

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAC
FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E
MEDICINA DO TRABALHO – FUNDACENTRO

Debora Silveira Carvalho

Gestão de áreas contaminadas: detecção e mapeamento pelo uso
de métodos geofísicos.

São Paulo
2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

DEBORA SILVEIRA CARVALHO

Gestão de áreas contaminadas: detecção e mapeamento pelo uso
de métodos geofísicos.

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Centro Universitário Senac –
Campus Santo Amaro / Fundacentro,
como exigência para obtenção do grau
de Mestre em Sistemas Integrados de
Gestão.

Orientador: Profa. Dra. Diana S.
Hamburger

**São Paulo
2006**

Carvalho, Debora Silveira

Gestão de áreas contaminadas: detecção e mapeamento pelo uso de métodos geofísicos. / Debora Silveira Carvalho – São Paulo, 2006.

79f.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro Universitário Senac – Campus Santo Amaro/Fundacentro, como exigência para obtenção do grau de Mestre em Sistemas Integrados de Gestão.

Orientador: Profa. Dra. Diana Sarita Hamburger.

1. Geofísica 2. Áreas contaminadas 3. Gestão ambiental

Aluna: Debora Silveira Carvalho

Título: Gestão de áreas contaminadas: detecção e mapeamento pelo uso de métodos geofísicos.

A banca examinadora da Dissertação de Mestrado em sessão pública realizada em 22 / 09 / 2006 considerou a candidata:

(x) aprovada

() reprovada

- 1) Examinadora
Joyce Bevilacqua da Silva
- 2) Examinadora
Paulina Setti Riedel
- 3) Examinador
Rodrigo Cunha
- 4) Presidente
Diana S. Hamburger

AGRADECIMENTOS

A meus avós

Aurora e Cys

Pelo modelo de vida e vivência.

Aos meus pais

Ana e Wladimir

Pelo suporte de três vidas.

A amiga

Heidi

Pelos momentos difíceis e, sobretudo os fáceis.

Ao querido

Pedro

Por toda compreensão, apoio, companheirismo e amor, e todos os ensinamentos.

A amiga e orientadora

Diana

Por tornar este trabalho mais colorido.

Ao líder

Maurício

Pelo exemplo de liderança e oportunidades de aprendizado.

Ao querido Tico
Dedico.
Exemplo e inspiração.

“Pensem que todas as maravilhas, objetos de seus estudos, são a obra de muitas gerações, uma obra coletiva que exige de todos um esforço entusiasta e um labor difícil e impreterível. Tudo isto, nas mãos de vocês, se torna uma herança. Vocês a recebem, respeitam-na, aumentam-na e, mais tarde, irão transmiti-la fielmente à sua descendência. Deste modo somos mortais imortais, porque criamos juntos obras que nos sobrevivem.”
(Albert Einstein)

RESUMO

Este trabalho pretende contribuir para a difusão da Geofísica como tecnologia aplicada na gestão de áreas contaminadas, por meio do mapeamento e detecção de tais áreas, uma vez que empresas passaram a se preocupar com questões de bem estar sócio-ambiental, contemplando o meio ambiente interno e as comunidades no entorno de seus limites. A necessidade do gestor em conhecer seu objeto de trabalho – as áreas contaminadas por atividades de seus processos produtivos – toma cada vez maior importância, assim como a necessidade de determinar ações corretivas. Para tanto, informações primárias são primordiais para tomadas de decisão no planejamento de plano de ação, visando melhor uso de tempo e recursos, para a intervenção em áreas degradadas. Através de pesquisa bibliográfica e a apresentação de um estudo de caso de uma área contaminada por hidrocarbonetos aromáticos – combustível tipo diesel – o presente trabalho discute como a Geofísica permite detectar e mapear áreas contaminadas, resultando em informações seguras e sistemáticas para o gestor, para a tomada de decisões para as etapas seguintes da gestão. O caso apresentado foi realizado com uso de dois métodos geofísicos *Ground Penetrating Radar* e Eletrorresistividade, tendo sido delimitadas anomalias nos sinais eletromagnéticos e elétricos, que permitiram determinar o alcance em profundidade e lateral de local potencialmente contaminado, resultando no direcionamento de sondagens de verificação direta, para validação das informações obtidas com uso da Geofísica. Para o gestor, esta informação é aplicada na tomada de decisões e definição das próximas etapas da gestão de áreas contaminadas. Alguns autores apresentam o uso desta tecnologia em aplicações ambientais, em diversos contextos – diferentes tipos litológicos, contaminantes e diversos métodos geofísicos aplicados. Porém, a Geofísica apresenta muitas facetas a serem exploradas nos diversos contextos de gestão ambiental.

Palavras-chave: Geofísica; Áreas contaminadas; Gestão ambiental.

ABSTRACT

The propelling power of organizational excellence has been causing many organizations to rethink their environmental management tools. This work intends to disseminate Geophysics as a technology for environmental management, through mapping and detecting contaminated sites. For the manager is really important to have safe and systematic information for the decision taking process, on every step of the environmental management, on looking for the excellence of the remediation process on damaged areas. With a bibliographical research and a case study of a site contaminated by aromatic hydrocarbons, the present work discuss how to use Geophysics as a technology for one step on environmental management. The case study was done with two geophysical methods – GPR – Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity. Electromagnetic and electrical anomalies were detected and delimited and that allowed the delimitation in depth of the contamination presence. That gave an indication of best spots for the direct knowledge of geophysical information. Some authors present the technology on environmental applications in different sites – geological variations, different types of contaminants and use of different geophysical methods. For the manager, the information can be used for decision taking and to develop an action plan for environmental management. But Geophysics has a large potential to be explored for other environmental management applications.

Keywords: Geophysics; Contaminated sites; Environmental management.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO HISTÓRICA	10
1.1 Objetivos	13
1.2 Justificativa	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Conceituação	16
2.1.1 Geofísica	16
2.2 Métodos e técnicas Geofísicas	19
2.3 Contaminantes	27
2.4 Aplicações de Geofísica em mapeamentos de áreas contaminadas	31
2.5 Limitações do uso da Geofísica no mapeamento de áreas contaminadas ...	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Apresentação de caso de aplicação	40
4 RESULTADOS OBTIDOS	48
4.1 GPR – Ground Penetrating Radar	48
4.2 ER – Eletrorresistividade.....	51
4.3 Integração de informações e próximos passos da investigação	54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
REFERÊNCIAS	58
APÊNDICE A	70
ANEXO A	73

1 INTRODUÇÃO HISTÓRICA

A mudança do modo de produção industrial para o pós-industrial é tratada por De Masi (1999) como a mudança da produção de bens materiais para a produção de serviços, da padronização para a customização, trabalho físico para o intelectual, quantidade para a qualidade e finalmente do consumismo para a qualidade de vida. De acordo com Epelbaum (2004), as citadas mudanças demandam novas formas de mensuração de custo-benefício que contemplem ganhos não econômicos, intangíveis e benefícios de longo prazo. Banerjee, Iyer, Kashyap (2003 apud Epelbaum, 2004, p. 28) apresentam quatro antecedentes importantes da gestão ambiental: preocupação pública, forças regulatórias, vantagem competitiva e comprometimento da alta administração.

“Até a década de 80 as organizações não tratavam com prioridade as questões relacionadas com o meio ambiente, priorizando algumas questões de saúde e segurança do trabalhador, e ainda essas limitavam-se a atender requisitos legais aplicáveis a seus empreendimentos”. (CHIUMMO, 2004, p. 1).

As análises das atividades profissionais desenvolvidas nesta dissertação mostraram que o tratamento das questões ambientais por gestores de empresas do ramo industrial, em diversas áreas de atuação de mercado, tem crescido cada vez mais, deixando de tratar somente de cumprimentos com requisitos legais ou normas de certificações, aprofundando-se às questões de bem estar sócio-ambiental, contemplando o meio ambiente interno e as comunidades no entorno de seus limites (COMPANHIA VALE DO RIO DOCE, 2004).

É cada vez maior a preocupação quanto à qualidade do solo e das águas subterrâneas, devido ao comprometimento da maioria dos rios, pelo lançamento de esgotos, efluentes industriais e outros poluentes, aliado à crescente demanda por parte da sociedade, a preservação dos recursos hídricos de subsuperfície torna-se extremamente importante não somente para utilização imediata deste

potencial, mas para que a qualidade e a quantidade se mantenham para uso das gerações futuras.

Em contrapartida, é necessário o desenvolvimento de novos métodos e técnicas para o diagnóstico de áreas previamente contaminadas, visto que uma vez estabelecido o problema, é necessário saná-lo da forma mais eficiente e com o menor custo possível. (MOREIRA, 2005b, p.1)

Somente no final do século XX o meio ambiente tornou-se um fator de preocupação do Homem, como parte de sua sobrevivência. Preocupações com o Meio Ambiente como meio de sobrevivência da vida humana são assuntos recentes nos diálogos humanos; no Brasil, a criação de um órgão consultivo e deliberativo quanto à política do meio ambiente ocorreu somente em agosto de 1981, com a criação da Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1990; BRASIL, 1981). A primeira legislação brasileira data de 23 de janeiro de 1986, pela Resolução CONAMA nº 001 (BRASIL, 1986).

O que é mau para o meio ambiente é mau também para a economia, ainda que a tradução dos danos ambientais em prejuízos econômicos possa não ser perceptível em curto prazo. Mais tarde ou mais cedo os custos ambientais serão infalivelmente cobrados em saúde pública, qualidade de vida, esgotamento de recursos naturais e desvalorização de bens materiais e imateriais. (LISBOA, 2002, p. 9).

A forma de uso dos recursos naturais representa mudanças para o homem, em cunho social, tecnológico, cultural, e até mesmo financeiras. A forma com a qual as indústrias atuam nos dias de hoje, não reflete a mentalidade que era observada na época da Revolução Industrial. (EPELBAUM, 2004).

Hoje no Brasil, através da demanda de investigações e mapeamentos de áreas contaminadas, o uso de métodos geofísicos vem tomando importância, tornando-se procedimento usual, indicados por órgãos ambientais (CETESB, 2001a).

Muitas já são as empresas que apresentam suas preocupações com o Meio Ambiente e o uso da Geofísica como tecnologia no mapeamento e

delimitação de suas áreas contaminadas. Como exemplo, a Petrobrás, desde 1998 emprega o uso da Geofísica, associada à Geoquímica Analítica, em estudos geo-ambientais em áreas onde causa impacto devido às suas atividades. Já foram mapeados mais de 150 hectares, com resultados de GPR e Eletrorresistividade, de alta qualidade e confiabilidade, resultados estes que subsidiam as fases subseqüentes: a avaliação de risco ambiental e projetos de remediação de áreas contaminadas. (SAUERBRONN, 2003).

A Geofísica é uma ferramenta pouco difundida, apesar dos avanços nas técnicas e equipamentos aplicados, de forma que é necessário e essencial que esta seja apresentada com a maior clareza possível, demonstrando suas capacidades e limitações, mesmo para aqueles que trabalham com o meio ambiente (SCHIANETZ 1999). A aplicação da Geofísica em mapeamentos ambientais apresenta poucos registros de uso e escassez de bibliografia sobre o tema. Por isso, há grande interesse em difundir a Geofísica como ciência da Terra e tecnologia para uso no mapeamento de áreas contaminadas. Desta forma pretendeu-se neste trabalho explorar a Geofísica como tecnologia na gestão ambiental de áreas contaminadas, em se tratando de uma tecnologia de comprovada eficácia na delimitação de áreas contaminadas.

As aplicações mais antigas de Geofísica datam de 1879, com a publicação de um trabalho de mapeamento de depósitos metálicos com uso de métodos magnéticos e posteriormente, com o desenvolvimento da computação na época da Segunda Guerra Mundial, os métodos geofísicos foram mais amplamente estudados e desenvolvidos. Alguns métodos foram criados por derivações de métodos utilizados para a localização de armas, submarinos e aviões; durante a Segunda Guerra Mundial, submarinos eram identificados pela análise da velocidade de propagação da onda na água, uma vez conhecidos o tempo de emissão e resposta desta onda, era possível calcular a profundidade em que se encontrava o submarino, dando origem ao método que hoje se denomina Sísmica. (TELFORD, 1990; VOGELSANG, 1995).

No Brasil, o uso de métodos geofísicos tem seus primeiros registros no ano de 1954, aplicada em trabalhos realizados pela Petrobrás e pelo Observatório

Nacional, no Rio de Janeiro, onde métodos sísmicos eram utilizados para a prospecção de petróleo (SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 2006).

1.1 Objetivos

Contribuir para a difusão do uso da Geofísica como tecnologia de gestão de áreas contaminadas. Isto foi apresentado nesta dissertação através do mapeamento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos, discutindo a tecnologia, seu funcionamento e fundamentos teóricos, algumas de suas aplicações (com caráter ilustrativo) e um exemplo de caso prático, desenvolvido profissionalmente.

1.2 Justificativa

A Geofísica é uma tecnologia bastante útil na detecção, mapeamento e delimitação de áreas onde ocorre a presença de substâncias contaminantes, pois estas modificam as propriedades físicas do meio a ser investigado. Uma vez determinado o método geofísico que se aplica às características físicas – de acordo com as propriedades físicas do meio e das substâncias nele presentes – torna-se possível mapear áreas de grandes dimensões e determinar pontos localizados onde haja necessidade de investigação direta, e assim otimizar recursos e tempo, para verificar a presença ou ausência de contaminação.

Este uso é pouco difundido. Por esta razão este trabalho pretendeu explorar este potencial, baseado no conhecimento sobre áreas contaminadas e Geofísica, demonstrando a forma como este processo se dá através de um estudo de caso.

A gestão ambiental é estudada por tratar-se da preocupação de dirigentes de corporações interessados em manter seus espaços nos mercados, a preocupação com o consumo consciente, o desenvolvimento sustentável e a responsabilidade sócio-ambiental e assim se faz necessário conhecer as ferramentas de gestão. Foi discutido no presente trabalho a aplicação da Geofísica como tecnologia de suporte à gestão ambiental das empresas através

da utilização de conhecimentos técnico-científicos no dimensionamento e na análise ambiental das áreas contaminadas, viabilizando a proposição de soluções adequadas à condição de cada área estudada (EPELBAUM, 2004).

Este trabalho pretendeu, além de difundir o uso da Geofísica como uma etapa do processo de gestão de áreas contaminadas, demonstrar sua aplicabilidade e funcionamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a realização desta dissertação de Mestrado, a primeira atividade consistiu no planejamento e definição do objeto a ser estudado. Definido este, foram traçados o objetivo desenvolvido e a metodologia utilizada.

Para o desenvolvimento do trabalho, foi necessário embasamento teórico e fundamentação em trabalhos de outros autores, bem como a compreensão dos métodos aplicados.

A discussão presente nesta dissertação partiu dos seguintes temas: gestão ambiental, definições e ferramentas de gestão, definições de áreas contaminadas, métodos e técnicas Geofísicas, aplicações gerais da Geofísica, aplicações específicas da Geofísica para o meio ambiente, aplicações da Geofísica no mapeamento de áreas contaminadas, tipos de contaminantes e suas características em contextos geológicos. Acredita-se que estes temas abarcam a forma como a gestão de áreas contaminadas pode ser beneficiada com o uso da Geofísica, bem como suas aplicações e suas limitações em diferentes contextos geológicos, buscando embasar com esta pesquisa bibliográfica os argumentos que sustentam as informações práticas do caso estudado. Alguns temas apresentam ampla bibliografia, com artigos aplicáveis aos mais diversos meios, porém, outros são de bibliografia escassa, reflexo de pouco desenvolvimento de estudos sobre o assunto.

Encontram-se na literatura diversos trabalhos de aplicações de métodos geofísicos em mapeamentos de áreas contaminadas, sob aspectos controlados, em geral em trabalhos acadêmicos (BREWSTER, 1994; FILHO, 2003; PETTERSSON, 2003; DOURADO, 2004; PORSANI, 2004; RODRIGUES, 2004; DECEUSTER, 2005; WERKEMA, 2006). Em sua maioria, os casos estudados na literatura possuem parâmetros conhecidos e determinados, tais como as quantidades e tipos de contaminantes e suas características físico-químicas. Onde são conhecidos os parâmetros antes e depois da contaminação – experimentos realizados em condições ideais, em geral em sítios controlados – são previamente conhecidas as interferências nos meios geológicos no qual estão inseridos e todas as variáveis que alteram as propriedades físicas do meio, onde o resultado pode ser previamente estabelecido e confirmado ou não pela aplicação dos métodos geofísicos, avaliando o potencial das técnicas utilizadas.

No entanto, em se tratando de aplicações da Geofísica para mapeamentos sob aspectos dinâmicos, em situações onde o histórico da área, tipo e quantidades de contaminantes, geologia local e outros fatores que alteram as propriedades físicas do meio, estes parâmetros não são controlados. “Geralmente, os casos estudados na literatura são provenientes de experimentos controlados (...) A realidade na maioria dos casos é muito diferente das condições idealizadas que geralmente se apresentam nas pesquisas.” (DEHAINI, 2004, p.1).

Na gestão de áreas contaminadas é essencial que existam informações seguras que sustentem as decisões, pois, para traçar um plano de ação, há a necessidade de se delimitar o problema, e assim planejar as etapas posteriores; em se tratando de áreas contaminadas

Com o objetivo de otimizar recursos técnicos e econômicos, a metodologia utilizada no gerenciamento de áreas contaminadas baseia-se em uma estratégia constituída por etapas seqüenciais, em que a informação obtida em cada etapa é a base para a execução da etapa posterior. (CETESB, 2001a, cap. 110, p.1).

O processo de identificação de áreas contaminadas, ainda segundo CETESB (2001a), inclui etapas de definição da região de interesse, identificação

de potenciais contaminações, avaliação preliminar e por fim a investigação confirmatória. O ato de avaliar, muitas vezes é entendido como sinônimo de ‘analisar’; pressupõe a existência de um objeto a ser mensurado, segundo alguns padrões pré-determinados (MACEDO, 2000). O uso da Geofísica se dá na última etapa da identificação destas áreas: investigação confirmatória, como um método indireto de investigação. Seu produto consiste na sugestão de pontos para sondagens de investigação direta, que compõem as etapas posteriores à investigação Geofísica.

Alguns métodos de Geofísica podem ser aplicados no mapeamento de áreas contaminadas. Cada contexto geológico apresenta diferente resposta aos sinais geofísicos emitidos, uma vez que as características físicas de cada meio geológico podem variar em função de inúmeros fatores como porosidade do solo, quantidade de água nos poros, sais dissolvidos na água, propriedades elásticas, dentre outras (BRAGA, 1999).

2.1 Conceituação

A seguir, são apresentados os conceitos e definições de Geofísica, áreas contaminadas e gestão, adotados no presente trabalho.

2.1.1 Geofísica

Para este estudo, houve necessidade de conceituar os temas estudados e apresentados, conceitos que podem apresentar definições diversas, de acordo com o contexto estudado.

Segundo a SBGf, Sociedade Brasileira de Geofísica

Geofísica é o estudo da Terra usando medidas físicas tomadas na sua superfície. [...] A Geofísica, [...], envolve o estudo daquelas partes profundas da Terra que não podemos ver através de observações diretas, medindo suas propriedades físicas com instrumentos sofisticados e apropriados, geralmente colocados na superfície. Também inclui a interpretação dessas medidas para se obter informações úteis

sobre a estrutura e sobre a composição daquelas zonas inacessíveis de grandes profundidades. (SBGf, 2006).

Segundo Sheriff (1991), Geofísica é o estudo da Terra através de métodos físicos quantitativos, especialmente Sísmica de reflexão e refração, Gravimetria, Métodos Elétricos, Eletromagnéticos e Radioativos; a aplicação de princípios físicos a estudos da Terra, incluindo os mais comumente encontrados em outras ciências (ondas mecânicas, elétricas e eletromagnéticas, campos potenciais e radiométricos); a Geofísica pode referir-se à exploração, ao aplicar seus métodos com objetivo de exploração econômica.

Greenhouse (1998, p. 1) define que a Geofísica é a aplicação dos princípios físicos ao estudo da Terra, envolvendo a interpretação de campos, como o magnético e gravitacional, que são influenciados pelas estruturas geológicas, resultando em mapas de distribuição espacial ou temporal de algumas destas citadas propriedades físicas. Ainda em sua definição o autor demonstra que “[...] a Geofísica não responde às questões por si só, mas é o guia para a primeira etapa de uma investigação de subsuperfície”.

Bem como Sheriff e Greenhouse, Allaby (1991) define que a Geofísica é uma ciência encarregada de todos os aspectos das propriedades físicas e processos da Terra, e demais corpos planetários e suas interpretações.

No entanto, Reynolds (1997, p. 1), define a Geofísica como “a aplicação da Física às investigações da Terra, Lua e planetas.” O autor destaca em sua definição que para se evitar confusões, o uso da Física para o estudo das camadas interiores do planeta, desde a superfície até seu núcleo, é denominada Geofísica da Terra Sólida e há ainda a Geofísica Aplicada, aquela que se aplica às investigações de superfície e subsuperfície, com objetivos práticos, e mais freqüentemente, interesses econômicos.

Ainda segundo Reynolds (1997, p. 2), a Geofísica aplicada engloba desde estudos para determinação de espessuras de crosta, importantes para exploração de hidrocarbonetos, até estudo de estruturas rasas, para aplicações em

Engenharia Civil, prospecção de água subterrânea, mineração, dentre outras aplicações de interesses econômicos, até mesmo delimitação de cavas, objetos arqueológicos, ou localização de tubulações, cabos, dentre outros, com investigações em profundidades inferiores a 100,0 m.

Sheriff (1991 apud REYNOLDS, 1997, p. 2) define Geofísica aplicada como “realizar e interpretar medições das propriedades físicas da Terra, para determinar condições em subsuperfície, usualmente com objetivos econômicos tais como busca de depósitos de óleo combustível ou minerais”.

A definição de Greenhouse (1998) será adotada como a definição de Geofísica, pois é esta a que apresenta os conceitos mais importantes tratados nesta dissertação; esta definição trata dos princípios físicos, a interpretação, influências das estruturas geológicas, mapas de distribuição, e por fim determina que a Geofísica não é uma tecnologia encerrada em si, mas dependente de outras.

2.1.2 Áreas contaminadas

Em se tratando de gestão de áreas contaminadas, segundo a CETESB (2001a) uma área é contaminada somente se um local ou terreno possui comprovadamente poluição ou contaminação, gerada pela introdução de elementos não originários daquela área, que podem alojar-se em todos os meios constituintes desta área – solos, água, sedimentos, estruturas e demais materiais. Contendo poluição ou contaminação, é considerada contaminada qualquer área que apresenta concentração, intensidade ou quantidade de poluente em desacordo com as estabelecidas segundo legislação.

2.1.3 Gestão

Gestão define-se pelo ato de gerir, tornar-se responsável; representa um conjunto de procedimentos ou atos determinados. Em se tratando de áreas contaminadas, gestão é definida como as medidas tomadas com o intuito de minimizar riscos à população e ao meio ambiente. Incluindo-se tomadas de decisões quanto às formas de intervenção mais adequadas. (CETESB, 2001a).

2.2 Métodos e técnicas Geofísicas

Segundo Ferreira (2001), método define-se como um procedimento organizado, modo de agir, modo de proceder, que conduz a determinado resultado; regularidade e coerência na ação. Complementando esta definição, Houaiss (2005) define que método é um processo organizado, lógico e sistemático de pesquisa, instrução, investigação, apresentação etc.; qualquer procedimento técnico, científico. Ainda o mesmo autor define metodologia como o ramo da lógica que se ocupa dos métodos das diferentes ciências ou parte de uma ciência que estuda os métodos aos quais ela própria recorre.

Ferreira (Op. cit. p. 664) define técnica como “o conjunto de processos duma arte ou ciência”.

A Tabela 1 apresenta os métodos geofísicos existentes, classificados de acordo com a abrangência de sua aplicabilidade – não somente em mapeamentos ambientais, mas em aplicações para diversas finalidades, com a descrição de cada uma de suas respectivas técnicas, a propriedade física associada a cada uma destas técnicas e suas principais aplicações. Estas aplicações têm escalas variando de continentais – estudos geológicos regionais, depósitos minerais, contatos geológicos e falhamentos – a escalas locais – Engenharia Civil, Arqueologia, parâmetros hidráulicos, dentre outros.

Nota-se que na literatura sempre são aplicados mais de um método geofísico, a fim de garantir o estudo de diferentes características do meio; Parry (1996) demonstra a integração de quatro diferentes métodos geofísicos (GPR, Eletromagnético, Eletrorresistividade e Sísmica de Refração), comparando seus resultados no mapeamento de porções rasas da sub-superfície. Com esta investigação, o autor verifica que alguns fatores são limitantes para a aplicação de determinados métodos em locais com determinadas características (como exemplo, o GPR não obteve sucesso em solo muito argiloso), porém foi produzida uma imagem do substrato, com a integração de todos os métodos aplicados.

Tabela 1 – Métodos e técnicas Geofísicas (SHARMA, 1997; TELFORD, 1990; VOGELSANG, 1995)

MÉTODO	TÉCNICAS	PROPRIEDADE FÍSICA	PRINCIPAIS APLICAÇÕES
EM – Eletromagnético	1. LIN – <i>low induction numbers</i> 2. Indutivo	<ul style="list-style-type: none"> • Condutividade elétrica • Indutância 	Meio Ambiente – Mapeamento de plumas de contaminação Hidrogeologia – Água subterrânea Exploração mineral – Depósitos minerais Engenharia Civil – Mapeamento de estruturas e interferências Arqueologia
Eletrorresistividade	1. CE – Caminhamento elétrico 2. SEV – Sondagem elétrica vertical 3. PERF – Perfilagem	<ul style="list-style-type: none"> • Resistividade elétrica • Cargabilidade 	Meio Ambiente – Mapeamento de plumas de contaminação Hidrogeologia – Água subterrânea/Profundidade do Nível d'água /Estimativa de parâmetros hidráulicos/Estimativa de porosidade da rocha Estratigrafia – Mapeamento de topo rochoso Estudos geológicos regionais – Falhamentos e fraturamentos Exploração mineral – Depósitos minerais
Sísmica de reflexão e Refração	1. CMP – <i>Common Mid-Point</i> 2. CDP – <i>Common Depth Point</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Densidade • Elasticidade 	Petróleo Estudos geológicos regionais Engenharia Civil – Mapeamento de estruturas Estratigrafia – Mapeamento de topo rochoso/Falhamentos e fraturamentos Estudos geológicos regionais – Falhamentos e fraturamentos Hidrogeologia – Profundidade do Nível d'água
GPR – <i>Ground Penetrating Radar</i>	1. CMP – <i>Common Mid-Point</i> 2. WARR – <i>Wide Angle Reflection and Refraction</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Condutividade elétrica • Permissividade dielétrica 	Meio Ambiente – Mapeamento de plumas de contaminação Engenharia Civil – Mapeamento de estruturas e interferências Estratigrafia – Mapeamento de variações litológicas Exploração mineral – Depósitos minerais Arqueologia
Potenciais	1. Magnetometria 2. Gravimetria	<ul style="list-style-type: none"> • Susceptibilidade magnética • Densidade 	Petróleo Estudos geológicos regionais – Falhamentos e fraturamentos/ Contatos geológicos/Diques/Derrames basálticos Exploração mineral – Depósitos minerais Gradiente geotérmico Arqueologia
Radiometria	1. Cintilometria 2. Espectrometria Gama	<ul style="list-style-type: none"> • Radioatividade 	Estudos geológicos locais – Falhamentos e fraturamentos Arqueologia

É apresentado, a seguir, o embasamento teórico dos métodos geofísicos GPR – *Ground Penetrating Radar* e Eletrorresistividade pois, foram estes aplicados no estudo de caso.

2.2.1 O método GPR – *Ground Penetrating Radar*

O GPR é um método de investigação Geofísica que se baseia na propagação e reflexão de ondas eletromagnéticas.

Um sistema de GPR consiste em quatro módulos:

- Antena transmissora
- Antena receptora
- Unidade de controle
- Unidade de armazenamento e apresentação do dado.

Um pulso – onda – de energia eletromagnética é irradiado para o interior do solo pela antena transmissora. Parte da energia desta onda é refletida de volta para a antena receptora sendo amplificada, digitalizada e registrada em um meio magnético digital para processamento e armazenamento dos dados, como mostra de forma esquemática a Figura 1:

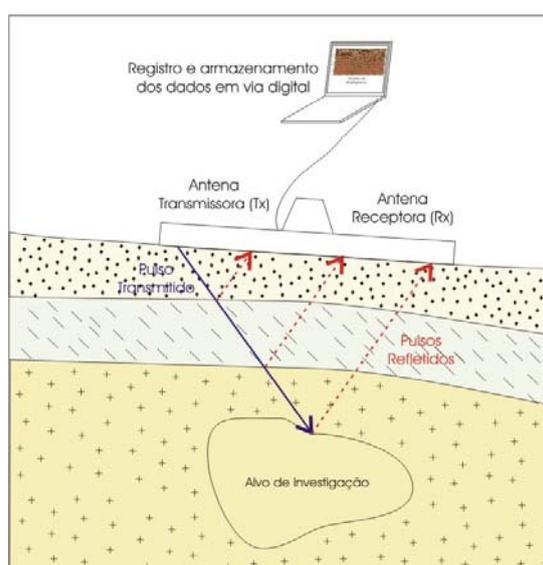


Figura 1 – O método GPR (Adaptado de DAVIS, 1989).

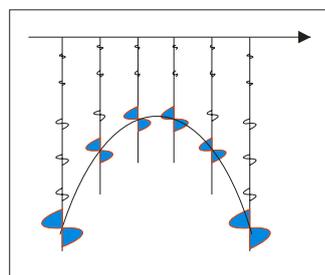
As variações nas propriedades eletromagnéticas – condutividade elétrica e indutância – do meio, em geral, estão associadas às mudanças de litologia,

conteúdo de água, sais minerais dissolvidos, quantidade de poros, dentre outros fatores.

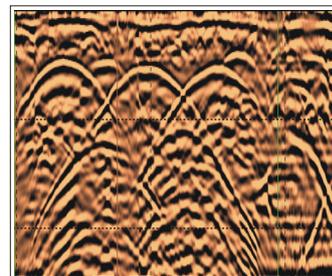
O método possui a vantagem de proporcionar dados com alta resolução porém, é sensível a meios onde a condutividade elétrica seja muito elevada (tais como tipos litológicos compostos por argilas), o que causa forte atenuação do sinal e, desta forma, limita a profundidade de penetração da onda eletromagnética emitida. Meios mais argilosos, onde existam contaminantes (inorgânicos ou orgânicos em processo de biodegradação avançado), podem gerar atenuação do sinal, pela elevação de sua condutividade, gerando ‘zonas de sombra’ nos radargramas – perfil horizontal da interpolação dos dados eletromagnéticos (SAUCK, 1998; WERKEMA, 2000).

O método GPR possibilita o mapeamento das interferências existentes no subsolo de maneira rápida, eficiente e economicamente viável.

Nos radargramas, as interferências – tubulações, rochas, tambores, dentre outros corpos, denominados refletores – aparecem em forma de hipérboles – Figura 2. Estas hipérboles possuem maior ou menor intensidade de sinal, de acordo com o material que constitui o corpo mapeado (como exemplo, tubulações metálicas ou de PVC apresentam hipérboles com diferentes intensidades e tamanhos).



(a) hipérbole gerada



(b) visualização em radargrama

Figura 2 – Esquema que apresenta a geração e visualização de um objeto enterrado, radargrama (Modificado de MANACORDA, 2002).

Em geral, os sinais referentes às tubulações devem apresentar-se numa seqüência de seções de radar – radargramas. Já o sinal refletido por objetos isolados deve apresentar hipérboles sem continuidade.

2.2.2 O método ER – Eletrorresistividade

A Eletrorresistividade é um método de investigação Geofísica que se baseia na emissão e detecção de correntes elétricas no solo, através de diferentes arranjos de eletrodos colocados em pequenas profundidades no solo – até cerca de 0,5 m – resultando em variações de profundidades investigadas de acordo com o arranjo de eletrodos aplicado.

Este método geofísico apresenta três diferentes técnicas, tal como citado na Tabela 2: o caminhamento elétrico (CE), a sondagem elétrica vertical (SEV) e a perfilagem (PERF). Destas três, somente duas serão discutidas a seguir, pois no caso da aplicação apresentada nesta dissertação somente dois foram aplicados, de acordo com a necessidade e tipo de parâmetros investigados no caso. A Perfilagem é mais raramente aplicada devido à suas restrições de aplicação em poços pré-existentes.

2.2.2.1 Caminhamento elétrico

Existem quatro fatores que alteram a condutividade elétrica dos tipos litológicos:

- Quantidade de água nos poros
- Quantidade de sais dissolvidos na água que preenche os poros
- Porosidade dos materiais
- Minerais formadores do material

São considerados eletricamente condutivos – que conduzem eletricidade facilmente – os seguintes tipos litológicos: argila, argila saturada, areia saturada, metais, material orgânico, produtos de biodegradação e fraturas preenchidas. Em contrapartida, são considerados tipos litológicos e materiais eletricamente resistivos – que não conduzem eletricidade: areia seca, arenito, plásticos, madeiras, rocha sã. (BRAGA, 1999).

A técnica do caminhamento elétrico baseia-se na análise de um parâmetro físico, com valores obtidos em superfície, investigando, ao longo de uma seção, sua variação lateral a uma ou mais profundidades determinadas (Figura 3).

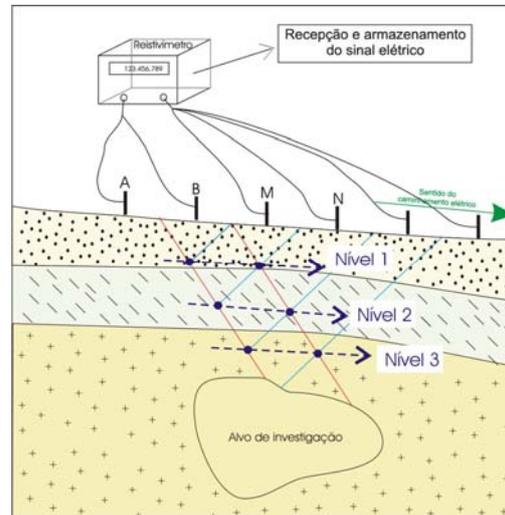


Figura 3 – Esquema de campo da técnica de caminhamento elétrico (Adaptado de BRAGA, 1999).

Existem várias modalidades de arranjos de campo no desenvolvimento desta técnica. São eles: pólo-pólo, pólo-dipolo e dipolo-dipolo. Estes arranjos de campo variam em sua forma de espaçamento entre os eletrodos. O tipo mais comumente aplicado é o arranjo dipolo-dipolo – detalhado a seguir.

O arranjo dipolo-dipolo é amplamente utilizado devido à sua facilidade e rapidez de aplicação em campo, e a maior precisão nos dados se comparados à outros arranjos; sua vantagem deve-se ao fato de que o estudo da variação lateral do parâmetro físico pode ser efetuado em vários níveis de profundidades obtendo-se uma caracterização dos materiais, em subsuperfície, tanto horizontal quanto verticalmente (BRAGA, 1999). O arranjo dipolo-dipolo é muito utilizado em estudos ambientais para a caracterização lateral e em profundidade da pluma de contaminação.

As principais características do arranjo dipolo-dipolo são:

- Espaçamento entre os eletrodos AB e MN são iguais

- Os centros dos dipolos AB e MN não permanecem fixos se deslocando ao longo da linha a ser investigada

A Figura 4 ilustra a disposição de um arranjo dipolo-dipolo ao longo de uma linha a ser estudada.

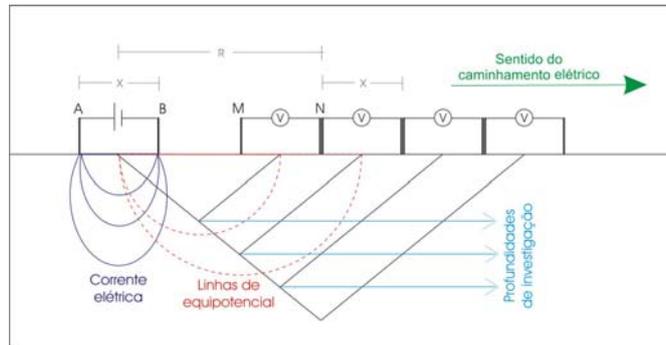


Figura 4 – Disposição no campo do arranjo dipolo-dipolo – CE. (Adaptado de BRAGA,1999).

O parâmetro físico utilizado nesta técnica é a resistividade aparente, sendo esta obtida a partir da equação (Adaptado de BRAGA, 1999 e TELFORD, 1990):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

onde,

$$K = 2.\pi.G.x \quad (2)$$

Sendo:

$$G = \frac{I}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \quad (3)$$

desenvolvendo esta equação temos:

$$K = \pi.n.(n+1).(n+2).I.x \quad (4)$$

Onde:

ρ_a - é a resistividade aparente do solo (ohm.m)

K – é o fator geométrico que depende do espaçamento entre os eletrodos (AB e MN)

ΔV – é a diferença de potencial entre os eletrodos MN (mV)

I – é a corrente injetada pelos eletrodos AB (mA)

n – é o nível de investigação em profundidade

x – é a distância entre os eletrodos em cada par (m).

Com os valores dos parâmetros físicos obtidos em um perfil levantado, tem-se a seção de resistividade aparente conforme ilustrado na Figura 5.

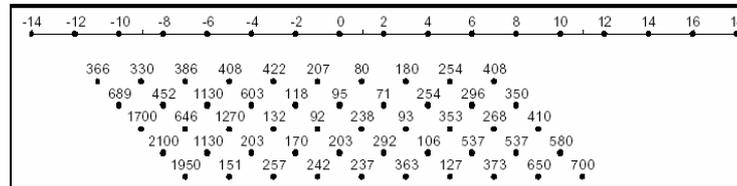


Figura 5 – Aquisição de dados em profundidade, com o arranjo Dipolo-Dipolo (Adaptado de BRAGA,1999).

2.2.2.2 Sondagem elétrica vertical (SEV)

A técnica da sondagem elétrica vertical (SEV) baseia-se na análise de um parâmetro físico, com valores obtidos em superfície, investigando, ao longo de uma seção, sua variação vertical em profundidade (Figura 6).

Existem dois arranjos de campo para esta técnica: Schlumberger e Wenner. Estes diferem essencialmente pela forma de posicionar os eletrodos de recepção de corrente elétrica injetada no meio. O arranjo utilizado no estudo de caso apresentado foi o Schlumberger, uma vez que este é menos susceptível a interferências de ruídos externos, tais como correntes geradas por cabos e estações de alta tensão (BRAGA, 1999).

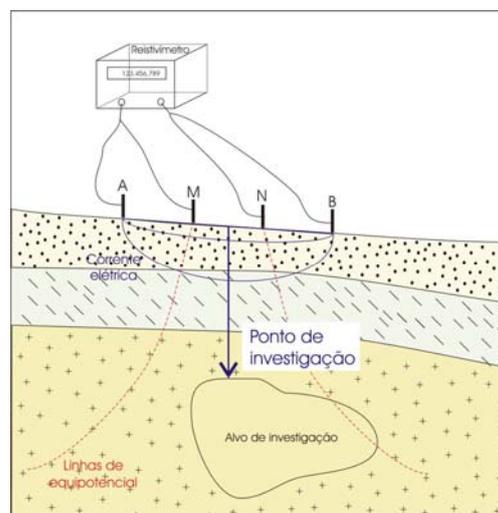


Figura 6 – Esquema de campo da técnica de SEV. (Adaptado de BRAGA, 1999).

Os valores de resistividade aparente obtidos são plotados em relação aos valores da distância $AB/2$, fornecendo a curva de resistividade aparente, a qual é passível de interpretação quantitativa por meio do uso de softwares apropriados. O processo consiste em interpretar as sondagens levando em consideração um modelo geoeletrico isotrópico e homogêneo, onde a resistividade varia somente com a profundidade. A interpretação pode ser feita usando-se os métodos comparativos, direto e inverso – pela comparação com modelos pré estabelecidos segundo parâmetros conhecidos.

2.3 Contaminantes

Algumas substâncias estão naturalmente presentes em alguns tipos de solos e ausentes em solos com diferentes características. Segundo a CETESB (2001b), são consideradas as naturalmente ausentes do solo aquelas substâncias que são geradas antropogênicamente em processos industriais. Em contrapartida, são consideradas autóctones as substâncias que “ocorrem naturalmente no solo”. Em função destas substâncias, são estabelecidos valores de referência de qualidade.

A Tabela 2 apresenta, de maneira resumida, os contaminantes orgânicos, agrupados por tipos (halogenados, hidrocarbonetos aromáticos e compostos fenólicos) e classificados segundo sua solubilidade em água, sendo citados exemplos para cada um de seus tipos e quais os usos e aplicações que podem gerar contaminação por estes elementos. Não são tratados nesta dissertação os contaminantes inorgânicos (metais), uma vez que somente os contaminantes orgânicos são transportados em fase móvel – deixando a fase sólida e migrando pelos poros de rochas e solos, e pelo ar, após sua volatilização. (Adaptado de CETESB, 2001a; CETESB, 2001b).

Conforme citado anteriormente, algumas características modificam as propriedades físicas da Terra; dentre elas, para o mapeamento de área

Tabela 2 – Exemplos de contaminantes, seus usos e meios de contaminação (Adaptado de CETESB, 2001a; CETESB, 2001b)

TIPO	CONTAMI – NANTE	EXEMPLO	USOS E TIPO DE CONTAMINAÇÃO	SOLUBILIDADE EM ÁGUA (mg/L)
ORGÂNICOS	HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS (BTEX)	Benzeno	Encontrado no petróleo numa concentração de 4g/L. Sua emissão ocorre durante a produção de derivados de petróleo, ou durante seu uso como componente da gasolina ou solvente industrial. Os PAH – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos – são três ou mais ciclos condensados de benzeno. Abrangem cerca de 40 (quarenta) ligações nocivas ao Homem e ao Meio Ambiente. São formados na carbonização ou combustão incompleta de material orgânico. São muito solúveis em água e de baixa volatilidade, apresentando baixa mobilidade em solo e águas subterrâneas.	1,8E+03
		Tolueno	Solvente e componente da gasolina. Encontra-se no solo adsorvido a minerais de argila – bentonita e caolinita. É encontrado nas zonas urbanas devido a emissões por indústrias e veículos.	5,2E+02
		Estireno	A maior fonte de contaminação por este contaminante são indústrias petroquímicas, gerado por emissão durante a produção, vazamentos de tanques de armazenamento, água residuária e resíduos sólidos. Encontrado ainda nas emissões de veículos.	3,0E+02
		Clorobenzenos	Compostos aromáticos, formados pela adição de 1 a 6 cloros (Cl) ao anel de benzeno. São usados principalmente como intermediários na síntese de pesticidas.	4,9E+01 (Diclorobenzeno)
		Hexaclorobenzeno (HCB)	Formado pela cloração do benzeno, em temperaturas entre 150 e 200°C, tendo cloreto férrico como catalisador. Gerado também como resíduo da síntese de solventes clorados. Usado em fogos de sinalização, produção de alumínio, conservante da madeira e produção de pneus, ou fungicidas no tratamento de sementes.	1,1E-01
		Bifenilas PoliCicloradas	Conhecidos também como PCB's, ou hidrocarbonetos aromáticos clorados, sendo sempre uma mistura de diferentes congêneros. Podem ser formados até 209 diferentes congêneros de PCB's. Com a cloração, o ponto de ebulição e densidade tornam-se mais altos, ao passo que solubilidade em água e degradação biológica diminuem. Em geral, os hidrocarbonetos clorados são incolores e fluidos, de baixa tensão superficial. Os valores de solubilidade em água de cada um desses congêneros é sempre baixo. As misturas comerciais são de coloração amarela, ou resinas sólidas, resistentes ao fogo, e com alto ponto de fulgor. Tem condutividade elétrica muito baixa e são bastante estáveis quimicamente sob condições normais de pressão e temperatura. No ambiente, são resistentes às reações de degradação química.	Variam para cada congênero, porém são todos extremamente baixos.

Tabela 2 (Cont.) – Exemplos de contaminantes, seus usos e meios de contaminação (Adaptado de CETESB, 2001a; CETESB, 2001b).

TIPO	CONTAMI – NANTE	EXEMPLO	USOS E TIPO DE CONTAMINAÇÃO	SOLUBILIDADE EM ÁGUA (mg/L)
ORGÂNICOS	SOLVENTES HALOGENADOS	Clorofórmio	Utilizados em pesticidas ou como solvente, em alguns cosméticos e como anestésico. É intermediário na produção de refrigerantes e plásticos.	7,5E10+3 a 9,3 E10+3
		Tetracloroetileno	Usado como solvente em limpeza a seco e limpeza de metais. Tem uso veterinário, na produção de fluorcarbonetos e na indústria têxtil.	1,5E+02
		Tricloroetileno	Desengraxante para metais, limpezas têxteis e solventes em processos de extração. Grande parte de sua produção anual é liberada no ambiente (entre 60 e 90%).	1,1E+03
	COMPOSTOS FENÓLICOS	Clorofenóis	Existem dezenove congêneros dos Clorofenóis, compostos a partir do cloro (Cl), pela substituição no anel do fenol, por um ou mais cloros. São altamente tóxicos a muitos organismos, utilizados na produção de pesticidas, como conservantes de madeira, e como aditivo inibidor de crescimento microbial em diversos produtos, além de alguns de seus congêneros serem gerados na incineração de lixo doméstico e processos de clarificação de celulose e papel. São pouco solúveis em água, porém este fator aumenta proporcionalmente ao aumento do pH (ambientes alcalinos). São altamente móveis. Por possuir métodos simples de tratamentos, as quantidades de resíduos contendo clorofenóis são baixas. Microorganismos são capazes de degradar 90% de clorofenóis, em tratamentos secundários.	1,2 E+03 (Triclorofenol) 1,4E+01 (Pentaclorofenol)

contaminadas pelo uso da Geofísica, a presença de contaminantes nos poros das rochas pode mudar propriedades elétricas e eletromagnéticas das formações geológicas. Uma pluma proveniente de substâncias contaminantes pode ocorrer em duas regiões distintas em subsuperfície: a primeira, na porção localizada na zona vadosa; e a segunda, abaixo do nível d'água, denominada zona saturada. Na zona vadosa, a pluma de compostos orgânicos poderá estar presente sob as fases livre e residual – adsorvida na matriz – com os solos e sedimentos impregnados por contaminantes em fase líquida – em especial os hidrocarbonetos – e sob a fase vapor, que é constituída por voláteis, presente tanto nos arredores quanto acima da fase livre. Na camada saturada a pluma poderá estar presente sob as formas de fase adsorvida na matriz do solo e dissolvida.

Quando um produto se encontra sob a forma de fase livre ou residual na zona vadosa, há a tendência de se obter valores elevados de resistividade associados à ausência de condutividade elétrica do meio. À medida que os processos de degradação química (oxidação/redução) ou biológica atuam sobre este produto, tanto na zona não saturada como na saturada, haverá a produção de substâncias com propriedades condutivas, modificando as características dos sinais de atenuação detectados pelos métodos geofísicos, em particular do GPR (SAUCK, 1999).

2.3.1 LNAPL – *light non aqueous phase liquids*

Os contaminantes do tipo LNAPL são aqueles não miscíveis e com densidade menor que a água (<1g/ml). Seu comportamento em contato com o subsolo é determinado por suas características físico-químicas e sua interação com o meio ambiente. Os LNAPLs migram verticalmente através da zona vadosa – também denominada franja capilar – (porção do aquífero situada acima do lençol freático), sob influência da força gravitacional (SILVA, 2002).

Conforme se observa na Figura 7, na zona não saturada os contaminantes deste tipo podem encontrar-se sob a forma livre e residual; na zona saturada, o produto encontra-se em fase dissolvida.

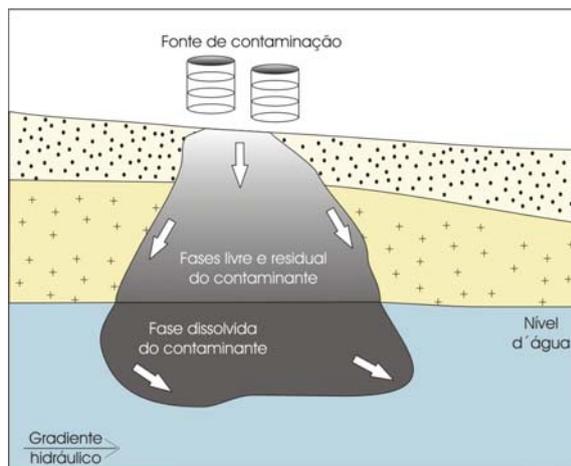


Figura 7 – Esquema da dispersão de contaminantes tipo LNAPL.
(Adaptado de CASSIDY, 2006).

Na fase livre, o produto deposita-se nos poros das camadas geológicas, mantendo-se sobrenadante à franja capilar, podendo ser adsorvida pelas partículas do solo, interrompida por camadas impermeáveis ou menos porosas, ou ainda pode atingir o nível freático. Na zona saturada, por encontrar-se em fase dissolvida, o contaminante em fase livre segue na direção e velocidade do fluxo d'água.

Na fase residual (também denominada fase adsorvida ou retida), o contaminante se encontra retido na superfície dos grãos ou interstícios do corpo geológico, tendo sido gerado por processos de adsorção química, absorção e ligações fracas, podendo ser encontrado na zona não saturada e saturada.

Na fase dissolvida, o contaminante encontra-se solubilizado nas zonas saturada e não saturada, representando o contaminante em seu estado líquido em contato com a água subterrânea.

Na fase vapor, o contaminante encontra-se volatilizado a partir da fase livre e dissolvida, e o vapor aloja-se e é retido nos poros das camadas geológicas.

2.4 Aplicações de Geofísica em mapeamentos de áreas contaminadas

A Geofísica apresenta resultados em mapeamentos de áreas contaminadas, uma vez que as substâncias contaminantes modificam as características físicas do meio estudado.

Diversos artigos recentes apresentam o uso da Geofísica no mapeamento de áreas contaminadas. Os trabalhos apresentam aplicações em áreas industriais e urbanas, muitos deles sob condições controladas, conforme citado na revisão bibliográfica desta dissertação (BREWSTER, 1994; FILHO, 2003; PETTERSSON, 2003; DOURADO, 2004; PORSANI, 2004; RODRIGUES, 2004; DECEUSTER, 2005; WERKEMA, 2006). Serão apresentados a seguir casos no Brasil e em todo o mundo, de aplicações da Geofísica no mapeamento de áreas contaminadas, classificadas cronologicamente: (AQUINO, 2001; MORAES, 2001; CASTRO, 2003; GANDOLFO, 2003; ELIS, 2003; MOREIRA, 2003a; HEITZMANN, 2003; SANSONOWSKI, 2003; DEHAINI, 2004; DOURADO, 2004; PALMA, 2004; PEDROSA, 2004; CARNEVALE, 2005; DECEUSTER, 2005; DECEUSTER, 2006; SHEVNIN, 2005; CARVALHO, 2006; PUJARI, 2006).

Aquino (2001) apresenta a aplicação de GPR associado a outras técnicas em situação onde ocorreu atenuação do sinal, em áreas contaminadas no município de Araras – SP, onde o solo estava contaminado por resíduos industriais por solventes halogenados – organoclorados – e sais no solo, formado por sedimentos argilosos e siltosos. O uso de métodos geofísicos forneceu informações de posicionamento da pluma de contaminação, bem como permitiu delimitar o sentido preferencial de propagação dos contaminantes dissolvidos.

No município de Duque de Caxias – RJ, o método da Eletroresistividade foi aplicado no mapeamento de contaminação por hexaclorociclohexano (HCH) e triclorobenzeno. Nesta área, o solo é composto por restinga e aluviões fluviais, tipos litológicos onde se espera variações nas propriedades elétricas com a presença destes elementos. Foram aplicadas as técnicas de SEV e CE no mapeamento da contaminação, que apresentaram valores decrescentes de resistividade, quanto mais próximo à fonte da contaminação. Neste estudo, os

dados de ER foram comparados a resultados de GPR e apresentaram convergência entre estes. (MORAES, 2001).

A integração dos métodos de Eletrorresistividade, Sísmica e Eletromagnético apresentou sucesso na determinação das propriedades físicas do subsolo contaminado por substâncias tipo LNAPL em solos saturados com água salina, com variações nas propriedades acústicas e eletromagnéticas do meio, que mostraram variações de acordo com a saturação e quantidade de substâncias contaminantes; a condutividade elétrica foi crescente, inversamente à permeabilidade – solos mais argilosos são eletricamente mais condutivos que solos arenosos. A onda eletromagnética se propaga com mais facilidade (aumento da constante dielétrica) quanto maior a saturação do solo por substâncias LNAPL. Carcione (2003) afirma que é possível utilizar métodos tais como a Sísmica e o GPR no mapeamento de plumas de contaminação.

No município de Fortaleza – CE, o GPR foi aplicado no monitoramento de uma pluma de LNAPL situada em área urbana, durante o processo de remediação da área contaminada. A área foi contaminada por vazamentos de tanques de armazenamento de combustível (misturas de gasolina com etanol). Foram realizadas coletas de dados num período de 14 meses, com objetivo de mapear o espalhamento da pluma de contaminação. Dados adicionais de poços de monitoramento foram associados à interpretação dos dados geofísicos. A evolução temporal da pluma foi detectada com a aplicação da Geofísica com sucesso. (CASTRO, 2003).

No município de Cubatão – SP, o resultado da aplicação do GPR para mapear a presença de hidrocarbonetos foi favorável, conforme descrito por Gandolfo (2003), pois na área estudada, o nível d'água estava raso no momento da investigação Geofísica e apresentou alto teor de contaminação, tanto no solo como na água, dados que foram confirmados pela investigação por sondagem de investigação direta. As amostras coletadas apresentaram alta condutividade elétrica e baixa permissividade dielétrica. Hidrocarbonetos podem gerar anomalias Geofísicas locais, devido a efeitos de biodegradação ao longo do

tempo. Nas seções de radargramas neste estudo, foram observadas anomalias de atenuação onde o sinal penetrou no solo e as ondas eletromagnéticas não foram refletidas, não retornando às antenas do GPR, uma vez que haviam sido dissipadas em meio altamente condutivo. Nestes casos, a ausência de sinal é denominada 'zona de sombra', e esta foi atribuída ao local onde havia presença de hidrocarbonetos.

Em aplicações de caracterização de áreas de disposição de resíduos, para mapear cavas e determinar a profundidade da presença de chorume – efluente de alta solubilidade, produto da transformação e biodegradação dos resíduos depositados em aterros sanitários e lixões – em locais onde havia disposição de resíduos urbano e industriais, o GPR associado à Eletrorresistividade apresentou resultados positivos, uma vez que o sinal eletromagnético é atenuado devido à alta condutividade do chorume, gerada pela presença dos sais minerais presentes neste efluente. Os resultados da aplicação do método da Eletrorresistividade possibilita mapear maiores profundidades que com a aplicação do GPR. Neste caso apresentado por Elis (2003), o método da Eletrorresistividade pode ser considerado eficaz no mapeamento da profundidade da zona saturada, fluxo das águas subterrâneas, variações texturais do solo, presença e distribuição espacial de resíduos, contaminação dos solos e águas e delimitação do formato da pluma de contaminação.

Aplicações dos métodos GPR e Eletromagnético Indutivo no monitoramento de área industrial contaminada por derivados de petróleo é relatado por Moreira (2003a), para a avaliação do potencial de aplicação destes métodos, onde obteve resultados de anomalias condutivas nos locais onde havia contaminação, que foram confirmados por análises químicas de amostras de água de poços de monitoramento localizados na área, com presença de derivados de hidrocarbonetos e sais inorgânicos.

A aplicação do GPR associado a sondagens geotécnicas à percussão, na avaliação de problemas de afundamentos no solo, na região metropolitana de São Paulo – SP é apresentada por Heitzmann (2003), onde perfis de dados de GPR

processados mostraram interpretações associadas às sondagens realizadas. O trabalho foi realizado com alta amostragem espacial de linhas de investigação Geofísica, e as interpretações permitiram determinar que os recalques no solo ocorriam devido a presença de argilas orgânicas sob o corpo de aterro existente, com adensamentos gerados pelo rebaixamento do lençol freático presente na área, feito para a construção de garagens subterrâneas.

Ainda o mesmo autor, Heitzmann, demonstra o uso do GPR no mapeamento de resíduos de silicato de alumina enterrados no solo. Estes resíduos possuem características eletromagnéticas semelhantes ao contexto geológico no qual se encontram, o que permitiu que o uso do método GPR mapeasse as paredes das valas nas quais estão enterrados tais resíduos. Estas paredes apresentaram-se como descontinuidades nos radargramas – ou “zonas de sombra” – permitindo, associados às sondagens verticais, precisar a profundidades das valas, alvo da investigação.

O uso do GPR no mapeamento de pluma de contaminação gerada por acidente de derramamento de petróleo num contexto geológico descrito por terraços aluvionares de origem fluvial (terraços próximos às margens de rios, com sedimentos recentes inconsolidados), constituída por areias finas a grossas e cascalhos, mostrou nos radargramas locais onde um forte refletor delimitou a interface argila-areia, de grande importância para a determinação da profundidade máxima atingida pelo material derramado, uma vez que as camadas de argila são pouco porosas e impermeáveis. Integrando os resultados do GPR com os obtidos por poços de monitoramento, foi possível delimitar a pluma de espalhamento do material derramado (SANSONOWSKI, 2003).

Aplicações do GPR para o mapeamento de plumas de contaminação em áreas urbanas em postos de gasolina são apresentadas por Dehaini (2004) em local de depósitos sedimentares aluviais associados ao Rio Tietê, com contexto geológico areno-argiloso. O contaminante deste local era gasolina em fase livre, observada em poços de monitoramento. Conforme esperado, o sinal do GPR

apresentou 'zonas de sombra' onde havia presença de contaminação, o que permitiu delimitar qualitativamente a pluma.

Estudos controlados realizados em laboratório verificaram que a velocidade da onda eletromagnética foi alterada pela presença de hidrocarbonetos em areias e, portanto, o método GPR tem alteração em seu sinal em solos deste tipo, contaminados por estas substâncias (DOURADO, 2004).

Em terrenos arenosos, no município de Camaçari – BA, o uso da Eletrorresistividade obteve sucesso no mapeamento de plumas de contaminação de baixa resistividade, informações verificadas através de poços de monitoramento instalados na área, onde havia contaminação por ácido sulfúrico concentrado (PALMA, 2004).

Também em postos de gasolina a aplicação do GPR obteve sucesso com uso do GPR, uma vez que a permissividade relativa e a condutividade dos hidrocarbonetos são mais baixas que a do subsolo e água subterrânea, conforme Pedrosa (2004), que apresenta esta aplicação em postos no município de Fortaleza – CE.

Para mapear a estratigrafia e características do substrato rochoso, foram utilizados os métodos Eletromagnético, Sísmica de Refração e Sísmica de Reflexão, com objetivo de determinar o trajeto de percolação de contaminantes por fraturas no substrato rochoso através da identificação de zonas de fraturas, suas continuidades laterais e em profundidade, com uso de métodos não-invasivos. A análise integrada dos resultados permitiu o delineamento das camadas estratigráficas, localização de transições de camadas litológicas, marcas estruturais no substrato rochoso e espessura da camada de argila superficial. Carnevale (2005), com estes resultados, indicou locais para posicionamento dos poços de monitoramento para extração do contaminante.

Mais recentemente, relatos de aplicações em solos na Bélgica com uso do método da Eletrorresistividade em solos contaminados por LNAPL – *light non*

aqueous phase liquids – demonstram resultados positivos, comprovados pela verificação através de poços de sondagens de investigação direta, apresentados por Deceuster (2005). A continuidade deste trabalho é apresentada por Deceuster (2006), com aplicações dos métodos Eletromagnético e Eletrorresistividade associados, para mapear um aterro sanitário em uma indústria localizada na Bélgica, contaminado por substâncias dos tipos LNAPL e DNAPL – *dense non aqueous phase liquids*. A pluma de contaminação foi delimitada, em suas diferentes profundidades, com a integração dos métodos aplicados.

No México houve aplicação do método ER para o mapeamento de pluma de contaminação por hidrocarbonetos, com uso das técnicas de caminhamento elétrico – CE – e sondagem elétrica vertical – SEV. As anomalias mapeadas de baixa resistividade foram investigadas através de sondagens, e verificou-se que contaminações mais antigas – de mais de dez anos anteriores – apresentaram anomalias elétricas mais intensas; já contaminações por derrames recentes ou acidentais, e não cíclicos, apresentaram anomalias de menor intensidade; porém, estas são as mais comuns na indústria petrolífera (SHEVNIN, 2005).

Os métodos GPR e Eletrorresistividade foram aplicados com sucesso no mapeamento de plumas de contaminação em locais de abastecimento e manutenção de locomotivas em trilhos de trem. Através da integração de informações de geologia local, fotografias aéreas e poços de monitoramento, com os dados geofísicos, foram delimitadas anomalias de baixa resistividade e atenuação da onda eletromagnética, indicando a pluma de LNAPL. Os resultados geofísicos foram comparados a poços de verificação instalados no local. Carvalho (2006) utilizou esta aplicação para sugestão dos locais de instalação de poços de verificação e monitoramento, para as futuras etapas da gestão da área contaminada.

Camadas de nível d'água estão sendo contaminados por efluentes de aterros sanitários na Índia; a aplicação do GPR e Eletrorresistividade foram associados a análises químicas de amostras de água e demonstraram que anomalias condutivas são geradas pela pluma de contaminação; estas anomalias

são observadas em forma de fortes reflexões do sinal eletromagnético – GPR – e pontos de alta condutividade – Eletrorresistividade – e estas anomalias indicam que os efluentes migram pelo sistema de fraturas na base do aquífero. Pujari (2006) afirma que o uso de métodos geofísicos associados a análises químicas da água demonstrou bons resultados na caracterização da sub-superfície.

As aplicações descritas demonstram que a Geofísica foi aplicada com sucesso em diversos contextos – diferentes tipos geológicos, solos em locais distintos e portanto com características de formações geológicas diversas, bem como aplicações em sistemas dinâmicos variáveis, diferentes tipos de contaminações ou ainda, diferentes objetivos – mapeamento de áreas contaminadas, detecção de presença ou ausência de contaminações, monitoramentos temporais e periódicos de áreas conhecida e contaminadas e ainda localização de presença de substâncias alóctones para confirmação de existência de contaminação.

2.5 Limitações do uso da Geofísica no mapeamento de áreas contaminadas

Alguns casos ilustram as limitações desta tecnologia, sendo apresentados no presente trabalho somente suas limitações na aplicação da Geofísica utilizada no mapeamento de áreas contaminadas; Gandolfo (2003) aplicou os métodos GPR e Eletrorresistividade integrados, numa área onde o nível d'água apresentava profundidade de cerca de 13,0 m. Posteriormente à investigação Geofísica, foram realizadas sondagens à percussão, nas quais foi detectada a presença de hidrocarbonetos, que não apresentaram quaisquer sinais nos resultados da investigação Geofísica; os caminhamentos elétricos apresentaram resultados de alta resistividade, característicos de valores encontrados em rochas, com uma anomalia de valores baixos de resistividade – próximos de 20 ohm.m, característicos de locais com presença de contaminantes. Porém, nestas zonas não aparecem as esperadas “zonas de sombra” nos radargramas analisados. Atribui-se este resultado do método GPR aos altos valores de resistividade elétrica, onde a onda eletromagnética não conseguiu penetrar na subsuperfície.

Heitzmann (2003) aplicou o GPR no mapeamento de resíduos de silicato de alumina, enterrados aleatoriamente, sem a abertura de valas. Estes resíduos apresentam características eletromagnéticas semelhantes ao contexto geológico no qual se encontram. O esperado era de que o uso da Geofísica não obtivesse qualquer resultado, tendo sido introduzido à mesma investigação outro equipamento eletromagnético. De fato, os resultados com o uso do GPR não foram satisfatórios, não tendo apresentado quaisquer sinais de anomalias nas seções investigadas. No entanto, nota-se que este mesmo autor obteve sucesso em caso citado anteriormente neste trabalho, em aplicação do GPR no mapeamento de resíduos de silicato de alumina enterrados no solo, porém com aberturas de valas para a disposição do resíduo.

Estudos comparativos realizados sob condições controladas mostram que modelo obtido em laboratório – denominado modelo hidrogeológico – diverge do modelo obtido com aplicações de métodos geofísicos em campo – modelo geoeletrico – em aplicações antes e depois da contaminação na zona vadosa por LNAPL. Mickle (2006) atribuiu esta divergência de resultados pois modelos de laboratório em geral não expressam a distribuição real de fluidos em meios anisotrópicos – meios que apresentam variações em suas propriedades elétricas, em todas as direções. A heterogeneidade do meio afetou o modelo geoeletrico devido a variações verticais de conteúdo em fluidos. Porém, é ressaltado neste trabalho que a condutividade elétrica e permissividade dielétrica foram alteradas pela introdução de substâncias tipo LNAPL no meio.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta monografia foi realizada seguindo duas abordagens complementares: a primeira se trata de pesquisa bibliográfica de temas relacionados à gestão de áreas contaminadas, aplicações de métodos geofísicos na delimitação e mapeamento destas áreas, tipos de contaminantes, aplicações de sucesso e fracasso da Geofísica no mapeamento ambiental bem como a escassez de trabalhos desta natureza. A segunda, a apresentação de um caso onde dois

métodos geofísicos foram aplicados como uma etapa do gerenciamento de uma área contaminada.

3.1 Apresentação de caso de aplicação

O caso apresentado nesta dissertação trata-se de área contaminada por substâncias tipo LNAPL – *light non aqueous phase liquids* – num local de abastecimento e manutenção de locomotivas, onde ocorrem derrames constantes de combustíveis e óleos lubrificantes.

Não foram apresentadas quaisquer coordenadas ou referências que localizem ou situem a área em estudo, respeitando assim o acordo de confidencialidade velado entre a empresa privada contratante dos serviços de investigação geofísica prestados.

O diesel, substância encontrada na área mapeada, trata-se de um LNAPL. Segundo Daniels (1995), essas substâncias têm comportamentos diretamente relacionados às estações do ano, períodos de chuva e o gradiente hidrológico do local ou a direção do fluxo d'água.

A área estudada apresenta solo de aterro, com substrato rochoso granítico bastante irregular e profundo, subjacente a duas camadas geológicas. A primeira, o solo de cobertura e uma segunda camada areno-argilosa muito porosa. O nível d'água na região varia entre 3,6 e 8,0 m; as substâncias presentes na área têm densidades menores que a água, ficando assim sobrenadantes à superfície do lençol freático.

Para a investigação Geofísica, foram utilizados dois métodos: o GPR – *Ground Penetrating Radar* e a Eletrorresistividade, que estão detalhados na revisão bibliográfica.

O caso apresentado nesta dissertação foi realizado em uma área situada dentro dos limites físicos de uma empresa onde existem áreas conhecidamente

contaminadas devido à natureza de suas atividades. Muitas destas áreas são as denominadas “potencialmente contaminadas” (CETESB, 2001a). A gestão destas requer a identificação de potenciais contaminações e a avaliação preliminar, para que nas etapas seqüenciais da gestão de tais áreas sejam traçadas com embasamento em informações sistemáticas e seguras.

A necessidade em mapear grandes áreas com poucos investimentos nas etapas iniciais da gestão de áreas contaminadas e a urgência gerou a demanda da investigação destas áreas com uso de métodos geofísicos. Assim, com a identificação de áreas potencialmente contaminadas e a avaliação preliminar destas, foi possível direcionar as etapas posteriores da gestão das áreas que – após a investigação direta e confirmatória – estivessem contaminadas.

A determinação dos métodos geofísicos mais adequados ao problema tornou-se possível após a análise de informações iniciais – tipos litológicos da área, histórico de atividades exercidas, produtos e substâncias aplicados e utilizados no local e informações de outras investigações realizadas previamente.

O objetivo desta investigação foi detectar materiais enterrados e estruturas diversas relacionadas às atividades antrópicas exercidas em local onde ocorrem atividades de manuseio de hidrocarbonetos, bem como mapear zonas de subsolo que apresentassem anomalias Geofísicas, identificar possível topo rochoso e outras camadas litológicas, determinar zonas anômalas e apontar locais onde a investigação direta seria necessária.

3.1.1 A área em estudo

A morfologia regional é composta por feições de cristas suaves e drenagens encaixadas em vales profundos encravados nas rochas formadas por granitos e gnaisses. Os rios próximos à área possuem barrancas abruptas e escavadas. A área situa-se no meio de uma faixa tectônica, com unidades pertencentes à duas diferentes Províncias Geotectônicas, sendo uma composta por metagranitos, quartzitos ferruginosos, xistos e gnaisses bandados, e a outra composta por biotita e hornblenda gnaisses.

Localmente, a área caracteriza-se por aterro aluvionar, composto por solos argilo-arenosos, com alguns seixos e matacões enterrados nas camadas sobrejacentes ao substrato rochoso. Estas informações foram obtidas na análise de poços de monitoramento – PM-00 – observados na Figura 9. O solo da região se constitui por latosolo vermelho-amarelado.

A área investigada consiste em local onde são exercidas atividades de abastecimento de locomotivas e veículos de passeio, bem como a manutenção destas locomotivas, onde há manuseio de hidrocarbonetos – combustíveis e lubrificantes. Estas atividades são exercidas já há alguns anos e, portanto, a presença de hidrocarbonetos no solo pode ser antiga ou recente, pois ocorrem derrames constantes de pequenas quantidades de combustível com o abastecimento e manutenção das locomotivas e automóveis. Observa-se óleo combustível sobre o pavimento. Tubulações que transportam os combustíveis foram recentemente modificadas para tubulações aéreas, deixando de ser subterrâneas, porém, ainda podem ser detectados com uso do método GPR os ‘resquícios’/‘caminhos’ em subsuperfície, da antiga localização de tais tubulações.

A presença de tanques e tubulações (antigas e recentes) e as atividades exercidas nesta área de abastecimento e manutenção de locomotivas geram constante derrame dos combustíveis, que são acumulados sobre o pavimento que há sobre o solo. Porém, parte deste combustível é transportado com o movimento de águas de chuva e efluentes da lavagem do piso, para a porção não pavimentada, acumulando-se no solo, percolando pelos poros das camadas de solo superficiais e depositando-se sobre o nível d’água, não se misturando à água por tratar-se de um produto do tipo LNAPL – *light non aqueous phase liquids*, mantendo-se sobrenadante ao lençol freático, e sendo alterado por suas variações em profundidade. Além desta fonte de contaminação, há um rio muito próximo à ilha de abastecimento; neste rio observa-se um ponto onde há surgência de óleo combustível, em quantidade considerável. É desconhecida a origem desta surgência de material.

No local onde foram situadas as linhas de investigação, o piso é pavimentado por concreto, delimitado por linhas verdes na Figura 9, onde se situa a denominada 'ilha de abastecimento', onde existem bicos e bombas para abastecimento de veículos e locomotivas, por óleo diesel. Há no local um rio, cerca de 30,0 m de distância do limite oeste da ilha de abastecimento, onde observam-se afloramentos de rochas e matacões. Nesta área, conforme se observa na Figura 9, o fluxo d'água corre em direção ao rio.

Na área existem tanques de armazenamento de combustíveis, localizados cerca de 200,0 m distante das bombas de abastecimento e as tubulações que ligam as bombas aos tanques são protegidas por uma canaleta aberta e não foram observados vazamentos nesta. Por fim, próxima ao pavimento da ilha de abastecimento há uma caixa separadora água/óleo que recebe efluentes provenientes de toda a área. Alguns pontos de visita – PV – foram construídos nesta área, em trabalhos anteriores a esta investigação Geofísica.

Previamente às investigações Geofísicas, foram implantados alguns poços de monitoramento, nos quais foram apresentados perfis da litologia local, informações quanto à direção de fluxo e profundidade do nível d'água e à presença de hidrocarbonetos.

Sete (07) poços de monitoramento estavam alocados sobre a ilha de abastecimento, e seus perfis de litologia apontam as seguintes características:

- Três camadas foram delimitadas: material de aterro e perfis de alteração de solo.
- Foi observada uma cobertura de solo superficial, composta por grande mistura de areias, argilas e material alóctone, de aterro, até cerca de 1,5 m de profundidade.
- A segunda camada é altamente porosa, de textura areno-argilosa, atingindo profundidades de até 8,0 m, correspondente ao horizonte B de solo – latosolo.

- A terceira camada compõe o saprolito originado pelo intemperismo e alteração da rocha sã, essencialmente gnáissica, tendo sido observada nesta camada algumas características da rocha original.
- Houve presença hidrocarbonetos nos PM – 05 e PM – 07, onde se observa uma camada saturada com o contaminante, sobrenadante à água.
- No PM – 08 se notou odor de combustível na camada areno-argilosa.
- O nível d'água no PM – 06 está em 3,6 m de profundidade.

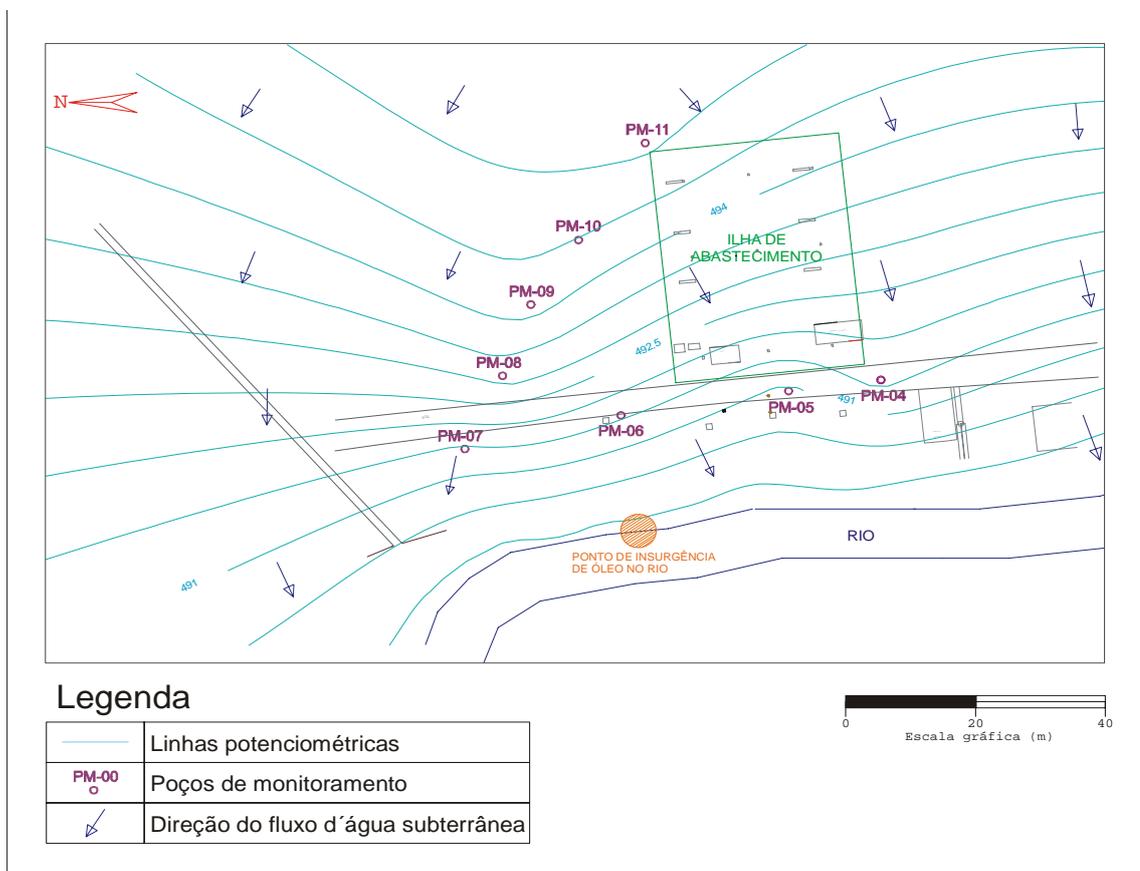


Figura 9 – Mapa de situação do local.

A Figura 9 apresenta as linhas de isovalores da profundidade da água no local, informações retiradas de um mapa denominado potenciométrico; estes valores podem relacionar-se com a profundidade da presença de contaminantes do tipo LNAPL. A profundidade do nível d'água pode variar sazonalmente, sofrendo influência da quantidade de acúmulo de água proveniente de chuvas nos poros das formações geológicas e efluentes de lavagem do piso do local de

abastecimento. A Figura 9 apresenta os poços de monitoramento – PM – que existiam previamente na área. Nota-se, na porção W a surgência de óleo diesel na superfície da água; a presença deste material resultou no início das investigações de presença de substâncias contaminantes nesta área.

Informações obtidas previamente à investigação Geofísica ajudaram na determinação do escopo dos trabalhos. Nesta região, falhas regionais são conhecidas, através de mapas geológicos e fotografias aéreas, na direção SW. Além desta informação, alguns perfis geoeletricos foram cedidos à equipe de investigação, por parte da empresa interessada, com o intuito de verificar as informações obtidas previamente e direcionar as investigações Geofísicas. Alguns perfis de poços de monitoramentos foram cedidos, bem como informações verbais de observação de presença de odores de combustíveis na área e observação da presença de óleos em alguns dos poços de monitoramento, sobre o lençol freático.

A substância presente nesta área é o diesel, composto basicamente por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e outros, derivados do petróleo, que conforme descrito na Tabela 2 na revisão bibliográfica desta dissertação, apresentam em geral alta solubilidade em água, são bastante nocivos ao Homem e ao Meio Ambiente (CETESB, 2001b; COLIN, 1995).

3.1.2 GPR – *Ground Penetrating Radar*

As propriedades físicas primárias dos hidrocarbonetos – diesel – que podem ser detectadas pelo uso do GPR são: permissividade dielétrica e condutividade elétrica; a permissividade dielétrica de hidrocarbonetos varia entre 2 e 30, comparada à permissividade relativa da água, de 80 (DANIELS, 1995).

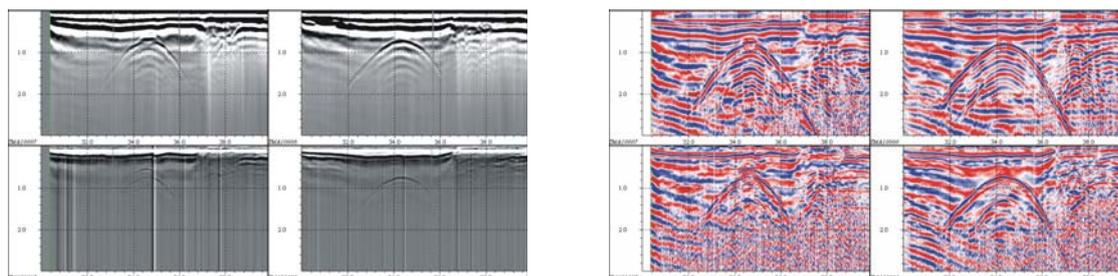
Para o GPR, foi utilizado equipamento multifrequencial, onde resultados de antenas de 200 e 600 MHz foram interpoladas em oito canais de aquisição de dados, por linhas equiespaçadas a cada 2,0 m, nas direções longitudinal e

transversal, a partir de uma linha de referência marcada com tinta no local da investigação.

Os dados obtidos em campo foram armazenados em via digital, em um computador e, com uso de um *software* de tratamento e visualização de dados, foi possível analisar cada seção obtida – os denominados radargramas.

Estes dados foram adquiridos em função da distância versus velocidade da onda eletromagnética e para seu entendimento e visualização, uma série de transformações e ajustes matemáticos descritos a seguir, são necessários para que estes dados sejam transformados em imagens.

Com caráter ilustrativo, a Figura 8 mostra radargramas antes e depois do processamento matemático:



(a) dados brutos

(b) Após o processamento matemático

Figura 8 – Radargramas ilustrativos.

O tratamento de dados passa pelos seguintes processos (TELFORD, 1990):

3.1.2.1 Remoção e ajuste do tempo zero

Os dados adquiridos sofreram ajuste matemático para que o *delay* gerado pela transmissão e recepção da onda eletromagnética fosse eliminado do sinal.

3.1.2.2 Remoção de *background*

Analisando o espectro de frequências eletromagnéticas, uma média de valores ruidosos determina o *background*; este deve ser subtraído do sinal eletromagnético considerado.

3.1.2.3 Filtros passa-banda – verticais e horizontais– ou outros filtros.

Foram testados, para cada radargrama, filtros que apresentassem melhor ajuste, de acordo com o espectro de frequências eletromagnéticas. Estes filtros aplicados podem ser de altas, baixas, ou ainda para faixas de frequências – conhecidos como filtros “passa-banda”.

3.1.2.4 Ganhos lineares e visuais

Para melhorar a visualização do sinal em radargramas, foram aplicados ganhos, variando para cada linha de investigação. Estes ganhos são somente visuais e envolvem representações em cores, contrastes, realces e brilhos.

3.1.2.5 Migração no domínio do tempo

Através da Transformada de Fourier, o sinal recebe tratamento matemático e é transformado de velocidades para profundidades, sendo apresentado em radargramas de distância versus profundidade.

3.1.3 ER – Eletrorresistividade

Segundo Reynolds (1997), a distância de 20,0 m entre as linhas de caminhamento elétrico é suficiente para garantir a qualidade da interpolação matemática dos dados.

Tratando-se de uma área de aproximadamente 5.000 m², nove perfis de caminhamento elétrico – CE – foram realizados na área, sobrepostos às linhas de investigação com o método GPR. Estas linhas foram realizadas com dipolos de aberturas de 5,0 e 8,0 m entre os eletrodos, a fim de investigar diferentes profundidades.

As sondagens elétricas verticais – SEV – apresentam resultados pontuais. No caso apresentado, foram realizadas duas SEV, em locais onde havia relevância em investigar a profundidade do nível d'água, tendo sido considerada a distância entre estes dois pontos. Foi inferido um perfil geoeletrico para cada uma das SEV realizadas.

Os dados adquiridos com a aplicação desta técnica são armazenados também em via digital, em planilhas de valores. São feitas as interpolações dos dados e sua plotagem em perfis de cores.

4 RESULTADOS OBTIDOS

São apresentados os resultados obtidos com a conclusão do presente trabalho.

4.1 GPR – Ground Penetrating Radar

O objetivo do mapeamento com uso do GPR é de delimitar anomalias superficiais e rasas, com variações nas propriedades eletromagnéticas, as quais podem ser geradas pela presença de substâncias contaminantes, em especial sobre o nível d'água e na zona vadosa. Com alcance de no máximo 4,0 m de profundidade, é realizada a investigação desta mesma área com uso da Eletrorresistividade, a fim de atingir maiores profundidades.

Na presente investigação, linhas de mapeamento com o equipamento GPR foram posicionadas eqüidistantes a cada 2,0 m, em duas direções; transversal e longitudinal. Para determinação do posicionamento destas, é determinado um ponto de referência na área, em geral locado em arestas de edificações ou limites físicos. No caso desta investigação, a LDR – linha de referência, foi situada sobre a intersecção de um trilho de trem e um dormente. Partindo-se desta LDR, são demarcados com tinta, pontos eqüidistantes a cada 2,0 m, nas duas direções citadas, sobre as quais o equipamento deverá ser posicionado. A distância de 2,0 m é determinada previamente à aquisição de dados, quando são determinados,

teoricamente, todos os padrões de aquisição de dados – distância entre linhas de investigação, tempo de abertura da janela de emissão e recepção do sinal, velocidade de aquisição, velocidade de estaqueamento dos dados. Com linhas separadas em 2,0 m, há interpolação completa dos dados adquiridos, uma vez que o cone de abertura de investigação da onda eletromagnética é cerca de 30° (TELFORD, 1990).

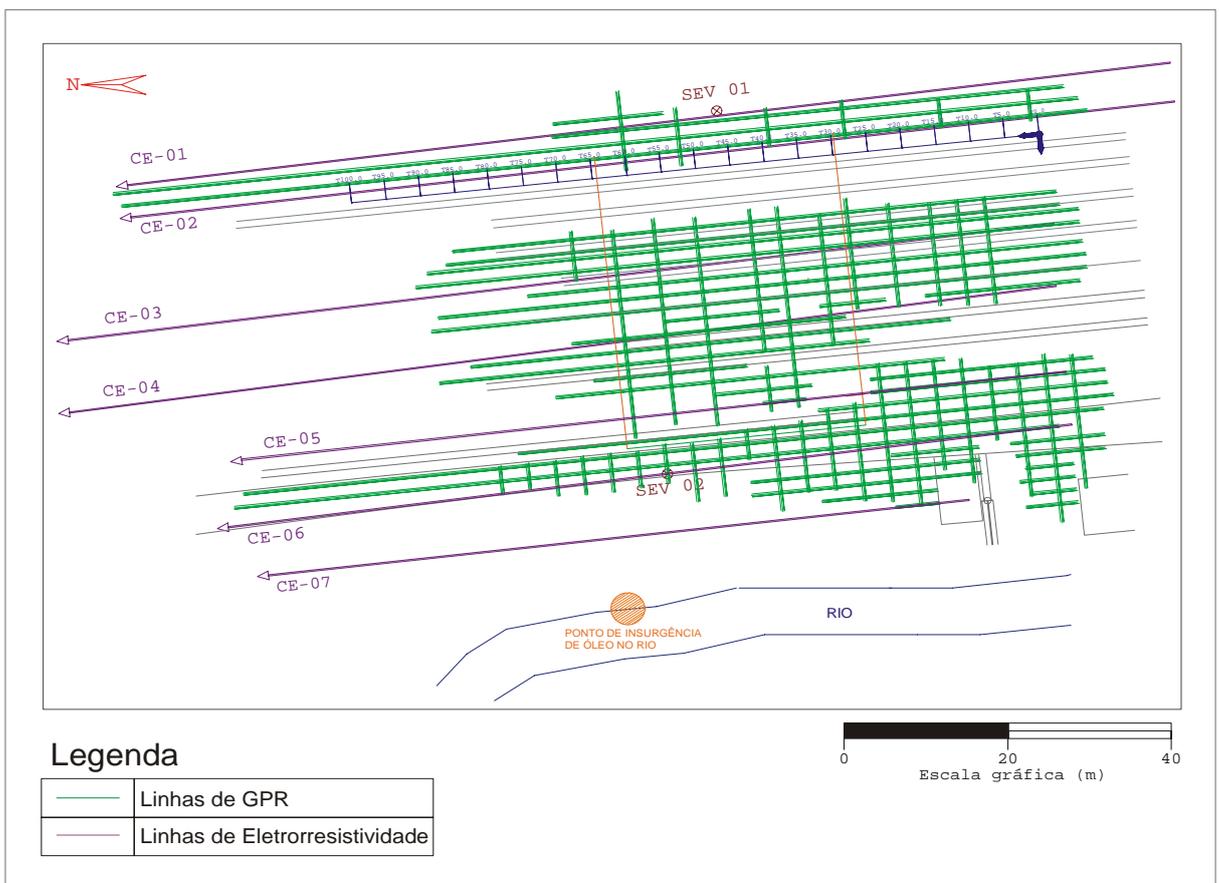


Figura 10 – Mapa de localização das linhas de aquisição (GPR e ER).

A Figura 10 ilustra as linhas de aquisição com uso do GPR em verde e, da Eletrorresistividade, em lilás. Os levantamentos são realizados concomitantemente por duas equipes em campo. Na figura observa-se que a LDR foi posicionada junto à linha férrea permanente, sendo que os eixos transversal e longitudinal são crescente nos sentidos norte e oeste, respectivamente.

O tratamento dos dados de GPR envolve processos de: remoção e ajuste de tempo zero, remoção de *background*, filtro passa-banda vertical, migração no

domínio do tempo e ganho visual linear e de cores, conforme descrito nos materiais e métodos, nesta dissertação. Segundo Telford (1990), o produto final apresentado, com os dados do uso do método GPR, são figuras em planta de cada “fatia” de profundidade, desenhados em perspectivas tridimensionais, para que a imagem apresente continuidade vertical das anomalias. Os mapas de tomografias eletromagnéticas verticais são apresentados na Figura 11. Tomografias eletromagnéticas verticais são obtidas em fatias de 0,5 m, apresentadas em forma de gráficos de distância versus profundidade.

Nestes mapas observa-se uma anomalia principal, situada sob o pavimento da ilha de abastecimento, local onde existem vazamentos constantes de combustível pelas atividades de abastecimento, bem como derrames antigos deste mesmo combustível. A substância apresenta diferentes estágios de biodegradação sob o pavimento, colocado posteriormente à descoberta da presença de contaminação, com o objetivo de impermeabilizar e cessar o contato do combustível com o solo, passando a não existirem novas fontes de contaminação. No entanto, as atividades de abastecimento ocorreram durante alguns anos e somente há cerca de dois anos o problema foi detectado. A partir da verificação da existência de um problema ambiental, os passos tomados para a análise e gestão desta área, demandaram a delimitação da pluma de contaminação, ainda que qualitativamente, para que as etapas seguintes da gestão da área fossem traçadas.

A anomalia observada apresenta-se em cor azul, em geral associada às áreas onde há a presença de substâncias de não ocorrência natural no solo. Nestes locais a onda eletromagnética é atenuada pela presença de substâncias, sendo completamente dissipada no meio, gerando assim uma ‘zona de sombra’, onde não há presença de sinal eletromagnético. A cor verde representa o *background* da área, onde o sinal eletromagnético penetra nas camadas do solo, e na medida em que encontra refletores em subsuperfície, é refletido com intensidades médias às antenas receptoras. Já sinais de cor vermelha são gerados pela presença de materiais de baixa condutividade do sinal

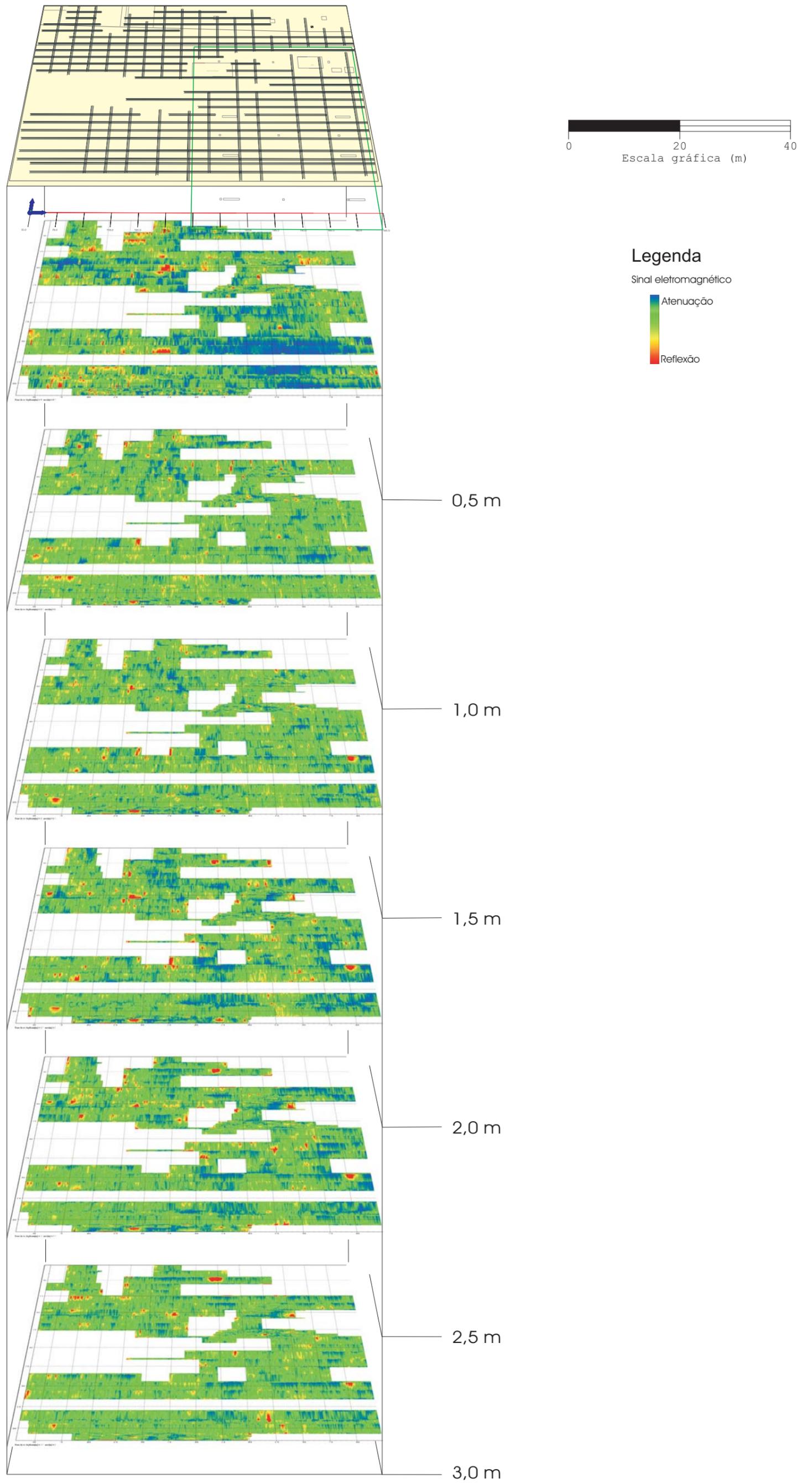


Figura 11 - Mapa de Tomografias eletromagnéticas horizontais

eletromagnético, locais no qual a onda penetra no material e é refletida com alta intensidade.

Quando se observam zonas de atenuação de sinal – em cor azul, com maior ou menor intensidade – atribui-se a este local a possível presença de substâncias contaminantes.

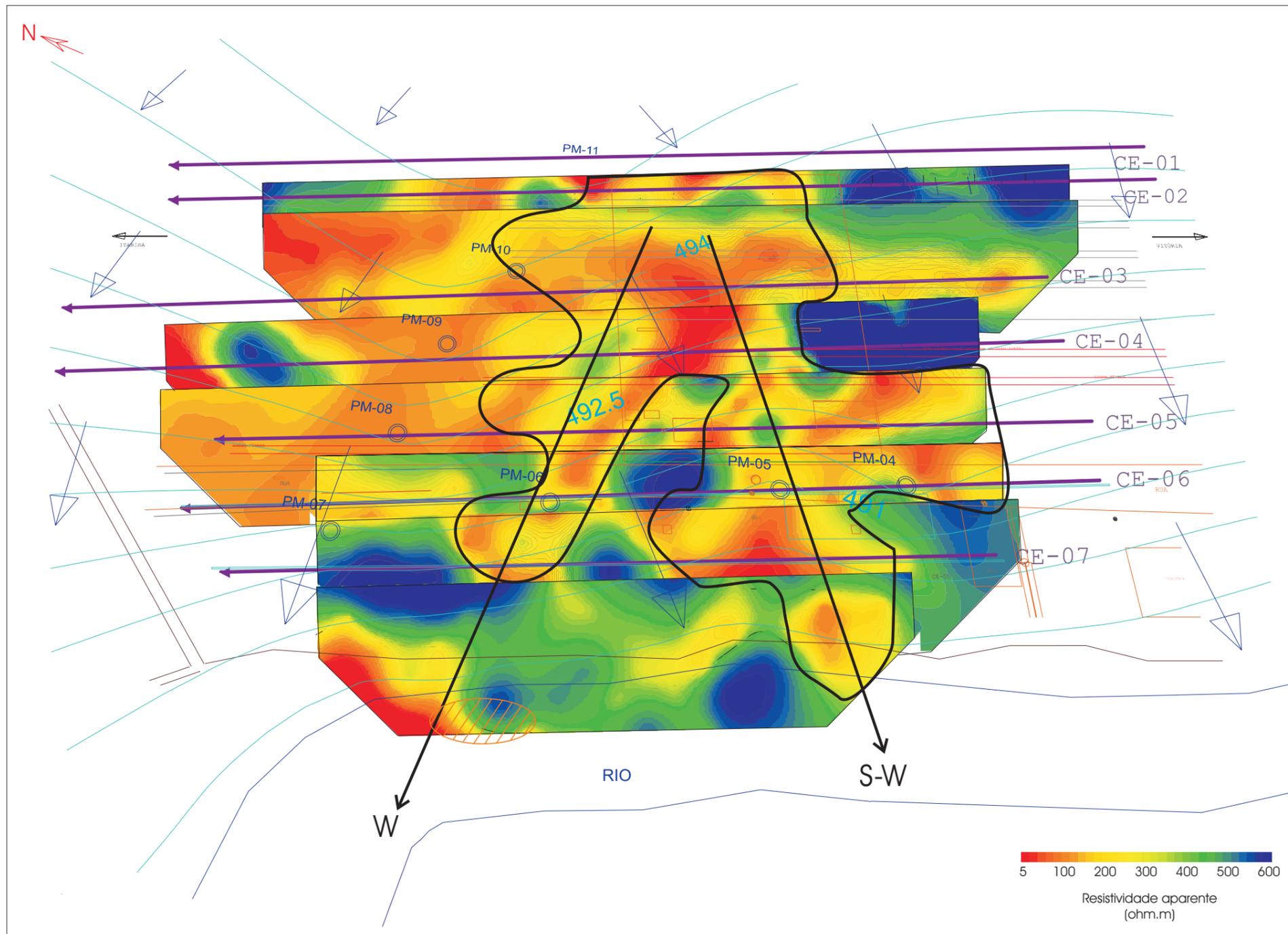
4.2 ER – Eletrorresistividade

As linhas de caminhamento elétrico foram posicionadas com distância máxima entre elas de 17,0 m, pois, segundo Braga (1999), a distância ideal para interpolação das informações não deve ser maior que 20,0 m – pois a partir desta distância a interpolação dos dados perde sua acurácia, uma vez que ocorre dissipação da corrente elétrica injetada.

Para a investigação de profundidades maiores, os dipolos – distância entre os eletrodos – devem ter maior abertura. No presente trabalho, o tamanho da abertura do dipolo foi de 3,0 m para todas as linhas de caminhamentos elétricos. Com objetivo de mapear variações de camadas litológicas e nível d'água, todas as linhas foram posicionadas no sentido crescente de sudeste (SE) à noroeste (NW). A aquisição atingiu cerca de 10,0 m de profundidade. Informações prévias de poços de monitoramento – PM – apresentam o nível d'água entre 3,0 e 8,0 m de profundidade.

A interpolação dos dados foi realizada com uso da técnica da *krigagem* – técnica amplamente aplicada, pois permite produzir mapas a partir de dados irregularmente espaçados. É muito flexível, podendo ser uma técnica exata ou aproximada, de acordo com o modelo produzido.

Os resultados obtidos com a aplicação do método da Eletrorresistividade são apresentados em perfis na Figura 12, onde o desenho em perspectiva representa todos os perfis de caminhamentos elétricos realizados e suas continuidades laterais e em profundidade, que após o processamento dos dados



Legenda

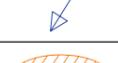
	Linhas potenciométricas
	Poços de monitoramento
	Direção do fluxo d'água
	Óleo insurgente no rio
	Direção preferencial de percolação de efluentes na camada



Figura 12 - Mapa de perfis de caminhamentos elétricos

conforme descrito na revisão bibliográfica, são integrados às informações obtidas previamente à investigação Geofísica.

Nestes perfis de caminhamentos elétricos são delimitadas três camadas de valores distintos de resistividade aparente, atribuídos às características litológicas e presença de substâncias de contaminação em cada uma das camadas delimitadas.

Foram delimitadas três camadas litológicas; a superficial, composta por areias, argilas e coberturas de solo alóctones, dispostas somente para aterramento da área, na qual nota-se a presença de substâncias contaminantes. Na Figura 12 atribui-se a esta a camada a anomalia delimitada na cor vermelha, onde os valores de resistividade aparente variam entre 5 e 40 ohm.m, valores estes associados, na literatura, à locais onde ocorre presença de água, alta porosidade dos tipos litológicos e contaminantes (BRAGA, 1999). Em se tratando de uma substância conhecida como LNAPL – *Low Non Aqueous Phase Liquid* – este tipo de substância encontra-se sobrenadante ao lençol freático, sendo esta camada o alvo de maior importância para investigações diretas. Subjacente à superficial, há uma segunda camada mapeada por valores de resistividade aparente entre 40 e 400 ohm.m, valores associados, na literatura, a camadas de argila/areia com presença de pouca água, com alguns fragmentos de rochas, que diminuem a capacidade do meio em conduzir corrente elétrica, fazendo assim com que os valores de resistividade sejam mais altos. Por fim, a camada inferior apresenta valores altos de resistividade aparente, observada na cor azul dos perfis de caminhamentos elétricos. Nesta camada os valores estão entre 400 e 600 ohm.m, valores estes associados a rochas cristalinas em baixo grau de intemperismo. É possível determinar com esta análise que o topo rochoso está em profundidade superior à 10,0 m e irregular nesta área.

Desta forma é possível delimitar uma zona onde existe maior probabilidade de contaminação na área, a anomalia delimitada por uma linha em preto, com duas direções preferenciais de percolação da água e qualquer substância contaminante que esteja sobrenadante ao lençol freático – direções W e S-W.

Informações de observações do local apresentam na direção W a presença de óleo insurgente no rio; nota-se que a anomalia delimitada apresenta percolação de substâncias nesta mesma direção.

Ademais dos caminhamentos elétricos, ainda em se tratando da aplicação do método da Eletrorresistividade, foram realizadas duas sondagens elétricas verticais – SEV – posicionadas estrategicamente para a verificação de informações de Geologia previamente conhecidas por ocasião de instalação dos poços de monitoramento.

A Figura 13 apresenta os resultados obtidos para as duas SEV realizadas, bem como seus perfis geológicos inferidos, segundo valores de resistividade elétrica encontrados na literatura (BRAGA, 1999).

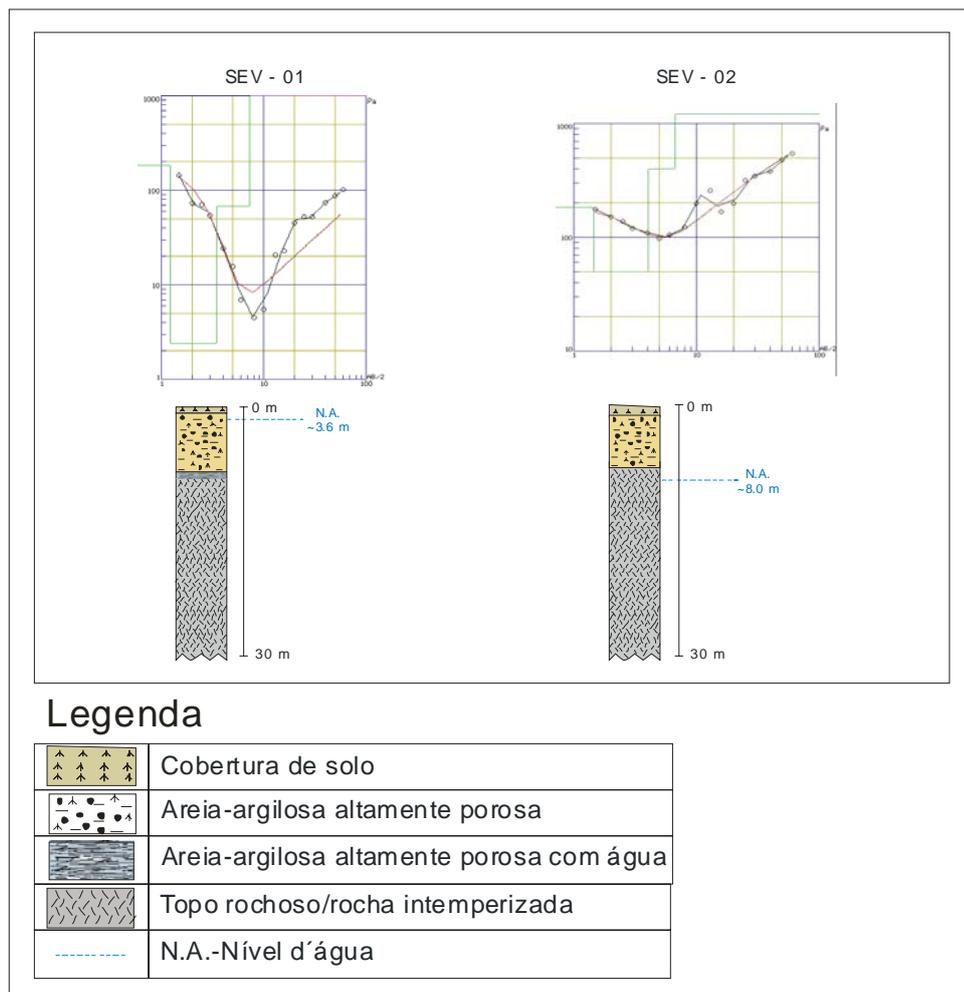


Figura 13 – Sondagens elétricas verticais

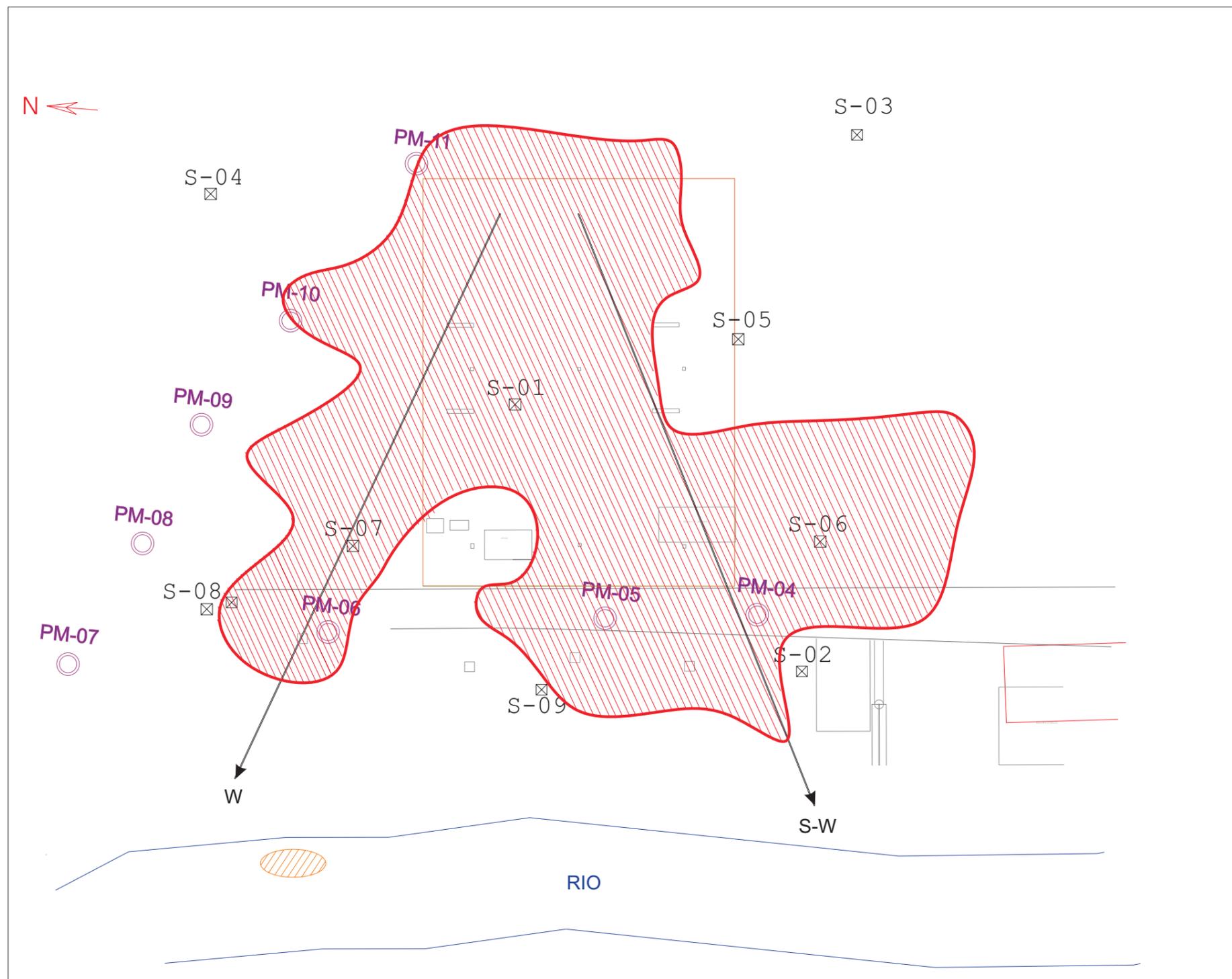
Nesta figura estão dois perfis geológicos inferidos; o primeiro apresenta a profundidade do nível d'água mais raso, em aproximadamente 3,6 m. Foram observadas três camadas neste perfil, sendo uma de cobertura de solo, sobrejacente a uma camada areno-argilosa altamente porosa, com grande potencial de percolação de substâncias por entre os poros, tendo sob esta uma camada pouco espessa de mesma formação geológica, porém, com valores associados à presença de água. A terceira camada foi atribuída ao topo rochoso, em alto estágio de intemperismo. O segundo perfil geológico apresenta as mesmas três camadas observadas no primeiro perfil, com profundidade do nível d'água em aproximadamente 8,0 m de profundidade e o topo rochoso em menor profundidade se comparado ao primeiro perfil geológico inferido.

De forma complementar, os resultados observados com as SEV e os poços de monitoramento que existiam na área anteriormente à esta investigação, os resultados convergiram, pois, as camadas mapeadas com a Geofísica estavam delimitadas nos perfis litológicos traçados pela coleta de amostras.

4.3 Integração de informações e próximos passos da investigação

Muitos trabalhos apresentam mapeamentos utilizando a integração de diferentes métodos, a fim de explorar diferentes propriedades físicas do meio estudado: Aquino, 2001; Carnevale, 2005; Carvalho, 2006; Deceuster, 2005; Filho, 2003; Heitzmann, 2003; Moreira, 2003a; Parry, 1996; Pettersson 2003; Pujari, 2006; Romano, 2002; Sauck, 1998; Sauerbronn, 2003; Shevnin, 2005.

No caso apresentado nesta dissertação, a investigação com o GPR atingiu profundidade de 3,0 m. Com uso da Eletorresistividade esta profundidade foi de cerca de 10,0 m. Os métodos foram aplicados com caráter complementar, onde as informações foram integradas juntamente com outras informações indiretas e diretas – de poços de monitoramento – PM – e observações de campo. Unificando todas as informações adquiridas e pré-existentes em uma só informação final direcionada ao entendimento do gestor, foi confeccionada uma figura onde se delimitam as anomalias observadas e onde se localizam as sondagens sugeridas



Legenda

PM-00 ○	Poços de monitoramento
↙	Direção do fluxo d'água
○ (hatched)	Óleo insurgente no rio
→	Direção preferencial de percolação de efluentes na camada
○ (hatched)	Pluma de contaminação mapeada
S-XX ⊗	Pontos de indicação de sondagens para verificação direta



Figura 14 - Mapa de anomalias e sondagens

para investigação direta de verificação e validação da presença de contaminação sob estas anomalias.

Determinadas as anomalias de maior interesse, foi possível delimitar a pluma de contaminação em profundidade, suas variações laterais e direções preferenciais de percolação por entre as camadas mapeadas. A Figura 14 apresenta uma zona de maior interesse, produto da sobreposição e integração das anomalias obtidas com uso dos métodos GPR e Eletrorresistividade, onde são sugeridas 10 (dez) sondagens para verificação direta destas anomalias e verificação da presença de material de contaminação, bem como a determinação dos tipos litológicos de *background* da área.

Nesta figura há uma anomalia em vermelho, que engloba os resultados da aplicação da Geofísica com os métodos GPR e ER, sobre a qual foram sugeridas as sondagens de verificação direta, próxima etapa da gestão das áreas contaminadas. As direções W e SW foram apontadas como as preferenciais, obedecendo a direção do fluxo d'água em direção ao rio, para a percolação de água e substâncias contaminantes sobrenadante a esta, através da primeira e segunda camadas mapeadas nas sondagens elétricas verticais, camadas argilo-arenosas de alta porosidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao gestor, as tomadas de decisão podem ser realizadas baseadas em informações sistemáticas e seguras de grandes áreas potencialmente contaminadas para as etapas seguintes – confirmação da existência de contaminação – utilizando-se do direcionamento desta investigação direta para os locais de maior interesse, buscando assim otimizar recursos e tempo.

Com a validação das informações obtidas pela aplicação da Geofísica, é possível determinar as próximas etapas da gestão desta área, tais como a remediação e seus melhores processos, de acordo com o tipo e quantidade de contaminantes neste contexto geológico.

Com a metodologia empregada foi possível a partir da pesquisa bibliográfica demonstrar que, na literatura, alguns casos de aplicação de métodos geofísicos como tecnologia para a gestão de áreas contaminadas apresentam sucesso, bem como existem limitações. Muitos casos apresentam a integração de diversos métodos no mapeamento de áreas contaminadas – para garantir que diferentes os parâmetros físicos dos meios sejam investigados – através de alterações nas propriedades físicas do meio pela presença de substâncias alóctones. Há casos em que a aplicação da Geofísica apresenta insucesso, pois, as alterações nas propriedades físicas do meio não são detectadas – em casos como alterações de pequena amplitude no contexto dinâmico, alterações em propriedades de outras naturezas, tais como química ou biológica, não são detectáveis pela aplicação de métodos geofísicos.

O caso estudado demonstrou que a área contaminada por substâncias tipo LNAPL – óleo diesel – apresentou anomalias nos sinais em ambos os métodos aplicados – O GPR e a Eletrorresistividade. Integrando todas as informações obtidas ao longo da investigação, tornou-se possível a indicação de locais de maior concentração de contaminantes, onde foram sugeridas sondagens de verificação direta para validação das informações obtidas com a aplicação dos métodos indiretos e não-invasivos. O caso demonstrou também que em locais com presença de contaminantes orgânicos, as propriedades eletromagnéticas e elétricas do meio são alteradas em amplitude detectável com métodos geofísicos, mostrando que a Geofísica é uma tecnologia de aplicabilidade para a detecção, mapeamento e delimitação de áreas contaminadas por estes tipos de substâncias.

Em se tratando de tecnologia para a qual as aplicações são crescentes e muitas ainda experimentais, a forma como os gestores encaram a questão requer aprofundamento nas técnicas e na tradução desta para os gestores, que demonstrem as limitações da tecnologia com base em experiências anteriores e no potencial de desenvolvimento em trabalhos futuros, existe espaço para uma análise de mais casos de aplicações práticas, englobando diferentes contextos geológicos e outros tipos de substâncias contaminantes.

O objetivo de demonstrar e contribuir para a difusão do uso da Geofísica como tecnologia na gestão de áreas contaminadas foi atingido, através do estudo do embasamento teórico e da demonstração de caso prático desenvolvido profissionalmente.

Em trabalhos futuros, outras áreas contaminadas podem ser estudadas, com diferentes características geológicas, com uso de outros métodos geofísicos integrados, bem como contaminações por outras substâncias. Os meios dinâmicos podem apresentar respostas diversas às aplicações de métodos geofísicos em combinações diferentes de suas diversas propriedades físicas.

REFERÊNCIAS

ALLABY, A.; ALLABY, M. **The Concise Oxford dictionary of Earth sciences.**

New York: Oxford University Press, 1991.

AQUINO, W. F.; BOTELHO, M. A. B. **Método Eletromagnético Indutivo e GPR aplicados à detecção de contaminação do solo e água subterrânea por resíduos industriais.** In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7, 2001, Salvador. Rio de Janeiro: SBFg. 2001. p. 266-270. CD-ROM.

BRAGA, A. C. de O. Apostila didática: **Métodos geoeletricos aplicados:** módulo: Hidrogeologia. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, 1999. 91 p.

BREWSTER, M. L.; ANNAN, P. **Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release:** 200 MHz radar. *Geophysics*, v. 57 n. 8, p. 1211-1221, ago. 1994.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 001, 23 jan. 1986.** Relator: Flávio Peixoto da Silveira. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, DF, 17 fev. 1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/conama>>. Acesso em: 07 fev. 2006.

BRASIL. **Decreto nº 99.274, de 6 de junho de 1990.** Regulamenta a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, e a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Diário Oficial

da República Federativa do Brasil, DF, 07 jun. 1990, p. 10887. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/decreto/Antigos/D99274.htm> . Acesso em: 05 jun. 2005.

BRASIL. **Lei nº 6.938, 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, DF, 02 set. 1981, p. 16509. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/Leis/L6938.htm>. Acesso em: 08 dez. 2005.

CARCIONE, J. M.; SERIANI, G.; GEI, D. **Acoustic and electromagnetic properties of soils saturated with salt water and NAPL**. Journal of applied Geophysics, v. 52, p. 177-191, jan. 2003.

CARNEVALE, M.; HAGER, J; JONES, B. R. **Integrated geophysical characterization at a contaminated site**. In: ANNUAL MEETING – SAGEEP – SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 18, 2005, Atlanta. Denver: 2005. p. 1129-1141. CD-ROM.

CARVALHO, D.; OKABE, R. **Contaminated site mapping using GPR and Electrical Resistivity in Brazil**. In: ANNUAL MEETING – SAGEEP – SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 19, 2006, Seattle. Proceedings. Denver: 2006. p. 1545-1551. CD-ROM.

CASSIDY, N. J. **GPR signal dispersion and attenuation characteristics of LNAPL hydrocarbon contamination**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR 2006 GPR, 11, 2006, Columbus. p. 155-166. CD-ROM.

CASTRO, D. L. de; BRANCO, R. M. G. C. **4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history**. Journal of applied Geophysics, v. 54, p. 127-144, ago. 2003.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas/CETESB, GTZ**. 2.ed. São Paulo: CETESB, 2001a.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas no estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2001b.

CHIUMMO, L. A. **Desempenho ambiental e processo de comunicação. Estudo de caso nos setores químico e petroquímico**. São Paulo, 2004, 212 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

COLIN, B. **Environmental Chemistry**. 2nd ed. New York: W. H. Freeman and Company, 1995.

COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. **Relatório anual 2004**. Disponível em:
<http://www.cvrd.com.br/cvrd/hotsites/ra/2004/PDF/ra_por.pdf>. Acesso em: 01
fev. 2006.

DANIELS, J. J.; ROBERTS, R.; VENDL, M. **Ground Penetrating Radar for the detection of liquid contaminants**. Journal of applied Geophysics, v. 33, p. 195-207, 1995.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. **Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy**. Geophysical Prospecting, v. 37, n. 5, p. 531-551, 1989.

DECEUSTER, J.; CHABALLE, M.; KAUFMANN, O. **3D Resistivity and IP Tomography as promising tools to monitor remedial actions over a gas plume**. In: ANNUAL MEETING – SAGEEP – SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 18, 2005, Atlanta. Proceedings. Denver: 2005. p. 155-166. CD-ROM.

DECEUSTER, J.; KAUFMANN, O. **Geophysical investigations of an industrial waste landfill contaminated by LNAPL and DNAPL at Ransart, Belgium**. In: ANNUAL MEETING – SAGEEP – SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 19, 2006, Seattle. Proceedings. Denver: 2006. p. 1454-1463. CD-ROM.

DE MASI, D. **O futuro do trabalho: fadiga e ócio na sociedade pós-industrial.**

Rio de Janeiro: José Olympio; UnB: 1999.

DEHAINI, J. **GPR Aplicado a estudos de contaminação por hidrocarbonetos.**

In: SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 1, 2004, São Paulo. Rio de Janeiro: 2004. CD-ROM.

DOURADO, T. C. et al. **Experimentos controlados para detecção de hidrocarbonetos em sedimentos arenosos analisando a amplitude e a velocidade de propagação do pulso de radar (GPR – 1MHz).** In: SIMPÓSIO DE GPR, 1; SIMPÓSIO DE HIDROGEOFÍSICA, 1, 2004, Fortaleza. Anais eletrônicos. Fortaleza: 2004. CD-ROM.

ELIS, V. R. **Geofísica aplicada à caracterização de áreas de disposição de resíduos.** In: WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA À ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE, 3, 2003, São Paulo. Resumos. ABGE: São Paulo, 2003. p. 63-76.

EPELBAUM, M. **A influência da gestão ambiental na competitividade e no sucesso empresarial.** São Paulo, 2004, 190 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FERREIRA, A. B. H. **Mini Aurélio.** Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2001.

FILHO, W. M.; MOURA, H. P. **Emprego de métodos geofísicos na caracterização geoambiental do aterro controlado de Piracicaba/SP.** In:

INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY,
8. Anais eletrônicos. Rio de Janeiro: Technical Papers, SBFg, 2003. CD-ROM.

GANDOLFO, O. C. B. **Aplicações de GPR no Brasil**: Potencialidade e limitações a partir de casos estudados. In: WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA À ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE, 3, 2003, São Paulo. ABGE: São Paulo, 2003. p. 35-48.

GREENHOUSE, J.; GUDJURGIS, P. **Introduction to environmental and engineering geophysics**. In: ANNUAL MEETING – SAGEEP – SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 12, 1998, Chicago. Proceedings. Denver: 1998. CD-ROM.

HAWKEN, P.; LOVINS, A.; LOVINS, L. H. **Capitalismo natural**. São Paulo: Cultrix, 1999.

HEITZMANN, J. F. **A Geofísica como ferramenta em estudos ambientais**: uma visão do usuário. In: WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA À ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE, 3, 2003, São Paulo. ABGE: São Paulo, 2003. p.77-86.

HOUAISS, A. Dicionário da língua portuguesa. Disponível em:

<<http://houaiss.uol.com.br/busca.jhtm?verbete=METODO>>. Acesso em: 11 ago. 2005.

LISBOA, M. V. **Em busca de uma política externa brasileira de meio ambiente.**

São Paulo em Perspectiva. São Paulo, v.16, n.2. Fundação SEADE. 13 p, 2002.

MACEDO, R. K; BEAUMORD, A. C. **A prática da avaliação e da gestão de impactos ambientais.** São Paulo: ABGA, 2000.

MANACORDA, Guido. **IDS radar products for utilities mapping and ground classification.** In: INTERNATIONAL NO-DIG CONFERENCE AND EXHIBITION, 20, 2002, Dinamarca. Anais eletrônicos: 2002.

MICKLE, R. J., ENDRES, A. L., ATEKWANA, E. A. **A coupled hydrogeological-petrophysical analysis of geophysical variations in the vadose zone.** In: ANNUAL MEETING – SAGEEP – SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 19, 2006, Seattle. Proceedings. Denver: 2006. p. 1524-1531. CD-ROM.

MORAES, E.; GRAZINOLI, P. **Prospecção do contaminante (BHC) através da Eletrorresistividade.** In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7, 2001, Salvador. Rio de Janeiro: SBFg. 2001. p. 278-284. CD-ROM.

MOREIRA, C. A. **Análise temporal e especial de pluma de contaminação por meio de métodos geofísicos.** Rio Claro, 2003a. 107 p. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Geologia). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

MOREIRA, C. A. **Aplicação do método eletromagnético transiente em área contaminada sob atenuação natural**. Rio Claro, 2005b. 161 p. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

PARRY, D. G. **A multi-method near-surface geophysical study on the Nose Hill Upland**, 1996, 82 p. Tese (Mestrado em Ciências). Department of Geology and Geophysics, Universe of Calgary.

PALMA, C. M. et al. **Uso da Geofísica de superfície e de poço na delimitação de plumas de contaminantes**: estudo de caso. In: SIMPÓSIO DE GPR/I SIMPÓSIO DE HIDROGEOFÍSICA, 1, 2004, Fortaleza. Fortaleza: 2004. CD-ROM.

PEDROSA, T. R. M. A. M.; CASTRO, D. L.; BRANCO, R. M. G. C.

Caracterização de plumas de hidrocarbonetos em postos de abastecimento em Fortaleza, usando o método eletromagnético radar de Penetração do Solo (GPR). In: SIMPÓSIO DE GPR/I SIMPÓSIO DE HIDROGEOFÍSICA, 1, 2004, Fortaleza. Fortaleza: 2004. CD-ROM.

PETTERSSON, J. P.; NOBES, D. C. **Environmental geophysics at Scott Base**: ground penetrating radar and electromagnetic induction as tools for mapping contaminated ground at Antarctic research bases. *Cold regions science and technology*, v. 37, p. 187-195, mar. 2003.

PORSANI, J. L. et al. **O sitio controlado de Geofísica rasa do IAG-USP.**

Instalações e resultados preliminares. In: SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 1, 2004, São Paulo. Rio de Janeiro: 2004. CD-ROM.

PUJARI, P. R., NANOTI, M.V. **Integrated resistivity imaging and GPR studies to asses groundwater pollution near landfill site, Nagpur-India.** In: ANNUAL MEETING – SAGEEP – SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 19, 2006, Seattle. Proceedings. Denver: 2006. p. 1441-1453. CD-ROM.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics.** New York: John Wiley, 1997.

RODRIGUES, S. I. et al. **Emprego do GPR no mapeamento de tambores plásticos enterrados no SCGR do IAG.** In: SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 1, 2004, São Paulo. Rio de Janeiro: 2004. CD-ROM.

ROMANO, D. de S. **Geofísica aplicada à investigação de áreas industriais e urbanas com problemas ambientais:** estudo de casos. São Paulo, 2002. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

SANSONOWSKI, R. C., REMACRE, A. Z. **Integrando informações de GPR: modelagem geoestatística e de fluxo e transporte de massa em estudo de caso ambiental.** In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8, 2003, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SBGf. 2003. CD-ROM.

SAUCK, W. A.; ATEKWANA, E. A.; NASH, M. S. **High conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques.** Journal of Environmental and Engineering Geophysics, v. 2, n. 3, p. 203-212, jan. 1998.

SAUCK, William A. **A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments.** Journal of applied Geophysics, v. 44, p. 151-165, maio 1999.

SAUERBRONN, J. L. B. **Aplicação de ferramentas Geofísicas no diagnóstico ambiental de áreas impactadas.** In: WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA À ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE, 3., 2003, São Paulo. Resumos. São Paulo: ABGE, 2003. p. 87-92.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA. Disponível em:
<<http://www.sbgf.org.br>>. Acesso em: 02 mar. 2006.

SHARMA, P. V. **Environmental and engineering geophysics.** New York: Cambridge University Press, 1997.

SCHIANETZ, B. **Passivos ambientais: levantamento histórico: avaliação da periculosidade: ações de recuperação.** Curitiba: SENAI, 1999. 200 p.

SHERIFF, R. E. **Encyclopedic dictionary of exploration geophysics.** 3rd ed. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1991. (Geophysical references series: 1).

SHEVNIN, V. et al. **Study of Petroleum Contaminated sites in Mexico with Resistivity and EM Methods.** In: ANNUAL MEETING – SAGEEP – SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 18, 2005, Atlanta. Proceedings. Denver: 2005. p. 167-176. CD-ROM.

SILVA, J. A. F. da. **Sistematização e avaliação de técnicas de investigação aplicadas à caracterização e diagnóstico de área contaminada por hidrocarbonetos de petróleo.** 2002. 138 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e meio Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

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

VOGELSANG, D. **Environmental geophysics: a practical guide.** New York: Springer-Verlag, 1995.

WERKEMA JR., D. D. et al. **Vertical distribution of microbial abundances and apparent resistivity at an LNAPL spill site.** In: ANNUAL MEETING – SAGEEP – SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 14, 2005, Denver. Proceedings. Denver: 2000. p. 597-608. CD-ROM.

WERKEMA JR., D. D., ATEKWANA, E. A., ATEKWANA, E. A. **Conductivity profile rate of change from field and laboratory data within biodegrading petroleum hydrocarbon.** In: ANNUAL MEETING – SAGEEP – SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 19, 2006, Seattle. Proceedings. Denver: 2006. p. 1607-1614. CD-ROM.

APÊNDICE A – Referências de apoio

ATEKWANA, E. A.; SAUCK, W. A.; WERKEMA JR., D. D. **Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site.** Journal of applied Geophysics, v. 44, p. 167-180, maio, 1999.

AMARAL, J. A. G. do; BARROS, A. M. A. de. **Políticas ambientais nas empresas brasileiras:** análise de conteúdo. Em pauta: Revista Escola de Minas. Minas Gerais, v. 55, n. 3, 2002.

ANDRADE, R. O. B; TACHIZAWA, T.; CARVALHO, A. B de. **Gestão ambiental:** enfoque estratégico aplicado ao desenvolvimento sustentável. São Paulo: Makron Books, 2000.

BABU, S.; CHAKRALA, P. C.; ANWAR, M. **Resistivity investigation for mapping polluted areas in and around Hyderabad, India.** In: ANNUAL MEETING – SAGEEP – SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 18, 2005, Atlanta. Proceedings. Denver: 2005. p. 177-189. CD-ROM.

BANERJEE, S. B.; IYER, E. S.; KASHYAP, R. K. **Corporate environmentalism:** antecedents and influence in industry type. Journal of marketing, Chicago, v. 67, n. 2, 2003.

CHAMBERS, J. E. et Al. **Noninvasive monitoring of DNAPL migration through a saturated porous medium using electrical impedance tomography.** Journal of contaminant Hydrology, v. 68, p. 1-22, 2004.

FOWLER, C. M. R. **The solid Earth:** an introduction to global geophysics. New York: Cambridge University Press, 1990.

FRANK, P.; SIEVER, R. **Understanding Earth.** 3rd ed. New York: W.H. Freeman, 2001.

GRIFFITHS, D. H. **Applied geophysics for geologists and engineers:** the elements of geophysical prospecting. 2nd ed. New York: Pergamon Press, 1965.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica.** 5 ed. São Paulo: Atlas, 2003.

OLHOEFT, G. R. **Applications and frustration in using ground penetrating radar.** In: ULTRA WIDEBAND CONFERENCE, 1999, Washington. Proceedings. Washington: 1999. CD-ROM.

OLHOEFT, Garry R. **Ground penetrating radar:** use and misuse. In: SPIE SUBSURFACE SENSORS AND SOFTWARE AND APPLICATIONS CONFERENCE, 1999. Abstracts. 1999. p. 166-173.

TEIXEIRA, W. et al. (Comp.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2001.

ANEXO A – Artigo apresentado em evento

CONTAMINATED SITE MAPPING USING GPR AND ELECTRICAL RESISTIVITY IN BRAZIL

Debora Silveira Carvalho, IDS Radar, Brazil

Roberto Okabe, IDS Radar, Brazil

Abstract

We will present our experience on a contaminated site mapping, using GPR and Electrical Resistivity geophysical methods at a Brazilian site. A multifrequency GPR equipment was used and all the geophysical, geological and borehole information were integrated to determine the next steps for investigations and site remediation.

The area presented hydrocarbon contamination with LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquids) substances on a fuel supply and maintenance areas of train engines and vehicles, over operating railroads.

The geophysical results reach around 20 meters deep. Groundwater percolation might help to spread the contamination product through the depth.

Hydrocarbon contaminated sites usually give low resistivity anomalies and attenuation of electromagnetic signal and the integrated characterization by these methods allow us to delimitate contamination plume and suggest the best spots for future direct investigations.

Introduction

On fuel supply and maintenance areas for trains engines on operating railroads, contaminations by LNAPL substances – Light Non Aqueous Phase Liquids – are common. Those areas are usually undeveloped at Brazilian sites (Gallas et. al., 2005). Most of the companies are worried about the environment and many of these contaminated sites are being investigated for working on remediation plans.

At this stage we present one case where all the available information helped to integrate the geophysical mapping using GPR and Electrical Resistivity methods.

Some borehole information, aerial photographs, geological regional map and structures and a field description were given as previous information for planning the Geophysical investigation.

Acquisition data took place over a fuel supply and maintenance area for trains engines. Fuel activities could possibly be the source of contamination by hydrocarbon substances. Groundwater flow might have helped to spread these substances on a very porous layer mapped with Geophysical methods.

Background setting and regional characterization

Geological information allowed the technical crew to observe that regional faults and structures are present over the area on NE-SW direction. Some lineated trends are observed on the aerial photographs and geological maps. A latosol red-yellowish is present over the investigated area (Teixeira, Toledo and Fairchild, org., 2001). This type of soil usually presents high porosity, where water can easily flow.

The borehole information shows underground conditions. Hydrocarbon presence was observed on drills over groundwater level. The area presents a granitic bedrock overlaid by clayey sands. The groundwater level (GWL) was between 3.6 to 8.0 meters. Two layers were identified: the topsoil layer, formed by some mixture of clay and sands, with bigger or smaller fragments of original bedrock, but in a very low stage of geological weathering. A second one, formed by clayey sand very porous with water and LNAPL substances, that might be contamination or not, depending on its concentrations and quantity on subsoil.

Boreholes PM – 05 and PM – 06 showed presence of LNAPL's around 8.0 meters deep. This information could help to integrate all the geophysical and geological information, to delimitate the next step for site investigation and remediation.

These two layers presented variations on their thickness, depending on how close they were to the river. It is located around 40 meters from the end of the fuel supply ground pavement (made of a concrete layer) on S-W direction. Two Vertical Electrical Soundings (VES) were made to determine the presence and thickness of those layers and the presence of groundwater.

Geophysical investigations and results

As a cost-effective kind of investigation, a geophysical research was held using a multifrequency GPR, Electrical Resistivity and VES to detect the hydrocarbon impacted area.

The GPR equipment used was a RIS 2K from IDS Italy, with 200 and 600 MHz antennas. Results are shown in different levels, generated by average values in blocks of 0.6 meters, from ground level to 3.6 meters deep. Investigation lines were positioned every 2 meter. Some anomalies could be detected under the fuel supply soil pavement.

Electrical Resistivity was done using Dipole-Dipole field array, with 3 and 8 meters dipole size. Two VES were done to help understand the geological information given previously to the geophysical investigation (geological layers and water presence on soil pores).

The most important GPR anomaly was mapped from surface through 3.0 meters deep and it is an attenuation anomaly, presented in blue in Figure 1, an electromagnetic tomography.

Electrical Resistivity reached around 20 meters deep and interpretations allowed the delimitation of three different layers, divided by their apparent resistivity values. The first layer has very low apparent resistivity values (ranging from 5 to 40 ohm.m). Some parts might have water in their pores. As an LNAPL contamination this layer is a favorite target for directing the boreholes for confirming presence of these substances. This is the most significant layer since this is an environmental research.

The second layer presents higher apparent resistivity values, ranging from 40 to 400 ohm.m and it is representative of a clayey sand material. These values are not significant for contamination substances.

The third layer is the bedrock or at least a less weathered bedrock or a clayey sand material, with apparent resistivity values in a range between 40 and 600 ohm.m. At the SE portion of the investigated area, weathered bedrock apparent resistivity values can be seen.

Integrating all geophysical, geological and borehole information it is possible to determine that bedrock is very deep and irregular at the site. Some blocks/boulders are present between the bedrock and topsoil.

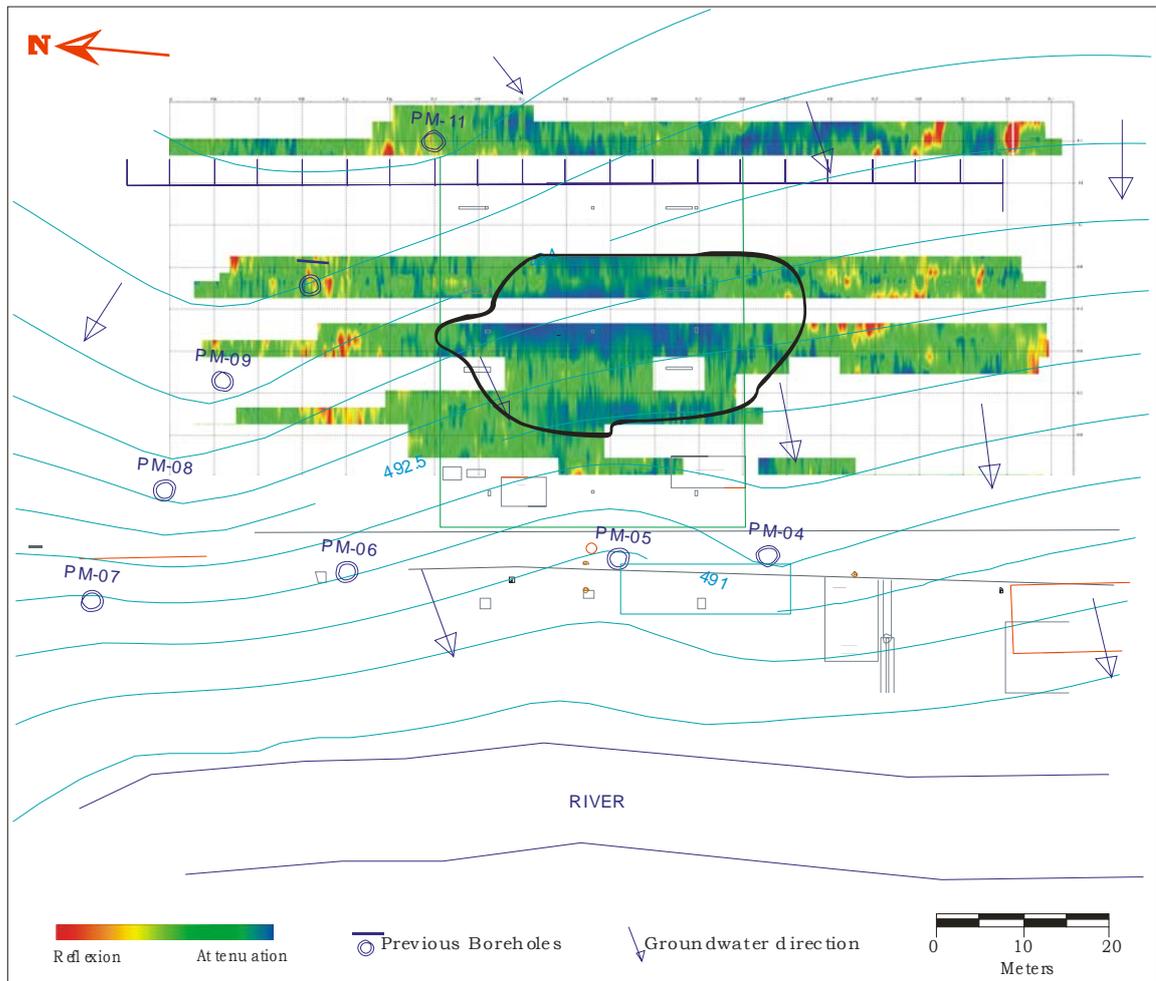


Figure 1: Electromagnetic tomography with a main anomaly under the fuel supply soil coverage.

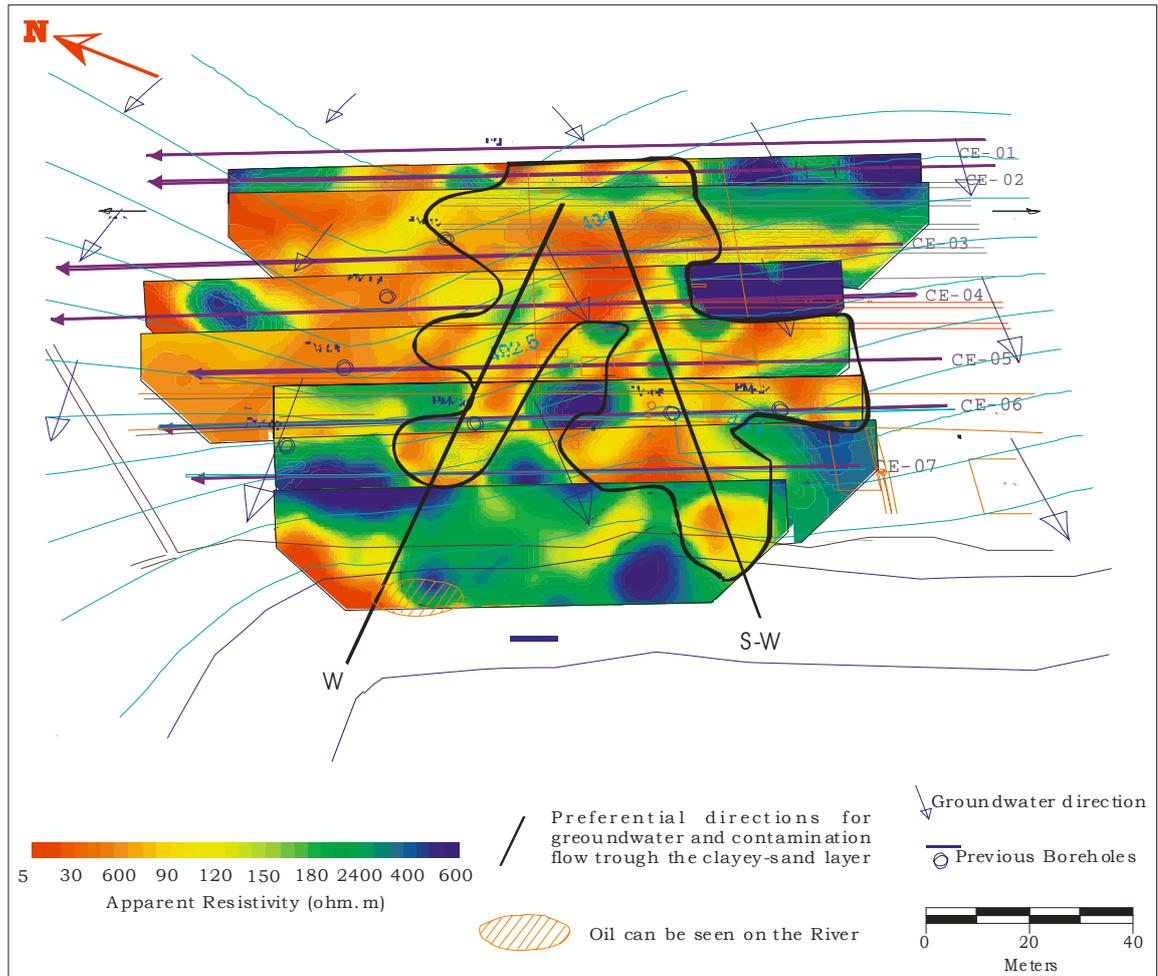


Figure 2: Electrical Resistivity tomographies with a main anomaly that determine the contamination flowing direction.

At N-W portion of investigated area, some low apparent resistivity values can be found. Previous to this investigation, some boreholes were located at this portion (PM – 07 to PM – 11). There are no evidences of contamination at this side at fuel supply area.

The groundwater level (GWL) was verified by two VES (Vertical Electrical Soundings) and it is about 3.6 meters deep at the E portion and around 8.0 meters at W side of the fuel supply pavement. Figure 3 shows two VES done at this investigation.

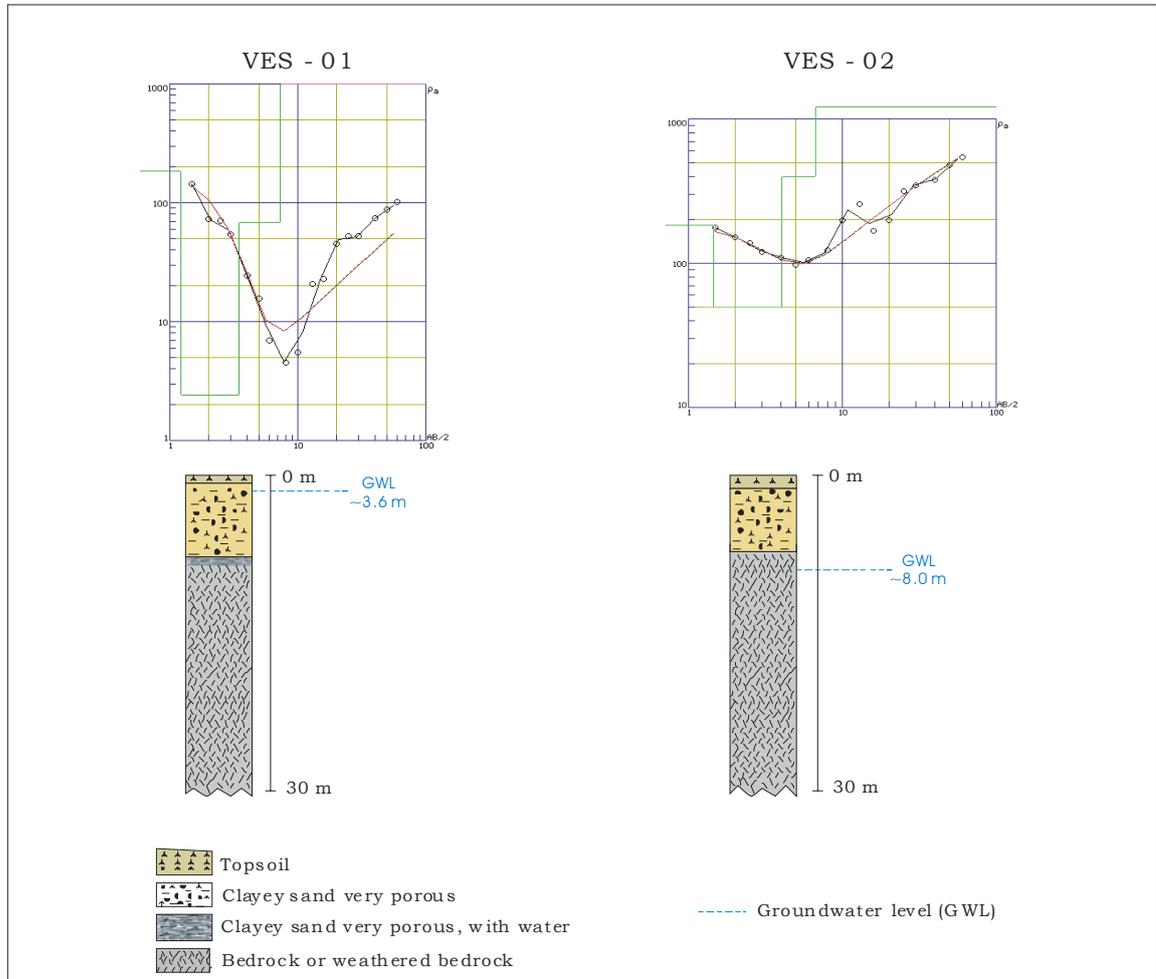


Figure 3: Geological layers inferred, for the VES results obtained.

The source of contamination was attributed to the main anomaly – where the electromagnetic attenuation is higher – mapped with GPR, just below the fuel supply concrete pavement.

For continuing the environmental problem solution, ten points of borehole investigation are suggested for confirming the presence of contamination by hydrocarbons, as shown in Figure 4. After having the borehole information a remediation plan can be done.

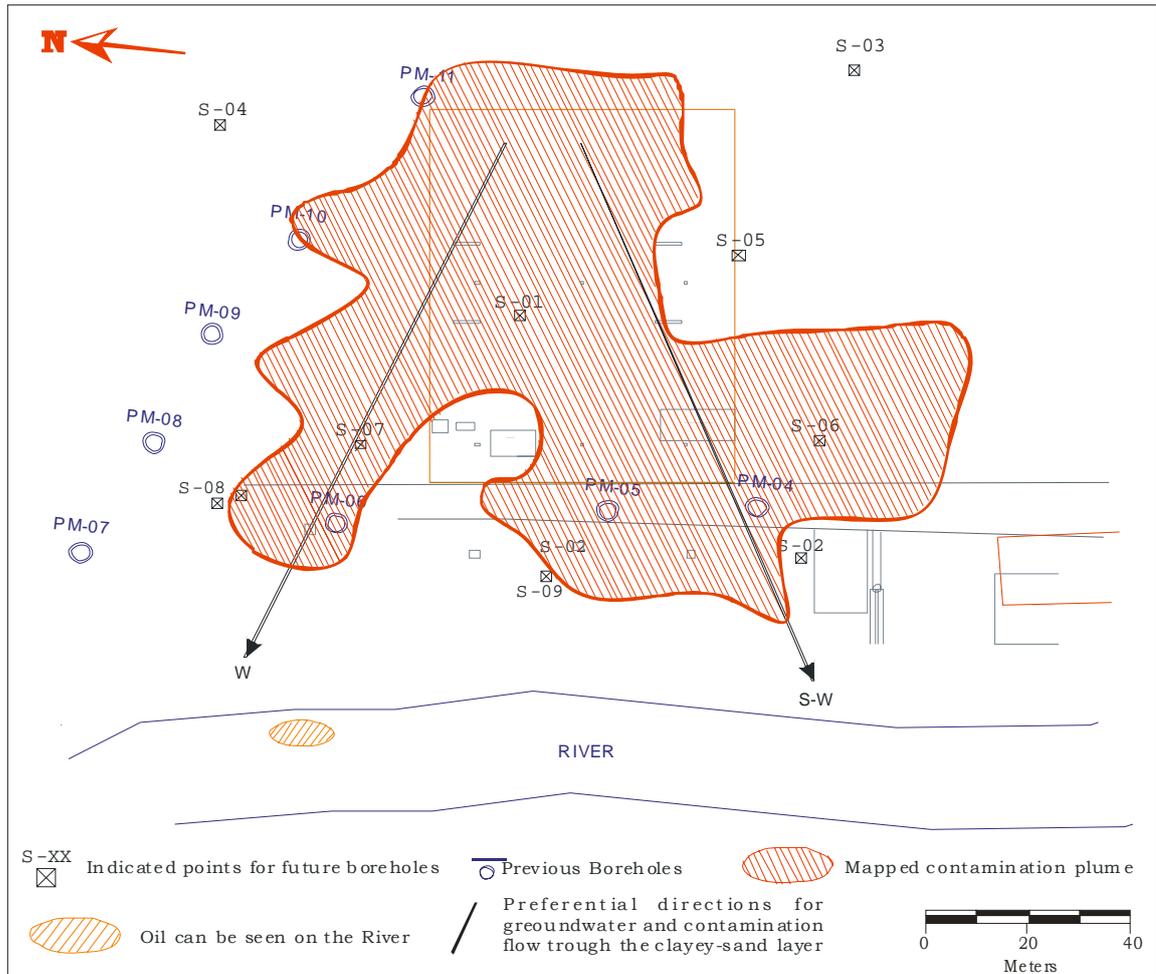


Figure 4: Contamination plume mapped over the fuel supply pavement area and the future boreholes indicated for contamination presence detection.

References

- Balia et al., 2003, Geophysical approach to the environment study of a coastal plain, *Geophysics*, **68**, No.5, 1446-1459.
- Daniels, J. J., Roberts, R. and Vendl, M., 1995, Ground Penetrating Radar for detection of liquid contaminants, *Journal of Applied Geophysics*, **33**, No. 1-3, 195-207.
- Deceuster, J. Chaballe, M. and Kaufmann, O. 2005. 3D Resistivity and IP tomography as efficient tools to monitor remedial actions over a gas plume, 2005, in **Proceedings of the Symposium on the Applications of Geophysics to Engineering and Environmental Problems**, 155-166.
- Gallas, J.D.F. et al., 2005, Contaminação por choro e sua detecção por resistividade. *RBGF-Revista Brasileira de Geofísica*, **23**, No. 1, 51- 59.
- Shevvin et al., 2005, Study of petroleum contaminated sites in Mexico with resistivity na EM methods, in **Proceedings of the Symposium on the Applications of Geophysics to Engineering and Environmental Problems**, 167-176.
- Teixeira, W., Toledo, M. C. M. de and Fairchild, T., organizers, 2001, **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos.

Acknowledgements

Authors wish to thank the geophysical work team in our company, composed by Georgia Castro and Renato Moraes, geophysicists, for the help on geophysical data acquisition and interpretation. Also thank Marcelo Alarsa, geologist, for the help with the borehole information understanding and correlation with geophysical data.

Thank to IDS Radar for letting us spend our precious work time to write this paper and develop our skills as researchers.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)