



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"  
Programa Interunidades



Mestrado

---

## Engenharia Civil e Ambiental

**PAULA GOMES JUNQUEIRA**

**ESTUDO GEOFÍSICO EM ÁREA CONTAMINADA POR DIESEL NO  
MUNICÍPIO DE CERQUILHO (SP)**

Bauru  
2017



**PAULA GOMES JUNQUEIRA**

**ESTUDO GEOFÍSICO EM ÁREA CONTAMINADA POR DIESEL NO  
MUNICÍPIO DE CERQUILHO (SP)**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Tomazini da Conceição

Bauru  
2017



Junqueira, Paula Gomes.

Estudo Geofísico em área contaminada por diesel no município de Cerquilha (SP) / Paula Gomes Junqueira, 2017

63 f. : il.

Orientador: Fabiano Tomazini da Conceição

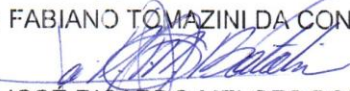
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

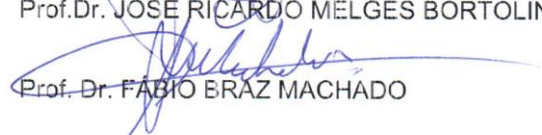
1. Contaminação. 2. Hidrocarboneto. 3. Eletroresistividade. 4. Polarização Induzida. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE PAULA GOMES JUNQUEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.**

Aos 20 dias do mês de janeiro do ano de 2017, às 14:00 horas, no(a) Câmpus de Rio Claro/ DEPLAN, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FABIANO TOMAZINI DA CONCEIÇÃO - Orientador(a) do(a) IGCE / UNESP/Rio Claro (SP), Prof.Dr. JOSÉ RICARDO MELGES BORTOLIN do(a) FHO / Uniararas/Araras (SP), Prof. Dr. FÁBIO BRAZ MACHADO do(a) ICET / UNIFESP/Diadema (SP), sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de PAULA GOMES JUNQUEIRA, intitulada **ESTUDO GEOFÍSICO EM ÁREA CONTAMINADA POR DIESEL NO MUNICÍPIO DE CERQUILHO (SP)**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

  
Prof. Dr. FABIANO TOMAZINI DA CONCEIÇÃO

  
Prof.Dr. JOSÉ RICARDO MELGES BORTOLIN

  
Prof. Dr. FÁBIO BRAZ MACHADO

## DEDICATÓRIA

“Dedico esse trabalho à Dulcinha, que ela supere essa fase para conquistarmos mais coisas  
juntas.”

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Dulce e Pedro por me apoiarem e me darem força em mais uma etapa da minha vida.

Aos meus pais, minha Tia Cecília, meu namorado Flávio e à colega Mari, por estarem presentes no dia da minha Defesa.

Ao Flávio por me ajudar e me inspirar sempre.

Aos colegas Livia e Matheus por me ajudarem na aquisição de campo.

Aos familiares Mário, Mauê e Cilene por me receberem e me ajudarem em Bauru.

Ao professor César pela atenção e dedicação ao meu trabalho.

Ao professor Fabiano pela orientação.

Ao laboratório de geofísica que possibilitou minhas aquisições em campo

E à CAPES pela bolsa de mestrado.

## Resumo

Impactos relacionados ao aporte de hidrocarbonetos em subsuperfície são particularmente preocupantes ao ambiente e à saúde humana, devido à aspectos degradativos e separação em fases dissolvida e residual, que resultam num tempo frequentemente prolongado de residência. Estudos da fase residual são relevantes ao monitoramento e remediação de contaminações em subsuperfície, frente à possibilidade de contaminação das águas subterrâneas mesmo após anos da seção da fonte primária. Os métodos geofísicos são ferramentas consagradas no estudo de contaminações em solo, tanto na fase de confirmação, como na fase de monitoramento, devido à possibilidade de investigações indiretas e não invasivas em solos e rochas. A integração de dados geofísicos com análises químicas de solo ou águas subterrâneas proporciona uma visão abrangente e adequada ao estudo e monitoramento de áreas contaminadas. Neste sentido, este trabalho apresenta o estudo geofísico numa área impactada pelo vazamento de hidrocarbonetos, devido a acidente ferroviário. A área investigada é um trecho de ferrovia localizado no município de Cerquilha (SP), onde ocorreu em 2002 um acidente com vagões que transportavam óleo diesel e está em processo de recuperação desde então. Foram medidos e calculados os parâmetros físicos resistividade elétrica e cargabilidade a partir dos métodos geofísicos Eletroresistividade e Polarização Induzida, por meio da técnica de Imageamento Elétrico. Também foram compilados dados de análises químicas realizadas na área de estudos e disponibilizados pela CETESB. A análise dos resultados permitiu determinar que os métodos geofísicos foram sensíveis aos contaminantes presente na área de estudos e delimitar fase residual e dissolvida e zonas da pluma de contaminação.

Palavras-chave: Contaminação. Hidrocarboneto. Eletroresistividade. Polarização Induzida. Fase Residual.

## **Abstract**

Impacts related to the oil supply in the subsurface are of particular concern to the environment and human health due to degradative aspects and separation in dissolved and residual phases, resulting in an often prolonged residence time. Residual phase studies are relevant to monitoring and remediation of contaminants in the subsurface, facing the possibility of groundwater contamination even after years of primary source section. Geophysical methods are tools appropriate to the study of contamination in soil, both in the confirmation phase, as in the monitoring phase, due to the possibility of indirect and non-invasive investigations in soils and rocks. Integration of geophysical data with chemical analysis of soil or groundwater provides a comprehensive and adequate view to the study and monitoring of contaminated areas. In this sense, this work presents a geophysical study in an area affected by the leak of hydrocarbons due to railway accident. The study area is a railway stretch in the municipality of Cerquillo (SP), where an accident with wagons carrying diesel oil occurred in 2002 and the area is in recovery process since then. Electric resistivity and chargeability were the physical parameters measured from geophysical methods Electrical Resistivity and Induced Polarization by means of electrical imaging technique. Chemical analysis data collected in the study area were provided by CETESB and compiled. The results analysis allowed to determine that the geophysical methods were sensitive to the contaminants in the study area and delimit residual and dissolved phase and contamination plume features.

**Keywords:** Contamination. Hydrocarbon Electrical Resistivity. Induced Polarization. Residual Phase.

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> – Modelo genérico de fases de um contaminante LNAPL em subsuperfície.....                                                                                               | 7  |
| <b>Figura 2</b> – Malha ferroviária (ALL – Malha Oeste), que atravessa o município de Cerquilha/SP.....                                                                                 | 11 |
| <b>Figura 3</b> – Localização da área de estudos.....                                                                                                                                   | 12 |
| <b>Figura 4</b> – Área de estudos com representação do sentido do fluxo d'água geral subterrâneo.....                                                                                   | 16 |
| <b>Figura 5</b> – A) Topografia e ocupação da área de estudos, B) Vagão tombado logo após o acidente ferroviário.....                                                                   | 17 |
| <b>Figura 6</b> – Disposição dos vagões envolvidos no acidente.....                                                                                                                     | 18 |
| <b>Figura 7</b> – A) Localização da estação de tratamento na área de estudos, B) Estação de tratamento.....                                                                             | 19 |
| <b>Figura 8</b> – Localização poços de monitoramento PM-01 a PM-10.....                                                                                                                 | 20 |
| <b>Figura 9</b> – Dispositivo tetraeletródico e distorções de campo elétrico e equipotenciais em semi-esfera estratificada.....                                                         | 21 |
| <b>Figura 10</b> – O fenômeno da Polarização Induzida.....                                                                                                                              | 22 |
| <b>Figura 11</b> – Demonstração da distribuição dos íons no fenômeno polarização de membrana (A) e polarização metálica ou eletrônica (B).....                                          | 23 |
| <b>Figura 12</b> – A) Representação arranjo Wenner, B) Representação arranjo Schlumberger.....                                                                                          | 24 |
| <b>Figura 13</b> – Linhas de aquisição de dados geofísicos.....                                                                                                                         | 26 |
| <b>Figura 14</b> – A) Linha 1, B) Linha 2, C) Linha 3.....                                                                                                                              | 26 |
| <b>Figura 15</b> – Integração da pluma de contaminação com as linhas de aquisição.....                                                                                                  | 27 |
| <b>Figura 16</b> – A) Preparo do ponto de estabelecimento do eletrodo, B) Alocação do eletrodo, C) Preenchimento com $\text{CuSO}_4$ , D). Conexão do cabo transmissor ao eletrodo..... | 28 |
| <b>Figura 17</b> – A) Terrameter LS em operação e ligado ao cabo de transmissão, B) Tela do Terrameter LS em funcionamento .....                                                        | 29 |
| <b>Figura 18</b> – Evolução de 2011 a 2014 da pluma de contaminação de espessura aparente da fase livre.....                                                                            | 30 |
| <b>Figura 19</b> – Área de estudos com as linhas de aquisição de dados geofísicos, poços de monitoramento e pluma de contaminação do ano de 2014.....                                   | 31 |
| <b>Figura 20</b> – Comparação das seções de inversão de cargabilidade 1C, 2C e RC.....                                                                                                  | 33 |

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 21</b> – Comparação das seções de inversão de cargabilidade 3C, 4C, 5C, 6C e RC.....                    | 34 |
| <b>Figura 22</b> – Modelo de inversão de cargabilidade com indicações das principais anomalias.....               | 37 |
| <b>Figura 23</b> – Mapa de níveis de cargabilidade nas profundidades de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m.....       | 38 |
| <b>Figura 24</b> – Mapa de níveis de cargabilidade nas profundidades de 13m, 15m, 17m, 19m, 21m e 23m.....        | 39 |
| <b>Figura 25</b> – Comparação das seções de inversão de resistividade 1R, 2R e RR.....                            | 40 |
| <b>Figura 26</b> – Comparação das seções de inversão de resistividade 3R, 4R, 5R, 6R e RR...                      | 41 |
| <b>Figura 27</b> – Modelo de inversão de resistividade com indicações das principais anomalias .....              | 42 |
| <b>Figura 28</b> – Mapa de níveis de resistividade nas profundidades de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m.....       | 44 |
| <b>Figura 29</b> – Mapa de níveis de resistividade nas profundidades de 13 m, 15 m, 17 m, 19 m, 21 m e 23 m ..... | 45 |

## **Índice de Tabelas**

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> – Quantidade de petróleo e derivados (em toneladas) transportados pela Ferroban entre 1997 e 2002 ..... | 10 |
| <b>Tabela 2</b> – Valores de Precipitação para a região de Cerquilho em milímetros nos anos de 2011 a 2014.....         | 13 |
| <b>Tabela 3</b> – Quantidades de BTEX medidas nos poços PM-01 a PM-10 nos anos de 2002 e 2010.....                      | 32 |

## Sumário

|                                                                               |            |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>RESUMO .....</b>                                                           | <b>I</b>   |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                         | <b>II</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>                                                | <b>III</b> |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>                                                 | <b>V</b>   |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                     | <b>1</b>   |
| <b>2 OBJETIVOS.....</b>                                                       | <b>3</b>   |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                          | <b>4</b>   |
| 3.1 ÁREAS CONTAMINADAS NO ESTADO DE SÃO PAULO.....                            | 4          |
| 3.2 O EMPREGO DA GEOFÍSICA EM ÁREAS CONTAMINADAS.....                         | 5          |
| 3.3 CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS.....                                     | 5          |
| 3.4 TRABALHOS APLICADOS DE GEOFÍSICA EM ESTUDOS DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO ..... | 8          |
| 3.5 CONTEXTO GERAL DAS FERROVIAS NO BRASIL.....                               | 9          |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODO .....</b>                                             | <b>12</b>  |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....                                               | 12         |
| 4.1.1 Área de Estudo.....                                                     | 12         |
| 4.1.2 Histórico do Acidente .....                                             | 17         |
| 4.2 MÉTODOS GEOFÍSICOS .....                                                  | 20         |
| 4.2.1 Eletrorresistividade (ER).....                                          | 20         |
| 4.2.2 Polarização Induzida (IP) .....                                         | 22         |
| 4.2.3 Aplicação dos Métodos.....                                              | 23         |
| 4.3 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO .....                                           | 25         |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                         | <b>30</b>  |
| 5.1 PLUMAS DE CONTAMINAÇÃO .....                                              | 30         |
| 5.2 GEOFÍSICA .....                                                           | 32         |
| 5.2.1 Cargabilidade .....                                                     | 33         |
| 5.2.2 Resistividade .....                                                     | 39         |
| <b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>                                      | <b>46</b>  |
| <b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                     | <b>49</b>  |

# 1 INTRODUÇÃO

Os aspectos envolvidos no conceito de áreas contaminadas variam no âmbito internacional. A Agência Federal de Meio Ambiente da Alemanha apresenta no seu site uma definição de área contaminada baseada no Ato Federal de Conservação do Solo: área contaminada é a contaminação por resíduos abandonados ou em áreas industriais que provoque mudanças prejudiciais no subsolo ou outros riscos à saúde pública. Esse fenômeno é causado por manuseio, armazenamento ou depósito inadequado de resíduos e uso impróprio de substâncias perigosas ao meio ambiente. Na Alemanha, desde que houve a promulgação de leis de proteção ao solo em 1999, mais de 1000 casos de contaminação do solo por negligência acontecem a cada ano, que resultam em aproximadamente 90 condenações por ano (UMWELTBUNDESAMT, 2016).

No Brasil, a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) elaborou uma definição de área contaminada como um local onde, pela introdução de resíduos ou substâncias, é considerada poluída ou contaminada. A contaminação pode ocorrer de forma planejada, acidental ou natural, através de diversas fontes, como depósito, acúmulo, armazenamento, enterramento ou infiltração de substâncias ou resíduos. Os poluentes ou contaminantes podem ficar alocados em subsuperfície na zona saturada e na zona não saturada e a partir daí, serem transportados pelo meio ambiente por diversas vias, com a capacidade de alterar as características naturais e qualidades dos meios por onde propagam. Os impactos negativos da propagação de poluentes no meio ambiente pode atingir tanto a área onde ocorreu a contaminação, como seus arredores (CETESB, 2001).

Existem diversas fontes potenciais de contaminação dos solos, como aterros sanitários e industriais; tanques de armazenamento de substâncias perigosas; cemitérios; instalações de incineração; curtumes; postos de combustíveis; aplicação de pesticidas e fertilizantes na lavoura e a disposição incorreta de suas embalagens; efluentes hídricos da agroindústria e atividades de transporte ferroviário, como por exemplo, no caso de acidentes com transporte de substâncias potencialmente contaminantes (DIAS, 1999; MORINAGA, 2007; CALIJURI; CUNHA, 2013).

A logística de transporte de hidrocarbonetos no sudeste do Brasil envolve oleodutos que interligam campos produtores aos parques de refino, que posteriormente fazem uso de rodovias para curtas distâncias e ferrovias para longas distâncias no transporte de derivados. O transporte ferroviário é particularmente relevante devido à possibilidade de

movimentação de grandes volumes a um custo relativamente baixo (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2014). Neste contexto, acidentes ferroviários frequentemente resultam em contaminações de grande extensão e impacto ambiental.

A área de estudos apresenta um histórico de acidente ferroviário, onde houve contaminação do solo e água subterrânea, devido ao derramamento de aproximadamente 240.000 litros de óleo diesel no município de Cerquilha (SP) em abril de 2002. São encontrados três grupos de contaminantes na área de estudo: combustíveis líquidos, solventes aromáticos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) (CETESB, 2006).

Esta área é monitorada desde 2002 por meio de análises químicas de água subterrânea. Estes dados apontam oscilações nos teores de contaminantes na água subterrânea, com destaque para o benzeno, mesmo em processo de remediação. Nesse sentido é provável que haja aporte sazonal de contaminantes no aquífero, proveniente de impregnações no ambiente insaturado (CETESB, 2006).

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho objetiva o estudo geofísico integrado a dados químicos disponíveis para uma área de estudos no município de Cerquilha – SP, onde houve um vazamento de óleo diesel por acidente em transporte ferroviário em 2002.

Os objetivos específicos são:

a) Avaliar dados químicos disponibilizados pela CETESB em diversas campanhas. Os dados estão disponíveis no Processo CETESB nº PA 06/00204/06, de acesso público.

b) Utilizar ensaios geofísicos a partir dos métodos Eletorresistividade e Polarização Induzida, por meio da técnica Imageamento Elétrico em arranjo Wenner-Schlumberger, para subsidiar a definição de contrastes entre ambiente contaminado e área não contaminada.

c) Analisar os resultados obtidos nos ensaios geofísicos e comparar com as análises químicas, na tentativa de determinação de fases dissolvidas e fases residuais de contaminantes e avaliar a evolução da pluma de contaminação.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo**

No Estado de São Paulo, a CETESB é responsável por ações de controle ambiental e gerenciamento de áreas contaminadas. Para tanto, a agência atualiza frequentemente uma lista de áreas contaminadas e reabilitadas. A última atualização data de 2015 e apresenta um total de 5.376 áreas cadastradas como contaminadas ou reabilitadas. A compilação e análise dos dados obtidos na lista são expostas no Texto Explicativo - Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo (CETESB, 2015a).

As atividades contaminadoras do solo podem ser classificadas como: comercial, industrial, resíduos, postos de combustíveis, acidentes/agricultura/fonte desconhecida. O Texto Explicativo - Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo (2015) apontou como a principal atividade contaminadora os postos de combustíveis e registrou 46 pontos referentes à atividade Acidentes/Agricultura/Fonte desconhecida, que representam 1% do total. Os três principais grupos de contaminantes encontrados nas áreas contaminadas são combustíveis líquidos, solventes aromáticos (benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs).

Os documentos, expedientes e processos administrativos da CETESB são de acesso público e por meio de agendamento, é possível vista dos processos de áreas que constam na lista de áreas contaminadas e reabilitadas (BRASIL, 2003).

A CETESB iniciou a elaboração em 1999 de um Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas que tem um caráter consultivo e propositivo em relação aos procedimentos recomendados. Este manual descreve uma metodologia de gerenciamento de áreas contaminadas que consiste em dois processos base, o de identificação e o de recuperação (CETESB, 1999a; CETESB, 2001).

O processo identificação de áreas contaminadas é composto pelas seguintes etapas: definição da região de interesse, identificação de áreas potencialmente contaminadas, avaliação preliminar e investigação confirmatória. O processo de recuperação de áreas degradadas é composto por seis etapas: investigação detalhada, avaliação de risco, investigação para remediação, projeto de remediação, remediação e monitoramento (CETESB, 1999a).

### **3.2 O Emprego da Geofísica em Áreas Contaminadas**

No Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, a geofísica é indicada como um método não invasivo e não destrutivo de investigação das estruturas de subsuperfície, que pode ser aplicada em diferentes etapas do processo de recuperação de áreas degradadas, como na remediação e nas investigações confirmatória, detalhada e para remediação (CETESB 1999b).

Os métodos geofísicos permitem a detecção de contrastes de propriedades físicas dos materiais geológicos e antrópicos. Assim, é possível a identificação da presença de contaminação subterrânea disseminada nos solos e nas águas subterrâneas, de vala de resíduos, tanques e tambores enterrados e de vazamentos em tanques e dutos. É possível ainda a caracterização de litologias, profundidade do nível d'água e caminhos preferenciais de fluxo subterrâneo (CETESB, 1999b).

O emprego da geofísica no gerenciamento de áreas contaminadas possibilita uma análise multipontual e não invasiva, complementar à quantificação de teores por meio de análises químicas. A aplicação desta ferramenta em subsídio ao planejamento de ações de remediação pode proporcionar resultados efetivos e num prazo relativamente reduzido. O estudo geofísico auxilia no direcionamento das técnicas de tratamento e locação de poços para áreas onde haja impregnações no solo (fase residual) que eventualmente atue como fonte secundária de impacto ao aquífero (CETESB, 1999a; FACHIN et al., 2006; LAGO et al., 2006).

### **3.3 Contaminação por Hidrocarbonetos**

O refino do petróleo gera diversos produtos como gasolina, gases combustíveis, parafinas, dentre os quais o diesel, hidrocarboneto onde predomina o benzeno. Esse derivado de petróleo é considerado um composto de fase líquida não aquosa (NAPL). Os NAPLs são hidrocarbonetos que se apresentam isolados em fase imiscível quando em contato com água e/ou ar. Diferenças nas propriedades físicas e químicas entre a água e NAPL resultam na formação de uma interface física entre os líquidos que previne que eles se misturem. Os NAPL podem ser classificados como leves (LNAPL), que tem uma densidade menor que a da água e os densos (DNAPL) que tem uma densidade maior que a da água (NEWELL et al., 1995; UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA, 1999).

Exemplos de LNAPL são compostos como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX), hidrocarbonetos aromáticos de natureza hidrofóbica que ocupam vazios ao redor de partículas de granulometria fina, sob a forma de películas. Assim, em zonas não saturadas de solos, os BTEX ocupam pequenos poros (NEWELL et al., 1995).

Contaminantes em subsuperfície se distribuem em quatro fases: a) em fase residual, sorvido no solo em detrimento ao oxigênio; b) em fase livre que desloca a água dos poros; c) dissolvido na água e c) na forma de vapor. O que define como o contaminante vai se dividir nessas fases são: propriedades físico-químicas, coeficiente de sorção, constante da lei de Henry (coeficiente de divisão do gás), coeficiente de partição e a solubilidade. Esses mesmo coeficientes vão influenciar no deslocamento da pluma de contaminação em adição a hidrologia da área (USEPA, 1999).

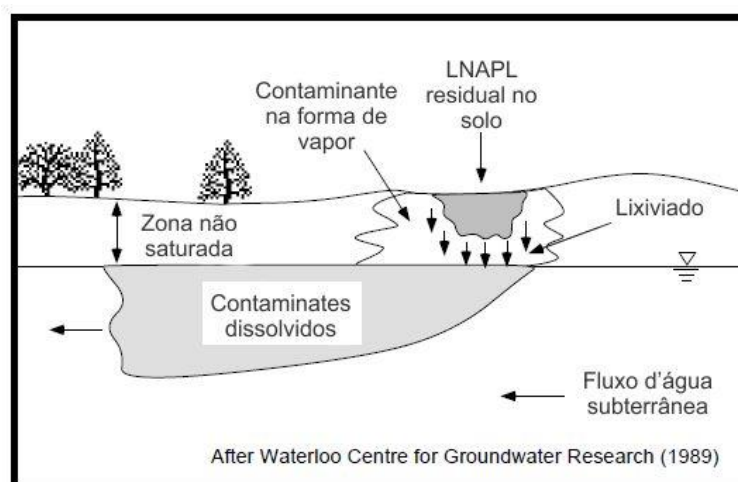
Assim que são liberados, contaminantes do tipo NAPL migram verticalmente pela força da gravidade. Na zona não saturada o contaminante se move por capilaridade como glóbulos de resíduo pelos espaços vazios. O contaminante permanece em fase residual, impregnado aos grãos minerais próximos à fonte de contaminação. Se há uma quantidade suficiente de contaminante, ele pode atingir o limite superior da zona saturada e se deslocar horizontalmente como fase livre. Conforme a água da chuva infiltra em subsuperfície e a água subterrânea se desloca, substâncias químicas são dissolvidas de sedimentos ou da fase livre. Uma vez em solução, essas substâncias se movem com a fase aquosa. Ao atingir o nível freático, os contaminantes consistem a fase dissolvida, com mobilidade próxima à da água. Essa fase passa por processos de dispersão, diluição e dissolução, o que reduz os teores de contaminantes e a toxicidade e aumenta o teor de oxigênio. Seu deslocamento é interrompido por sorção futura e biodegradação (Figura 1) (NEWELL et al., 1995; USEPA, 1999).

O comportamento de um contaminante em subsuperfície em condições favoráveis promove a sua degradação através da redução de sua massa, toxicidade, mobilidade, volume ou concentrações no solo ou água subterrânea. Esse fenômeno é a atenuação natural. Esse processo ocorre em qualquer área contaminada e varia em eficiência, a partir do tipo e concentração dos contaminantes e do corpo que eles atingiram. Os mecanismos que permitem que isso ocorra são: a) mecanismos destrutivos, incluindo biodegradação, oxidação abiótica e hidrólise e b) mecanismos não destrutivos como sorção, dispersão, estabilização química e biológica e volatilização (USEPA, 1999; CAREY et al., 2000).

Num modelo de biodegradação aeróbico, os hidrocarbonetos do petróleo são usados pelas bactérias como fonte de carbono até a conversão dos compostos iniciais em gases

voláteis e água. Para isso acontecer são necessárias condições aceitáveis de pH (potencial hidrogeniônico), Eh (potencial de oxidação-redução) e temperatura. A taxa de degradação será determinada pela taxa de dissolução de componentes tóxicos às populações de bactérias e pela taxa com que os íons necessários para a degradação são repostos. Em contaminações por hidrocarbonetos do petróleo, por causa da sua alta condição redutora, o terminal elétron aceptor de preferência é o oxigênio. De uma visão termodinâmica, esse é o mecanismo de reação mais favorável. Quando a parte solúvel dos hidrocarbonetos de petróleo são os principais contaminantes, uma relação inversa entre concentrações de BTEX e concentrações de oxigênio dissolvido são observadas na pluma de contaminação e indicam o metabolismo microbiológico desses componentes (USEPA 1999).

**Figura 1** –Modelo genérico de fases de um contaminante LNAPL em subsuperfície.



Fonte: Adaptado de NEWELL et al., 1995.

O intemperismo de rochas formadas por minerais de sílica é um processo fundamental na natureza. Porém, um ambiente contaminado por hidrocarbonetos em processo de degradação pode intensificar a corrosão de grãos minerais. A oxidação do petróleo por microrganismos resulta em dióxido de carbono e ácidos orgânicos. Estes compostos solúveis interagem com os metais em solução no ambiente contaminado e promovem a dissolução de grão minerais como quartzos e feldspatos. Os grãos podem ter sua superfície significativamente alteradas por intemperismo, mesmo em ambiente com a presença de sedimentos recentes e águas com pH neutro, onde não se esperava esse comportamento. O responsável por esse comportamento são os ácidos orgânicos. O que se obtêm é um ambiente supersaturado em sílica dissolvida e concentrações de carbono dissolvido, que pode atingir a supersaturação em momentos de grande atividade

(HARTER, 1977; BENNETT; SIEGEL, 1987; McCABE et al., 1987; HIEBERT; BENNETT, 1992).

### **3.4 Trabalhos Aplicados de Geofísica em Estudos de Contaminação do Solo**

Em estudo realizado por Bermejo et al. (1997) em uma base aérea militar próxima de Oscoda, Michigan, Estados Unidos, identificou-se uma pluma de contaminação em processo de atenuação natural através de métodos geofísicos. O método de Radar de Penetração no solo permitiu delimitar uma pluma de contaminação. Por meio do método Eletromagnético no Domínio da Frequência identificou-se um conjunto de cabos elétricos enterrados. Os resultados geofísicos foram usados como guias na obtenção de amostras de solo e água subterrânea.

Os métodos geofísicos Eletromagnético no Domínio da Frequência e Eletrorresistividade foram combinados com sucesso para delimitar uma pluma de contaminação em estudo realizado em Utah Country, Utah, Estados Unidos, por Benson et al. (1997). A área estudada foi contaminada por gasolina, através do vazamento de um tanque. A variação nas medidas de resistividade do ambiente contaminado em relação ao ambiente não contaminado permitiu delimitar a pluma. Análises químicas da água também favoreceram a delimitação da zona contaminada. Os resultados da Eletrorresistividade apresentam altos valores de resistividade em áreas onde há elevado nível de contaminante e chegam a  $36 \Omega\cdot m$ . E baixos valores de resistividade em regiões onde os níveis do contaminante estão abaixo dos limites estabelecidos por lei, indo até  $11 \Omega\cdot m$ .

Em uma área localizada no município de Araras, São Paulo, foi realizado um estudo de contaminação em subsuperfície por meio dos métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida por Moreira e Braga (2009), onde funcionaram duas indústrias químicas entre 1981 e 1992. Em novembro de 1985 denúncias de odores em poços de abastecimento próximos à área levaram ao estudo e à confirmação da contaminação. Análises químicas identificaram os contaminantes 1,2 dicloroetano, benzeno, tolueno, xilenos e sais inorgânicos e que a área sofre processo de atenuação natural. O estudo relacionou a presença de fase residual no subsuperfície com altos valores de resistividade, em torno de  $150 \Omega\cdot m$  no ano de 2002. Em 2007, essa mesma região foi identificada por elevados valores de cargabilidade e baixos valores de resistividade (em torno de  $10 \Omega\cdot m$ ). Esse comportamento condiz com a dissolução dos minerais do aquífero e neoformações minerais.

Buselli et al. (1990) realizaram a aplicação de métodos geofísicos (elétricos e eletromagnéticos) na detecção de áreas contaminadas pela disposição de resíduos sólidos, através da identificação de chorume no subsolo. De acordo com os autores, a identificação de locais contaminados pode ser mais efetiva ao combinar diferentes ferramentas geofísicas (sondagens elétricas e métodos eletromagnéticos como por exemplo, o TEM – Transient Electromagnetics).

Um estudo realizado no vale de um rio da Bacia de Paris por Vaudelet et al. (2011) em uma área urbana contaminada com diversos poluentes, utilizou dados de análises de solo e água e dados de análises geofísicas para realizar o mapeamento da pluma de contaminação. Os produtos dos ensaios geofísicos foram mapas de condutividade elétrica, pseudo seções de resistividade, pseudo seções de cargabilidade e resultados de sondagens de Polarização Induzida espectral. O trabalho relacionou anomalias de baixa resistividade (valores como 2  $\Omega.m$  e 7  $\Omega.m$ ), com áreas em intenso estado de mineralização. Áreas com valores de resistividade média, de 50  $\Omega.m$ , com valores de até 600  $\Omega.m$  são relacionadas com contaminante em fase bruta. Além disso, o trabalho relaciona anomalias com altos valores de cargabilidade (maiores que 10 V/V) com anomalias com baixos valores de resistividade, margem da pluma de hidrocarbonetos e dentro de áreas com altos valores de resistividade.

### **3.5 Contexto Geral das Ferrovias no Brasil**

O sistema de transporte ferroviário é aquele que é realizado sobre linhas férreas para transportar pessoas e mercadorias. As características do transporte de mercadorias deste setor são de produtos com baixo valor agregado e em grandes quantidades como: minério, produtos agrícolas, fertilizantes, carvão, derivados de petróleo (BRASIL, 2013).

As ferrovias brasileiras pertencem à União e atualmente são operadas por empresas privadas por um sistema de concessão. No ano de 2011 o Sistema Ferroviário Brasileiro totalizava 30.051 km de extensão, em 12 malhas ferroviárias no país, distribuído pelas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, e parte do Centro-Oeste e Norte do país (BRASIL, 1988; CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES - CNT, 2011).

O sistema ferroviário passou por um processo de desestatização, quando em 1996 houve o início do programa de concessões à iniciativa privada. Neste modelo, o poder concedente tem como responsabilidades principais a regulamentação, a fiscalização e o acompanhamento da execução dos contratos de concessão. As empresas concessionárias

têm entre as suas principais atribuições, a responsabilidade de prestar serviço adequado, prestar contas da gestão do serviço ao poder concedente e aos usuários, além de captar, aplicar e gerir os recursos financeiros necessários à prestação do serviço. Além disso, a ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres) é responsável por regular as atividades de prestação dos serviços públicos de transporte ferroviário e de exploração de sua infraestrutura (CNT, 2011).

Na maior parte do Estado de São Paulo a concessionária atuante é a ALL – América Latina Logística, em duas malhas ferroviárias de grande extensão e importância. A primeira, ALL – Malha Paulista conecta o Porto de Santos com os portos fluviais de Panorama (SP) e de Pederneiras (SP) e os principais produtos transportados são: derivados de petróleo e álcool, soja e farelo de soja, açúcar e fertilizantes. A segunda malha, ALL – Malha Oeste (Figura 2), possui 1.945 km de extensão e liga Mairinque (SP) a Campo Grande (MS), passa pelo município de Cerquilha (SP) e os principais produtos transportados são minério de ferro, soja, milho e derivados de petróleo e álcool (CNT, 2011).

No município de Cerquilha, a ferrovia foi construída em 1883 e fazia parte da Estrada de Ferro Sorocabana, inaugurada em 1872. Desde a sua inauguração, a ferrovia realizava o transporte de carga e passageiros, quando em 1999, a Ferrobán (atual ALL – Malha Oeste) desativou a linha para passageiros, e opera apenas o transporte de cargas, em funcionamento até os dias atuais (ESTAÇÕES FERROVIÁRIAS DO BRASIL, 2016).

As malhas ferroviárias no interior do Estado de São Paulo possuem como uma das características principais o transporte de derivados de petróleo, principalmente por meio da antiga Ferrobán - Ferrovias Bandeirantes SA. A Tabela 1, aponta a quantidade de petróleo e derivados transportados entre os anos de 1997 e 2002.

**Tabela 1** – Quantidade de petróleo e derivados (em toneladas) transportados pela Ferrobán entre 1997 e 2002.

| Ferrovia | Produtos              | TU <sup>1</sup> Milhões |      |      |      |      |      |
|----------|-----------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|
|          |                       | 1997                    | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
| FERROBAN | Derivados do Petróleo | ---                     | 2,90 | ---  | 0,09 | ---  | ---  |
|          | Gasolina              | 0,87                    | ---  | 0,45 | 0,25 | 0,32 | 0,24 |
|          | Óleo Combustível      | 0,26                    | ---  | 0,32 | 0,45 | 0,50 | 0,02 |
|          | Óleo Diesel           | 1,94                    | ---  | 1,09 | 0,78 | 1,03 | 1,40 |

Fonte: Adaptado de Silva (2004).

**Figura 2** – Malha ferroviária (ALL – Malha Oeste), que atravessa o município de Cerquilha/SP.



Fonte: Adaptado de CNT (2011).

## 4 MATERIAIS E MÉTODO

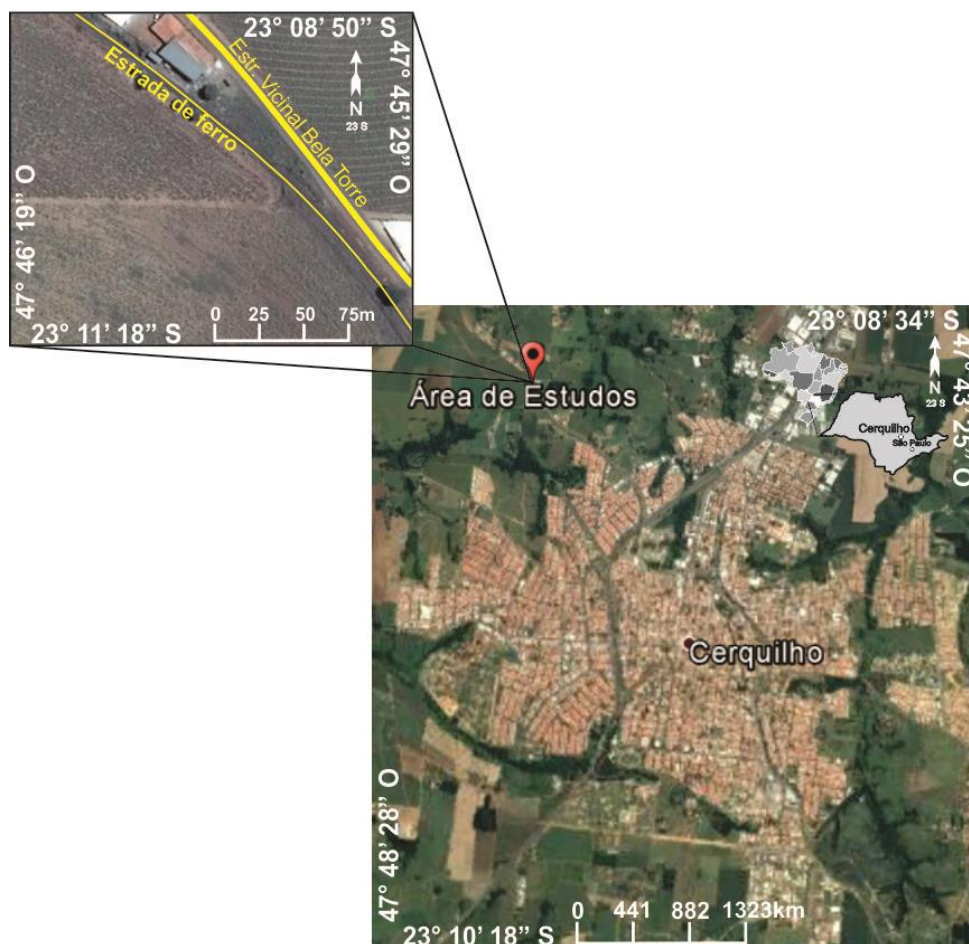
### 4.1 Caracterização da Área

#### 4.1.1 Área de Estudo

##### 4.1.1.1 Características Gerais

A área de estudos está localizada no município de Cerquilha. O município está na região Centro-Leste do Estado de São Paulo distante 150 km da capital, com uma população de 39.617 habitantes (Figura 3), precisamente na latitude  $23^{\circ}09'54''\text{S}$  e longitude  $47^{\circ}44'37''\text{O}$ . O município possui área territorial de  $128,86\text{ km}^2$ , dos quais apenas  $31,29\text{ km}^2$  estão em zona urbana. A densidade demográfica é de  $309,98\text{ habitantes/km}^2$ , bem acima da densidade demográfica média do Estado de São Paulo, que é de  $116,20\text{ habitantes/km}^2$  (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2014).

**Figura 3** – Localização da área de estudos.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2010).

O município de Cerquilha faz parte da região de governo e da região administrativa de Sorocaba/SP e faz divisa a Norte com Tietê, a Sudoeste com Tatuí, a Oeste com Laranjal Paulista, a Nordeste com Cesário Lange, a Sudeste com Boituva, e a Noroeste com Jumarim (SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE CERQUILHO – SAAEC, 2016).

O clima da região segundo a classificação de Koeppen-Geiger é classificado como Cwa, que apresenta clima temperado úmido com inverno seco e verão quente. O município possui pluviosidade média anual igual de 1.212 mm e temperatura média de 21,3°C. Na Tabela 2 estão os valores de precipitação para o município de Campinas a aproximadamente 80 km de distância de Cerquilha. Nos anos de 2013 e 2014 a precipitação foi menor que em 2011 e 2012. (CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA – CEPAGRI, 2016).

**Tabela 2** – Valores de Precipitação para a região de Cerquilha em milímetros nos anos de 2011 a 2014.

| <b>Monitoramento</b>                                    | <b>Mês/Ano</b>   | <b>2011</b>   | <b>2012</b>   | <b>2013</b>  | <b>2014</b>  |
|---------------------------------------------------------|------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| <b>Climatológico</b>                                    |                  |               |               |              |              |
| Precipitação<br>em<br>mm<br>Município<br>de<br>Campinas | <b>Janeiro</b>   | 403,6         | 301,4         | 252,9        | 181,4        |
|                                                         | <b>Fevereiro</b> | 166,8         | 137,4         | 136,5        | 14,1         |
|                                                         | <b>Março</b>     | 218,2         | 148,4         | 15,3         | 98,6         |
|                                                         | <b>Abril</b>     | 95,3          | 213,9         | 93,3         | 61,9         |
|                                                         | <b>Mai</b>       | 41,9          | 73,1          | 62,8         | 22,9         |
|                                                         | <b>Junho</b>     | 59,8          | 165,5         | 69,5         | 9,2          |
|                                                         | <b>Julho</b>     | 6,6           | 40,6          | 60,6         | 28,2         |
|                                                         | <b>Agosto</b>    | 25,5          | -             | 3,5          | 12,2         |
|                                                         | <b>Setembro</b>  | 15,6          | 24,3          | 31,8         | 69,2         |
|                                                         | <b>Outubro</b>   | 155,6         | 100,7         | 81,1         | 15,6         |
|                                                         | <b>Novembro</b>  | 280,9         | 93,9          | 85,8         | 154,8        |
|                                                         | <b>Dezembro</b>  | 206,1         | 133,3         | 97,8         | 232,8        |
|                                                         | <b>Total</b>     | <b>1675,9</b> | <b>1432,5</b> | <b>990,9</b> | <b>900,9</b> |

Fonte: UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA - UDOP (2017).

De acordo com o Inventário Florestal do Estado de São Paulo (2016), Cerquilha possui apenas 1,23% da área total do município composta por vegetação original remanescente do Bioma Mata Atlântica, e 0,68% da área composta por locais de reflorestamento.

Sua base econômica é a indústria e agricultura, com predomínio a cultura da cana-de-açúcar, além do destaque para o setor têxtil, pois a cidade é considerada importante centro de confecção infantil, com foco principal em micro e pequenas empresas (CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL – CEPAM, 2014).

#### **4.1.1.2 Hidrografia**

Cerquilha está localizado na zona do Médio Tietê, que possui como principais redes de drenagem os Rios Sorocaba e Capivari, afluentes do Rio Tietê, principal corpo hídrico da região. Em relação à topografia o município apresenta relevo acidentado, pertencente à província da depressão periférica, em área predominantemente composta por relevo de morrotes alongados e espigões (PERINOTTO, 1987).

O município encontra-se na Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos Sorocaba/Médio Tietê (UGRHI-10), que possui 34 municípios, 16 na região do Médio Tietê (trecho do Rio Tietê do reservatório de Pirapora até a barragem de Barra Bonita) e 18 municípios na bacia do Rio Sorocaba. O Rio Sorocaba fica próximo ao município de Cerquilha e é o manancial de abastecimento do município (SECRETARIA DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO – SSRH, 2011).

#### **4.1.1.3 Geologia Geral**

Cerquilha está na região nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, que ocupa toda a porção centro-oeste do Estado de São Paulo. Esta unidade geotectônica é preenchida por sedimentos que datam desde o Ordoviciano até o Cretáceo e está localizada sobre o Embasamento Cristalino. No início a região da bacia era ocupada pelo mar, que em alguns períodos recuava, o que possibilitou a formação de ambientes litorâneos e continentais. Essa dinâmica resultou em sedimentos marinhos, profundos, rasos ou litorâneos e sedimentos continentais, com influência ou não de degelo de calotas glaciais. Diversos fatores incidiram nesses sedimentos, o que possibilitou a geração de diferentes rochas, como por exemplo as que compõem o Aquífero Tubarão, presente na área. As principais unidades geológicas presentes na região são o Grupo Itararé, depósitos aluvionares

recentes e a Formação Tatuí, que compõe majoritariamente a área de estudo é composta principalmente de argilitos e siltitos, com lentes e níveis de arenitos e calcários (RAJA GABAGLIA; MILANI, 1990; DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; INSTITUTO GEOLÓGICO – IG; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM, 2005; IRITANI, EZAKI, 2012; PERINOTTO, LINO, 2016).

#### **4.1.1.4 Aquífero Regional**

O Aquífero Tubarão é do tipo sedimentar, ou seja, a água circula por poros existentes entre grãos minerais, num ambiente formado pelo depósito de sedimentos pela ação de rios, vento e mar. O Aquífero é constituído por um espesso pacote sedimentar heterogêneo, com intercalações de camadas arenosas, siltosas e argilosas, muitas vezes sem continuidade lateral. No município de Cerquilha podem ocorrer lentes de constituição argilosa ou arenosa. As litologias encontradas são siltitos, argilitos, folhelhos, diamictos, arenitos muito finos a conglomeráticos e ritmitos que ocorrem como camadas com diferentes espessuras, intercaladas e descontínuas (IRITANI, EZAKI, 2012).

#### **4.1.1.5 Geologia Local**

Na área de estudos foram realizadas sondagens que permitiram a elaboração de um perfil geológico local. O perfil é constituído, do topo para base, por sedimentos da Formação Tatuí, com acabamento plano paralelo. Nas camadas menos rasas predominam grãos de silte e nas mais profundas de argila, devido a processo de lixiviação e acumulação em camadas mais profundas. Há a presença de lentes de arenitos finos a muito finos (CETESB, 2006).

A primeira camada é inconsolidada e composta por um siltito marrom avermelhado, decorrente de alterações *in situ*, por preenchimento de uma voçoroca e cultivo de cana-de-açúcar. Essa camada vai até 5 m de profundidade. A camada sotoposta a essa é composta por um siltito cinza esverdeado, com espessura que varia de 1 m a 4 m e que ocorre a profundidades de 2 m a 8 m. A terceira camada mais profunda apresenta baixos teores de umidade e é composta por um argilito marrom ou esverdeado, com espessura que varia de 4 m a 6 m e que ocorre a profundidades de 6 m a 14 m. A partir de 14 m de profundidade há a presença de rocha sã e materiais muito bem compactados. Conforme a profundidade aumenta no perfil, os materiais ficam mais compactos e plásticos (CETESB, 2006).

#### 4.1.1.6 Aquífero Local

O aquífero presente na área de estudos é do tipo livre ou freático, ou seja, ele ocorre normalmente a profundidades de poucos metros e próximo à superfície, com contato com a atmosfera e topo de acordo com o nível freático. O horizonte não saturado ocorre nas duas primeiras camadas, compostas por material inconsolidado e siltito e o ambiente saturado ocorre no argilito. O nível d'água subterrânea varia entre 8 m e 10 m de profundidade nas zonas topograficamente mais altas (arredores na ferrovia) e de 4 m a 5 m nas zonas topograficamente mais baixas (CETESB, 2006; TEIXEIRA et al, 2000).

Ensaio de caracterização hidráulica foram realizados nos entornos da ferrovia e apresentaram valores no horizonte saturado em termos de condutividade hidráulica entre  $1,47 \times 10^{-4}$  cm/s e  $7,267 \times 10^{-4}$  cm/s. O fluxo geral da água subterrânea da área tem sentido sudoeste, em direção ao Córrego Figueira Velha, área de descarga do aquífero livre em questão, com fluxo da região topograficamente mais alta (região da ferrovia) para a mais baixa (Figura 6). Os gradientes hidráulicos variam entre os extremos de 0,032 m/m, na porção centro-norte da área e 0,029 m/m na porção sul. A área de estudos é um vale aberto com desnível de 5 m na direção oeste e 30 m na direção sul. Nos arredores da ferrovia, a superfície é praticamente plana (CETESB, 2006).

**Figura 4** – Área de estudos com representação do sentido do fluxo d'água geral subterrâneo.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2010); CETESB (2006).

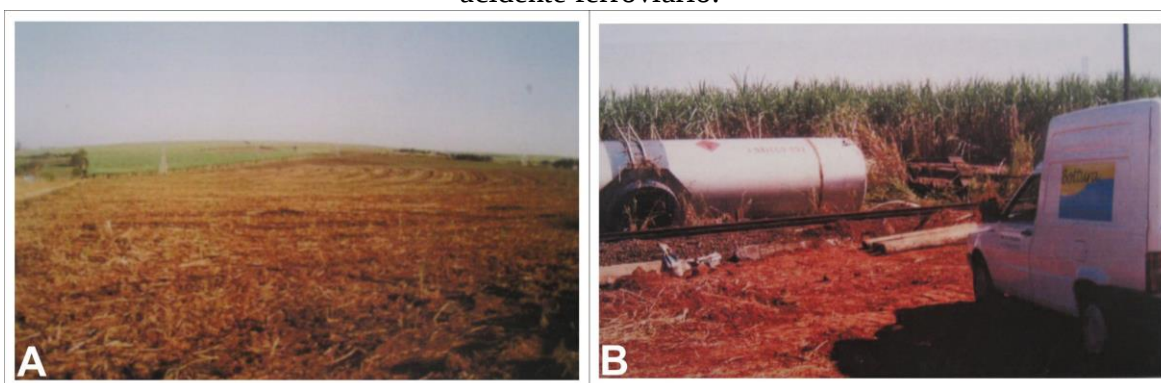
#### 4.1.2 **Histórico do Acidente**

As informações referentes ao histórico do evento foram extraídas do processo CETESB PA 06/00204/06, material de acesso público junto a regional da CETESB de Itu/SP (CETESB, 2006; 2014).

No dia 28/04/2002 ocorreu um acidente na estrada de ferro Cerquilha – Laranjal Paulista, km 164/14 a 166/15 operada pela Ferrobán – Ferrovias Bandeirantes S.A. Essa área está localizada no bairro Taquaral, área rural a noroeste da cidade de Cerquilha (SP). A Figura 7 apresenta imagens da área logo após o acidente ferroviário.

A composição que fazia o transporte de óleo combustível despreendeu-se dos trilhos e tombou, o que ocasionou o derramamento de cerca de 240.000 litros. Na Figura 8 estão representados os quatro dos oito vagões da composição que tiveram praticamente toda sua carga vazada e os demais com perda parcial.

**Figura 5** – A) Topografia e ocupação da área de estudos, B) Vagão tombado logo após o acidente ferroviário.



Fonte: Adaptado de CETESB (2006).

A área impactada está situada num divisor de águas entre duas bacias hidrográficas. Ao norte ocorre a bacia das nascentes do córrego Taquaral, afluente do Rio Sorocaba. Ao sul, a bacia das nascentes do córrego Figueira Velha, afluente do Rio Tietê. O escoamento superficial de óleo diesel seguiu o relevo do terreno e a estrutura da linha férrea. Nenhuma nascente ou drenagem foi atingida diretamente e todo o produto infiltrou no solo. A zona que indica infiltração do óleo diesel está localizada ao longo da estrada de ferro. Sentido sudoeste e nordeste da área diretamente ocupada está uma plantação de cana-de-açúcar e sentido norte residências e comércio.

**Figura 6** – Disposição dos vagões envolvidos no acidente.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2010); CETESB (2006).

O sistema emergencial de remediação começou a operar em 10/05/2002 e após dois meses foram recuperados 1.364 litros do contaminante presente em fase livre sobrenadante na água subterrânea. Posteriormente foi dado início ao monitoramento de nível de água subterrânea e de fase livre de combustível em poços instalados e nas cacimbas de granjas localizadas próximas à área do derramamento. De 2002 a 2004 esse monitoramento era executado duas vezes por semana, associado ao bombeamento da fase livre.

No dia 23/06/2005 foi assinado um Termo de Ajustamento de Conduto – TAC entre a Ferrobán e o Ministério Público, onde foram acordadas medidas de segurança, controle e remediação ambiental, que deviam ser cumpridas a partir de então pela empresa. Assim, houve ampliação do sistema de monitoramento de extração de fase livre, com a implantação de outros sistemas de remediação (sistema de extração de fase dupla – DPE e sistema de extração de vapor – SVE).

Os sistemas de remediação foram modificados em 2007 com o objetivo de otimizar a degradação do produto em fase residual. O sistema de remediação DPE foi substituído pelo sistema de extração multi-fásica – MPE e o sistema SVE foi modificado para operar com sistema de bioaeração *in situ*.

Em 2008 os sistemas de remediação foram desinstalados devido à ausência de fase livre do contaminante. A área continuou a ser monitorada e foi identificada uma fase livre

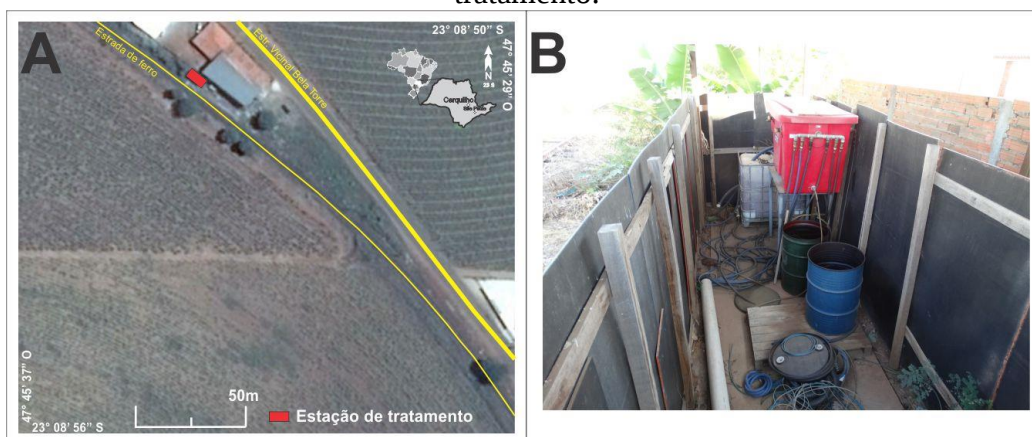
intermitente e sazonal, com remoção manual até setembro de 2009, quando foi instalado um sistema de MPE móvel.

Em novembro de 2011 um novo sistema entrou em operação para remoção de fase livre e residual, o sistema de bombeamento simples aliado ao sistema de lavagem do solo *in situ*. Isso porque a partir da desmobilização do sistema de remediação em 2008, o monitoramento da área indicou aporte recorrente e pontual de fase livre nos poços de monitoramento. Houve a extração contínua da fase livre, porém persistia o aporte sazonal de contaminante, o que indica a presença de fase residual. Assim foram realizadas sondagens no solo impactado e o resultado indicou a presença de contaminante em fase residual.

O surfactante injetado na área é o Lauril Sulfato de Sódio (SDS) em solução 2%, injetado por doze poços. A fase livre e residual são bombeadas junto com a água subterrânea por oito poços e a água retorna pelo sistema de injeção. A estação de tratamento do sistema em operação e sua localização na área de estudos podem ser observados na Figura 9.

Até o primeiro semestre de 2014, o monitoramento apontou que a espessura de contaminante em fase livre teve uma redução significativa, porém não o suficiente para interromper o sistema de remediação. A lista da CETESB de áreas contaminadas e reabilitadas de 2015 apresenta a área de estudos como em processo de remediação com monitoramento da eficiência e eficácia (CETESB, 2015b).

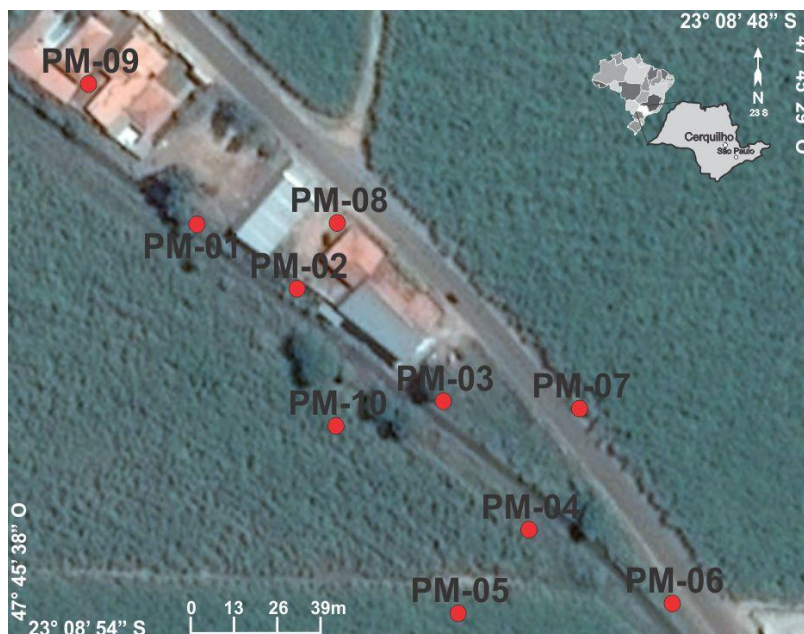
**Figura 7** – A) Localização da estação de tratamento na área de estudos, B) Estação de tratamento.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2010); elaborado pelo autor.

Na área estão presentes diversos poços de monitoramento, remediação, injeção e cacimbas. A Figura 10 apresenta a localização de dez poços de monitoramento, PM-01 a PM-10.

**Figura 8** – Localização poços de monitoramento PM-01 a PM-10.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2010); CETESB (2006).

## 4.2 Métodos Geofísicos

### 4.2.1 Eletorresistividade (ER)

Os solos e rochas possuem algumas propriedades eletromagnéticas, como a resistividade elétrica, a constante dielétrica e a permeabilidade magnética. A Eletorresistividade é um método geofísico que utiliza a determinação da resistividade elétrica em diferentes materiais no ambiente geológico. De acordo com o material a ser estudado, sua natureza e estado físico, varia a dificuldade na propagação de corrente elétrica e diferentes valores do parâmetro resistividade elétrica ( $\rho$ ) são encontrados. Desta forma, a resistividade mede a dificuldade da passagem da corrente elétrica em cada material (MILSON, 2003).

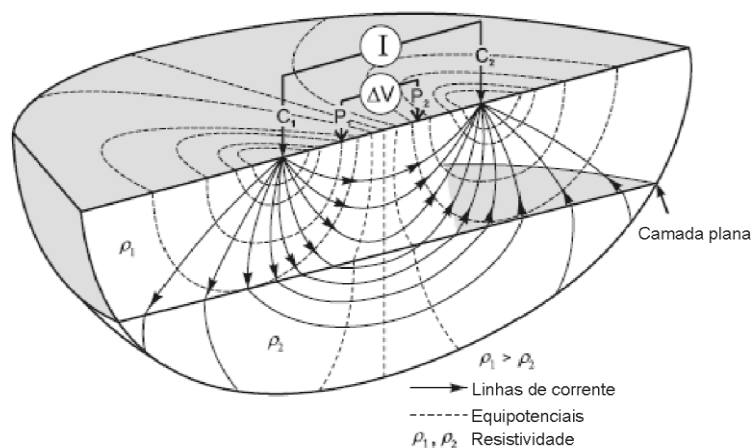
Em ambientes homogêneos uma única medida é suficiente para indicar a resistividade. Porém para meios heterogêneos é necessária uma sequência de medidas e sua média ponderada é chamada de resistividade aparente ( $\rho_a$ ) (KNÖDEL et al., 2007).

A resistividade em ohm.metro ( $\Omega.m$ ) pode ser calculada através da Equação 1, onde  $K$  é o coeficiente geométrico de disposição de eletrodos,  $\Delta V$  é a diferença de potencial em milivolts (mV) e  $I$  é a intensidade da corrente em miliampère (mA) (KNÖDEL et al., 2007).

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Equação 1}$$

Assim, o método Eletrorresistividade consiste em injetar uma corrente elétrica artificial ( $I$ ) em subsuperfície através de um par de eletrodos metálicos ( $C_1$  e  $C_2$ ). Uma diferença de potencial ( $\Delta V$ ) será gerada no subsolo e medida por outro par de eletrodos ( $P_1$  e  $P_2$ ), o que permite calcular a resistividade aparente em subsuperfície e, conseqüentemente a resistividade real através do processo de inversão (Figura 11) (KNÖDEL et al., 2007).

**Figura 9** – Dispositivo tetraeletródico e distorções de campo elétrico e equipotenciais em semi-esfera estratificada.



Fonte: Adaptado de KNÖDEL et al. (2007).

O método Eletrorresistividade tem como principais aplicações a caracterização hidrogeológica, a determinação dos estratos geológicos, a localização de resíduos enterrados e o mapeamento de plumas de contaminantes inorgânicos (CETESB, 1999c).

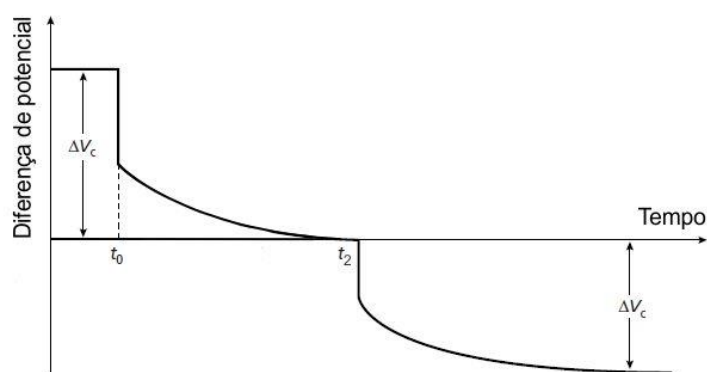
Em solos e rochas, metais e sulfatos metálicos são eficientes condutores de corrente, o que permite o estudo de objetos metálicos enterrados. Plumbras de contaminação são estudadas a partir de íons em solução que são bons condutores de corrente elétrica. A maioria dos minerais formadores das rochas são maus condutores de corrente elétrica e as correntes em subsuperfície são conduzidas principalmente por íons presentes na água dentro dos poros das rochas. A água presente nos poros ioniza pouco e a condutividade

elétrica depende da presença de sais dissolvidos. Contaminações em subsuperfície podem contribuir com a presença desses sais dissolvidos. Minerais de argila são ionicamente ativos e são bons condutores mesmo pouco úmidos (MILSON, 2003).

#### 4.2.2 **Polarização Induzida (IP)**

O fluxo de corrente elétrica artificial em subsuperfície pode causar a polarização elétrica de íons em subsuperfície. Quando a corrente é interrompida, as células de polarização são descarregadas lentamente, em períodos de segundos, o que produz correntes, voltagens e campos magnéticos. A diferença de potencial ( $\Delta V_c$ ) atingida com a passagem da corrente apresenta uma queda drástica quando ela é interrompida ( $t_0$ ) e após isso um decaimento gradual até alcançar o zero ( $t_2$ ). Um fenômeno similar é observado quando a corrente é reiniciada. A diferença de potencial tem um aumento drástico ( $t_2$ ) e depois aumenta gradualmente até atingir um estado de equilíbrio ( $\Delta V_c$ ). O método Polarização Induzida é baseado nessa resposta defasada de voltagem nos materiais terrestres quando a corrente é interrompida e pode ser representada pelo parâmetro cargabilidade em mV/V (Figura 12) (MILSON, 2003; KEAREY et al, 2002).

**Figura 10** – O fenômeno da Polarização Induzida.



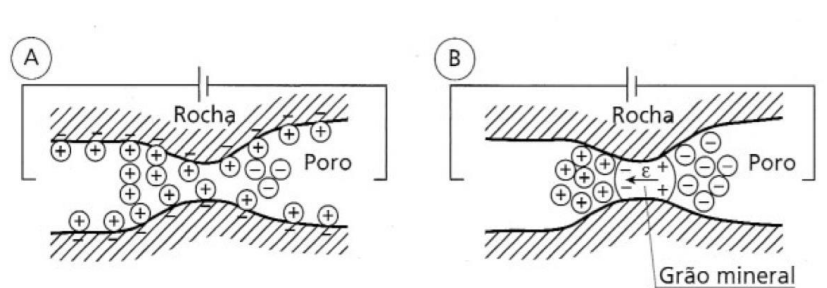
Fonte: Adaptado de KEAREY et al. (2002)

Existem dois mecanismos de polarização de rochas. A polarização de membrana e a polarização de eletrodo. A polarização de membrana é baseada no fato que pequenos poros nas rochas são preenchidos por água com íons positivos e negativos. Os íons positivos estão estabelecidos próximo às paredes dos poros. Quando um campo elétrico é aplicado, a nuvem de íons positivos é alterada pelo deslocamento de íons negativos. Com a

interrupção do campo elétrico, uma corrente no sentido contrário é gerada para reestabelecer o equilíbrio original. Esse efeito ocorre principalmente em argilominerais devido aos seus poros particularmente pequenos (Figura 13) (MILSON, 2003).

A Polarização de eletrodo ocorre na presença de minerais metálicos em contato com água subterrânea. Com a passagem de corrente elétrica, cargas positivas e negativas de grãos minerais são deslocadas para lados opostos. Assim, íons positivos e negativos presentes nos poros próximos aos minerais, acumulam em cada lado dos grãos. Os íons e os grãos minerais tendem a trocar elétrons, porém não na mesma taxa, o que causa um acúmulo de íons nas extremidades dos grãos e consequentemente um acúmulo de cargas. A interrupção da corrente faz com que os íons voltem a condição de equilíbrio e um decaimento de voltagem (Figura 13) (KEAREY et al., 2002).

**Figura 11** – Demonstração da distribuição dos íons no fenômeno polarização de membrana (A) e polarização metálica ou eletrônica (B).



Fonte: Adaptado de KEAREY et al. (2002).

Existem duas variações possíveis para a utilização da Polarização Induzida, que na prática consiste na variação da voltagem em subsuperfície. A primeira consiste na medição do decaimento da voltagem em um intervalo de tempo e recebe a denominação IP – Domínio do Tempo. E a segunda, consiste na medição da resistividade aparente em duas ou mais frequências de baixas correntes alternadas, chamada de IP – Domínio da Frequência (KEAREY et al., 2002).

#### 4.2.3 ***Aplicação dos Métodos***

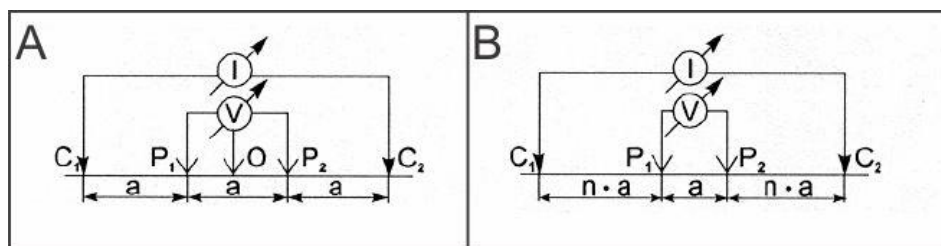
Existem diversas técnicas de aplicação dos métodos, entre elas o Imageamento Elétrico, que é proposto no presente trabalho. A técnica consiste em medidas efetuadas ao longo de uma linha de aquisição, por meio de eletrodos de corrente e potencial, separados equidistantes. Conforme os eletrodos são movimentados em apenas um sentido é possível

investigar descontinuidades laterais. E conforme são afastados os eletrodos de corrente dos de potencial é possível investigar diferentes profundidades, o que gera uma investigação em duas dimensões.

Os eletrodos sobre a superfície do terreno podem ser dispostos em diversas posições geométricas, chamadas arranjos. O presente trabalho propõe o uso do arranjo Wenner-Schlumberger, que é sensível a estruturas tanto horizontais como verticais, caracterizado por pares de eletrodos de potencial no centro e eletrodos de corrente nas extremidades, com espaçamento constante (KNÖDEL et al., 2007).

No arranjo Schlumberger os eletrodos de potencial ( $P_1$  e  $P_2$ ) ficam fixos e os eletrodos de corrente ( $C_1$  e  $C_2$ ) são afastados a cada injeção ( $n$ ) de corrente num intervalo constante ( $a$ ). Essa configuração permite um estudo geofísico em profundidade. No arranjo Wenner os eletrodos de potencial também são deslocados e afastam. O centro do arranjo é representado pelo letra “O”. Assim, a cada injeção de corrente a distância entre os eletrodos de potencial e a distância entre um eletrodo de corrente e o de potencial mais próximo dele sempre são iguais. A Figura 14 esquematiza os arranjos Wenner e Schlumberger e as Equações 2 e 3 apresentam respectivamente os coeficientes geométricos ( $K$ ) do arranjo Wenner e Schlumberger (MILSON, 2003).

**Figura 12** – A) Representação arranjo Wenner, B) Representação arranjo Schlumberger.



Fonte: Adaptado de KNÖDEL et al. (2007).

$$K = 2\pi a \quad \text{Equação 2}$$

$$K = \pi n(n+1)a \quad \text{Equação 3}$$

$$n > 3$$

Os eletrodos usados nesse trabalho foram do tipo não polarizáveis com o intuito de minimizar ruídos nas medidas de Polarização Induzida. O eletrodo consiste em um recipiente com base porosa, com uma haste de cobre e preenchidos com uma solução

supersaturada em sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ). O contato com o solo é feito através da solução que escoa pela base porosa.

### 4.3 Aquisição e Processamento

Para a etapa de aquisição de dados foi feita uma atividade de campo, com a realização de um levantamento geofísico. Os métodos aplicados foram Eletrorresistividade, devido ao seu uso tradicional em estudos ambientais e a Polarização Induzida, na tentativa de avaliar a sua eficácia para o mesmo objetivo, visto que o equipamento utilizado permite realizar os dois métodos simultaneamente. Além disso, a aplicação de dois ou mais métodos geofísicos distintos pode reduzir as incertezas nas interpretações.

A técnica de investigação empregada foi o Imageamento Elétrico, com sete linhas em arranjo Wenner-Schlumberger de 114 m de comprimento cada, posicionadas distantes umas das outras em 6 m e espaçamento entre eletrodos de 6 m. O sentido de imageamento das linhas é de noroeste para sudeste. A profundidade de investigação é de 25 m (Figura 15).

As Linhas 1 e 2 foram posicionadas ao lado da ferrovia, de acordo com seu comprimento. As Linhas 3, 4, 5 e 6 foram realizadas paralelas às Linhas 1 e 2, no sentido sudoeste, onde há uma plantação de cana-de-açúcar. No dia da aquisição de dados a plantação estava cortada e baixa. A Figura 16 ilustra a montagem das linhas de aquisição em campo.

A Linha de Referência foi realizada à montante do local contaminado. Ela foi posicionada a nordeste da área contaminada, paralela à estrada asfaltada que está a montante da região do acidente, ao lado de uma plantação de cana-de-açúcar (Figura 15).

As linhas foram posicionadas de modo a atingir toda extensão longitudinal e transversal da área contaminada, baseada no modelo de pluma de contaminação de espessura aparente da fase livre de 2014. Entre a Linha de Referência e a Linha 1 não foi possível a realização de ensaios, devido as diversas construções presentes na área (Figura 17).

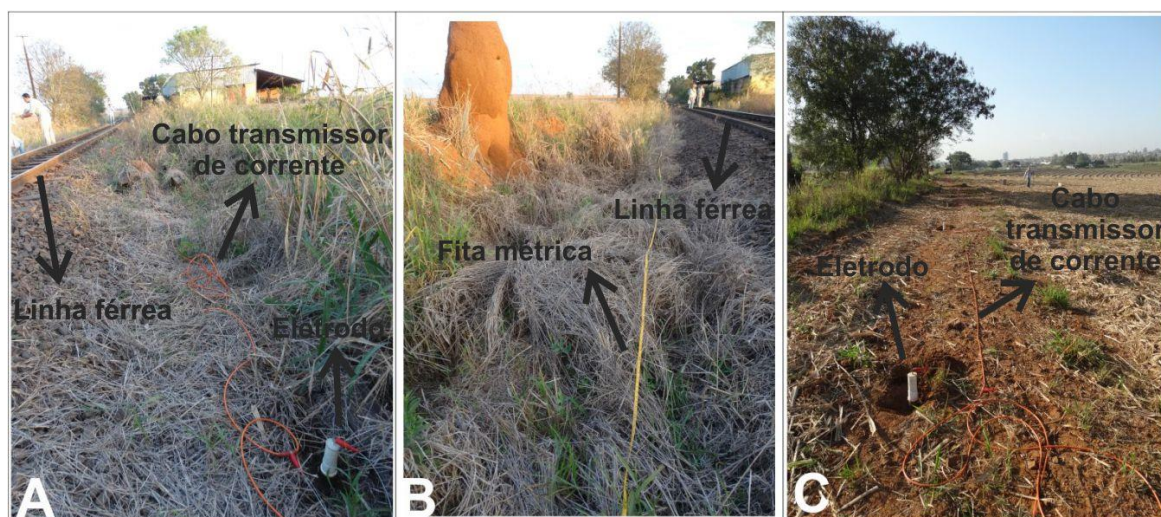
A montagem de cada linha foi feita com marcações de 6 m em 6 m com o auxílio de uma trena, para identificação da posição dos eletrodos. Uma enxada foi usada para deixar plano os pontos de estabelecimento de eletrodos e permitir seu contato diretamente com o solo. Assim, foi possível alocar os eletrodos e preenche-los com a solução supersaturada de  $\text{CuSO}_4$ , sem que eles tombassem (Figura 16).

**Figura 13** – Linhas de aquisição de dados geofísicos.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2010).

**Figura 14** – A) Linha 1, B) Linha 2, C) Linha 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 15** – Integração da pluma de contaminação com as linhas de aquisição.



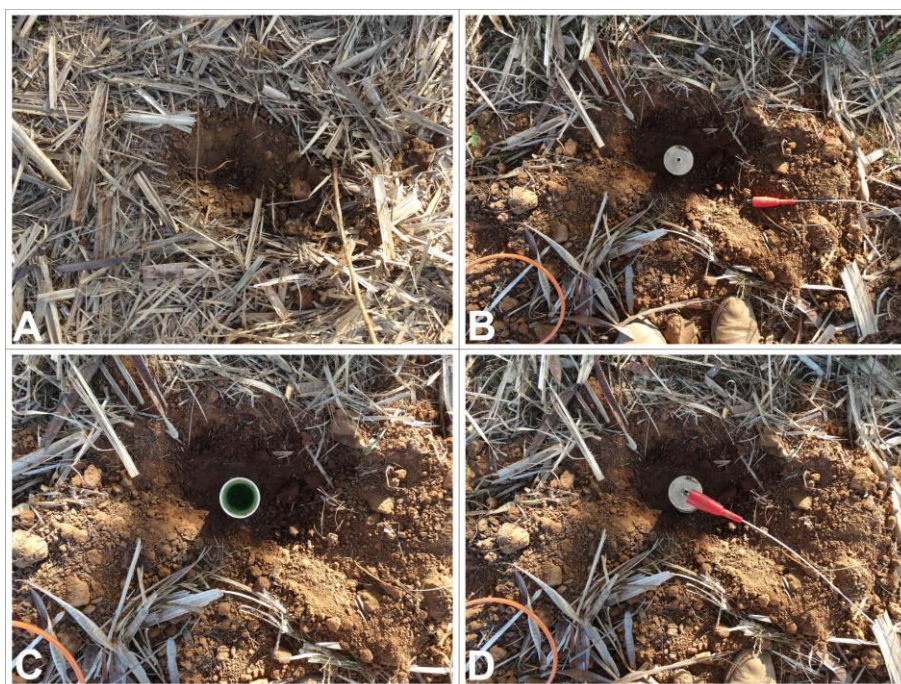
Fonte: Adaptado de Google Earth (2010); CETESB (2014).

Além disso, os eletrodos foram umedecidos para a redução da resistência de contato. Após isso, o local estava pronto para a alocação do cabo transmissor, que foi conectado à haste metálica dos eletrodos, de forma a manter o espaçamento estabelecido e uma de suas extremidades conectada ao equipamento de aquisição de dados geofísicos. Após esses procedimentos a linha está pronta para medições (Figura 18).

Na aquisição de dados geofísicos o equipamento utilizado foi o Terrameter LS, fabricado pela ABEM Instrument (Suécia) e disponibilizado pelo Laboratório de Geofísica do Departamento de Geologia Aplicada da Universidade Estadual Paulista (UNESP) *campus* de Rio Claro. O mesmo equipamento permite realizar estudos geofísicos através dos métodos Eletrorresistividade (ER), Potencial Espontâneo (SP) e Polarização Induzida (IP). O equipamento transmite e recebe sinais automatizados em um único módulo. A

transmissão e recepção de sinais ocorrem em ciclos periódicos e o aparelho faz o cálculo automático da resistência de contato, do desvio padrão do conjunto de medidas e registra automaticamente em sua memória interna as medidas de campo. Os dados armazenados são acessados por uma saída USB e estão disponíveis em uma planilha com formato que permite o tratamento no *software* Res2dinv. O equipamento opera com um programação prévia de 250 W, resolução de 1  $\mu$ V e corrente máxima de 2,5 A. A Figura 19 ilustra o aparelho em funcionamento durante a aquisição de dados (ABEM, 2011).

**Figura 16** – A) Preparo do ponto de estabelecimento do eletrodo, B) Alocação do eletrodo, C) Preenchimento com  $\text{CuSO}_4$ , D). Conexão do cabo transmissor ao eletrodo.



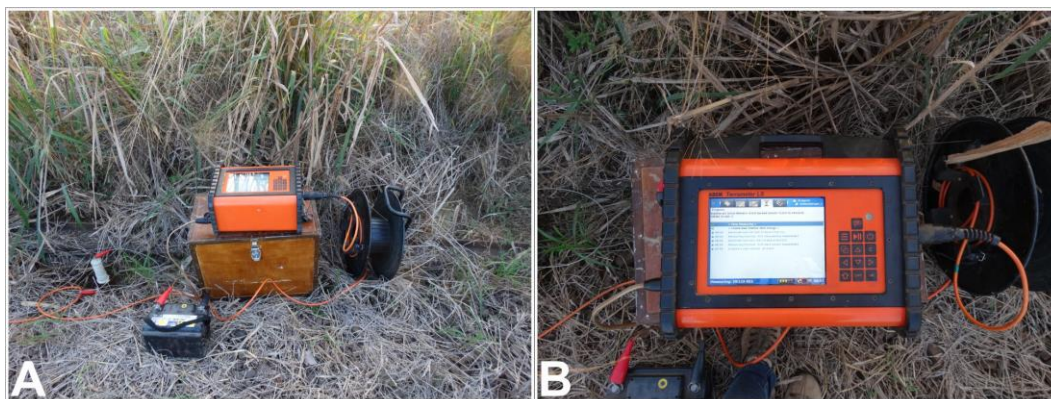
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o intuito de obter uma ampla faixa de opções de injeção de corrente, o equipamento foi programado com os seguintes valores para aquisição das medidas em campo: corrente mínima de 50 mA e máxima de 500 mA, tempo de transmissão de corrente de 1 segundo, duas janelas de leitura fixas e consecutivas de 100 ms e início de janela de leitura após o corte de corrente (*delay time*) de 0,4 segundos (Figura 19).

Os dados geofísicos de campo foram processados no *software* Res2dinv. Esse *software* permite a geração de modelos inversão bidimensionais para análise qualitativa, através de dados quantitativos de campo. Os modelos gerados são seções de resistividade e

cargabilidade em termos de distância x profundidade, com escala gráfica logarítmica e intervalos de interpolação de valores de cor (GEOTOMO SOFTWARE, 2010)

**Figura 17** – A) Terrameter LS em operação e ligado ao cabo de transmissão, B) Tela do Terrameter LS em funcionamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a elaboração dos modelos 2D, as seções foram combinadas para a obtenção de mapas de níveis geoeletricos. Esses modelos são representações em 3D e para sua geração foi necessário reorganizar os dados de inversão de forma que os valores correspondessem a posições no espaço de acordo com as aquisições em campo. A plataforma utilizada para a geração dos modelos foi a Oasis Montaj e eles estão apresentados em termos de distância x profundidade com escala gráfica logarítmica e intervalos de interpolação de valores de cor. Os blocos foram fatiados transversalmente nas profundidades de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m, 11 m, 13 m, 15 m, 17 m, 19 m, 21 m e 23 m para análise dos resultados (GEOSOFT, 2014).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Plumas de contaminação

A partir das medidas resultantes das análises químicas de amostras de água subterrânea de poços de monitoramento instalados na área de estudos, os relatórios presentes no processo CETESB PA 06/00204/06 apresentam modelos de plumas de contaminação. A Figura 20 representa uma compilação de plumas de contaminação para os anos de 2011 a 2014 baseadas nos valores de espessura aparente da fase livre.

**Figura 18** – Evolução de 2011 a 2014 da pluma de contaminação de espessura aparente da fase livre.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2010); CETESB (2014).

Em 2011, a pluma de contaminação possuía formato de “U”, com seu eixo longitudinal correspondente com a extensão da linha férrea e espessura da fase livre entre 0 m e 0,5 m. Há dois pontos com maiores espessuras. Um no sentido sudeste, próximo de

onde tombaram três dos quatro vagões que vazaram totalmente. Nesse ponto a espessura de fase livre chega a 1,5 m. E outro a noroeste, onde a espessura de fase livre chega a 1 m.

Nos anos seguintes a evolução da pluma de contaminação aconteceu primeiro na redução dos níveis mais espessos de fase livre, para depois reduzir o formato da pluma. Assim, de 2011 para 2012 o ponto a noroeste regride a espessura, para valores entre 0 m e 0,5 m e o ponto a sudeste desloca no sentido do fluxo de água subterrânea. De 2012 para 2013, esse ponto também regride a espessura para valores entre 0 m e 0,5 m. E a partir daí o formato da pluma altera, com uma redução na sua área.

A regressão da pluma de contaminação foi menor nos anos de 2013 e 2014 em relação aos anos de 2011 e 2012. A Tabela 2 apresentação os dados de precipitação para a região de Cerquilho. Em 2011 e 2012 houveram mais chuvas, o que influenciou de maneira mais intensa a biodegradação do contaminante.

A Figura 21 mostra as linhas de aquisição de dados geofísicos, sobrepostas pela pluma de contaminação do ano de 2014 e a localização dos poços de monitoramento PM-01, PM-02, PM-03, PM-04, PM-05, PM-07, PM-08 e PM-10. A tabela 3 apresenta as quantidades de BTEX medidas nos poços PM-01 a PM-10 no ano de 2002, logo após o acidente e no ano de 2010.

**Figura 19** – Área de estudos com as linhas de aquisição de dados geofísicos, poços de monitoramento e pluma de contaminação do ano de 2014.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2010); CETESB (2006); CETESB (2014).

Na Tabela 3, os valores medidos em 2002 de benzeno, tolueno, e xilenos ultrapassam os valores de investigação para águas subterrâneas nos poços PM-01, PM-02, PM-03, PM-04, PM-05, PM-08 e PM-10. Os valores medidos para etilbenzeno ultrapassam os valores de investigação para águas subterrâneas nos mesmos poços, exceto o PM-10 (BRASIL, 2009).

Em 2010 há uma redução nos valores medidos de BTEX nesses poços. Apenas os valores medidos de benzeno nos poços PM-02, PM-04, PM-05 e PM-10 ultrapassam os valores de investigação para águas subterrâneas. Em vermelho na Tabela 3 estão os valores de BTEX que ultrapassaram o valor de investigação para água subterrânea. Em 2010 o PM-03 estava desativado (BRASIL, 2009).

**Tabela 3** – Quantidades de BTEX medidas nos poços PM-01 a PM-10 nos anos de 2002 e 2010.

| Data da amostragem | Poços de Monitoramento | PM 01 | PM 02 | PM 03 | PM 04 | PM 05 | PM 06 | PM 07 | PM 08 | PM 09 | PM 10 | V.I. |
|--------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Junho/02           | Benzeno                | <250  | 450   | 500   | 280   | 200   | <1    | <1    | 320   | <1    | 300   | 5    |
| Unidade            | Tolueno                | 950   | 1425  | 1200  | 1240  | 1140  | 17    | <1    | 760   | 9     | 840   | 700  |
| µg/L               | Etilbenzeno            | 525   | 550   | 450   | 300   | 380   | <1    | <1    | 340   | <1    | 260   | 300  |
|                    | Xilenos                | 2550  | 2325  | 2125  | 1540  | 1740  | <1    | <1    | 1560  | <1    | 1380  | 500  |
| Janeiro/10         | Benzeno                | <L.D. | 7,1   |       | 15,4  | 13,7  | <L.D. | <L.D. | <L.D. | <L.D. | 15,8  | 5    |
| Unidade            | Tolueno                | <L.D. | <L.D. |       | <L.D. | <L.D. | <L.D. | <L.D. | <L.D. | <L.D. | <L.D. | 700  |
| µg/L               | Etilbenzeno            | <L.D. | <L.D. |       | <L.D. | <L.D. | <L.D. | <L.D. | <L.D. | <L.D. | <L.D. | 300  |
|                    | Xilenos                | 2,2   | 45    |       | 2,3   | 3,4   | <L.D. | <L.D. | <L.D. | <L.D. | 4,1   | 500  |

Fonte: CETESB (2006).

L.D. = limite de detecção analítico do laboratório (0,1), V.I. = valor de investigação para água subterrânea (µg/L)

## 5.2 Geofísica

Os modelos de inversão bidimensionais para análise qualitativa dos dados geofísicos estão apresentados em seções de resistividade e cargabilidade em termos da distância x profundidade para cada linha de aquisição. O sentido das linhas está representado acima das seções. As cores quentes (tons de amarelo, laranja, vermelho e roxo) representam maiores valores de cargabilidade e resistividade, as cores frias (tons de azul) menores e os tons de verde, valores intermediários. As seções foram nomeadas de acordo com a linha e parâmetro físico que representam. Por exemplo, a seção de cargabilidade da Linha de Imageamento Elétrico 1, foi nomeada de Seção 1C.

Os mapas de níveis geoeletricos estão apresentados em termos de distância x profundidade, com escala gráfica logarítmica e intervalos de interpolação de valores de

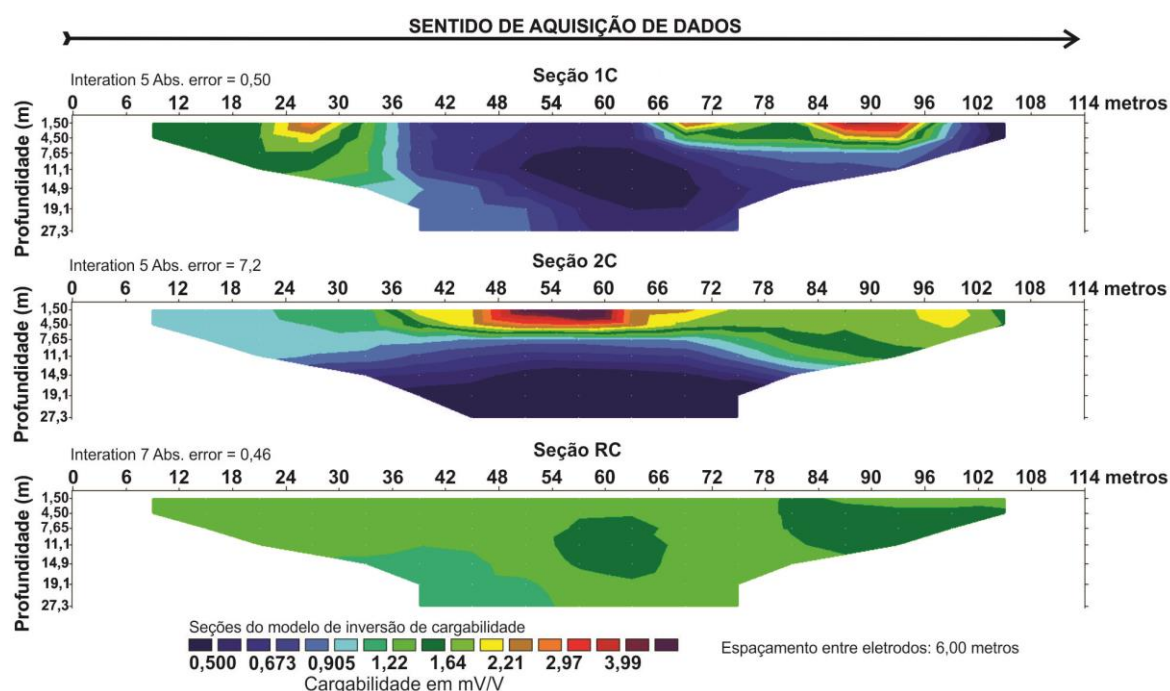
cor. Cores quentes (tons de laranja, vermelho e roxo) representam maiores valores de cargabilidade e resistividade, as cores frias (tons de azul e verde) menores e os tons de amarelo, valores intermediários. As profundidades de visualização são de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m, 11 m, 13 m, 15 m, 17 m, 19 m, 21 m e 23 m.

### 5.2.1 *Cargabilidade*

A observação das seções de cargabilidade das Linhas 1 a 6 (1C a 6C) e comparação com a seção da Linha de Referência (RC) determina dois padrões claros de feições. As seções 1C e 2C apresentam um contraste evidente da seção RC, com valores extremos de cargabilidade, acima de 2 mV/V e abaixo de 0,905 mV/V, caracterizados por tons de azul, amarelo, laranja, vermelho e roxo (Figura 22).

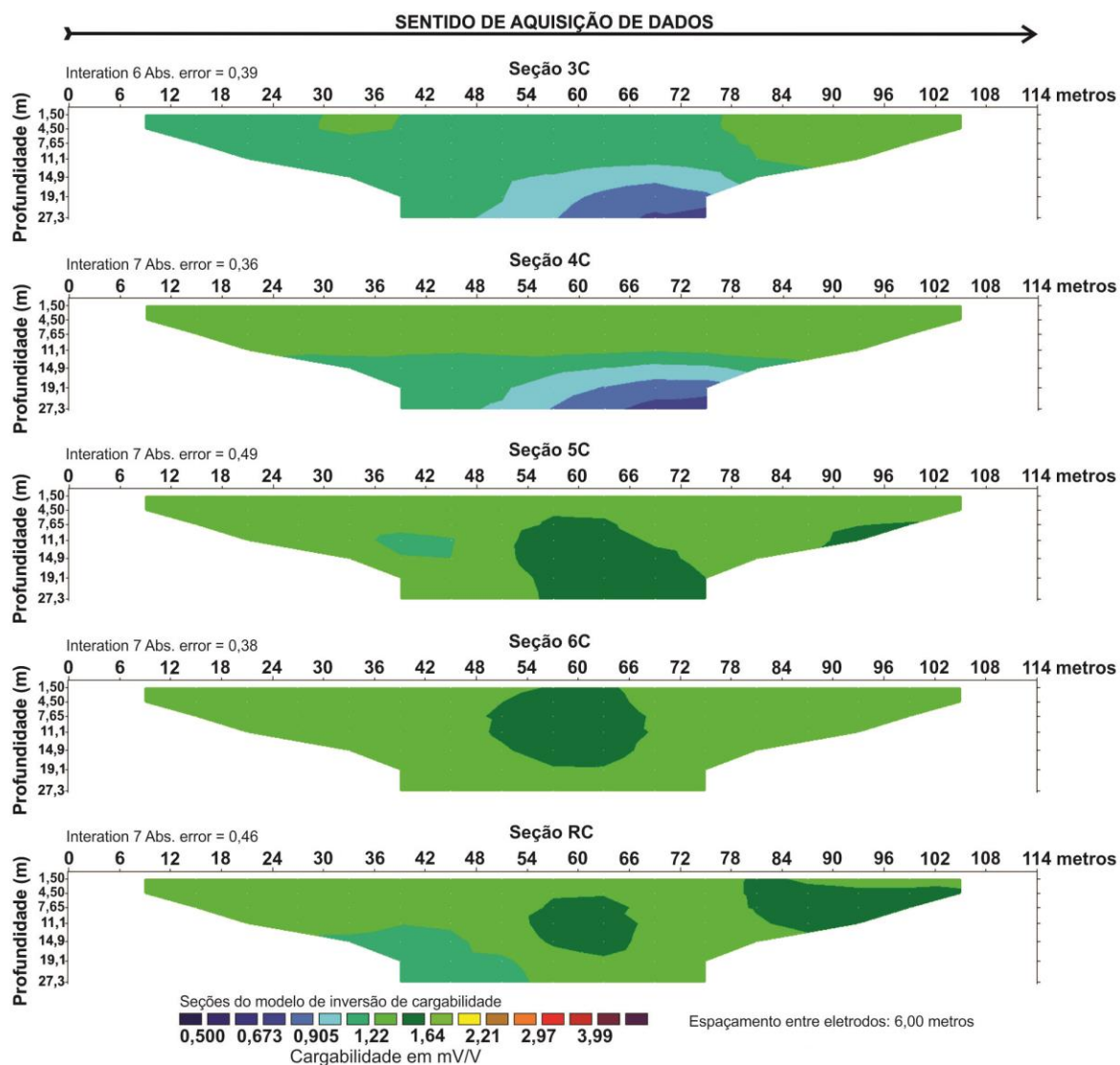
As seções 3C, 4C, 5C e 6C apresentam um padrão muito semelhante com o da seção RC, com predomínio de valores intermediários de cargabilidade, de 0,905 mV/V a 2 mV/V, de tons verdes (Figura 23).

**Figura 20** – Comparação das seções de inversão de cargabilidade 1C, 2C e RC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 21** – Comparação das seções de inversão de cargabilidade 3C, 4C, 5C, 6C e RC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O trabalho de Vaudelet et al. (2011) em uma área urbana contaminada com diversos poluentes, associa áreas com altos valores de cargabilidade próximas ao nível d'água e as margens de áreas com contaminante em fase bruta, com áreas em processo de biodegradação aeróbia e anaeróbia e neoformações minerais. Atekwana e Atekwana (2010) em seu estudo do comportamento de propriedades geofísicas em áreas contaminadas por LNAPL, também associa altos valores de cargabilidade com zonas muito alteradas, devido a biodegradação do contaminante no meio geológico. Moreira e Braga (2009) aplicou os métodos Eletroresistividade e Polarização Induzida em uma área industrial contaminada por benzeno, tolueno, xilenos, entre outros e identificou anomalias de elevada

cargabilidade associadas com anomalias de baixa resistividade, correspondentes com uma área de neoformação mineral.

Quando processos biodegradativos atuam sobre os contaminantes orgânicos, o resultado da metabolização dos microrganismos são ácidos carbônico e orgânico. A ação de ácidos provoca a dissolução de minerais do meio geológico e os íons resultantes ficam na forma dissolvida. A saturação do meio em íons leva a precipitação de neoformações minerais, como os sulfetos (BENNETT et al., 1996).

O contaminante no ambiente geológico em subsuperfície apresenta uma fase residual, presente no ambiente insaturado e uma fase dissolvida, presente no ambiente saturado. A fase dissolvida apresenta uma mobilidade próxima a da água do ambiente que está inserida e migra de acordo com o fluxo da água subterrânea. A contaminação presente em ambiente saturado passa por um processo de solubilização, com consequente dispersão, diluição e redução nos teores de contaminante, com a criação de um ambiente que possibilita a ação de microrganismos por ser menos tóxico e ter maior teor de oxigênio. A fase residual apresenta impregnada aos grãos minerais e tem uma menor mobilidade quando comparada com a fase dissolvida (WILSON; JONES, 1993; RABUS; HEIDER, 1998).

A transformação de LNAPL em subsuperfície por biodegradação resulta em um complexo ambiente. A presença e distribuição de diferentes populações de microrganismos é ditada pela distribuição e concentração de contaminante, que servem como doadores de elétrons. Assim, os microrganismos alteram as propriedades geofísicas de áreas em subsuperfície contaminadas por LNAPL. Os produtos do metabolismo de microrganismo intemperizam os minerais do aquífero e alteram a concentração iônica nos poros, o que causa uma alteração no estado de saturação de minerais. Métodos geofísicos como Eletorresistividade e Polarização Induzida são sensíveis à mudanças nas propriedades da interface entre minerais, água e microrganismo e consequentemente sensíveis à alterações na zona contaminada (BRAGA; CARDINALI, 2005; ATEKWANA; ATEKWANA, 2010).

Os tons de azul presentes nas seções 1C e 2C representam baixos valores de cargabilidade, inferiores a 1 mV/V. Essa zona pode estar relacionada a um ambiente contaminado pouco alterado na zona saturada e insaturada. Na seção 3C essa zona adquire uma tonalidade verde-água e valores intermediários de cargabilidade, entre 1 mV/V e 1,22 mV/V, o que pode ser associado a uma contaminação com menores teores de contaminantes (Figura 24).

Na seção 4C até aproximadamente 11 m de profundidade, há uma feição homogênea de coloração verde e valores de cargabilidade entre 1,22 mV/V e 1,30 mV/V. Essa zona pode ser associada a um ambiente insaturado, livre de contaminação, visto que é uma região onde não ouve infiltração direta de contaminantes devido ao tombamento dos vagões. Abaixo dessa feição, é encontrado possivelmente um ambiente saturado, com tonalidade verde-água e valores intermediários de cargabilidade, entre 1 mV/V e 1,22 mV/V, o que pode ser associado com a evolução da pluma de contaminação no sentido do fluxo geral d'água subterrânea (Figura 24).

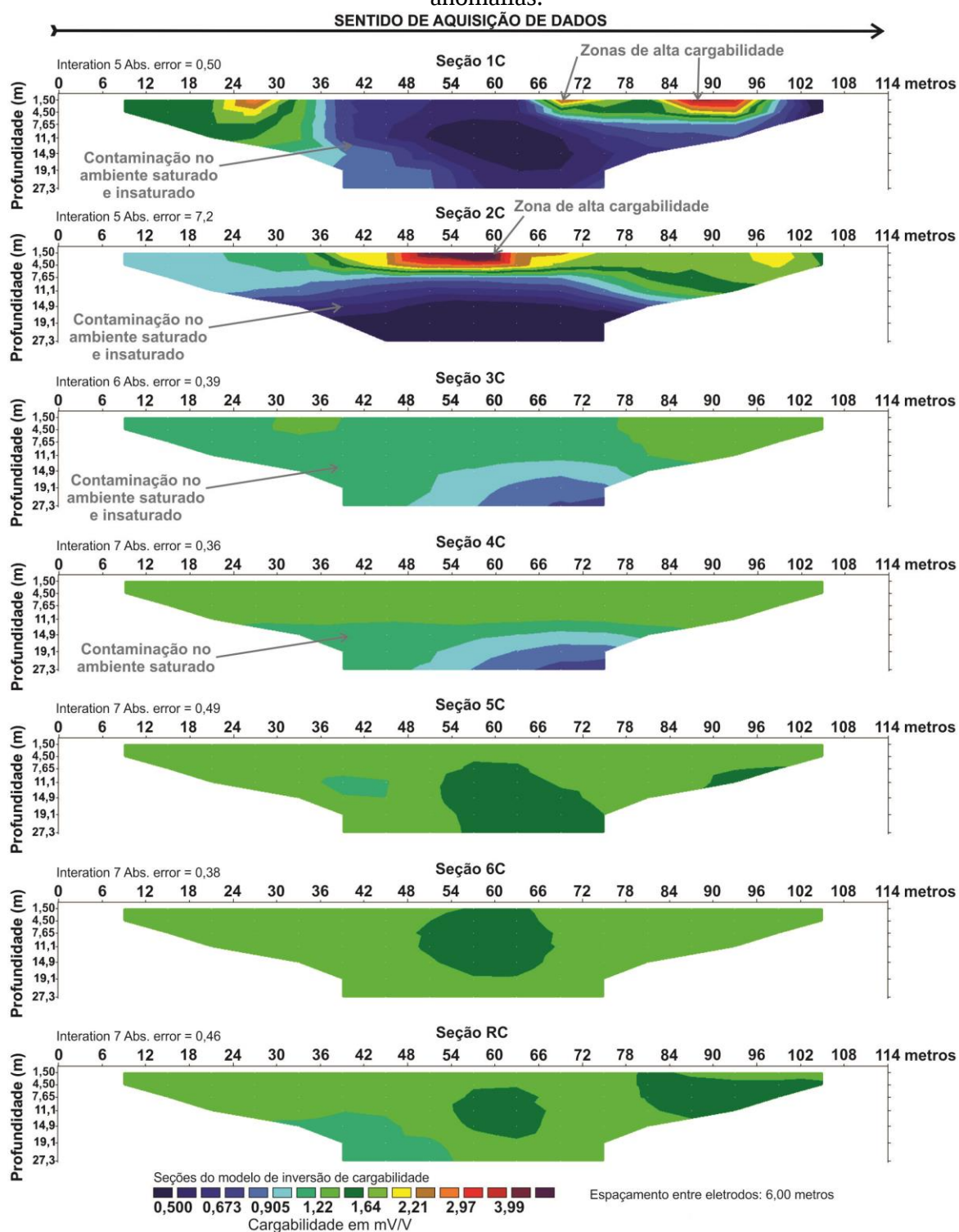
As seções 5C e 6C não apresentam zonas de valores inferiores a 1 mV/V e nem superiores a 1,80 mV/V, não apresentam feições que possam ser associadas a um ambiente saturado ou insaturado e são as que possuem maior semelhança com a seção RC. A seção 1C entre as distâncias 69 m e 72 m e 84 m e 96 m e a seção 2C entre 48 m e 63 m apresentam áreas próximas a superfície com altos valores de cargabilidade, acima de 2,97 mV/V, representados por tons de vermelho e roxo (Figura 24).

As anomalias de alta cargabilidade presentes nas seções 1C e 2C estão no ambiente insaturado e possivelmente impregnado com fase residual de contaminante. Elas estão próximas ao nível do solo e sofrem forte influencia de fatores ambientais como a infiltração de água da chuva. Esses fatores permitem diluição e dissolução do contaminante, o que gera um ambiente menos tóxico e com maiores teores de oxigênio (aeróbio), o que propicia a ação de microrganismos. A biodegradação no ambiente geológico leva a dissolução de minerais e liberação de íons, que com a saturação do meio, resultam em neoformações minerais (Figura 24).

O mapa de níveis de cargabilidade distingue a possível área mineralizada por tons de rosa que representam valores de cargabilidade acima de 2,97 mV/V. Essa zona regride em profundidades maiores, até não ser mais distinguível a partir de 13 m de profundidade. Esse comportamento indica que a área de mineralização possui forma de cone e está restrita ao horizonte de ambiente insaturado (Figuras 25 e 26).

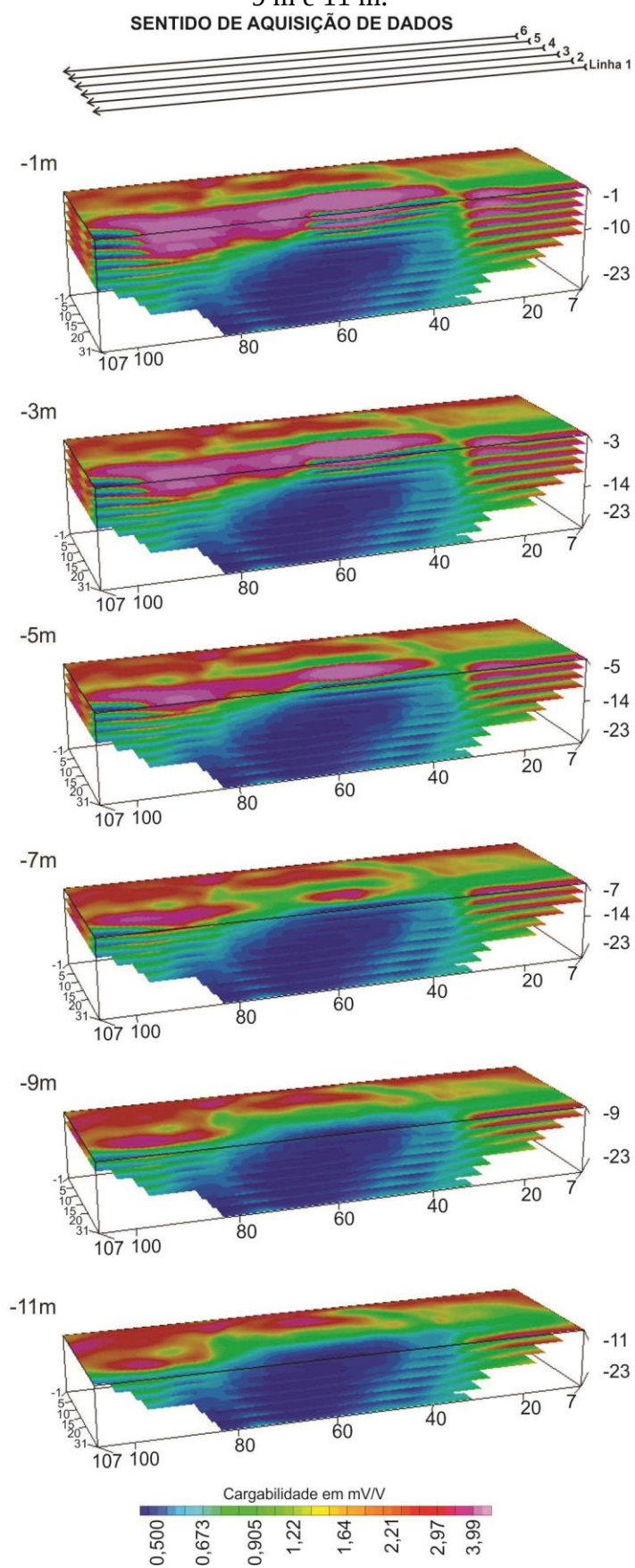
A zona possivelmente relacionada a um ambiente contaminado pouco alterado na zona saturada e insaturada também pode ser identificada no mapa de níveis geoeletricos. Assim como no modelo de inversão, ela é representada por tons de azul, apresenta valores abaixo de 0,7 mV/V e está localizada na região abaixo das Linhas 1 e 2 (Figuras 25 e 26).

**Figura 22** – Modelo de inversão de cargabilidade com indicações das principais anomalias.



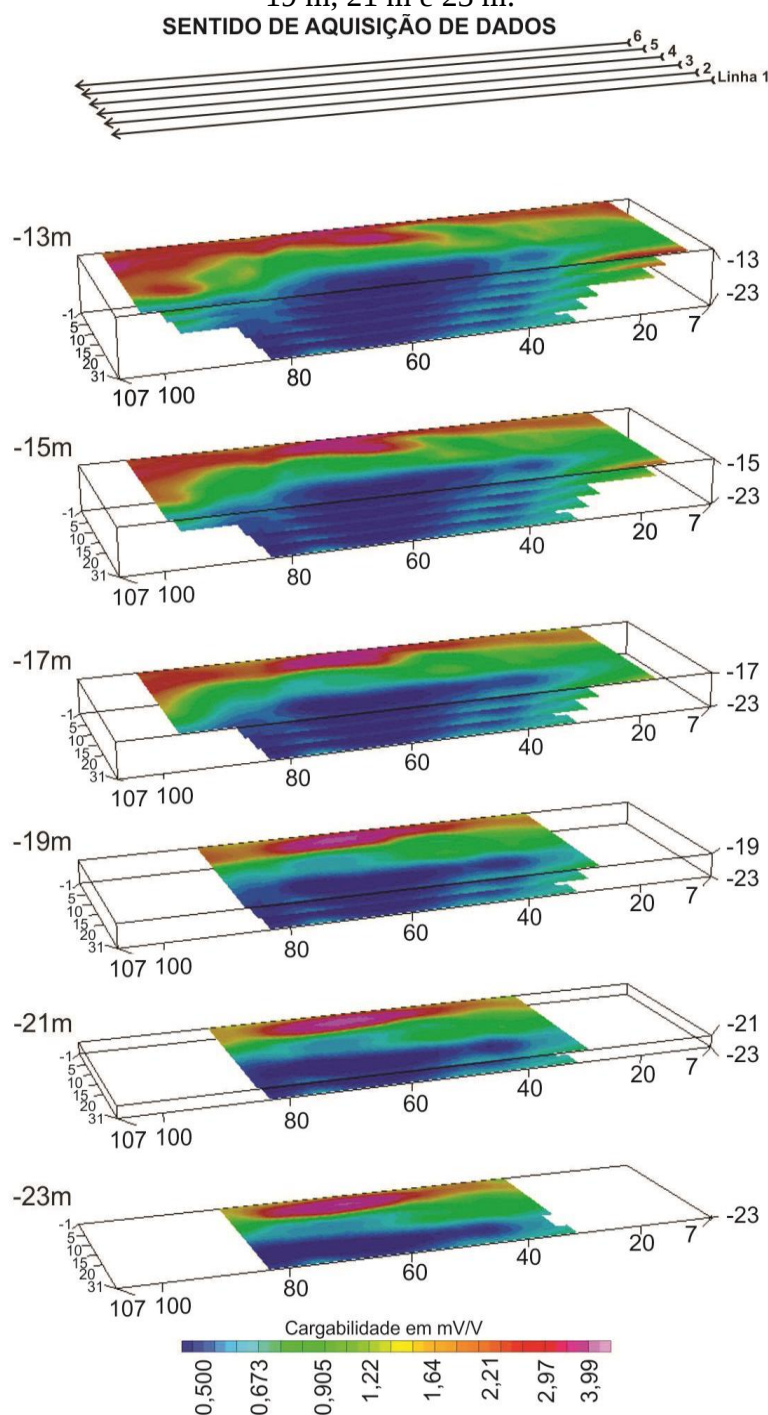
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 23** – Mapa de níveis de cargabilidade nas profundidades de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 24** – Mapa de níveis de cargabilidade nas profundidades de 13 m, 15 m, 17 m, 19 m, 21 m e 23 m.



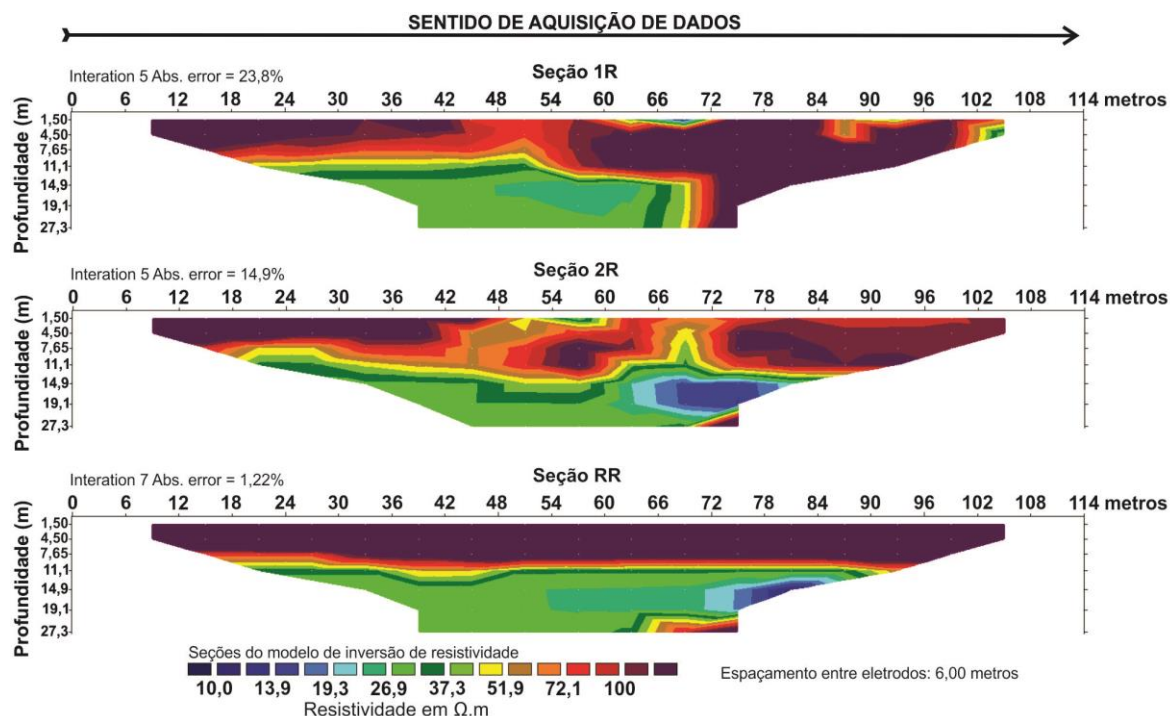
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.2 Resistividade

O modelo de inversão de resistividade, assim como o de cargabilidade, apresenta um contraste claro entre as seções das Linhas 1 e 2 (1R e 2R) e da Linha de Referência (RR). E uma aproximação gradual das feições da seção 3R, 4R, 5R e 6R às feições da

seção RR (Figuras 27 e 28). As seções 1R e 2R apresentam valores de resistividade, acima de  $60 \Omega.m$ , e, profundidades até 11 m, com distribuição heterogênea de cores, representados por tons de laranja, vermelho e roxo (Figura 27).

**Figura 25** – Comparação das seções de inversão de resistividade 1R, 2R e RR.



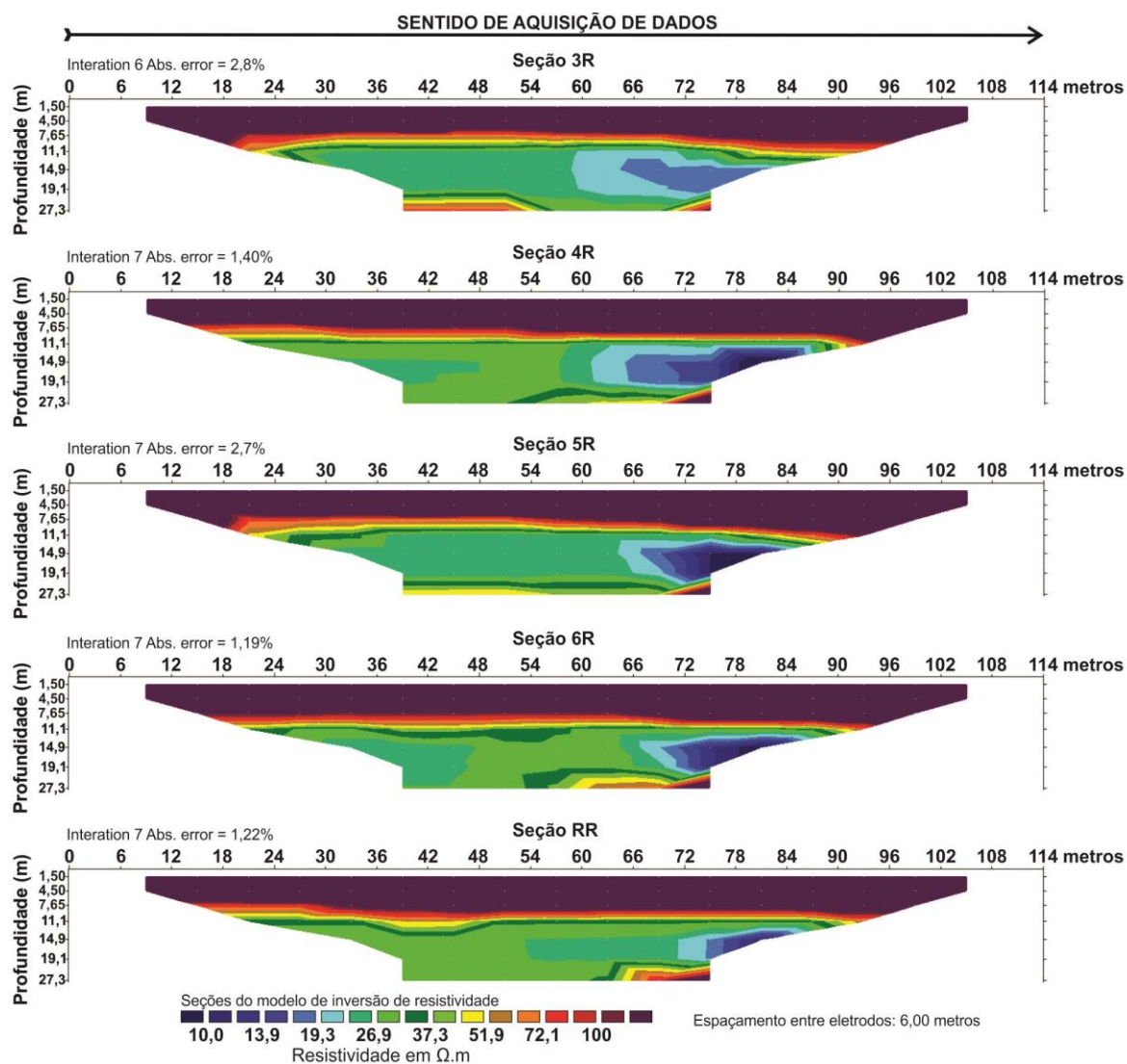
Fonte: Elaborado pelo autor.

As seções 3R a 6R apresentam um padrão homogêneo de altos valores de resistividade, acima de  $100 \Omega.m$  na região com profundidades menores que 11 m, representados por um horizonte de coloração roxa e semelhante com a Linha de Referência (Figura 28).

O trabalho de Moreira e Braga (2009) que investigou uma área industrial contaminada por benzeno, tolueno, xilenos, entre outros, através dos métodos Eletrorresistividade e Polarização Induzida identificou anomalias de altos valores de resistividade associadas a uma fase residual não degradada. Assim, estabeleceu que anomalias pouco resistivas indicam a presença de fase dissolvida de contaminante e um ambiente com maior oxigenação e baixa concentração de contaminantes, resultado de mudanças nas propriedades físicas do meio contaminado. Além disso, o trabalho estabeleceu uma correlação entre áreas com baixos valores de resistividade e áreas com altos valores de cargabilidade e neoformações minerais.

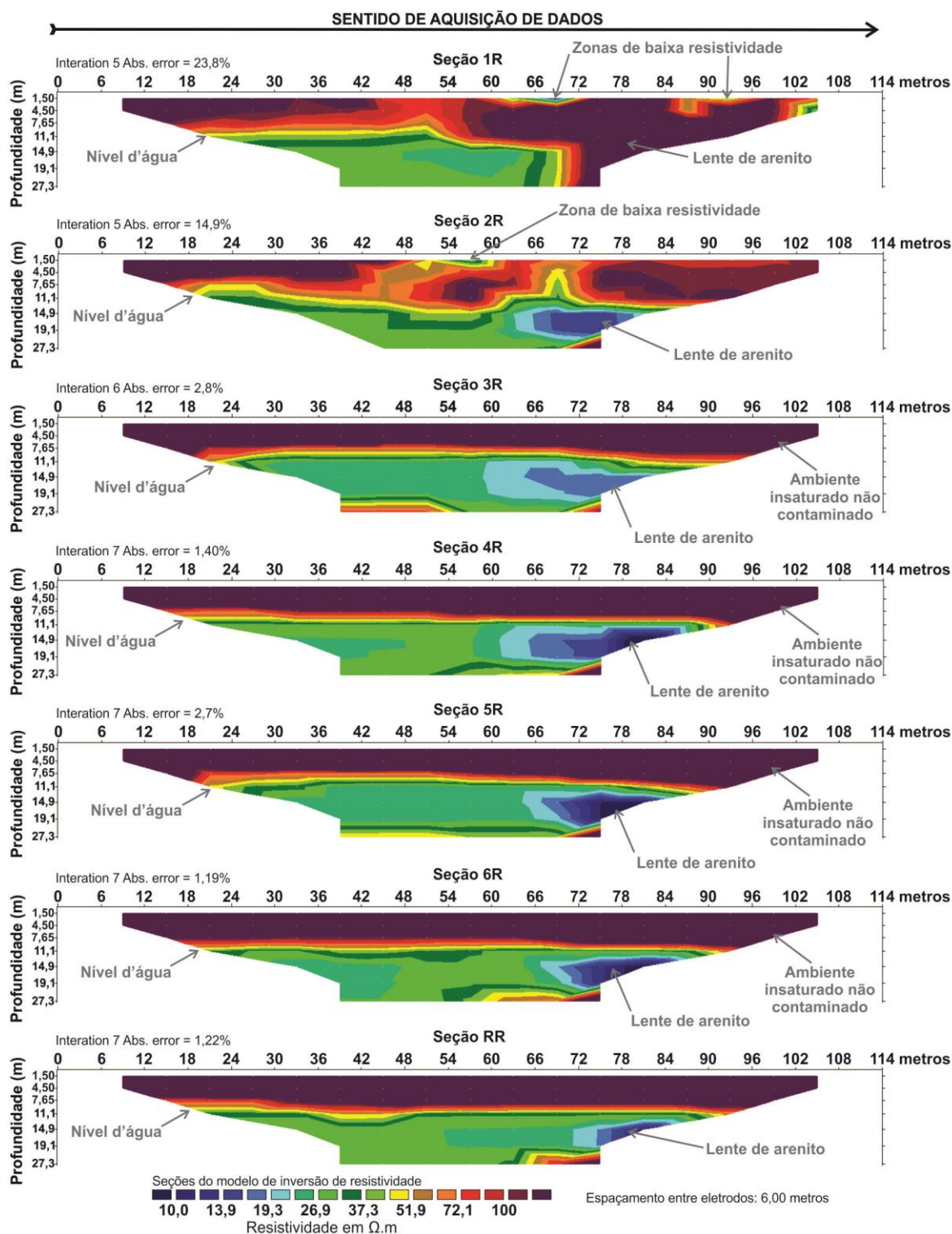
A seção 1R entre as distância 63 m e 72 m e 90 m e 96 m e a seção 2R entre 51 m e 60 m apresentam áreas próximas a superfície com baixos valores de resistividade, abaixo de  $37,3 \Omega.m$  e representados por tons de verde e azul. A posição dessas anomalias coincide com a posição das anomalias nas seções 1C e 2C com altos valores de cargabilidade (Figura 29).

**Figura 26** – Comparação das seções de inversão de resistividade 3R, 4R, 5R, 6R e RR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 27** – Modelo de inversão de resistividade com indicações das principais anomalias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as seções apresentam um horizonte pouco espesso de coloração amarela brilhante e profundidade próxima aos 10 m, com valores intermediários de resistividade, entre 45  $\Omega.m$  e 51,9  $\Omega.m$ . Essa área indica um possível nível d'água, o que marca a

passagem de um ambiente insaturado, mais resistivo, para um ambiente saturado, menos resistivo. As profundidades do nível d'água obtidas em campo por sondagens corroboram com essa interpretação (Figura 29) (CETESB, 2006).

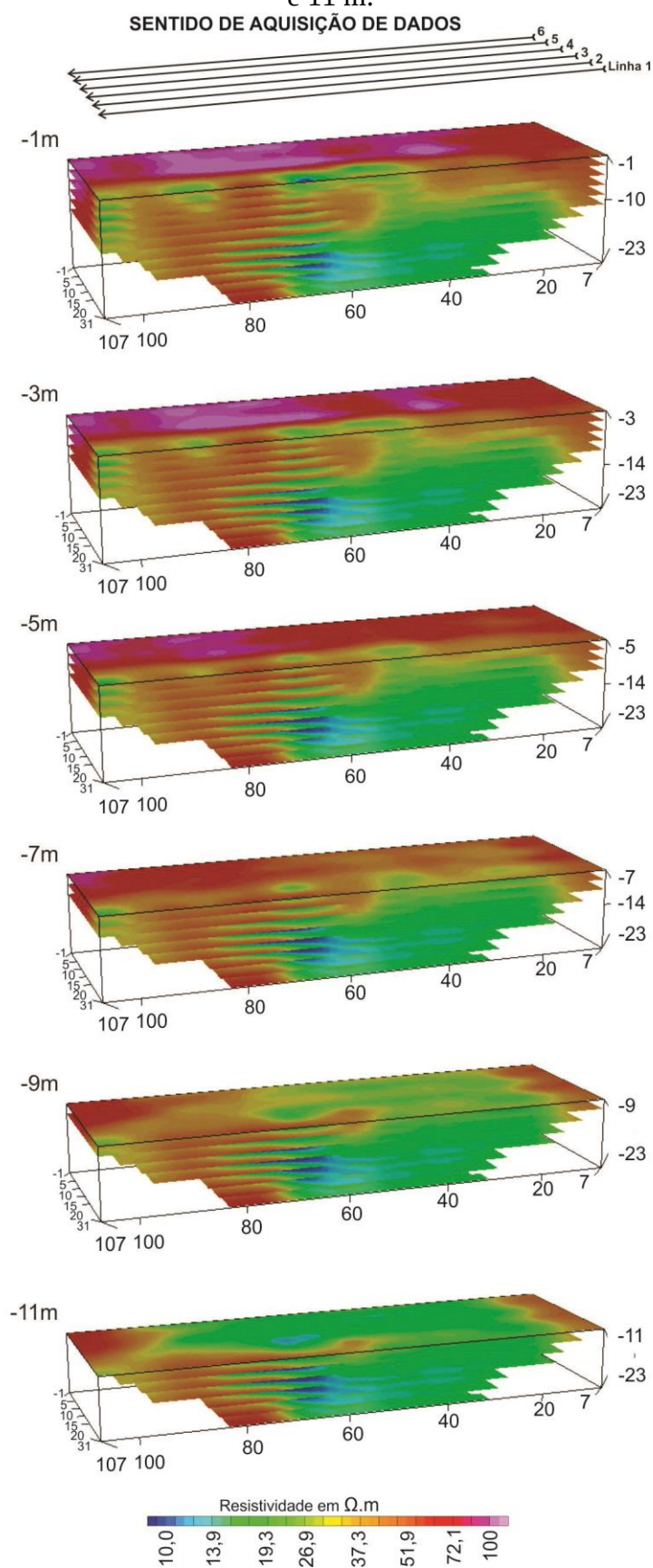
A fase residual de contaminante é estabelecida na zona insaturada, através da impregnação dos grãos minerais. Essa fase apresenta baixa mobilidade e contaminante em elevada concentração, o que gera um ambiente de alta toxicidade que impede a ação de microrganismos que promovem a biodegradação (WILSON; JONES, 1993; RABUS, HEIDER, 1998).

As seções 1R e 2R indicam a potencial presença de contaminante no ambiente insaturado. Os valores de resistividade, acima de 52  $\Omega$ .m, distribuídos de forma heterogênea indicam que o contaminante apresenta altos teores de toxicidade e um ambiente desfavorável para a biodegradação. As seções 3R a 6R, mais distantes da linha férrea e de onde os vagões tombaram, apresentam um horizonte que vai até a profundidade aproximadamente 8 m e de coloração roxa, com valores de resistividade acima de 100  $\Omega$ .m. Esse horizonte pode ser interpretado como um ambiente insaturado sem a presença de fase residual de contaminante (Figura 29).

Nas seções 2R a 6R e na RR é identificada uma anomalia no ambiente saturado, representada por tons de azul e valores de resistividade abaixo de 24  $\Omega$ .m. Essa anomalia pode ser interpretada como uma área que contém contaminante em seus espaços vazios. Uma suposição é que nessa área esteja presente uma lente de arenito, que é um ambiente mais poroso do que o ambiente siltoso e argiloso ao seu redor, o que favorece o transporte de contaminante dissolvido para essa zona. Na mesma área, porém na seção 1R, também há a presença de uma anomalia que apresenta altos valores de resistividade, representado pela cor roxa e valores acima de 100  $\Omega$ .m. Na seção 1R a lente de arenito pode ser interpretada como um ambiente saturado em contaminante bruto, com alta toxicidade e pouca oxigenação (Figura 29) (WILSON; JONES, 1993; RABUS; HEIDER, 1998).

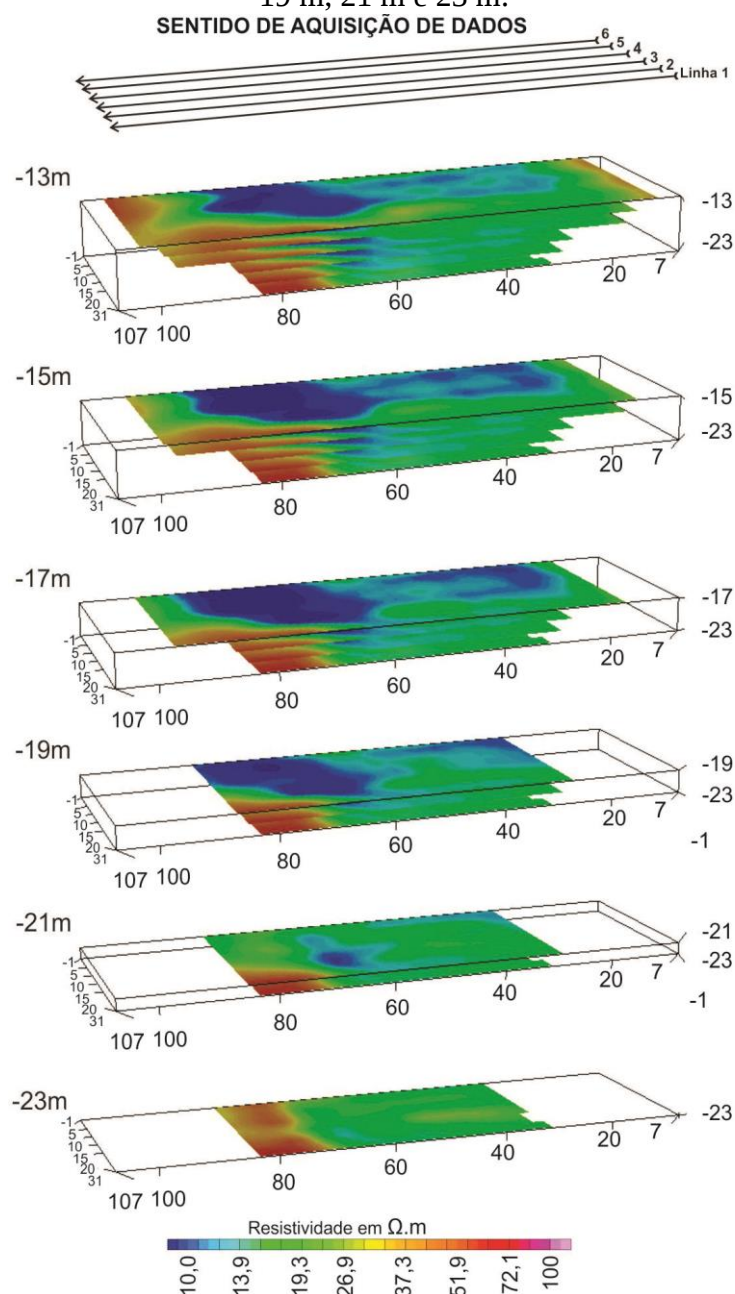
No mapa de níveis de resistividade é possível identificar a anomalia da lente de arenito saturada e não saturada em contaminante, o ambiente insaturado sem a presença de fase residual de contaminante e a passagem do ambiente insaturado para o saturado. É possível ver uma faixa de cor rosa, com valores acima de 90  $\Omega$ .m, na região das Linhas 3 a 6, nas profundidades até 7 m. Essa faixa condiz com a interpretação de ambiente insaturado sem a presença de fase residual de contaminante. Na profundidade de 9 m não é possível identificar uma predominância de cores, o que condiz com a passagem do meio insaturado, para o saturado (Figura 30 e 31).

**Figura 28** – Mapa de níveis de resistividade nas profundidades de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 29** – Mapa de níveis de resistividade nas profundidades de 13 m, 15 m, 17 m, 19 m, 21 m e 23 m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos 11 m, ocorre uma feição em tons de azul, com valores abaixo de 13,9  $\Omega.m$ , na região das Linhas 3 a 6. Este feição deve representar a lente de arenito saturada em contaminante dissolvido. Uma coloração alaranjada com valores de resistividade entre 37  $\Omega.m$  e 72  $\Omega.m$  no ambiente contaminado insaturado abaixo das Linhas 1 e 2 segue em profundidade no meio saturado pela lente de arenito. As profundidades de 11 m a 21 m deixam claras as feições que correspondem a lente de arenito saturada em contaminante bruto e dissolvido, representadas por tons de laranja e azul respectivamente (Figura 30 e 31).

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A contaminação estudada nesse trabalho ocorreu em 2002, devido a um acidente ferroviário e a recuperação da área seguia de forma discreta desde o acidente. Em 2006, o sistema de remediação foi otimizado, com foco na fase livre e gases contaminantes. A partir de 2007 o sistema foi modificado e passou a tratar a fase residual também. Através de medidas de fase livre do contaminante, em 2008 a área foi considerada descontaminada e o sistema de remediação foi removido.

Medidas posteriores de fase livre de contaminante e sondagens no ambiente impactado indicaram que a área ainda estava contaminada e um novo sistema de recuperação foi instalado em 2009. A área segue em recuperação desde então, com remoção da fase livre e residual.

As plumas de contaminação dos anos de 2011 a 2014 e a Tabela 3 com as quantidades de BTEX medidas nos poços PM-01 a PM-10 nos anos de 2002 e 2010 indicam uma redução de contaminante na área estudada e a eficiência do sistema de remediação, em relação principalmente à remoção de fase livre e à diminuição nos teores de contaminantes.

A redução nos valores de espessura aparente acontece devido ao processo de remoção através do bombeamento, que retira a fase livre e separa o óleo da água, a qual é reinjetada no ambiente. Porém esse sistema não remove a fase residual do contaminante, contida no ambiente insaturado, que por sua vez atua como fonte secundária de contaminação e resulta em uma fase livre intermitente e sazonal.

Assim, a partir do comportamento da pluma observado desde 2011 e a manutenção do sistema de remediação, é esperado que em 2016 tenha havido regressão ainda maior e redução de sua influência na área estudada.

Os resultados geofísicos corroboram os dados geoquímicos descritos nos relatórios da CETESB e permitiram identificar que a área está contaminada e estabelecer um modelo de pluma de contaminação. As medidas adquiridas através dos métodos geofísicos Eletrorresistividade e Polarização Induzida foram sensíveis aos produtos de processos degradativos ocorrentes na área devido ao aporte de hidrocarbonetos.

A comparação das seções 1C a 6C com a seção RC e a comparação das seções 1R a 6R com a seção RR permitiu a identificação de um ambiente contaminado. Dois padrões de feições, um com contraste em relação à seção RC e outro semelhante à seção RC,

permitem a identificação de uma área contaminada, localizada principalmente abaixo da linha férrea e uma área com características próximas as de uma área em condições naturais, com valores intermediários de cargabilidade, representados por tons de verde.

A interpretação dos resultados de resistividade elétrica corrobora com o proposto para os resultados de cargabilidade. A comparação das seções 1R a 6R com a seção RR também identificou dois padrões de feições, um com contraste em relação à seção RR e outro semelhante à seção RR. Novamente é possível identificar um ambiente contaminado abaixo das Linhas 1 e 2 e o retorno às condições naturais do ambiente no sentido de fluxo da água subterrânea.

Os resultados geofísicos permitiram identificar não só a contaminação dissolvida, mas residual também. Nas seções de cargabilidade e resistividade é possível ver uma distinção entre o ambiente com contaminante na forma residual e dissolvida e o ambiente com contaminante apenas na forma dissolvida. Altos valores e baixos valores nas seções geofísicas podem indicar contaminação em relação ao meio geológico.

As seções 1C e 2C apresentam valores extremos de cargabilidade e podem ser interpretadas como uma contaminação no ambiente, sem distinguir o meio saturado do insaturado. As seções 1R e 2R apresentam altos valores de resistividade e distribuição heterogênea de cores e podem ser associadas a um ambiente insaturado contaminado. Conforme o ambiente adquire características próximas do natural, os valores de cargabilidade e resistividade tendem a ser medianos.

As seções de resistividade e cargabilidade propiciam a identificação de diversas anomalias e regiões que podem ser interpretadas de diversas maneiras e a associação dessas interpretações permite a proposição de uma pluma de contaminação.

As seções geofísicas resultantes das Linhas 1 e 2 identificaram um ambiente abaixo da linha férrea com contaminante em fase residual e dissolvida e em maior concentração. Altas concentrações de contaminantes compõem um ambiente com altos valores de toxicidade e baixo teor de oxigênio. Isso indica que, apesar da contaminação ter acontecido há 14 anos e a fonte ter cessado, o grande volume de óleo diesel derramado dificulta a ação de microrganismos que promovem a degradação do contaminante.

A fase dissolvida tende a ter um deslocamento no sentido do fluxo d'água e o teor de contaminantes diminui conforme ela cruza o ambiente abaixo das linhas de aquisição, até que os teores sejam tão baixos, que o ambiente tenha um comportamento geofísico muito próximo do ambiente natural. Isso indica que a contaminação está distante do córrego Figueira Velha, área de descarga do aquífero livre. No ambiente abaixo das Linhas

2 a 6, não há presença de contaminante na fase residual, visto que provavelmente nessa área não houve infiltração de óleo diesel na época do acidente.

Na pluma de contaminação foi possível reconhecer dois pontos anômalos nos resultados geofísicos. Primeiro são as regiões associadas à neoformações minerais próximas ao nível do solo. Elas foram identificadas nas seções 1C e 2C e corroboradas pelas seções 1R e 2R. Segundo é a suposta lente de arenito, com contaminante concentrado no ambiente abaixo da Linha 1 e contaminante dissolvido no ambiente abaixo das outras Linhas.

A fase residual de contaminante foi negligenciada diversas vezes no processo de recuperação da área de estudos. O foco das análises químicas realizadas no local é no contaminante em fase livre. A geofísica realizada na área foi capaz de detectar a fase residual, o que demonstra que é uma ferramenta capaz de auxiliar na recuperação da área de diversas formas, como aferir a eficiência do sistema de remediação, auxiliar na locação de poços na área e auxiliar no diagnóstico da área contaminada.

Em 2008, quando o sistema de remediação foi desmobilizado, um estudo geofísico poderia ter auxiliado na tomada de decisão de encerramento do sistema, visto que permite a identificação do contaminante em fase residual.

O estudo geofísico na área permitiu identificar que a fase residual ainda está presente e tem um comportamento como uma zona com alta concentração de contaminante e que o contaminante também é apresentado na forma dissolvida. Assim, há a necessidade de manutenção do sistema de remediação da área. O sistema de bombeamento simples aliado ao sistema de lavagem do solo *in situ* remove a fase livre e residual e é compatível com o comportamento da contaminação no local. A geofísica também pode ser aplicada com o objetivo de aferir a eficiência desse sistema, através de ensaios regulares.

Além disso, é necessário adotar ações para que a contaminação em fase residual seja monitorada diretamente na área de estudos. Uma maneira é através da análise de amostras de solo e não só de amostras de água subterrânea na área contaminada. Um estudo geofísico propicia a detecção de fase residual de contaminante na área e ainda pode auxiliar a locação de sondagens de solo no local e assim, contribuir para o diagnóstico da contaminação no meio insaturado e saturado.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEM. **Terrameter LS - Manual de Instrucción**: ABEM Product Number 33 3000 95. 2011. Disponível em : < <http://www.abem.se/support/downloads/archive/user-manuals/guia-de-usuario-terrameter-ls-20120628.pdf> >. Acesso em: 15 jun. 2016.

ATEKWANA, E. A.; ATEKWANA, E. A. Geophysical Signatures of Microbial Activity at hydrocarbon Contaminated Sites: A Review. **Surveys Geophysics**. [S.I.], n. 31, p. 247–283, 2010.

BENNETT, P.; SIEGEL, D. I. Increased solubility of quartz in water due to complexing by organic compounds. **Nature**, Syracuse, vol. 326, p. 684-686, abr. 1987.

BENNETT, P. C.; HIEBERT, F. K.; CHOI, W. J. Microbial colonization and weathering of silicates in a petroleum-contaminated groundwater. **Chemical Geology**. [S.I.], n. 132, p. 45–53, 1996.

BENSON, A. K.; PAYNE, K. L.; STUBBEN, M.A. Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods. **Geophysics**, [S.I.], vol 62, n. 1, p. 80-86, 1997.

BERMEJO, J.L.; SAUCK, W.A.; ATEKWANA E.A. Geophysical discovery of a new LNAPL plume at the former Wurtsmith AFB. **Ground Water Monitoring Remediation**, [S.I.], vol. 17, n. 4, p. 131-137, 1997.

BRAGA, A. C. O.; CARDINALI, M. T. Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de Hidrocarbonetos. **Revista Brasileira de Geofísica**. [S.I.], n. 23(2), p. 181–190, 2005.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/Constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/Constituicao.htm)>. Acesso em: 18 de nov. 2014.

BRASIL. **Lei nº 10.650, de 16 de abril de 2003**. Dispõe sobre o acesso público aos dados e informações existentes nos órgãos e entidades integrantes do Sisnama. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/2003/L10.650.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/2003/L10.650.htm)>. Acesso em: 18 de nov. de 2014.

BRASIL. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas... Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620> >. Acesso em 13 dez. 2016

BRASIL. **Decreto n. 7929, de 18 de fevereiro de 2013**. Regulamenta a Lei nº 11.483, de 31 de maio de 2007, no que se refere à avaliação da vocação logística dos imóveis não operacionais... Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2013/Decreto/D7929.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2013/Decreto/D7929.htm)>. Acesso em 18 de novembro de 2014.

BUSELLI, G.; BARBER, C.; DAVIS, G. B.; SALAMA, R. B. Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods. **Geotechnical and environmental geophysics**, [S.I.], vol. 2, p. 27-39, 1990.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D.G.F. **Engenharia Ambiental**: conceitos, tecnologia e gestão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 338 p.

CAREY, M. A.; FINNAMORE, J. R.; MORREY, M. J. ; MARSLAND P.A. **Guidance on the Assessment and Monitoring of Natural Attenuation of Contaminants in Groundwater**. Swindon: R&D Publication 95, 2000.

CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL – CEPAM. **Municípios Paulistas – Cerquilha**. 2016. Disponível em: < <http://www.cepam.org/municipios/municipios-paulistas/cerquilha.aspx> >. Acesso em: 02 jun. 2016.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLOGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA – CEPAGRI. **Clima dos Municípios Paulistas**. 2016. Disponível em < [http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_131.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_131.html) >. Acesso em: 02 jun. 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de Ferrovias**. Brasília, 2011. 184 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. O gerenciamento de áreas contaminadas. In: \_\_\_\_\_. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. [S.I.]:[s.n.], 1999a. p 1 e 2.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Métodos Geofísicos. In: \_\_\_\_\_. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. [S.I.]:[s.n.], 1999b. p 1 a 8.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Investigação Confirmatória. In: \_\_\_\_\_. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. [S.I.]:[s.n.], 1999c. p 1.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Conceituação. In: \_\_\_\_\_. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. [S.I.]:[s.n.], 2001. p 3.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Processo nº PA 06/00204/06. FERROBAN – Ferrovias Bandeirantes**. Itu, 2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Processo nº PA 06/00204/06. FERROBAN – Ferrovias Bandeirantes**. Itu, 2014.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Texto Explicativo**: Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo. [S.I.]:[s.n.], 2015a. 14 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo**: dezembro de 2015, ordem alfabética. [S.I.]:[s.n.], 2015b. p. 692.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; INSTITUTO GEOLÓGICO – IG; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. **Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo**. Escala 1:1.000.000. Nota explicativa, 2005.

DIAS, M. C. O. **Manual de impactos ambientais**: orientações básicas sobre aspectos ambientais de atividades produtivas. Fortaleza: Banco do Nordeste, 1999. 297 p.

ESTAÇÕES FERROVIÁRIAS DO BRASIL. **E. F. Sorocabana**. Disponível em: < <http://www.estacoesferroviarias.com.br/c/cerquilha.htm> >. Acesso em: 02 jun. 2016.

FACHIN, S. J. S.; HUBER, F.; SHIRAIWA, S.; BORGES, W. R.; MIGLIORINI, R. B. Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curume. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, vol. 24, nº 1, 2006.

GEOSOFT. **Oasis montaj How- To Guide**: Complete Workflow for Oasis montaj. Toronto: [s.n.], 2014. 231 p.

GEOTOMO SOFTWARE. **RES2DINV ver. 3.59**: for Windows XP/Vista/7. Malásia: [s.n.], 2010. 148 p.

GOOGLE EARTH. **Google Earth-Mapas 2010**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em 21 jan. 2017

HARTER, R.D. Reactions of minerals with organic compounds in soil. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.). **Minerals in the soil environment**. Madison, 1977, p. 709-739.

HIEBERT, F. K.; BENNETT, P. C. Microbial control of Silicate Weathering in Organic-Rich Ground Water. **Science: American Association for the Advancement of Science**. Austin, vol. 258, p. 278-281, oct. 1992.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **@Cidades**. 2016. Disponível em: < <http://cidades.ibge.gov.br/painel/economia.php?codmun=351150> >. Acesso em: 02 jun. 2016.

INVENTÁRIO FLORESTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa Florestal dos Municípios do Estado de São Paulo**. 2016. Disponível em: < <http://s.ambiente.sp.gov.br/sifesp/cerquilha.pdf> >. Acesso em: 02 jun. 2016.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo**. 3a edição. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA, 2012. p. 20-26, 31-37.

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

KEAREY, Philip et al. **An Introduction to Geophysical Exploration**. Terceira edição. Oxford: Blackwell Science Ltd, 2002. 268 p.

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H. J. **Environmental Geology - Handbook of Field Methods and Case Studies**. Berlim: Springer-Verlag, 2007. 1374 p.

McCABE, C.; SASSEN, R.; SAFFER, B. Occurrence of secondary magnetite within biodegraded oil. **Geology**, [S.I.], vol. 15, n. 1, p. 7-10, 1987.

MILSON, J. **Field Geophysics**. England: Wiley, 2003. 232 p.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Transporte Ferroviário**. [S.I.], 2014. Disponível em: < <http://www.transportes.gov.br/transporte-ferroviario-relevancia.html> >. Acesso em: 02 de jun. de 2016.

MOREIRA, A. C.; BRAGA, A. C. O. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.I.], vol. 14, n. 2, p. 257-264, 2009.

MORINAGA, C. M. **Recuperação de áreas contaminadas: um novo desafio para projetos paisagísticos**. 2007. 152 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NEWELL C. J.; ACREE S. A.; ROSS, R. R.; HULLING S. G. **Light Nonaqueous Phase Liquids**. Oklahoma, 1995. 25 p.

PERINOTTO, J.A.J. **Análise Estratigráfica da Sequência Portadora de Carvão na Região de Cerquilha (SP)**. 1987. 76 p. 76 p. Dissertação (Mestrado) - IG/USP, São Paulo.

PERINOTTO, J. A.; LINO, I. C. **Geologia, Recursos Minerais e Passivos Ambientais: atlas ambiental da bacia do Rio Corumbataí**. Disponível em: < <http://ceapla2.rc.unesp.br/atlas/geologia.php> >. Acesso em: 09 jun. 2016.

RABUS, R.; HEIDER, J. Initial reactions of anaerobic metabolism of alkylbenzenes in denitrifying and sulfate-reducing bacteria. **Archives of Microbiology**. [S.I.], n. 170, p. 377-384, jun. 1998.

RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. J. **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Rio de Janeiro: Ed. Gávea, 1990.

SECRETARIA DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO – SSRH. **Plano Regional Integrado de Saneamento Básico**. 2011. Disponível em: < [http://www.saneamento.sp.gov.br/PMS/UGRHI10/PRS\\_UGRHI10.pdf](http://www.saneamento.sp.gov.br/PMS/UGRHI10/PRS_UGRHI10.pdf) >. Acesso em: 02 jun. 2016.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE CERQUILHO – SAAEC. **Localização e Acessos do Município de Cerquilha**. 2016. Disponível em: < <http://www.saaec.com.br/cerquilha-3/localizacao-e-acessos/> >. Acesso em: 02 jun. 2016.

SILVA, P. R. **Transporte Marítimo de Petróleo e Derivados na Costa Brasileira: Estrutura e Implicações Ambientais**. 2004. 148 p. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p.125-127.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA- UDOP. **Precipitação Chuva – Municípios de São Paulo – Fonte ciagro**. Disponível em: <[http://www.udop.com.br/download/estatistica/economia\\_chuvas/1992a2017\\_historico\\_chuva\\_campinas.pdf](http://www.udop.com.br/download/estatistica/economia_chuvas/1992a2017_historico_chuva_campinas.pdf)>. Acesso em: 21 jan. 2017

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Microbial processes affecting monitored natural attenuation of contaminants in the subsurface**. Ada, 1999.

UMWELTBUNDESAMT. **Site Contamination**. 2014. Disponível em: <<http://www.umweltbundesamt.de/en/topics/soil-agriculture/site-contamination>>. Acesso em: 02 de jun. de 2016.

VAUDELET, P. et al. Mapping of contaminant plumes with geoelectrical methods: a case study in urban context. **Journal of Applied Geophysics**. [S.I.], 75, 738 – 751, 2011.

WILSON, S.C.; JONES, K.C. Bioremediation of soils contaminated with Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAHs): a review. **Environmental Pollution**. [S.I.], v. 81, n.3, p. 229-249, 1993.