, dependendo das condições, podem ser sinalizados por anomalias de baixa resistividade. As principais técnicas usadas na obtenção da resistividade são o caminhamento elétrico (CE) e a sondagem elétrica vertical (SEV).

- **Caminhamento elétrico (CE)**

A técnica consiste em tomar medidas da resistividade em subsuperfície, ao longo de uma seção, investigando a variação lateral do parâmetro físico em questão, horizontalmente, em um ou mais níveis de profundidade, permitindo a caracterização dos materiais em subsuperfície. Tal técnica é de grande utilidade na identificação de estruturas como diques, falhas, fraturas e também na delimitação de plumas de contaminação.

Existem variados arranjos, como polo-dipolo e gradiente, no presente trabalho, o utilizado foi o arranjo dipolo-dipolo. Esse tipo de arranjo tem como principais vantagens, segundo Gandolfo & Gallas (2007): sua simetria, tornando mais fácil, em uma interpretação qualitativa da pseudo-seção, o correto

posicionamento de uma anomalia; facilidade operacional em campo; boa resolução lateral. Tal técnica oferece, portanto, uma boa performance no mapeamento de estruturas verticais. Como desvantagem Gandolfo & Gallas (2007), citam grande influência das irregularidades da cobertura superficial nas anomalias observadas.

A execução do arranjo dipolo-dipolo, figura 6, consiste basicamente em dispor um par de eletrodos de emissão de corrente, A e B, e pares de eletrodos de potencial, M e N, em linha reta em superfície, havendo em cada par, A-B e M-N, uma mesma distância "x" entre os eletrodos, fixa durante todo o trabalho. A separação entre o par de eletrodos de corrente, A-B, e os pares de eletrodos de potencial, M-N, se dá de acordo com um fator "nx", e cada um desses pares de eletrodos de potencial, M-N, é responsável por um nível de investigação "n", sendo que quanto maior for o afastamento entre o centro destes pares de eletrodos com relação ao centro do par de eletrodos de corrente, A-B, mais profunda será a investigação do parâmetro. Essa profundidade corresponde a metade da distância entre os centros dos pares de eletrodos de potencial e eletrodos de corrente "R/2". Ao término da coleta de dados referente ao último nível de investigação, o último par de eletrodos M-N, todo o conjunto avança uma distância equivalente a separação entre os eletrodos que compõe cada par, a distância "x", e assim ocorre sucessivamente até a total cobertura da área desejada.

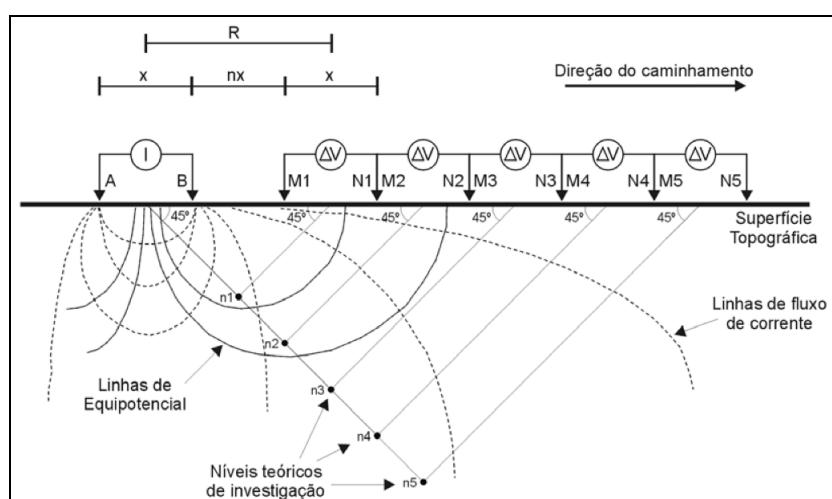


Figura 5. Caminhamento Elétrico, arranjo dipolo-dipolo. Modificado de Ellis (1998).

A seção de resistividade aparente é obtida plotando dados em um ponto equivalente ao ponto em subsuperfície, localizado na intersecção das retas que partem 45° do centro dos dipolos, posicionados, portanto, nos pontos médios entre os dipolos.

- **Sondagem elétrica vertical (SEV)**

A sondagem elétrica vertical consiste em realizar uma investigação da subsuperfície, através de medidas sucessivas do parâmetro físico em questão, com progressivo aumento da profundidade, ao longo de um eixo fixo, normal à superfície.

As sondagens elétricas verticais são ideais para se identificar diferentes estratos geoelétricos e calcular suas espessuras.

Existem dois arranjos muito utilizados, Wenner e Schlumberger, e ambos consistem basicamente na introdução de corrente elétrica através de dois eletrodos de corrente, A e B, e na posterior tomada de medidas sobre a diferença de potencial gerada, com equipamento apropriado, através de dois eletrodos de potencial, M e N. A principal diferença entre os arranjos é que o arranjo Wenner apresenta uma separação crescente e constante entre os 4 eletrodos de maneira que a distância entre A e M, M e N, e N e B seja a mesma a cada manobra, sendo necessário o deslocamento dos 4 eletrodos. Já no arranjo Schlumberger, figura 7, os eletrodos de emissão de corrente, A e B, apresentam espaçamento crescente em relação ao centro do arranjo, ao contrário dos eletrodos de potencial, M e N, que se mantém fixos, o máximo possível, durante todo o ensaio. O aumento da distância entre os eletrodos de corrente, A e B, permite a investigação da resistividade em profundidades cada vez maiores.

No presente trabalho o arranjo Schlumberger foi utilizado, pois é menos sujeito as variações laterais do parâmetro físico medido, irregularidades na superfície topográfica e ruídos produzidos por fontes artificiais, em comparação ao arranjo Wenner, além de oferecer maior velocidade na obtenção de dados.

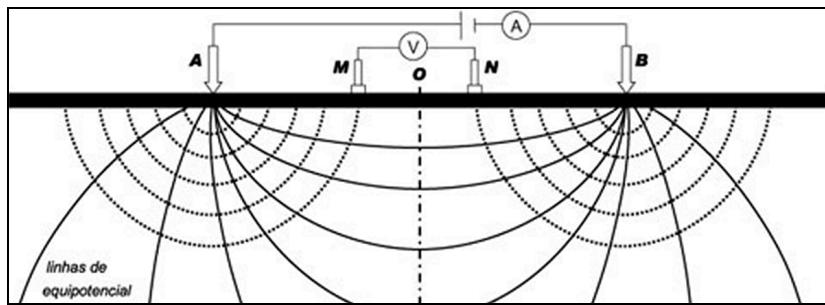


Figura 6. Sondagem Elétrica vertical, arranjo Schlumberger. Retirado de Braga (2002).

Os dados de resistividade aparente obtidos na sondagem elétrica vertical, são processados, através de ábacos e programas automáticos de inversão, e por fim representados por meio de curva bilogarítmica, de acordo com as distâncias entre os eletrodos.

#### 4.3.2. Potencial espontâneo (SP)

É um método natural, ou seja, não é necessária a aplicação de corrente elétrica no terreno para sua execução. O método é baseado na medição das diferenças de potenciais naturais que normalmente existem entre dois pontos quaisquer do terreno, segundo Parasnus (1970).

O potencial espontâneo pode apresentar valores que vão desde uma fração de milivolts a umas poucas dezenas de milivolts, mas às vezes alcançam valores de algumas centenas de milivolts, revelando a presença de alguma potente "pilha" no subsolo, Parasnus (1970). Estes potenciais grandes ocorrem geralmente na presença de mineralizações de sulfetos e zonas grafíticas.

A origem dos potenciais naturais ainda é debatida. Existem, ao menos, três diferentes abordagens que explicam os mecanismos de sua formação: reações eletroquímicas, teoria mais aceita para explicar as causas das anomalias associadas a mineralizações sulfetadas; potencial de difusão, baseado nas

diferenças de mobilidade entre os diferentes íons e na consequente formação de polos onde há predominância de determinados tipos de íons; e potencial de fluxo, amplamente difundido na área ambiental, na qual se insere este trabalho, para determinação das direções de fluxo de água subterrânea e localização de divisores de água.

O potencial de fluxo, também conhecido como eletrocinese ou eletrofiltração, ocorre devido ao movimento de eletrólitos no subsolo levando à formação de um campo elétrico. A magnitude do potencial espontâneo, nesse caso depende basicamente das características do meio e fluídos percolantes, continuidade do contato entre este fluido e o meio e as diferenças de pressão no percurso do fluido em subsolo, Gallas (2005).

Segundo Gallas (2005), o mecanismo de formação do potencial de fluxo ocorre durante a passagem de eletrólitos através dos poros, considerados como uma rede de capilares. Nessa passagem, os ânions são absorvidos pelas paredes dos capilares, fixando-se nelas, já os cátions são transportados através dos capilares pelo fluxo dos fluidos ali presentes, tendendo a se concentrar nas jusantes dos terrenos permeáveis. Esse comportamento é que gera diferenças de potencial durante o percurso.

Existem, segundo Orellana (1972), dois tipos de potencial de fluxo: "per ascensum" e "per descensum", sendo o último citado, o mais relevante. O fluxo "per descensum", trata da infiltração da água da chuva em fraturas ou terrenos permeáveis. Nesse movimento da água, há o carreamento de cátions, gerando uma diferença de potencial, tornando os locais mais elevados topograficamente "polos eletricamente negativos" se comparados aos locais menos elevados, figura 8.

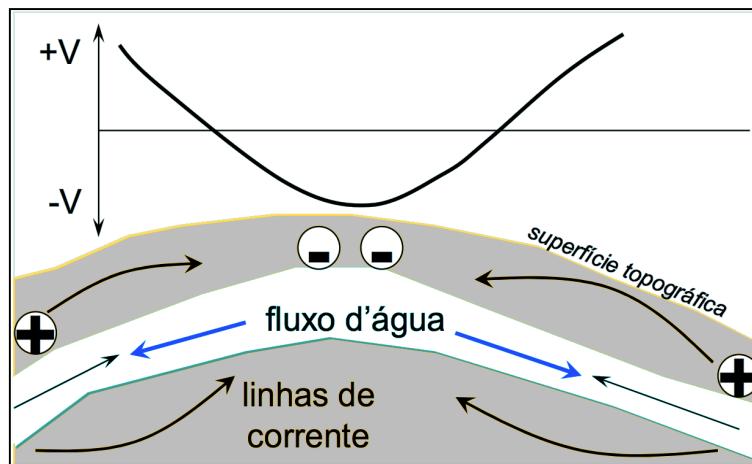


Figura 7. Potencial de fluxo. Retirado de Orellana (1972).

A técnica utilizada para obtenção dos dados é o caminhamento elétrico (CE), com dois principais tipos de arranjo: técnica dos gradientes e técnica dos potenciais.

Os dois arranjos são parecidos, mas possuem diferenças importantes: se utilizam de um par de eletrodos de recepção, M e N, que tomam medidas em estações dispostas em uma malha, mas ao contrário do arranjo gradiente, figura 9, que toma medidas das diferenças de potencial sucessivamente deslocando o par de eletrodos, a técnica dos potenciais, figura 10, mantém um eletrodo como base fixa, o polo negativo convencionalmente, enquanto o outro eletrodo, polo positivo, percorre a malha.

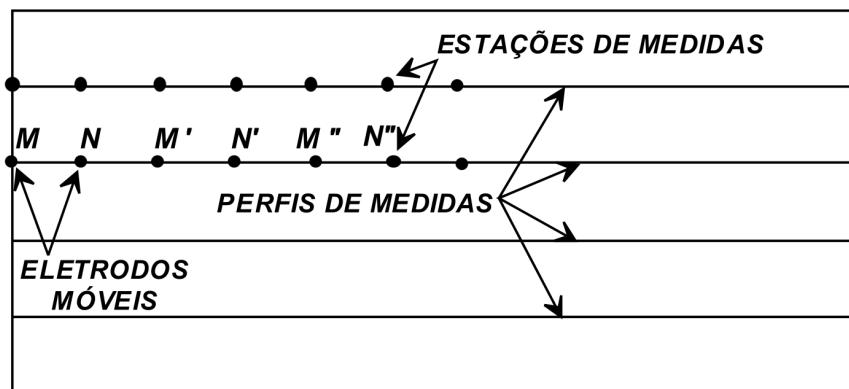


Figura 8. Técnica dos gradientes. Retirado de Gallas (2000).

Naturalmente cada arranjo possui vantagens e desvantagens. O arranjo gradiente tem como principal qualidade a facilidade em manejá fios curtos tornando o deslocamento e, consequentemente, a execução mais rápida.

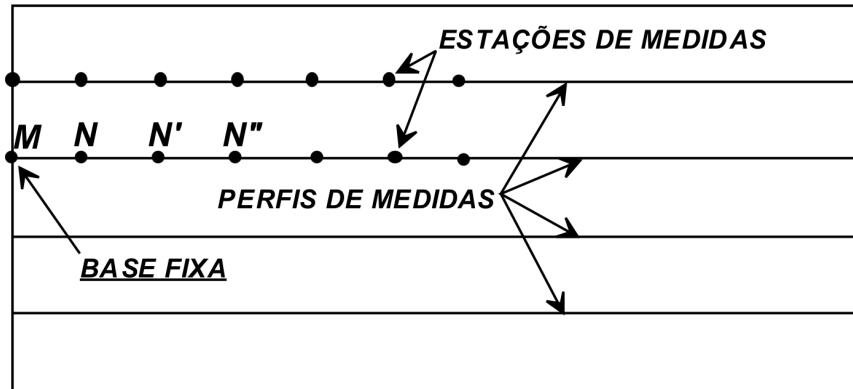


Figura 9. Técnica dos potenciais. Retirado de Gallas (2000).

Porém, tal arranjo apresenta uma tendência maior ao acúmulo de erros, principalmente devido ao contato solo/eletrodos, segundo Gallas (2005). Na técnica dos potenciais, com base fixa, somente a bobina referente ao polo positivo é arrastada, minimizando os erros.

#### 4.4 Métodos Geoelétricos e Meio Ambiente

Na área ambiental, com o avanço tecnológico e das técnicas de aquisição e processamento de dados, houve incremento significativo no volume de trabalhos, dentre os quais podemos destacar:

Gallas et al (2003) integraram três métodos, Eletrorresistividade (ER), Polarização Induzida (IP) e Potencial espontâneo (SP), e os aplicaram utilizando a técnica do imageamento elétrico (IE), no Lixão do Alvarenga, localizado na divisa entre os municípios de São Bernardo do Campo e Diadema, com o objetivo de delimitar a pluma de contaminação e seu sentido de fluxo preferencial.

Fachin et al (2006) se utilizaram dos seguintes métodos geoelétricos: Eletrorresistividade (ER), Eletromagnético (EM) e Radar de Penetração (GPR), para localizar áreas potencialmente contaminadas com resíduos industriais de um curtume. Na área eram dispostos restos de carne, pelo, gordura, e lodo de tratamento biológico.

Saraiva (2010) simulou processos, que podem ocorrer em um cemitério, a fim de se obter uma comparação, entre os métodos e técnicas geofísicas, durante o processo de formação da pluma de contaminação. Para este fim, corpos e restos de animais foram enterrados em uma área livre de contaminações. Nesse caso o método da eletrorresistividade, com a técnica do caminhamento elétrico (CE), apresentou resultados superiores na delimitação da pluma gerada.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

A escolha dos métodos geoelétricos empregados no presente trabalho, dentre as variadas possibilidades, se fez através do conhecimento das propriedades físicas do meio, dos contextos geológico e hidrogeológico e finalidade do estudo. Os métodos geoelétricos utilizados foram: potencial espontâneo (SP), através da técnica dos potenciais, e eletrorresistividade (ER), através das técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico (CE). A figura 11 indica o posicionamento das investigações geofísicas.



Figura 11. Área de estudo com a indicação das linhas onde foram realizados os caminhamentos elétricos, L-0, L-20 e L-40, e o levantamento de SP. Em destaque em vermelho, a localização das SEVs.

Para a execução dos trabalhos, os principais equipamentos utilizados, além de fios, trenas, GPS etc., foram: resistivímetro Terrameter, eletrodos e

milivoltímetro. Todos cedidos pelo Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS-IGc-USP).

## 5.1 Caminhamento Elétrico (CE)

A técnica de caminhamento elétrico se baseia na realização de medidas de um determinado parâmetro ao longo de uma linha, com o objetivo de investigar as variações desse parâmetro em um ou mais níveis de profundidade. No presente trabalho o caminhamento elétrico foi realizado através do arranjo dipolo-dipolo.

Este trabalho apresenta três linhas de caminhamento elétrico, cada uma com 200m de extensão, semi-paralelas às duas lagoas de disposição de resíduos. A primeira linha foi traçada rente as lagoas, enquanto a segunda e terceira linhas distaram 20m e 40m da primeira linha, respectivamente, sendo denominadas L-0, L-20 e L-40, figura 11. O arranjo dipolo-dipolo foi desenvolvido com espaçamento de 10m entre os eletrodos, sendo efetuadas leituras em 5 níveis de profundidade. Após o encerramento das leituras, o arranjo era deslocado 10m em direção ao final da linha de caminhamento. O desenvolvimento da técnica ocorreu no sentido NW-SE, em todas as linhas.

O equipamento utilizado foi o resistivímetro Terrameter SAS 4000, fabricado pela ABEM Instruments, com resolução de  $1\mu\text{V}$ . Esse equipamento é calibrado para medidas de resistividade por meio de ciclos periódicos de corrente elétrica alternada de baixa frequência, procedimento que permite a filtragem de ruídos do sinal adquirido. O equipamento fornece leituras diretas de resistência elétrica. A resistência medida, associada ao fator geométrico  $K$ , que depende exclusivamente da disposição dos eletrodos em superfície, resulta no parâmetro físico resistividade elétrica aparente (pa).

O resistivímetro Terrameter SAS 4000 possui quatro canais, portanto, executa a leitura de até quatro níveis simultaneamente, porém, o terceiro canal do *receiver* que integra o equipamento apresentou problemas, possibilitando a leitura simultânea somente de três níveis, que eram complementadas após uma nova

emissão de corrente. Após as leituras o conjunto avançava, com o processo se repetindo até finalizar a linha.

## **5.2. Sondagem elétrica vertical (SEV)**

Foram realizadas três sondagens elétricas verticais posicionadas na direção estimada do fluxo de água subterrânea, figura 11, com o objetivo de determinar a profundidade da superfície freática na área em estudo. As sondagens foram realizadas através do arranjo Schlumberger. Nele os eletrodos de emissão de corrente, A e B, apresentam espaçamento crescente em relação ao centro do arranjo, ao contrário dos eletrodos de potencial, M e N, que se mantém fixos durante o ensaio. O aumento da distância entre os eletrodos de corrente, A e B, permite a investigação da resistividade em profundidades cada vez maiores. No presente trabalho a abertura M-N foi mantida em 0,5m durante todo o ensaio, e o afastamento AB/2 ocorreu da mesma forma para todas as SEVs, obedecendo a seguinte ordem: 1,5m , 2m, 3m, 4m, 5m, 6m, 8m, 10m, 13m, 16m, 20m, 25m, 30m, 40m e 50m.

O equipamento utilizado para emitir os pulsos de corrente e medir a diferença de potencial foi o resistivímetro Terrameter SAS 4000, fabricado pela ABEM Instruments. Além do resistivímetro, foram usados no ensaio geoelétrico duas bobinas e eletrodos.

Os dados obtidos em campo foram dispostos em um gráfico bi-logarítmico. Nesse gráfico o eixo das abscissas representa a abertura AB/2, em metros, e também a profundidade do meio físico avaliado, enquanto o eixo das ordenadas representa os valores de resistividade aparente (pa) em ohm.m. O software IPI2Win, software livre da Universidade de Moscou, foi utilizado na inversão e modelamento dos dados das SEVs, auxiliando, desta forma, na definição dos estratos geoelétricos de forma quantitativa, revelando a espessura dos estratos e suas resistividades.

### 5.3 Potencial espontâneo (SP)

Um levantamento de potencial espontâneo foi realizado na área com a finalidade de determinar a direção de fluxo do lençol freático e por consequência a direção de propagação da pluma de contaminação.

A diferença de potenciais ocorre através do movimento de fluídos, principalmente água, através dos poros e descontinuidades das rochas. A água tem uma tendência maior a carrear cátions, gerando anomalias negativas em locais pouco saturados, e anomalias positivas em locais saturados.

Para a realização do levantamento, uma malha composta por 3 linhas paralelas foi preparada. As linhas possuíam um comprimento de 200m e foram dispostas a cada 20m sucessivamente, sendo denominadas L-0, L-20 e L-40, figura 11. Em cada uma das linhas, pontos de medida foram executados a cada 10m. A malha foi definida de tal forma que a densidade de informações geradas garantisse a indicação das direções de fluxo freático na área.

No levantamento de potencial espontâneo a chamada técnica dos potenciais foi utilizada, uma técnica eficiente que oferece rapidez na obtenção dos dados. Nela o eletrodo, que representa o polo negativo é, convencionalmente, mantido fixo em uma estação base enquanto o eletrodo que representa o polo positivo percorre os pontos de medida.

Para a execução da técnica foram necessários um milivoltímetro, dois eletrodos, uma bobina e um fio, que conectavam os eletrodos ao milivoltímetro, fotografia 3.



Fotografia 3. Equipamento utilizado no levantamento de Potencial Espontâneo.

Com os dados obtidos um mapa isopotenciométrico foi confeccionado através do *software* Surfer.

## 6. RESULTADOS

A seguir são apresentados os dados processados, extraídos dos métodos geofísicos empregados através das técnicas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV), Potencial Espontâneo (SP) e Caminhamento Elétrico (CE), respectivamente. O objetivo era caracterizar o meio físico e delimitar a zona de influência da contaminação.

### 6.1 Sondagem Elétrica Vertical

Os dados obtidos foram processados através do software IP2WIN. Os resultados obtidos se encontram na figura 12. Nessa figura a curva em preto representa a curva de campo, em vermelho há o modelo da curva teórica, a cor azul indica os valores de resistividade e a espessura de cada camada inferida. Ao lado de cada modelo geoelétrico, há uma tabela com os valores ajustados de resistividade ( $\rho$ ) e a profundidade da base de cada camada ( $d$ ). Cada modelo geoelétrico apresenta um erro associado. Esse erro representa, basicamente, o desvio da curva teórica com relação aos dados de campo.

A SEV 1 ocupou a linha 0 do caminhamento elétrico no ponto referente a posição 150m, em relação ao início do caminhamento, figura 11. O erro associado a esse modelo é de 3,47%.

A curva modelo da SEV 1 se ajusta a um sistema com seis camadas geoelétricas. Dentre estas camadas, a que corresponde ao nível freático é a quinta camada, com valor de resistividade igual a 138 ohm.m e profundidade de 6,0m.

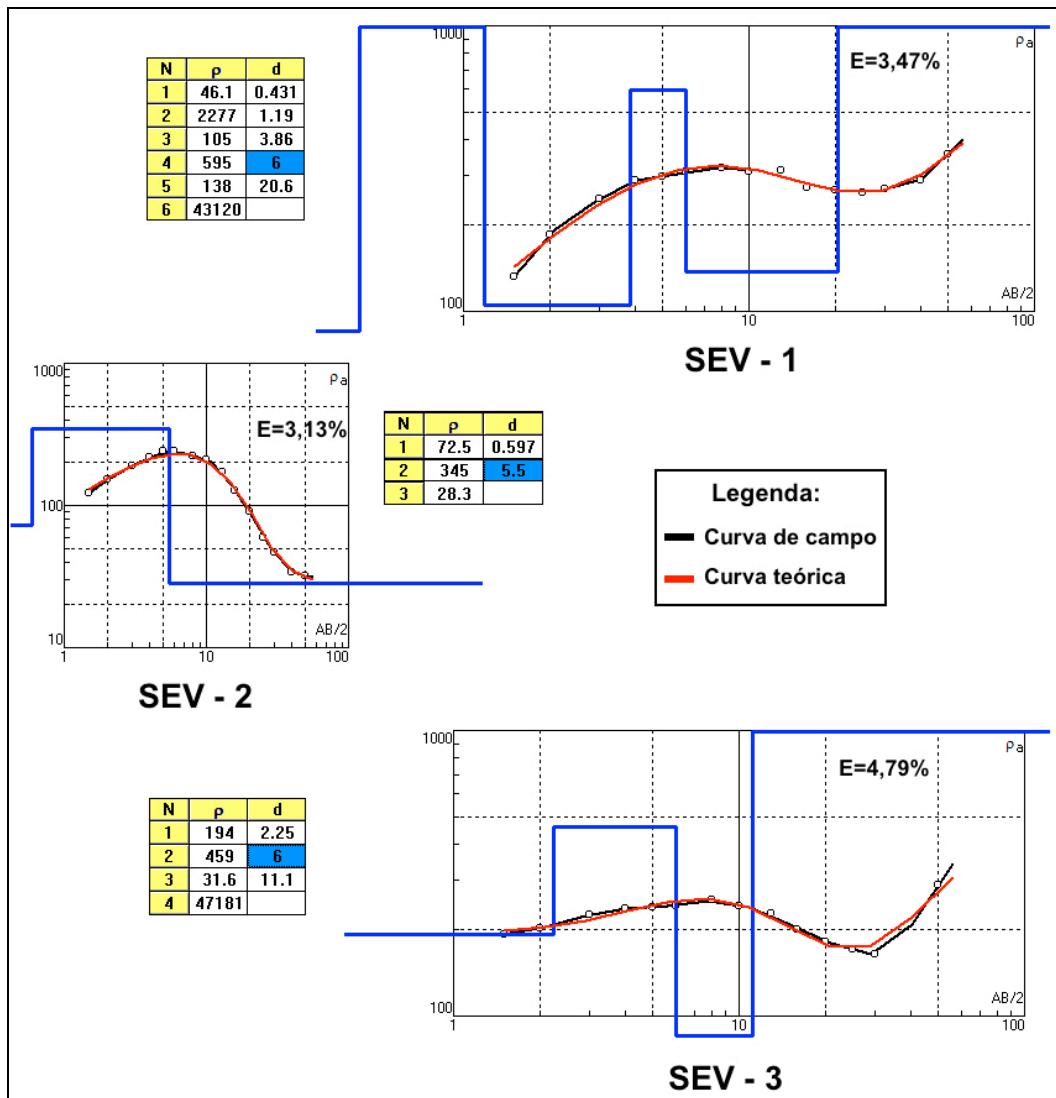


Figura 12. Modelos geoelétricos das Sondagens Elétricas Verticais executadas na área de estudo.

A SEV 2 ocupou a linha 20 do caminhamento elétrico, na posição 70m, uma posição intermediária em relação às outras SEVs. O erro associado a esse modelo é de 3,13%.

O modelo geoelétrico da SEV 2, se ajusta a um sistema com três camadas geoelétricas. Segundo Braga (2002), tal modelo é classificado como do tipo K ( $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ ). O nível freático é indicado pela terceira camada geoelétrica na SEV 2 , que se inicia aos 5,5m e tem valor de resistividade igual a 28,3 ohm.m.

A SEV 3 ocupou a linha 40 do caminhamento elétrico, na posição 150m, com relação à origem do caminhamento, figura 11. Seu modelo geoelétrico se ajusta ao

modelo com quatro camadas, com erro associado de 4,79%. Segundo Braga (2002), Esse modelo é classificado como do tipo KH ( $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ ).

A interpretação é semelhante às anteriores, sendo a terceira camada geoelétrica, aquela que indica a profundidade do nível freático, com início aos 6m e valor de resistividade igual a 31,6 ohm.m.

Inicialmente haviam sido programadas seis sondagens elétricas verticais na área investigada. Porém, o mau tempo durante toda a semana de trabalhos de campo impediu a execução integral do escopo inicialmente definido. Mesmo que não tenha causado prejuízo ao objetivo principal, definição do nível freático, tal fato impediu um maior detalhamento sobre as camadas e estratos geoelétricos na área. Somado o citado fato à ausência de dados diretos sobre a estratigrafia próxima à área, torna-se difícil a associação de litologias aos níveis geoelétricos identificados.

À exceção da associação litológica, podemos ao menos separar os estratos e fazer algumas correlações. Braga (2002), afirma que a zona não saturada, constituída por um ou mais tipos litológicos é considerada como sendo um estrato geoelétrico. Portanto, tanto a SEV 1 quanto a SEV 3 possuem três estratos geoelétricos: zona não saturada, zona saturada e um estrato resistivo, enquanto a SEV 2 possui apenas os dois primeiros estratos.

## 6.2 Potencial Espontâneo (SP)

Através dos dados obtidos com o levantamento de potencial espontâneo, um mapa de isovalores foi confeccionado utilizando o software Surfer 10, figura 13. O levantamento teve como objetivo verificar as direções de fluxo freático na área investigada. As interpretações foram baseadas na teoria dos potenciais de fluxo.

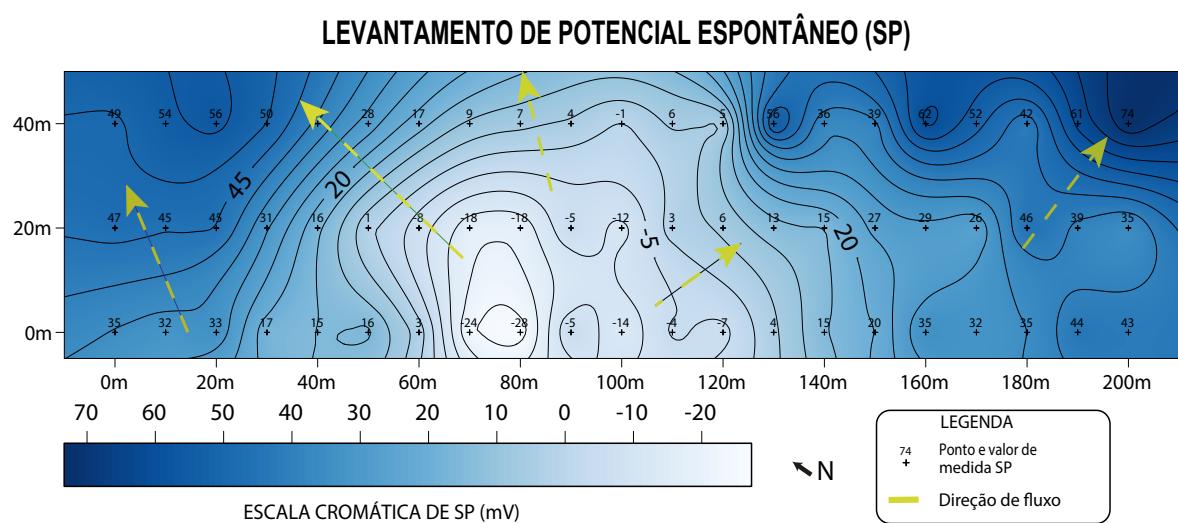


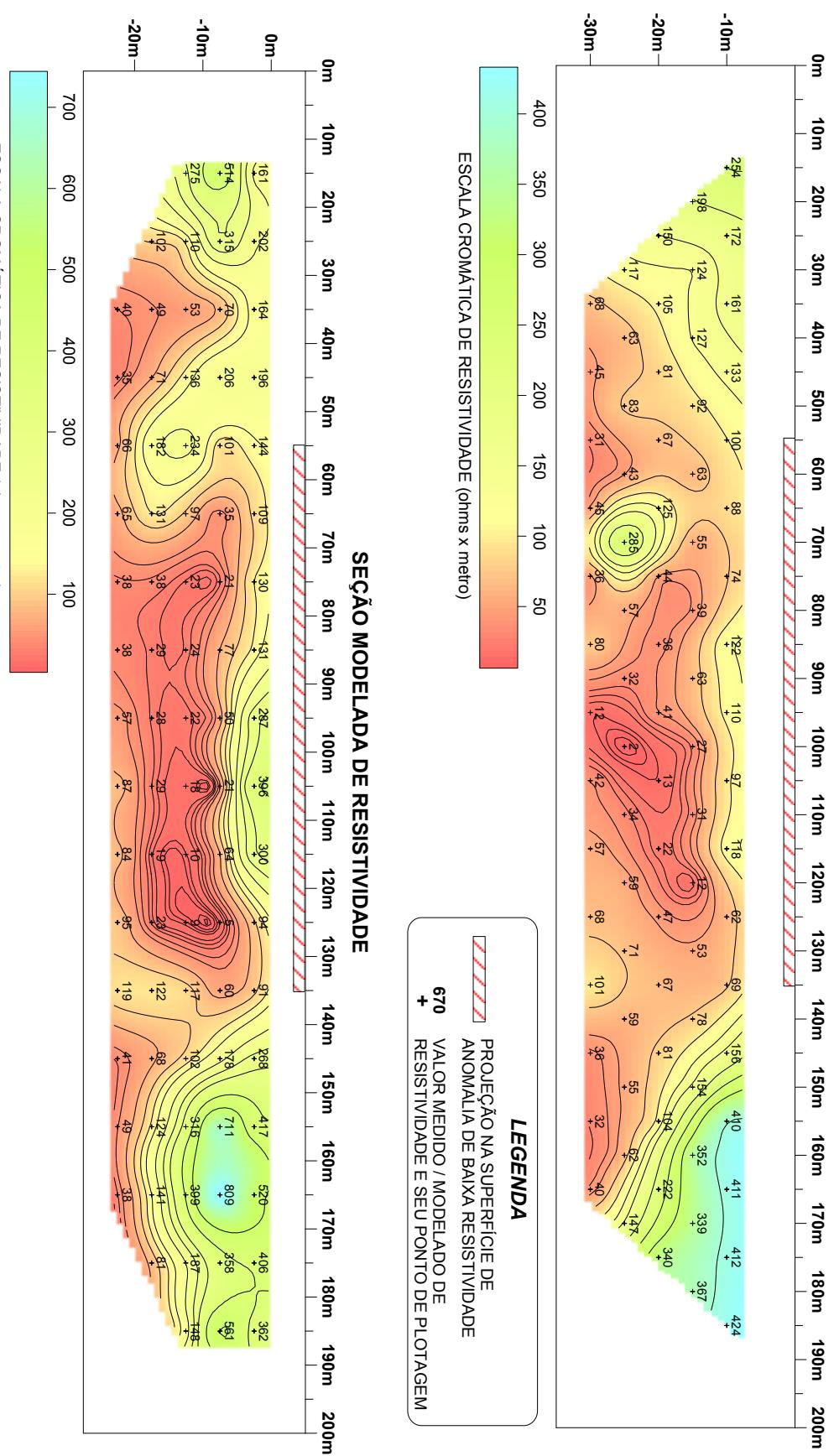
Figura 13. Mapa de isovalores de potencial espontâneo.

Os dados sugerem que o fluxo subterrâneo ocorre de forma difusa, preferencialmente no sentido N-NE na primeira metade de cada linha, até 100m, e no sentido NE-E na segunda metade. Há um incremento dos valores de potencial espontâneo nos sentidos norte e também leste culminando nos maiores valores registrados nesses extremos, 56 mV e 74 mV respectivamente. Os menores de valores SP ocupam a faixa central do levantamento, principalmente entre 60m e 120m de cada linha, e entre as linhas 0 e 20, sendo o menor valor registrado aos 80m da linha 0, -28 mV. Nota-se também um acréscimo nos valores entre as linhas, compatível com a topografia na área, um declive no sentido SW-NE.

### 6.3 Caminhamento Elétrico (Ce)

O Caminhamento Elétrico foi executado na área investigada, figura 11, com o objetivo de gerar seções geoelétricas em que se pudesse delimitar a pluma de contaminação imposta pelas lagoas artificiais. Os dados de resistividade elétrica, extraídos pelo ensaio geofísico, foram processados pelo software RES2DINV, de autoria de Loke (2004), que executa um imageamento 2D do terreno, empregando a técnica de inversão através do método dos mínimos quadrados. Os resultados da inversão, executada pelo RES2DINV, foram exportados na forma de arquivos XYZ. Tais dados foram então transformados em um arquivo Excel e, por fim, seções geoelétricas foram criadas no software Surfer 10, através de interpolação por krigagem simples. O resultado dessa operação será apresentado a seguir, contido nas figuras 14, 15 e 16 que, respectivamente, representam as seções L-0, L-20 e L-40.

**LAGOA DE RESÍDUOS DA SUINOCULTURA - LEVANTAMENTO DE ELETRORESISTIVIDADE  
ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - LINHA 0 - AB = MN = 10m**



## LAGOA DE RESÍDUOS DA SUINOCULTURA - LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - LINHA 20 - AB = MN = 10m

### PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE

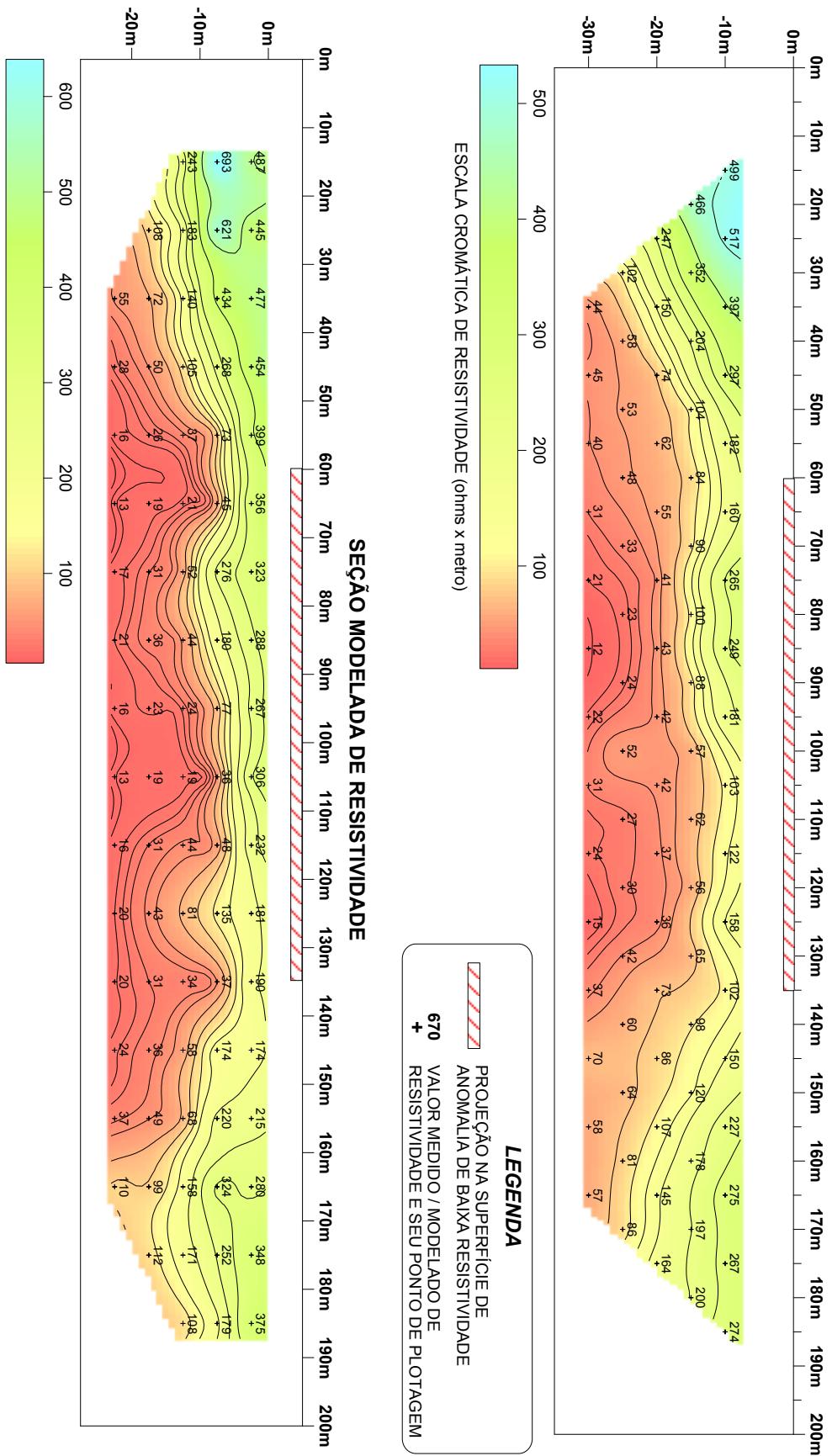


Figura15. Pseudo-Seção e Secção de resistividade da linha de caminhamento L - 20

**LAGOA DE RESÍDUOS DA SUINOCULTURA - LEVANTAMENTO DE ELETORRRESISTIVIDADE  
ARRANJO DIPOLÔ-DIPOLÔ - LINHA 40 - AB = MN = 10m**

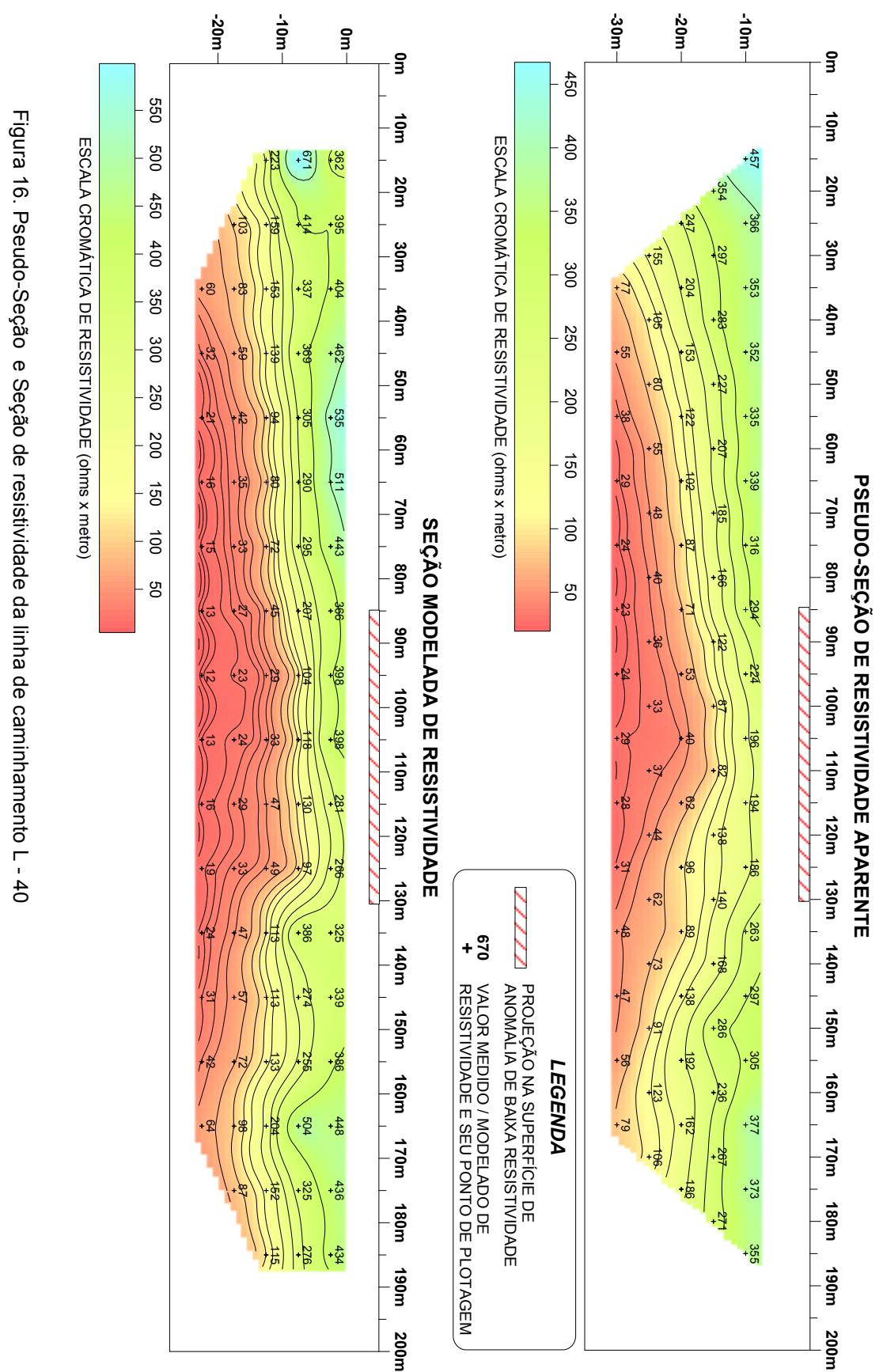


Figura 16. Pseudo-Seção e Seção de resistividade da linha de caminhamento L - 40

A seção que representa a linha de caminhamento 0 apresenta grande amplitude em seus valores de resistividade aparente, entre 5 ohm.m e 809 ohm.m em relação a seção modelada. A mesma indica anomalia de baixa resistividade próxima à superfície entre 55m e 140m, ocupando uma faixa central na seção. Com o aumento da profundidade a área de influência dessa anomalia se expande sem um sentido preferencial chegando a ocupar quase toda a porção inferior da seção geoelétrica, porém, alternando com algumas faixas mais resistivas, principalmente de 50m a 65m e 130m a 140m.

A seção que representa a linha de caminhamento 20, é caracterizada de forma semelhante à anterior, apresentando grande amplitude nos valores de resistividade aparente, 13 ohm.m a 693 ohm.m, com relação a seção modelada, e expansão difusa através da seção com o aumento da profundidade, mas há uma diferença relevante: na seção L-20 os menores valores de resistividade se concentram em profundidades intermediárias enquanto na seção L-40 os menores valores estão localizados na porção basal. A seção mostra uma anomalia próxima a superfície, principalmente entre 60m e 140m, porém, com influência menor em relação a outra linha, sendo mais presente em níveis inferiores, principalmente a partir dos 7m de profundidade, inclusive de forma consistente ao longo da seção, diferente da seção geoelétrica L-0.

Na seção geoelétrica referente a linha de caminhamento elétrico 40 há a confirmação do que parecia ser tendência na linha 20, com a anomalia de baixa resistividade ampla em área, mas restrita aos níveis inferiores principalmente a partir de 10m de profundidade. A seção geoelétrica modelada apresenta grande amplitude de seus valores de resistividade, 12 ohm.m a 671 ohm.m. A expansão da área de influência da anomalia de baixa resistividade com o aumento da profundidade também ocorre, mas de forma menos pronunciada. É possível identificar de fato um estrato geoelétrico com baixa resistividade nos níveis inferiores da seção.

## 7. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

É fato que a disposição de resíduos nessas lagoas levaria à formação de uma pluma de contaminação. Portanto, esse trabalho de formatura teve como objetivo o delineamento dessa possível pluma e indicação de suas direções de propagação. As questões mais relevantes para alcançar esse objetivo passavam pela escolha dos métodos geoelétricos utilizados, técnicas de investigação e o correto posicionamento da investigação geofísica, em função das dimensões da área investigada. Também foram consideradas a geologia e hidrogeologia local, bem como o tipo e características dos resíduos descartados na lagoa.

A figura 17 contém uma síntese dos resultados obtidos com as sondagens elétricas verticais e principalmente dos caminhamentos elétricos, com a indicação dos limites da pluma em cada uma das três seções realizadas.

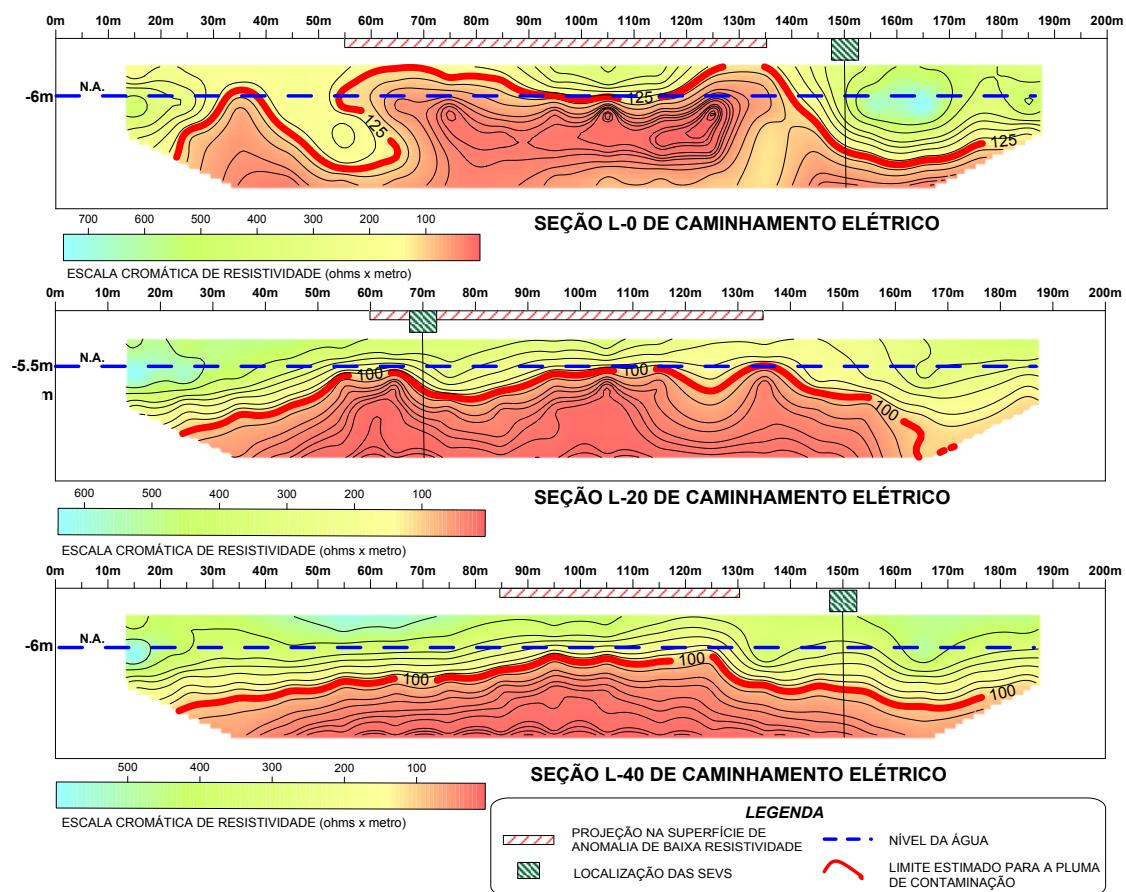


Figura 17. Seções modeladas e interpretadas de Caminhamento Elétrico.

As informações obtidas com as SEVs e CEs realizados na área investigada, correlacionadas à geologia local, indicam que as seções do subsolo na área de estudo, dentro do intervalo de profundidade investigado pelo caminhamento elétrico, se encontram em sua maior parte saturadas, e que o material que predomina na área possui caráter areno-argiloso. Tais características indicam um meio onde a propagação de corrente elétrica no subsolo ocorre através de condução iônica, ou seja, através do deslocamento de íons nas águas contidas nos poros do subsolo. Portanto, os valores de resistividade obtidos foram analisados principalmente em função da quantidade de sais dissolvidos nas águas que ocupam os interstícios do subsolo. Tal propriedade acarreta uma maior ou menor facilidade de condução elétrica - maiores ou menores resistividades.

O tipo de material descartado nas lagoas tem como constituintes principais: efluentes dos sanitários e cozinha, água com produtos utilizados na limpeza de pisos, equipamentos, carrapaticidas e, principalmente, as excretas produzidas pelos suínos. As excretas suínas são substâncias capazes de gerar uma grande quantidade de sais e partículas em suspensão durante o processo de degradação da matéria orgânica. Segundo Braga (2002), a resistividade das rochas que possuem condutividade iônica é função decrescente da quantidade de água, da natureza dos sais dissolvidos e da porosidade total comunicante. Tal fato aliado à posição em que se encontram as anomalias nas seções modeladas de resistividade, coincidente em extensão as lagoas de disposição, principalmente em níveis rasos, permite afirmar que a anomalia de baixa resistividade destacada nas seções de caminhamento elétrico nas cores em tons de vermelho, com valores entre 10 ohm.m e 125 ohm.m, é referente à pluma de contaminação gerada pelos resíduos dispostos nas lagoas artificiais.

Não foram identificadas outras fontes potenciais de contaminação, por isso é descartada influência dessa natureza nos resultados ou mesmo de ruídos que mascarassem de alguma forma os resultados obtidos, devido a localização da área, predominantemente rural.

Analizando a distribuição dos valores de resistividade que correspondem a zona de influência da pluma, notamos que na seção modelada da linha 0, os valores mais baixos se situam em nível mais próximo à superfície no meio da seção, entre

100m e 130m, próximos à fonte de contaminação, enquanto nas demais seções os valores mais baixos se encontram nos níveis mais inferiores. Como o nível freático se mantém razoavelmente estável na área, essa característica pode ser um indicativo que a pluma de contaminação possui maior densidade e acaba migrando para porções mais basais.

Na avaliação da morfologia da pluma nas seções nota-se que a mesma se expande sem sentido preferencial com o aumento da profundidade. Tal comportamento é parcialmente coerente com o levantamento de potencial espontâneo realizado na área.

Os resultados do levantamento de potencial espontâneo deveriam refletir as direções dos fluxos freáticos, indicadas pelo aumento dos potenciais medidos nas direções dos fluxos. No entanto, os menores de valores SP ocupam a faixa central do levantamento, principalmente entre 60m e 120m, nas três linhas. Os resultados sugerem que a propagação da pluma ocorre de forma difusa preferencialmente no sentido N-NE na primeira metade de cada linha de caminhamento, até 100m, e no sentido NE-E na segunda metade, de 100m a 200m, figura 18. Esse não é o comportamento esperado para área, de acordo com sua topografia, o que sugere interferência nos valores pela presença de íons oriundos da lagoa. A influência pode ser a devido a interação de minerais argilosos e ânions, através da adsorção típica desses minerais.

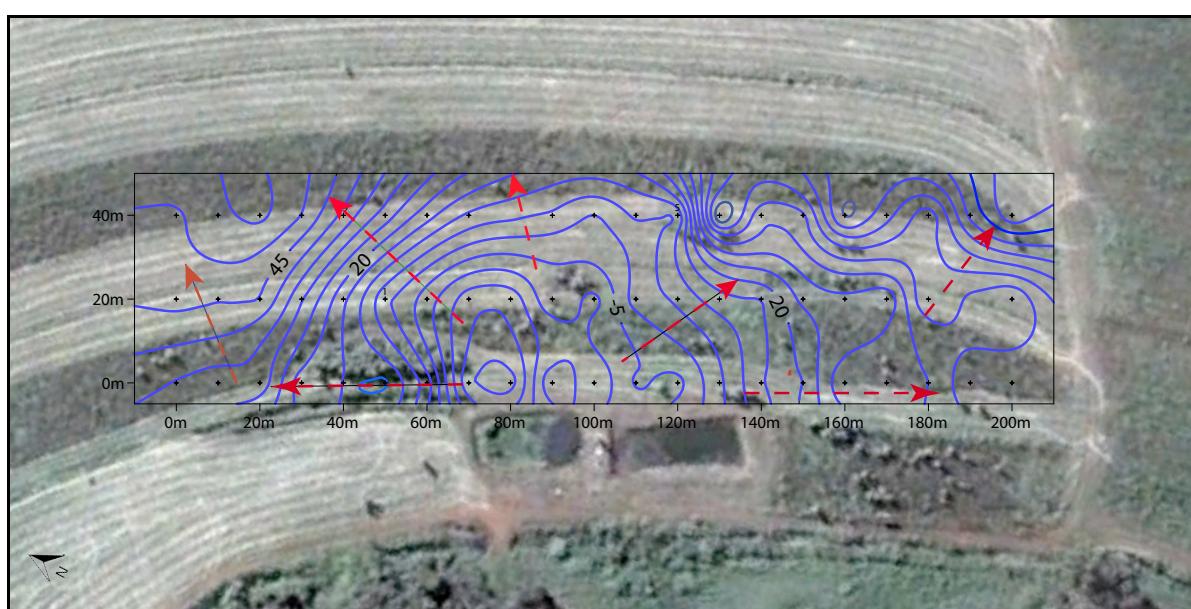


Figura 11. Direções de propagação da pluma de contaminação indicadas pelas setas em vermelho.

## 8. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo Paulista. Boletim Instituto Geográfico e Geológico, São Paulo, n. 41, p.169-263, 1964.

AUGE, M. Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea. Buenos Aires. Universidad de Buenos Aires. 27p. 2008.

BRAGA, A. C. O. Métodos geoeléctricos aplicados – Módulo Hidrogeologia. Rio Claro. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista. 27p. 2002.

CAETANO-CHANG, M. R. A Formação Pirambóia no centro-leste do estado de São Paulo. 1997. 204f Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

COTTAS, L. R. Estudos geológico-geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro (SP). Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 171p, 1983.

ELIS, V. R. Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro/SP, 264p, 1998.

FACHIN, S. J. S., HUBER, F., SHIRAIWA, S., BORGES, W.R. & MIGLIORINI, R.B., 2006. Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curtume. Rev. Bras. Geofísica, v. **24**:129-138.

FERREIRA, F. J. F. Técnicas e Aplicações de Imageamentos Elétricos 2-D e 3-D. Curitiba. Material didático da disciplina geofísica exploratória. Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná. 67p. 2002.

FERREIRA, S. R. Análise pedoestratigráfica das formações Rio Claro e Piraçununga, no centro-leste do Estado de São Paulo. (Tese DOUTORADO) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro/SP, 157p, 2005.

GALLAS J. D. F. 2000. Principais métodos geoelétricos e suas aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. Tese de doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista., 174p.

GALLAS, J. D. F., MALAGUTTI F. W., PRADO, R. L., TAIOLI, F. 2003. Lixão do Alvarenga - Mapeamento da pluma de contaminação pelos métodos geoelétricos. In: Anais do VIII Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro.

GALLAS, J. D. F. 2005. O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. Rev. Bras. Geof., São Paulo, **v. 23**, n. 2.

GANDOLFO, O. C. B., GALLAS, J. D. F. 2007. O arranjo polo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade. Rev. Bras. Geof., **v. 25**, n. 3.

GIMENEZ, N. B.; CAETANO-CHANG, M. R. Diagênese de arenitos da Formação Tatuí no Estado de São Paulo. Revista brasileira de geociências, São Paulo, **v. 40**, n. 1, março 2010 .

HACHIRO, J. Litotipos, associações, faciológicas e sistemas deposicionais da Formação Irati no Estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 175p, 1991.

IPT INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Mapa geológico do Estado de São Paulo, São Paulo, 1981. 2 mapas. Escala 1:500.000 (Série Monografias).

MASSOLI, M. 1983. Geologia da folha de Piraçununga, SP. Rev. Inst. Geol., **vol.4**: p.25-51.

MELO, M.S; COIMBRA, A.M.; CUCHIERATO, G. 1997. Facies sedimentares da Formação Rio Claro, neocenozóico da Depressão Periférica Paulista. São Paulo: Revista do Instituto Geológico, 18(1/2): 49-63.

MILANI, E. J. et al. 2007, Bacia do Paraná. Cartas Estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobrás v.15. n.2

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. Mapa pedológico do Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agronômico, 1999. 4 mapas. Escala 1:500.000. Acompanha uma legenda expandida.

ORELLANA, E. 1972. *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Madrid: Paraninfo, 523 pp.

PARASNIS, D. S. 1970. Princípios de geofísica aplicada, Madrid: Paraninfo, 208 pp.

SARAIVA, F. A. 2010. Avaliação de métodos geofísicos no comportamento espacial de plumas de necrochorume. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F. & NOGUEIRA, A.A., 1974 – Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28. Porto Alegre. Anais, 1:41-66.

SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B. Aspectos Regionais da estratigrafia da Bacia do Paraná no flanco nordeste. CONGRESSO DE GEOLOGIA, 27, 1973. Aracaju, SBG, 1973.v. 1, p. 243-256.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. 1990. *Applied geophysics*. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 770 p.

WU, F. T. - 1989. Proveniência das Rochas Arenosas do Subgrupo Itararé no Sul do Estado de São Paulo, SP. p 9-11 (Tese de Doutoramento-Instituto de Geociências e Ciências Exatas/Unesp- Rio Claro).

## **ANEXO I - Dados do Levantamento de Campo de Potencial Espontâneo (SP)**

X	Y	V
0	0	34,6
10	0	31,7
20	0	33,4
30	0	16,9
40	0	14,9
50	0	15,8
60	0	2,9
70	0	-24,1
80	0	-27,5
90	0	-4,9
100	0	-14,1
110	0	-4,3
120	0	-6,5
130	0	4
140	0	14,6
150	0	20
160	0	34,6
170	0	32
180	0	34,8
190	0	43,8
200	0	42,5
0	20	46,7
10	20	45,4
20	20	45
30	20	30,5
40	20	16,1
50	20	1,2
60	20	-7,6
70	20	-17,9
80	20	-18,3
90	20	-5,4
100	20	-11,6
110	20	2,5
120	20	6,1
130	20	13,1
140	20	14,8
150	20	26,5
160	20	28,9
170	20	26

180	20	45,5
190	20	38,8
200	20	34,6
0	40	49,1
10	40	53,8
20	40	56,2
30	40	50
40	40	38,7
50	40	27,8
60	40	17,2
70	40	9,1
80	40	6,5
90	40	4,3
100	40	-0,5
110	40	6,1
120	40	4,7
130	40	56
140	40	36,2
150	40	38,6
160	40	62
170	40	51,8
180	40	41,6
190	40	61,4
200	40	73,5

**ANEXO II - Dados do Levantamento de Campo de Sondagem Elétrica Vertical (SEV)**

**SEV 1**

AB/2	MN/2	K	AV/I	Ro
1,5	0,5	6,28	21,098	132,49544
2	0,5	11,78	15,871	186,96038
3	0,5	18,85	8,8443	166,715055
4	0,5	49,48	5,8327	288,601996
5	0,5	77,75	3,796	295,139
6	0,5	112,31	2,7369	307,381239
8	0,5	200,27	1,5911	318,649597
10	0,5	313,37	0,98797	309,600159
13	0,5	530,14	0,59022	312,899231
16	0,5	803,46	0,33811	271,657861
20	0,5	1255,85	0,21209	266,353227
25	0,5	1962,71	0,13315	261,334837
30	0,5	2826,64	0,095258	269,260073
40	0,5	5025,76	0,057234	287,644348
50	0,5	7853,19	0,045239	355,270462

**SEV 2**

AB/2	MN/2	K	AV/I	Ro
1,5	0,5	6,28	19,759	124,08652
2	0,5	11,78	12,943	152,46854
3	0,5	18,85	6,918	130,4043
4	0,5	49,48	4,437	219,54276
5	0,5	77,75	3,07	238,6925
6	0,5	112,31	2,14	240,3434
8	0,5	200,27	1,15	230,3105
10	0,5	313,37	0,671	210,27127
13	0,5	530,14	0,321	170,17494
16	0,5	803,46	0,159	127,75014
20	0,5	1255,85	0,072	90,4212
25	0,5	1962,71	0,03	58,8813
30	0,5	2826,64	0,016	45,22624
40	0,5	5025,76	0,0067	33,672592
50	0,5	7853,19	0,0041	32,198079

SEV 3

AB/2	MN/2	K	V/I	Ro
1,5	0,5	6,28	31,033	194,88724
2	0,5	11,78	17,176	202,33328
3	0,5	18,85	8,2691	155,872535
4	0,5	49,48	4,8009	237,548532
5	0,5	77,75	3,0948	240,6207
6	0,5	112,31	2,1729	244,038399
8	0,5	200,27	1,2701	254,362927
10	0,5	313,37	0,77911	244,149701
13	0,5	530,14	0,49135	260,484289
16	0,5	803,46	0,25018	201,009623
20	0,5	1255,85	0,14516	182,299186
25	0,5	1962,71	0,0874	171,540854
30	0,5	2826,64	0,058062	164,120372
40	0,5	5025,76	0,029307	147,289948
50	0,5	7853,19	0,03666	287,897945

### ANEXO III - Dados do Levantamento de Campo de Caminhamento Elétrico (CE)

#### Linha 0

X	Y	V	K	R
15	-10	1,3535	188	254
20	-15	0,26202	754	198
25	-20	0,07932	1885	150
30	-25	0,03098	3770	117
35	-30	0,01032	6597	68
25	-10	0,9125	188	172
30	-15	0,16442	754	124
35	-20	0,05581	1885	105
40	-25	0,01683	3770	63
45	-30	0,00688	6597	45
35	-10	0,85777	188	161
40	-15	0,16905	754	127
45	-20	0,04299	1885	81
50	-25	0,02197	3770	83
55	-30	0,00477	6597	31
45	-10	0,7097	188	133
50	-15	0,12171	754	92
55	-20	0,03556	1885	67
60	-25	0,01136	3770	43
65	-30	0,00685	6597	45
55	-10	0,52979	188	100
60	-15	0,08317	754	63
65	-20	0,06647	1885	125
70	-25	0,07563	3770	285
75	-30	0,00547	6597	36
65	-10	0,46963	188	88
70	-15	0,07333	754	55
75	-20	0,02312	1885	44
80	-25	0,01518	3770	57
85	-30	0,01218	6597	80
75	-10	0,39109	188	74
80	-15	0,05208	754	39
85	-20	0,0189	1885	36
90	-25	0,00859	3770	32
95	-30	0,00186	6597	12
85	-10	0,64962	188	122
90	-15	0,08355	754	63
95	-20	0,02179	1885	41
100	-25	0,00066	3770	2
105	-30	0,00638	6597	42
95	-10	0,58686	188	110
100	-15	0,03601	754	27
105	-20	0,00674	1885	13
110	-25	0,00889	3770	34
115	-30	0,0086	6597	57
105	-10	0,51555	188	97

110	-15	0,04127	754	31
115	-20	0,01161	1885	22
120	-25	0,01557	3770	59
125	-30	0,01026	6597	68
115	-10	0,63004	188	118
120	-15	0,01647	754	12
125	-20	0,02506	1885	47
130	-25	0,01887	3770	71
135	-30	0,01536	6597	101
125	-10	0,33175	188	62
130	-15	0,07034	754	53
135	-20	0,03565	1885	67
140	-25	0,0156	3770	59
145	-30	0,00552	6597	36
135	-10	0,36458	188	69
140	-15	0,10364	754	78
145	-20	0,04319	1885	81
150	-25	0,01459	3770	55
155	-30	0,00485	6597	32
145	-10	0,82924	188	156
150	-15	0,20451	754	154
155	-20	0,05512	1885	104
160	-25	0,0165	3770	62
165	-30	0,00602	6597	40
155	-10	2,1814	188	410
160	-15	0,46742	754	352
165	-20	0,11765	1885	222
170	-25	0,03912	3770	147
165	-10	2,1887	188	411
170	-15	0,44967	754	339
175	-20	0,18029	1885	340
175	-10	2,1911	188	412
180	-15	0,48732	754	367
185	-10	2,2538	188	424

Linha 20

X	Y	V	K	R
15	-10	2,6533	188	498,8204
20	-15	0,61862	754	466,43948
25	-20	0,13108	1885	247,0858
30	-25	0,026957	3770	101,62789
35	-30	0,006711	6597	44,272467
25	-10	2,7488	188	516,7744
30	-15	0,46652	754	351,75608
35	-20	0,079818	1885	150,45693
40	-25	0,015341	3770	57,83557
45	-30	0,0067611	6597	44,6029767
35	-10	2,1105	188	396,774
40	-15	0,269919	754	203,518926
45	-20	0,039274	1885	74,03149
50	-25	0,014064	3770	53,02128
55	-30	0,0061053	6597	40,2766641
45	-10	1,5783	188	296,7204
50	-15	0,13732	754	103,53928
55	-20	0,032854	1885	61,92979
60	-25	0,012751	3770	48,07127
65	-30	0,0046991	6597	30,9999627
55	-10	0,96585	188	181,5798
60	-15	0,11205	754	84,4857
65	-20	0,029368	1885	55,35868
70	-25	0,0088753	3770	33,459881
75	-30	0,0031908	6597	21,0497076
65	-10	0,087499	188	16,449812
70	-15	0,11972	754	90,26888
75	-20	0,021734	1885	40,96859
80	-25	0,0060706	3770	22,886162
85	-30	0,0017883	6597	11,7974151
75	-10	1,407	188	264,516
80	-15	0,13199	754	99,52046
85	-20	0,022791	1885	42,961035
90	-25	0,0062592	3770	23,597184

95	-30	0,003282	6597	21,651354
85	-10	1,3231	188	248,7428
90	-15	0,11711	754	88,30094
95	-20	0,022341	1885	42,112785
100	-25	0,01386	3770	52,2522
105	-30	0,0047615	6597	31,4116155
95	-10	0,96411	188	181,25268
100	-15	0,075954	754	57,269316
105	-20	0,022326	1885	42,08451
110	-25	0,0070598	3770	26,615446
115	-30	0,0036637	6597	24,1694289
105	-10	0,54967	188	103,33796
110	-15	0,08263	754	62,30302
115	-20	0,01971	1885	37,15335
120	-25	0,0078856	3770	29,728712
125	-30	0,0022023	6597	14,5285731
115	-10	0,64813	188	121,84844
120	-15	0,074288	754	56,013152
125	-20	0,019121	1885	36,043085
130	-25	0,01103	3770	41,5831
135	-30	0,005655	6597	37,306035
125	-10	0,84165	188	158,2302
130	-15	0,086024	754	64,862096
135	-20	0,038499	1885	72,570615
140	-25	0,015997	3770	60,30869
145	-30	0,010565	6597	69,697305
135	-10	0,54304	188	102,09152
140	-15	0,12976	754	97,83904
145	-20	0,045782	1885	86,29907
150	-25	0,017103	3770	64,47831
155	-30	0,0088168	6597	58,1644296
145	-10	0,79607	188	149,66116
150	-15	0,016511	754	12,449294
155	-20	0,056916	1885	107,28666
160	-25	0,02156	3770	81,2812
165	-30	0,0085955	6597	56,7045135
155	-10	1,2075	188	227,01
160	-15	0,23555	754	177,6047
165	-20	0,077095	1885	145,324075
170	-25	0,0229199	3770	86,408023
165	-10	1,4634	188	275,1192
170	-15	0,26136	754	197,06544
175	-20	0,086882	1885	163,77257
175	-10	1,4219	188	267,3172
180	-15	0,026164	754	19,727656
185	-10	1,4574	188	273,9912

Linha 40

X	Y	V	K	R
15	-10	2,4308	188	456,9904
20	-15	0,47	754	354,38
25	-20	0,13079	1885	246,53915
30	-25	0,040991	3770	154,53607
35	-30	0,011745	6597	77,481765
25	-10	1,9492	188	366,4496
30	-15	0,39399	754	297,06846
35	-20	0,10807	1885	203,71195
40	-25	0,027753	3770	104,62881
45	-30	0,0083099	6597	54,8204103
35	-10	1,8779	188	353,0452
40	-15	0,37492	754	282,68968
45	-20	0,081381	1885	153,403185
50	-25	0,021156	3770	79,75812
55	-30	0,0057345	6597	37,8304965
45	-10	1,8725	188	352,03
50	-15	0,03011	754	22,70294
55	-20	0,06448	1885	121,5448
60	-25	0,014586	3770	54,98922
65	-30	0,0044116	6597	29,1033252
55	-10	1,7844	188	335,4672
60	-15	0,27405	754	206,6337
65	-20	2,5209	1885	4751,8965
70	-25	2,703	3770	10190,31
75	-30	0,00037116	6597	2,44854252
65	-10	1,8015	188	338,682
70	-15	0,24475	754	184,5415
75	-20	0,046034	1885	86,77409
80	-25	0,010578	3770	39,87906
85	-30	0,0034367	6597	22,6719099
75	-10	1,6814	188	316,1032
80	-15	0,22068	754	166,39272
85	-20	0,037711	1885	71,085235
90	-25	0,0095804	3770	36,118108

95	-30	0,0035849	6597	23,6495853
85	-10	1,5631	188	293,8628
90	-15	0,16179	754	121,98966
95	-20	0,028278	1885	53,30403
100	-25	0,0087728	3770	33,073456
105	-30	0,0043365	6597	28,6078905
95	-10	1,193	188	224,284
100	-15	0,011553	754	8,710962
105	-20	0,021184	1885	39,93184
110	-25	0,0097971	3770	36,935067
115	-30	0,0042697	6597	28,1672109
105	-10	1,0415	188	195,802
110	-15	0,10903	754	82,20862
115	-20	0,032636	1885	61,51886
120	-25	0,011773	3770	44,38421
125	-30	0,0047653	6597	31,4366841
115	-10	1,0319	188	193,9972
120	-15	0,018248	754	13,758992
125	-20	0,051125	1885	96,370625
130	-25	0,016406	3770	61,85062
135	-30	0,0072555	6597	47,8645335
125	-10	0,99131	188	186,36628
130	-15	0,018036	754	13,599144
135	-20	0,047479	1885	89,497915
140	-25	0,019251	3770	72,57627
145	-30	0,0070676	6597	46,6249572
135	-10	1,397	188	262,636
140	-15	0,2234	754	168,4436
145	-20	0,073061	1885	137,719985
150	-25	0,02405	3770	90,6685
155	-30	0,008415	6597	55,513755
145	-10	1,5797	188	296,9836
150	-15	0,37935	754	286,0299
155	-20	0,10161	1885	191,53485
160	-25	0,03259	3770	122,8643
165	-30	0,012006	6597	79,203582
155	-10	1,6227	188	305,0676
160	-15	0,31281	754	235,85874
165	-20	0,085962	1885	162,03837
170	-25	0,028013	3770	105,60901
165	-10	2,0029	188	376,5452
170	-15	0,35389	754	266,83306
175	-20	0,098508	1885	185,68758
175	-10	1,9818	188	372,5784
180	-15	0,35926	754	270,88204
185	-10	1,8872	188	354,7936

---

Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas  
Orientador

---

André Ribeiro Barril  
Aluno