

MÉTODOS DA GEOFÍSICA AMBIENTAL APLICADOS À INVESTIGAÇÃO DE CONTAMINAÇÃO SUBTERRÂNEA

ENVIRONMENTAL GEOPHYSICS METHODS APPLIED TO THE INVESTIGATION OF UNDERGROUND CONTAMINATION

WAGNER FRANÇA AQUINO

Programa de Pós-Graduação do ICTS da UNESP, wagnergpr@gmail.com

MÁRCIO CORRÊA DA SILVA

Geométodos Levantamentos Geofísicos Ltda, marcio@geometodos.com.br

DOUGLAS BASTIANON

Consultor Geofísico, dbastianon2003@yahoo.com.br

PAULO SÉRGIO TONELLO

Programa de Pós-Graduação do ICTS da UNESP, paulo.tonello@unesp.br

RESUMO ABSTRACT

O presente artigo apresenta os conceitos relativos à definição da Geofísica Ambiental e de seus campos de aplicação, se referenciando mais especificamente aos métodos geofísicos aplicados aos estudos de contaminação subterrânea. É apresentada a correlação da metodologia aqui discutida com os pressupostos do gerenciamento de áreas contaminadas da CETESB, além da indicação de norma nacional e de guias internacionais para orientação à aplicação da Geofísica em investigações ambientais, bem como uma breve descrição dos métodos geofísicos mais adequados. Também, é apresentada uma tabela dos diferentes tipos de contaminantes e suas propriedades físicas como os fatores mais decisivos para a seleção dos métodos geofísicos aplicáveis. Ao final, são apresentados casos reais de contaminação de solo e água subterrânea onde todos os métodos geofísicos aqui descritos foram aplicados com êxito no diagnóstico ambiental do local impactado.

Palavras-chave: Geofísica Ambiental, métodos geofísicos, contaminação subterrânea.

This article presents the concepts related to the definition of Environmental Geophysics and its applications, referring more specifically to the geophysical methods applied to studies of underground contamination. The relationship of the methodology discussed here with the assumptions of contaminated areas management of CETESB is presented, as well as the national norm and the international guides for application of Geophysics in environmental investigations, in addition to a brief description of the most appropriate geophysical methods. Also, a table of the different contaminants and their physical properties is presented as the most decisive factors for the selection of the applicable geophysical methods. At the end, real cases of soil and groundwater contamination are presented where all the geophysical methods described here were successfully applied in the environmental diagnosis of the impacted site.

Keywords: Environmental Geophysics, geophysical methods, underground contamination.

1 INTRODUÇÃO

Práticas como a infiltração de efluentes industriais ou descarte inadequado de resíduos sólidos foram comumente adotadas, principalmente, entre as décadas de 1970 e 1990, tanto de forma intencional sem o conhecimento dos órgãos públicos responsáveis pela fiscalização e controle ambiental, bem como aliadas aos conceitos equivocados de absorção e depuração em subsuperfície (Aquino, 2000), e cujas consequências à qualidade dos solos e das águas subterrâneas são constadas até os dias de hoje em alguns casos.

Além dessas ações nocivas ao meio ambiente, devem ser citados também os passivos ambientais estabelecidos após a desativação de algumas plantas industriais e que, além dos riscos que podem representar à saúde humana e outros bens a proteger, demandam elevados recursos a serem despendidos na sua remediação, principalmente, nas zonas urbanas das grandes metrópoles, onde é crescente a necessidade de reuso do solo para diferentes fins (Habermann & Gouveia, 2014).

Muitas dessas situações geraram as denominadas “Áreas Contaminadas (AC)”, as quais são definidas pela Lei n. 13.577, de 2009, como “*área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de matéria em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger*”, e que somente no estado de São Paulo atingiram, no ano de 2019, o número de 6.285 casos que estão em diferentes fases de diagnóstico e remediação (CETESB, 2019).

Portanto, do ponto de vista legal, a degradação da qualidade dos solos e da água subterrânea ocasionados em uma área contaminada se constitui, além de uma questão ambiental, também de saúde pública, sendo que seus efeitos devem ser investigados com intuito de se avaliar a extensão e os impactos causados.

Neste sentido, a aplicação da metodologia geofísica pode contribuir para definição da abrangência da contaminação subterrânea em áreas suspeitas ou comprovadamente contaminadas, sendo que os levantamentos geofísicos periódicos, muitas vezes, são a única de forma de estabelecer o monitoramento da contaminação em áreas industriais desativadas ou abandonadas e onde a

figura do agente poluidor, que seria responsável pelo diagnóstico e remediação, pode não ser encontrada (Aquino, 2000).

Assim, a aplicação dos métodos geofísicos consiste, fundamentalmente, na investigação das condições locais, tanto em relação à determinação da contaminação existente, como dos possíveis processos dinâmicos de migração do contaminante através do meio geológico, contribuindo para um melhor conhecimento dos impactos ambientais causados, além de fornecer informações fundamentais que podem ser úteis na avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos.

A metodologia geofísica aplicada aos estudos de contaminação subterrânea é classificada como métodos de *screening* no Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB (2001), isto é, métodos preliminares de rastreamento para detectar contaminantes presentes em subsuperfície, podendo ser aplicada nas diferentes fases de um gerenciamento ambiental: investigação preliminar, investigação confirmatória, investigação detalhada e remediação.

Portanto, as informações obtidas a partir dos levantamentos geofísicos são úteis para a locação dos poços de monitoramento, como também podem fornecer estimativas de área e volume para as atividades de remoção e remediação de solos contaminados, além de reduzir o risco de perfuração de tanques e tambores enterrados contendo resíduos, ou para mapeamento de dutos e galerias subterrâneas (cadastramento de interferências) em locais contaminados.

Para orientação e definição de critérios de aplicação, foi publicada em 2011 a Norma ABNT n° 15.935 (2011) e que versa sobre a seleção e aplicação ambiental de forma bem abrangente dos métodos geofísicos de superfície e de poço(s) para a caracterização geológica e hidrogeológica do meio físico, detecção e/ou delimitação de contaminantes, detecção de resíduos, de objetos enterrados e de cavas e delimitação de aterros e lixões.

Destaca-se também, como referência aos estudos de contaminação subterrânea, o conteúdo apresentado na norma D 6429-99 de 2006 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), dos Estados Unidos, que orienta de maneira pormenorizada a seleção e a utilização de métodos geofísicos de superfície aplicados em investigações geológicas, geotécni-

cas, hidrológicas e ambientais, além do Guia da *Environmental Protection Agency* – EPA (1993) que descreve detalhadamente os métodos geofísicos de aerolevantamentos, de superfície e de poços aplicadas aos locais contaminados.

Portanto, diante da grande variedade de métodos e das diversas aplicações que a Geofísica possui, este artigo visa apresentar as conceituações e quais os métodos geofísicos mais efetivos, em particular do grupo da Geofísica Ambiental, em correspondência com os tipos de contaminantes mais comumente encontrados nas áreas suspeitas ou contaminadas, além de exemplos de situações reais onde foram realizados levantamentos para avaliação da contaminação subterrânea por diferentes fontes.

2 CAMPOS DE ATUAÇÃO DA GEOFÍSICA AMBIENTAL

Segundo Reynolds (2011), a Geofísica Aplicada é definida como sendo a área da Geofísica que investiga os recursos minerais ou estruturas geológicas, relativamente pequenas e pouco profundas que possam estar presentes na crosta terrestre, como por exemplo a identificação de domos salinos, jazidas minerais, falhas e contatos geológicos, e que podem ter interesse nas aplicações de prospecção de petróleo, de localização de aquíferos, de exploração mineral e de engenharia civil, entre outras. Dentro do campo de atuação da Geofísica Aplicada, Reynolds distingue a Geofísica de Exploração, em função de seus objetivos econômicos referentes à busca por recursos minerais, de outros dois grupos maiores que são a Geofísica de Engenharia e a Geofísica Ambiental, além de indicar seis subáreas distintas com utilizações mais específicas, a saber, Agrogeofísica, Arqueogeofísica, Biogeofísica, Geofísica Forense, Glaciogeofísica e Hidrogeofísica.

Conceitualmente, denomina-se de Geofísica Ambiental a área de aplicação da Geofísica voltada à avaliação dos efeitos danosos causados ao meio físico pela ação de determinados agentes em subsuperfície, sendo que Greenhouse (1991) e Steeples (1991) a definem como a aplicação dos

métodos geofísicos para investigações de fenômenos bio-físico-químicos rasos e que têm implicações no gerenciamento ambiental de um local. Alguns pesquisadores creditam o emprego da Geofísica Ambiental tão somente aos estudos de contaminação subterrânea, porém, esses autores, coerentemente, estabelecem os dois grandes campos de aplicação dos métodos geofísicos direcionados aos estudos de problemas ambientais:

- I. um primeiro grupo se refere ao diagnóstico dos impactos causados ao meio físico em eventos de degradação, tais como avaliação de processos erosivos e assoreamentos de corpos d'água, entre outros;
- II. um segundo grupo é aquele mais voltado, particularmente, à investigação de passivos ambientais provocados por contaminação subterrânea.

Quanto ao primeiro grupo de aplicação da Geofísica Ambiental, os levantamentos geofísicos podem ser implementados tanto sobre o solo, como sobre a água superficial, para avaliação dos efeitos da degradação que esses meios podem sofrer a partir dos eventos causadores.

Em relação ao segundo grupo, objeto deste trabalho, sua aplicação ambiental está direcionada à detecção de presença e mapeamento da contaminação em subsuperfície, com foco, portanto, na investigação da existência de contaminantes no solo e nas águas subterrâneas, podendo os métodos geofísicos também fornecer informações importantes quanto às feições geológicas e hidrogeológicas dos locais afetados.

Neste contexto, verifica-se, portanto, que a distinção desses dois grandes campos de aplicação da Geofísica Ambiental implica na sua utilização tanto para a avaliação dos impactos em locais que podem se constituir em áreas degradadas (AD), bem como para contribuir ao diagnóstico dos passivos ambientais das áreas contaminadas (AC).

A partir dos conceitos descritos anteriormente, é possível subdividir os campos da Geofísica conforme a Figura 1, com ênfase aos objetivos principais da Geofísica Ambiental, que é o tema deste artigo.

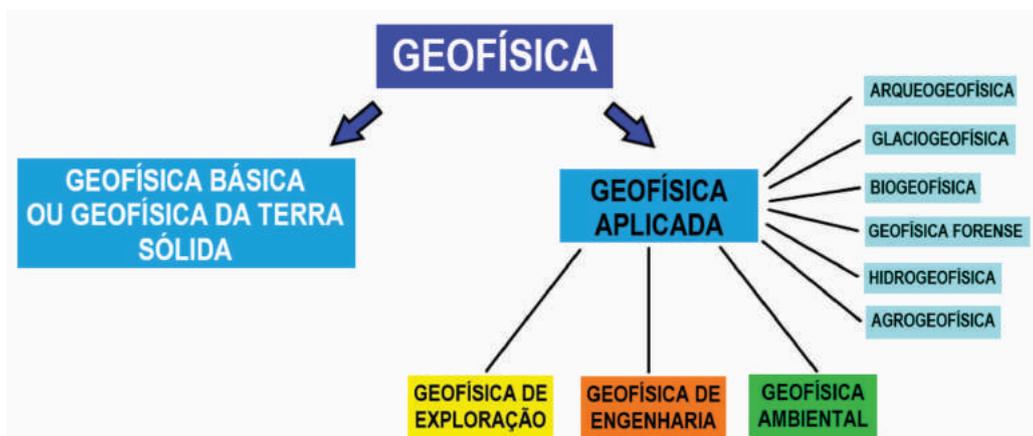


Figura 1. Subdivisões dos campos de atuação da Geofísica Aplicada e Ambiental.

Fonte: modificado de Reynolds, 2011.

3 MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS À CONTAMINAÇÃO SUBTERRÂNEA

Ao se comparar o emprego os métodos geofísicos ao dos métodos diretos de investigação de subsuperfície, como sondagens mecânicas por exemplo, uma das principais vantagens da aplicação geofísica é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor, além de propiciar a execução de perfis contínuos, possibilitando identificar com maior precisão as variações laterais por mudanças litológicas ou originadas pela presença da contaminação subterrânea (Greenhouse, 1996). Quanto à avaliação da presença da contaminação em profundidade, a utilização dos métodos geofísicos está voltada, especificamente, à localização de valas contendo resíduos, investigação da contaminação disseminada no solo e nas águas subterrâneas, detecção de tanques e tanques enterrados, e determinação de vazamentos a partir de tanques ou dutos (CETESB, 2001).

Referente às medições geofísicas, os desvios significantes do padrão normal das medidas constituem as anomalias e, do ponto de vista ambiental, podem apontar a presença de contaminantes em subsuperfície, sendo que a interpretação das anomalias geofísicas é de fundamental importância na investigação de áreas contaminadas, uma vez que suas intensidades possuem uma relação direta com as concentrações da contaminação, além de serem úteis na orientação dos trabalhos subsequentes para monitoramento da propaga-

ção subterrânea e recuperação do local afetado (Gretsky et al. 1990).

Em artigo publicado em 2019 por Aquino et al., esses autores descrevem as aplicações, as potencialidades e as limitações dos métodos geofísicos para diagnóstico das áreas contaminadas de forma pormenorizada, onde consideram que os principais e mais adequados métodos empregados na investigação da contaminação do solo e da água subterrânea são o GPR (ou Geo-radar), o Eletromagnético (EM), a Eletrorresistividade (ER) e a Resistividade Capacitiva (RC), além do Método Magnético (Magnetometria), por estes possuírem a capacidade de detecção da presença da contaminação subterrânea, cujos fundamentos básicos são descritos a seguir.

3.1 Método GPR

O GPR (*Ground Penetrating Radar*), ou Geo-radar, é um método geofísico eletromagnético que fornece seções contínuas dos perfis executados, imageando as feições em subsuperfície. O equipamento transmite para o subsolo, através de uma antena, pulsos de ondas de rádio de alta frequência (entre 10 MHz e 2.500 MHz). Na sequência, quando o sinal transmitido em profundidade atinge corpos ou estratos com diferentes permissividades dielétricas (ϵ), ou constantes dielétricas (K), parte da onda reflete nesses objetos ou interfaces, enquanto outra parte se propaga até a próxima descontinuidade. A onda eletromagnética refletida é captada por uma antena receptora,

sendo o sinal amplificado, digitalizado e armazenado para posterior processamento. Referente ao resultado que o método GPR fornece, o produto final da aquisição de campo é uma seção contínua (distância percorrida x profundidade), formada por uma série de sinais obtidos em cada ponto de amostragem (traços), que representa uma imagem de alta resolução da porção investigada do subsolo, sendo que através destas seções é possível identificar configurações representativas de feições geológicas, hidrogeológicas e ambientais presentes, e de outras estruturas em subsuperfície (Davis & Annan 1989).

3.2 Método Eletromagnético (EM)

O método Eletromagnético (EM) se baseia na indução, sem contato com o terreno, de um campo eletromagnético primário (H_p) para subsuperfície, através de uma bobina transmissora, e na geração de um campo eletromagnético secundário (H_s) em profundidade, que é detectado numa bobina receptora sobre o terreno. A propriedade física medida é a condutividade elétrica do meio e esta é proporcional à relação entre o campo primário emitido e o campo secundário captado, sendo lida diretamente em equipamentos denominados condutivímetros em unidades de miliSiemens por metro, sendo seus resultados expressos através de perfis (distância percorrida x medidas) ou por meio de mapas de valores interpolados. Quanto à profundidade de investigação, esta depende da frequência de emissão do campo eletromagnéticos, bem como da distância de separação entre o transmissor e o receptor (Aquino, 2000)

3.3 Método de Eletrorresistividade (ER)

Na execução do método de Eletrorresistividade (ER), quando uma corrente elétrica é injetada no solo por meio de um par de eletrodos cravados no terreno, os padrões de fluxo subsuperficial de corrente refletem a resistividade dos materiais em profundidade, sendo mapeados na superfície através de outro par de eletrodos que medem as variações de potencial elétrico. Desta maneira, quando a corrente elétrica atravessa um corpo de baixa resistividade elétrica ou de alta resisti-

vidade, o potencial elétrico diminui ou aumenta, respectivamente, sendo que este comportamento reflete a resistividade elétrica do meio e pode ser calculada em unidades de ohm por metro. Uma das técnicas mais utilizadas nas investigações ambientais é o Caminhamento Elétrico (CE), também nomeada mais recentemente por Tomografia de Resistividade Elétrica (TRE), a qual proporciona uma investigação das variações laterais da resistividade elétrica em determinados níveis de profundidade de investigação, gerando seções de subsuperfície onde são apresentados os valores interpolados das resistividades elétricas medidas (pseudo-seções), possibilitando a confecção de modelos geofísicos (Braga, 2006).

3.4 Método de Resistividade Capacitiva (RC)

O método de Resistividade Capacitiva (RC) é um método geofísico de aquisição de dados de resistividade elétrica diferente do método tradicional de Eletrorresistividade (ER) e vem sendo empregado em ambientes urbanos e outros locais onde o contato galvânico não pode ser efetuado ou onde altas impedâncias resultam em má qualidade dos obtidos. Esse método se baseia no conceito de acoplamento capacitivo entre o sensor e o terreno, sendo a injeção de corrente elétrica efetuada através de um cabo coaxial contendo um transmissor de corrente elétrica alternada em contato com a superfície, sincronizado a um ou mais receptores de tensão elétrica, formando, portanto, um sistema capacitivo e que atua numa faixa de frequência do método *Very Low Frequency* (VLF), de 10 a 18 kHz. Para os levantamentos de campo, utiliza-se a técnica de Imageamento de Resistividade Capacitiva (IRC) ou Caminhamento Elétrico Capacitivo (CEC), cujos pressupostos teóricos correspondem ao arranjo polo-polo da Eletrorresistividade convencional, sendo seus resultados apresentados na forma de pseudo-seções de resistividade elétrica (Kuras, 2002).

3.5 Método Magnético (Magnetometria)

O método Magnético, ou Magnetometria, quando aplicado nas investigações ambientais tem por objetivo medir altos e baixos anômalos que

tambores, tanques ou resíduos metálicos ferrosos enterrados possam gerar no campo geomagnético natural, cuja unidade de medida é nanoTesla (nT). A propriedade física envolvida neste método é a suscetibilidade magnética que é uma medida da capacidade de um material ser magnetizado, sendo que em áreas de disposição de rejeitos, o ferro e o aço são as principais fontes de anomalias por possuírem alta suscetibilidade magnética, contrastando fortemente com os materiais geológicos encaixantes, que geralmente são não magnéticos. Neste contexto, o método Magnético é classificado como sendo um método geofísico passivo, pois não necessita de uma fonte artificial de sinal, diferentemente dos métodos apresentados anteriormente, uma vez que a alta suscetibilidade magnética dos materiais ferromagnéticos, por ser uma propriedade intrínseca, gera por si só um magnetismo anômalo no local onde se encontram. Os resultados deste tipo de levantamento podem ser apresentados sob a forma de gráficos individuais das linhas executadas ou através de mapas de anomalias magnéticas (Greenhouse, 1996).

4 TIPOS DE CONTAMINANTES E APLICABILIDADE DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS

Conforme apontado por Greenhouse (1996), o emprego de dois ou mais métodos geofísicos distintos numa determinada investigação aumenta a precisão das interpretações, minimizando as ambiguidades na interpretação dos resultados,

sendo que para este autor a natureza dos contaminantes e a geologia local, nesta ordem, são os fatores preponderantes na seleção das técnicas geofísicas a serem utilizadas.

Dentre estes fatores anteriormente mencionados, primeiramente, é fundamental associar o tipo de contaminante aos melhores métodos geofísicos a serem utilizados, uma vez que para a investigação ambiental de um determinado meio é necessário que haja correspondência entre a propriedade física da fonte de contaminação com a adequada metodologia a ser aplicada e, que, se refere, assim, a utilização de um método geofísico específico e que também possua a capacidade de detecção de variações em suas medições (Paranis, 1997).

Quanto ao papel do ambiente geológico no qual está localizado o contaminante influenciando a eficiência e aplicabilidade dos métodos geofísicos, não que este seja negligenciável, porém, à luz das tecnologias atuais, existem formas de contornar tal problema, como por exemplo, através da aplicação de outra metodologia que a inicialmente programada, da alteração de frequência de operação do equipamento geofísico, da mudança de técnica ou arranjo de levantamento de campo, entre outros.

Neste contexto, são apresentadas, a seguir, as descrições dos tipos mais comuns de contaminantes presentes em casos de contaminação subterrânea por diferentes fontes, sendo este o fator fundamental para correspondência com os métodos geofísicos mais adequados a serem aplicados.

Tabela 1. Contaminantes e métodos geofísicos aplicáveis.

Tipo de contaminante, propriedades físicas e fontes de contaminação	Métodos geofísicos aplicáveis
Resíduos ou objetos metálicos: - Alta suscetibilidade magnética e alta condutividade elétrica. Exemplos: tambores ou tanques metálicos, areia de fundição.	1. Eletromagnético; 2. Magnético; 3. GPR; 4. Resistividade Capacitiva (método alternativo).
Resíduos inorgânicos: - Alta condutividade elétrica, ou baixa resistividade. Exemplo: resíduos domésticos.	1. Eletromagnético; 2. GPR; 3. Resistividade Capacitiva; 4. Eletrorresistividade (método alternativo).
Pluma inorgânica (íons e sais dissolvidos na água subterrânea): - Alta condutividade elétrica, ou baixa resistividade elétrica. Exemplos: plumas de contaminação de lixões e de infiltração de efluentes industriais	1. Eletromagnético; 2. Eletrorresistividade; 3. Resistividade Capacitiva; 4. GPR (método alternativo).
Resíduos orgânicos e plumas orgânicas: - Baixa condutividade elétrica e pequena constante dielétrica. Observação: os métodos geofísicos só detectam os contaminantes orgânicos em altas concentrações em subsuperfície (fase livre, retida ou adsorvida), não sendo capazes de identificar a fase orgânica dissolvida na água subterrânea. Exemplo: pluma de fase livre de contaminação de combustível ou de solventes organoclorados	1. GPR; 2. Resistividade Capacitiva; 3. Eletrorresistividade (em condições muito especiais); 4. Eletromagnético (em condições muito especiais).
Rejeitos de mineração: - Alta condutividade elétrica e alta acidez. Exemplo: lixiviados ou lamas de extração de mineração de ferro.	1. Eletromagnético; 2. Resistividade Capacitiva (método alternativo); 3. Eletrorresistividade (método alternativo); 4. GPR (método alternativo).
Contaminação difusa na agricultura: - Alta condutividade elétrica (em geral). Exemplos: vinhaça, lodos de tratamento, fertilizantes ou efluentes.	1. Eletromagnético; 2. Resistividade Capacitiva; 3. Eletrorresistividade (método alternativo).
Necrochorume: - Baixa resistividade elétrica, ou alta condutividade. Exemplo: cemitérios.	Resistividade Capacitiva; Eletrorresistividade; Eletromagnético (método alternativo); GPR (método alternativo).
Lodo de estações de tratamento, lodo de esgoto ou material de dragagem: - Alta condutividade elétrica, ou baixa resistividade. Exemplo: áreas de disposição de ETE ou ETA.	Eletromagnético; Eletrorresistividade; Resistividade Capacitiva; GPR (método alternativo).

Fonte: modificado de Aquino *et al.*, 2019.

5 ESTUDOS DE CASOS

Na sequência, são apresentados casos reais de aplicação dos métodos geofísicos aqui descritos, que foram empregados pelos autores ao diagnóstico de contaminação subterrânea por diferentes fontes, e que tiveram êxito nas investigações dos passivos ambientais gerados. A importância dos exemplos a seguir se refere às diferentes formas que os contaminantes subterrâneos produzem nos resultados dos métodos aplicados, constituindo, portanto, suas assinaturas geofísicas.

5.2 Investigação de resíduos ou objetos metálicos enterrados

O primeiro caso reportado exemplifica o emprego do método GPR para a localização de tanques de armazenamento subterrâneo de combustíveis (TASC) em posto de serviço. Para aquisição de dados, foi utilizado o equipamento modelo Ramac/GPR, fabricado pela Malã Geoscience, empregando-se a antena blindada de 250 MHz de frequência e executando-se linhas em formato de malha (*grid*), com espaçamento de 2,0 m de dis-

tância entre os perfis de campo e amostragem a cada 20 cm. Nesta investigação, foram localizados seis tanques subterrâneos de combustíveis no total, sendo que na Figura 2a é possível se observar a presença de quatro desses, representados na seção A pelas suas hipérbolas de difração em profundidades por volta de 1,40 m.

Como resultado final, foram plotados os posicionamentos dos tanques identificados no mapa de amplitude do sinal GPR na profundidade de corte de 1,40 m, apresentado na Figura 2b, onde se observam anomalias de maiores reflexões do sinal nos locais de existências desses tanques subterrâneos.

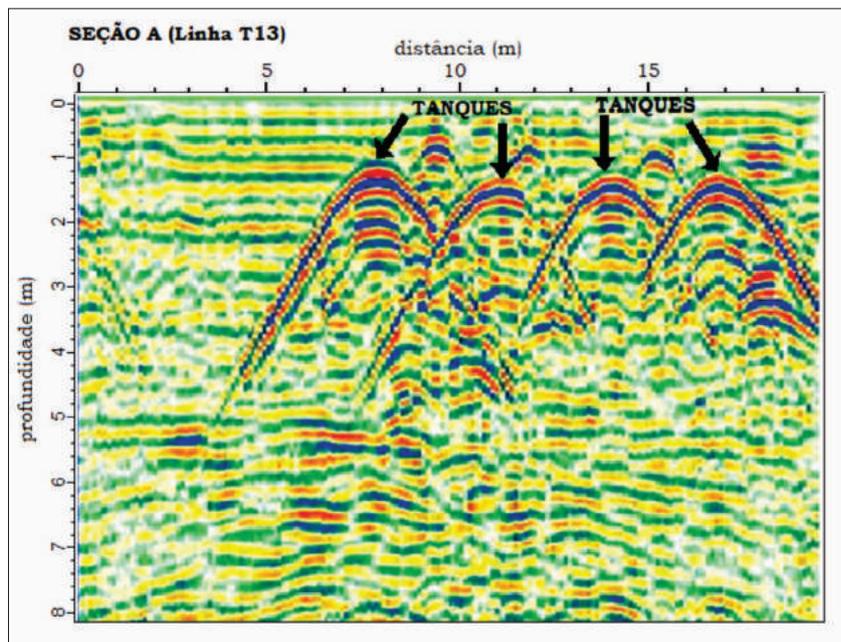


Figura 2a. Seção "A" indicando a detecção de tanques subterrâneos.

Fonte: os autores.

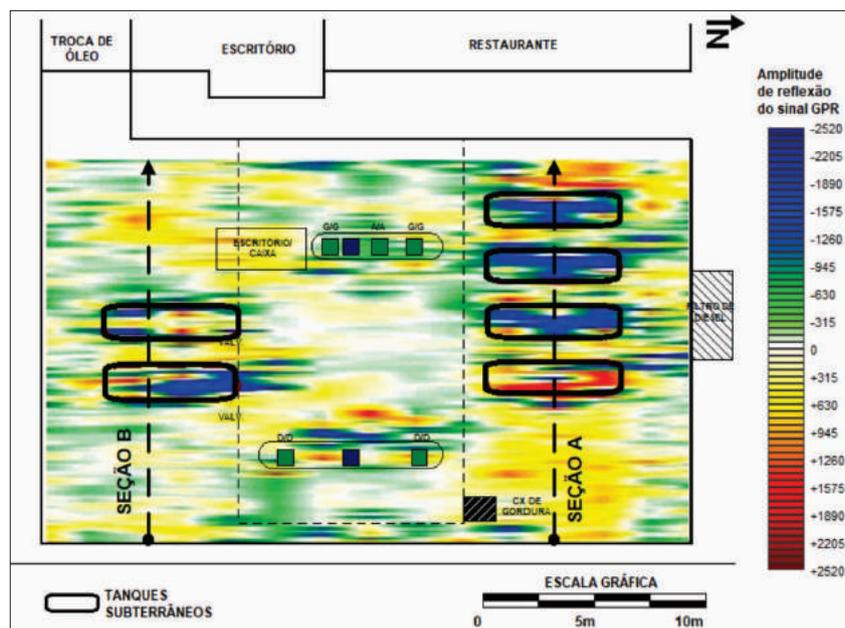


Figura 2b. Mapa de amplitude do sinal GPR na profundidade de 1,40 m.

Fonte: os autores.

O segundo estudo se refere à aplicação do método Magnético em varredura de área em planta industrial no intuito de se confirmar a presença de resíduos metálicos enterrados. A relevância deste levantamento está no fato que poderia ter sido empregado o método Eletromagnético Indutivo, comumente utilizado neste tipo de situação, porém em face de demanda impositiva foi empregado o método Magnético, que no Brasil é quase que exclusivamente aplicado à pesquisa mineral ou arqueológica, mas que comprovou sua eficiência neste caso, podendo ser aplicado em situações similares para avaliação ambiental. Na aquisição de dados em campo, foi utilizado o magnetômetro da marca Gem Systems, modelo GSM-19, sendo adotado um espaçamento de 1,0 m entre os pontos de medidas. Como resultado do levanta-

mento realizado obteve-se o mapa de anomalias do gradiente do campo magnético total (Figura 3), o qual apresenta mais ao centro do terreno investigado três anomalias geofísicas principais (A, B e C) e onde foram encontrados, não resíduos industriais, mas sim sucatas metálicas enterradas e que foram prontamente removidas do local.

A terceira investigação corresponde à aplicação do método Eletromagnético Indutivo para a determinação de posicionamento de tanque subterrâneo em área de antiga garagem de ônibus e que foi reutilizada como condomínio residencial posteriormente. Neste estudo, dois outros tanques subterrâneos já tinham suas localizações conhecidas, havendo dúvida sobre posicionamento de um terceiro tanque próximos a esses e que deveriam ser removidos todos em conjunto.

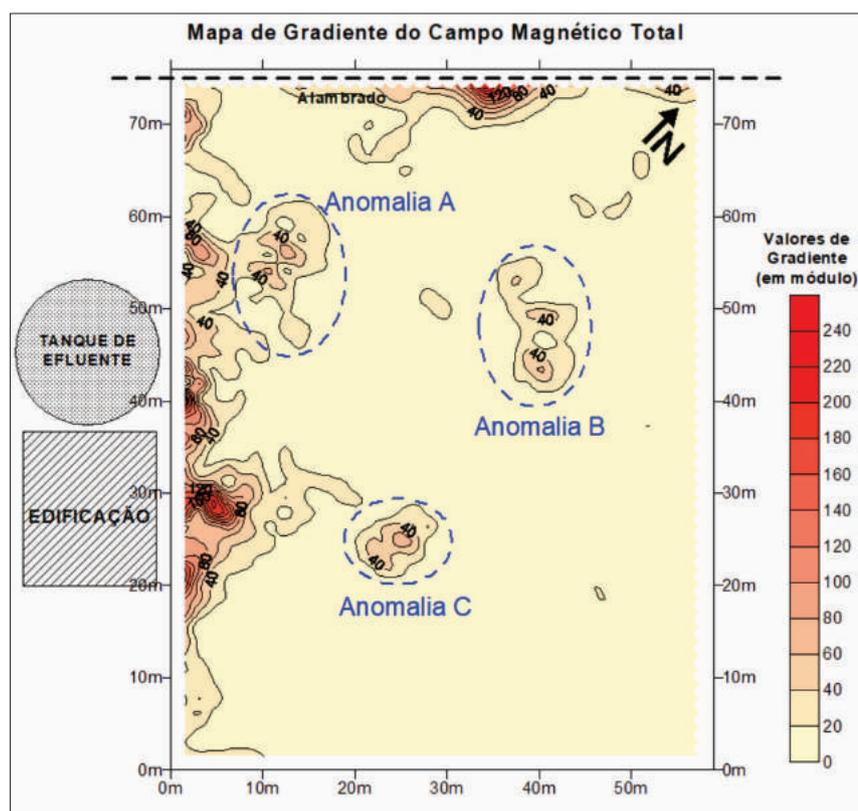


Figura 3. Mapa de anomalias magnéticas de material metálico enterrado.

Fonte: os autores.

Assim, foram executadas linhas de varredura no local suspeito, sendo empregado o equipamento de emissão e recepção transiente EM-61, marca Geonics Limited, que é um instrumento muito

sensível à detecção de objetos metálicos enterrados e que apresenta resolução lateral centimétrica nas medições, sendo obtidos, como exemplo os perfis a seguir.

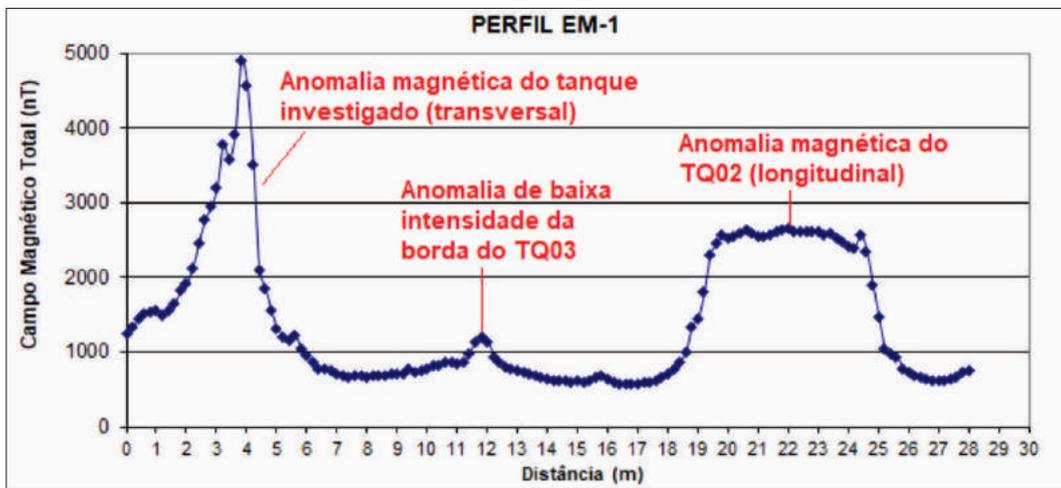


Figura 4a. Perfil de medidas magnéticas EM-1.

Fonte: os autores.

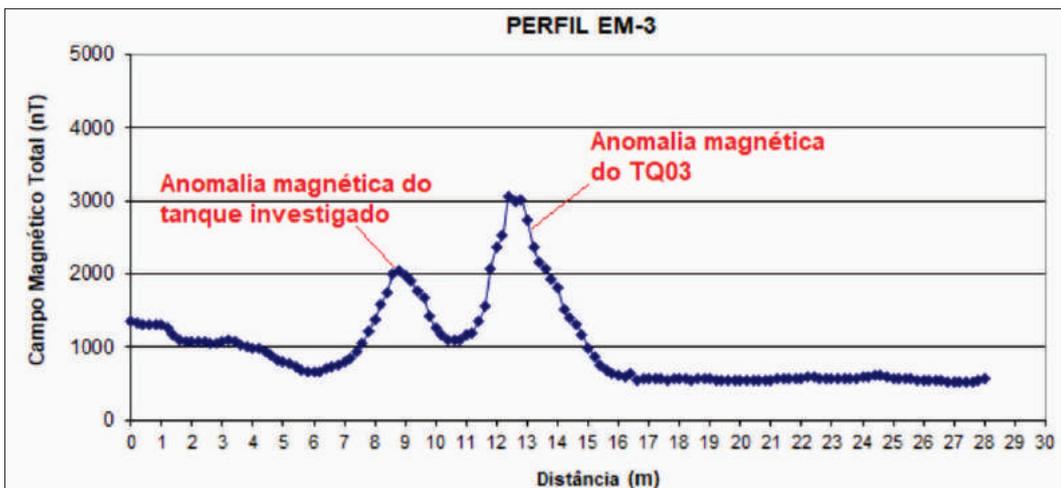


Figura 4b. Perfil de medidas magnéticas EM-3.

Fonte: os autores.

A partir da análise da amplitude das anomalias magnéticas (intensidade e largura) e das distâncias em que foram detectadas nos perfis eletromagnéticos, foi possível determinar o

posicionamento do tanque investigado e apresentá-lo no mapa seguir, sendo este e os outros tanques retirados do local em etapa posterior ao levantamento.

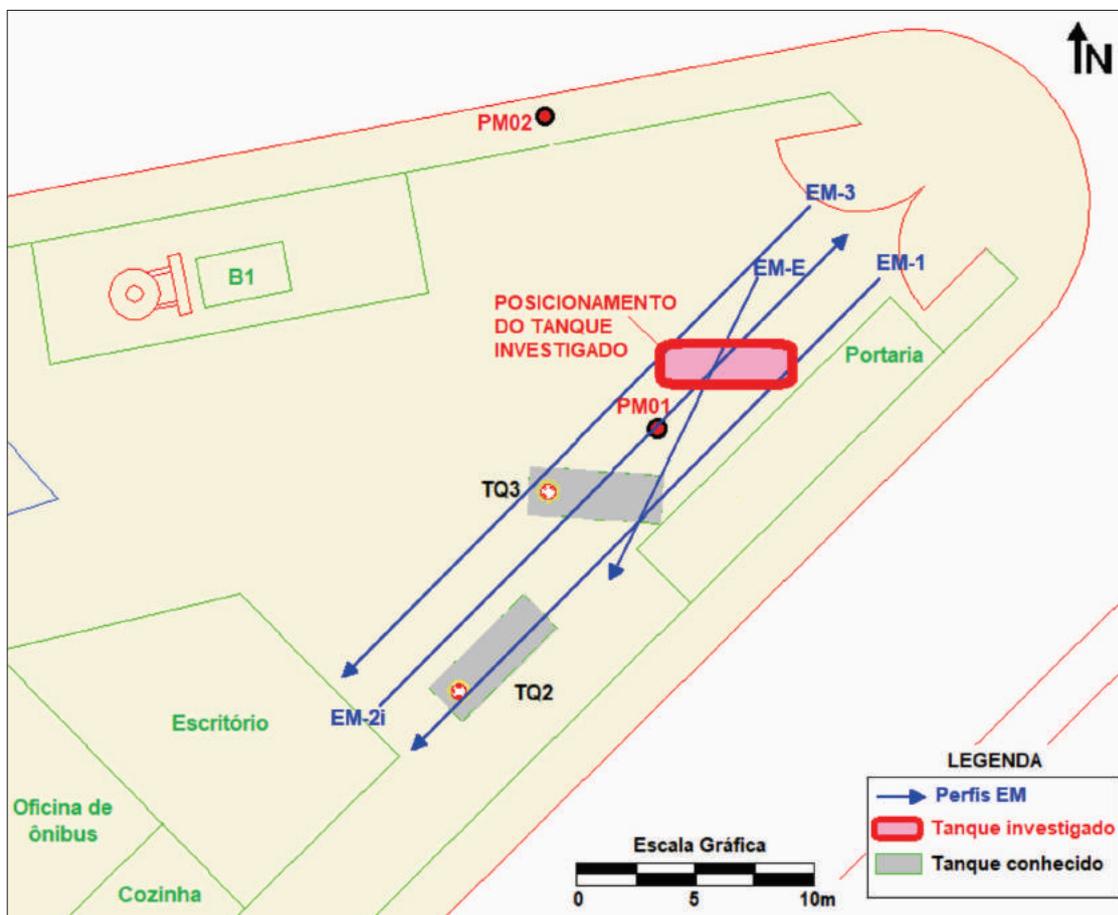


Figura 4c. Localização do tanque investigado no levantamento EM.

Fonte: os autores.

5.3 Investigação de resíduos inorgânicos enterrados

A avaliação apresentada na sequência corresponde ao estudo efetuado em área rural para a detecção e delimitação de cava onde havia ocorrido descarte diretamente no solo de resíduos inorgânicos, proveniente de indústria química e farmacêutica. Para esta pesquisa, foi utilizado o equipamento Ramac/GPR, com antenas não blindadas de 200 MHz de frequência, arranjo *com-*

mon off-set (dipolo) e intervalo de medidas de 25,0 cm, sendo executadas em campo linhas paralelas equidistantes de 15,0 m, seccionando, assim, a área suspeita conforme a Figura 5a.

Em algumas seções GPR obtidas, foram observadas feições indicativas de material revolvido, sendo bem representativo o apresentado na Figura 5a e onde se verifica uma anomalia em formato de cava, com largura de aproximadamente 26,0 m e com base irregular de profundidade máxima de 2,5 m.

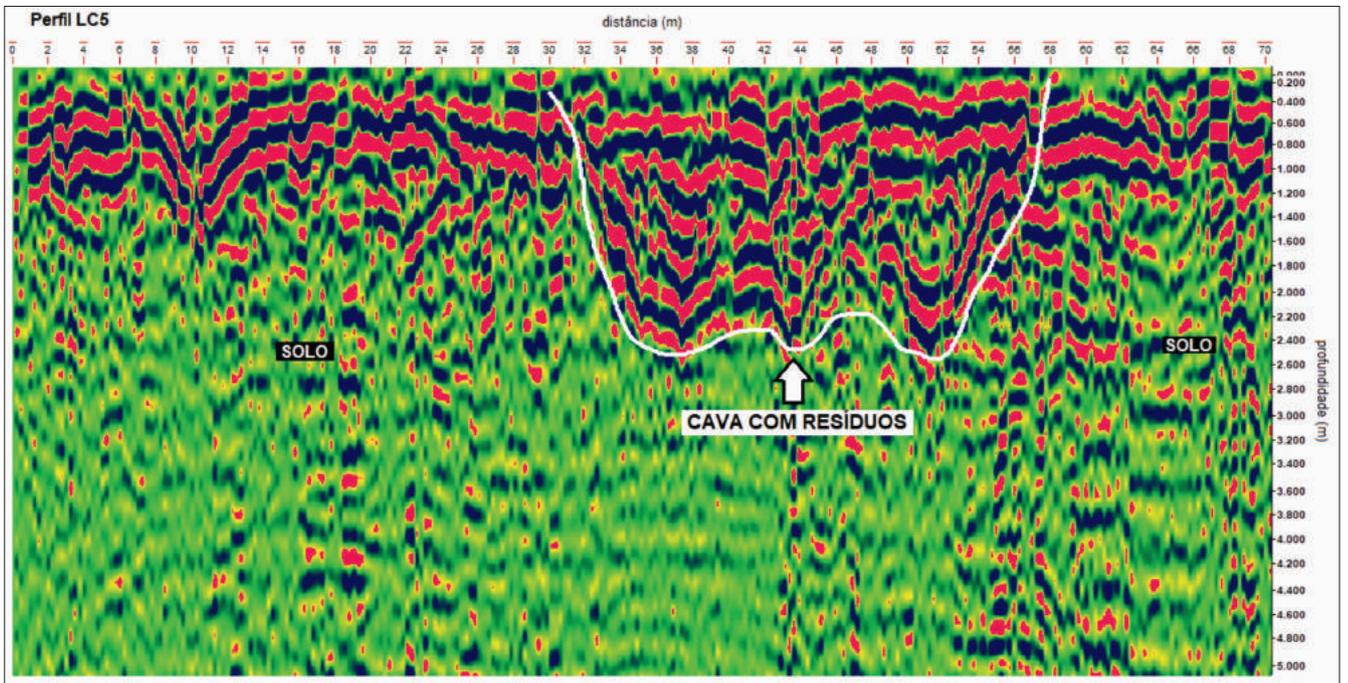


Figura 5a. Trecho de perfil GPR indicando cava com resíduos inorgânicos.

Fonte: os autores.

Integrando-se os dados dos perfis GPR paralelos, foi possível estimar os limites da disposição de resíduos no local investigado (Figura 5b), o

qual, tempos depois, foi submetido às atividades de intervenção para recuperação do local.



Figura 5b. Localização dos perfis GPR e área inferida com resíduos.

Fonte: os autores.

5.4 Pluma de contaminação inorgânica

O seguinte exemplo é sobre a avaliação da abrangência de pluma de contaminação subterrânea, originada por disposição no solo de resíduos inorgânicos do tratamento de couro proveniente de curtume. Na aquisição de dados deste levantamento, empregou-se o método Eletromagnético (EM), através do uso do condutivímetro de solo EM-31, marca Geonics Limited, para a realização de 20 perfis geofísicos longitudinais, com espaçamento médio de 20,0 m, e dois perfis transversais distantes de 8,0 m.

Quanto às linhas executadas, o intervalo adotado de medidas de condutividade elétrica foi de 10,0 m e 20,0 m nos perfis transversais e longitudinais, respectivamente, tomando-se as medições nas duas faixas de profundidades teóricas de investigação fornecidas pelo equipamento, de 3,0 m e 6,0 m. Como exemplo do comportamento da condutividade elétrica medida na área, podem ser observadas as curvas do Perfil P13 apresentado na Figura 6a, que aponta valores crescentes desde seu início até praticamente o final, com valores mais expressivos de 240 m a 360 m, onde os resíduos enterrados, certamente, estavam presentes em maiores concentrações.

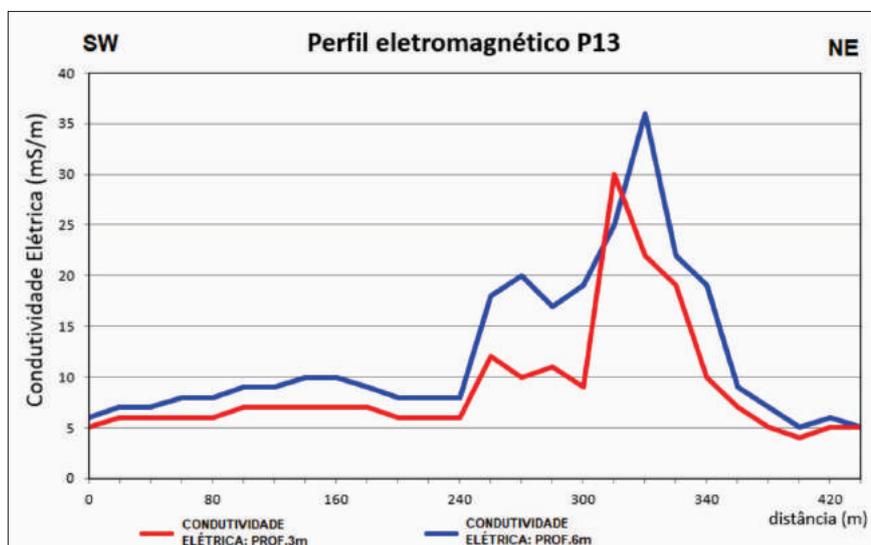


Figura 6a. Perfil P13 de condutividade elétrica de 3,0 m e 6,0 m de profundidade.
Fonte: os autores.

Por meio da plotagem dos pontos de leitura em planta base da área e interpolação pelo método de krigagem dos valores de condutividade elétrica, foram elaborados mapas de anomalias geo-

físicas, como visto na Figura 6b e que corresponde às variações das medidas para a profundidade de 6,0 m e que está dentro dos domínios da zona saturada.

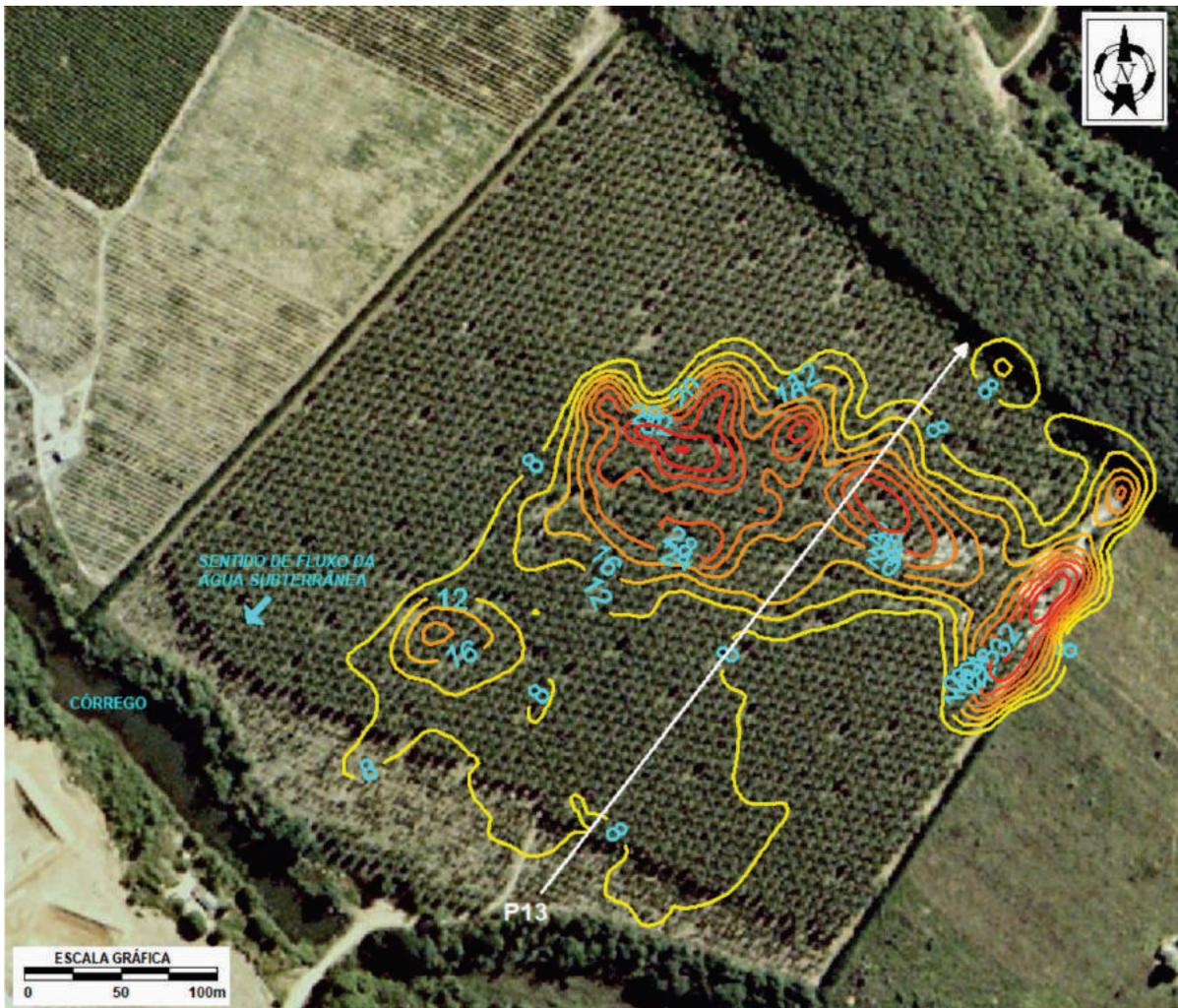


Figura 6b. Mapa de condutividade elétrica da profundidade de até 6,0m.

Fonte: os autores.

Este mapa da Figura 6b apresenta a abrangência da eventual pluma de contaminação inorgânica em direção ao córrego mais a sudoeste da área, concordante, portanto, ao sentido do fluxo local da água subterrânea, além de evidenciar os maiores valores de condutividade elétrica na porção nordeste, onde a fonte de contaminação é mais expressiva e é representada pelos resíduos ali enterrados quando do levantamento geofísico.

5.5 Contaminação orgânica na zona não saturada

A detecção de contaminação orgânica, em especial de combustíveis, já foi tema de diversas

aplicações do GPR, podendo ser citado os trabalhos de Aquino et al. (1998) e Dehaini (2001). Como ilustração ao tipo de anomalia que poderia ser detectado neste caso, segue exemplo de aplicação em posto de serviço, que na data do levantamento apresentava contaminação e estava em fase de remediação, onde foi utilizado o equipamento Ramac/GPR, com antenas de 400 MHz não blindadas e intervalo de distância de amostragem de 10,0 cm.

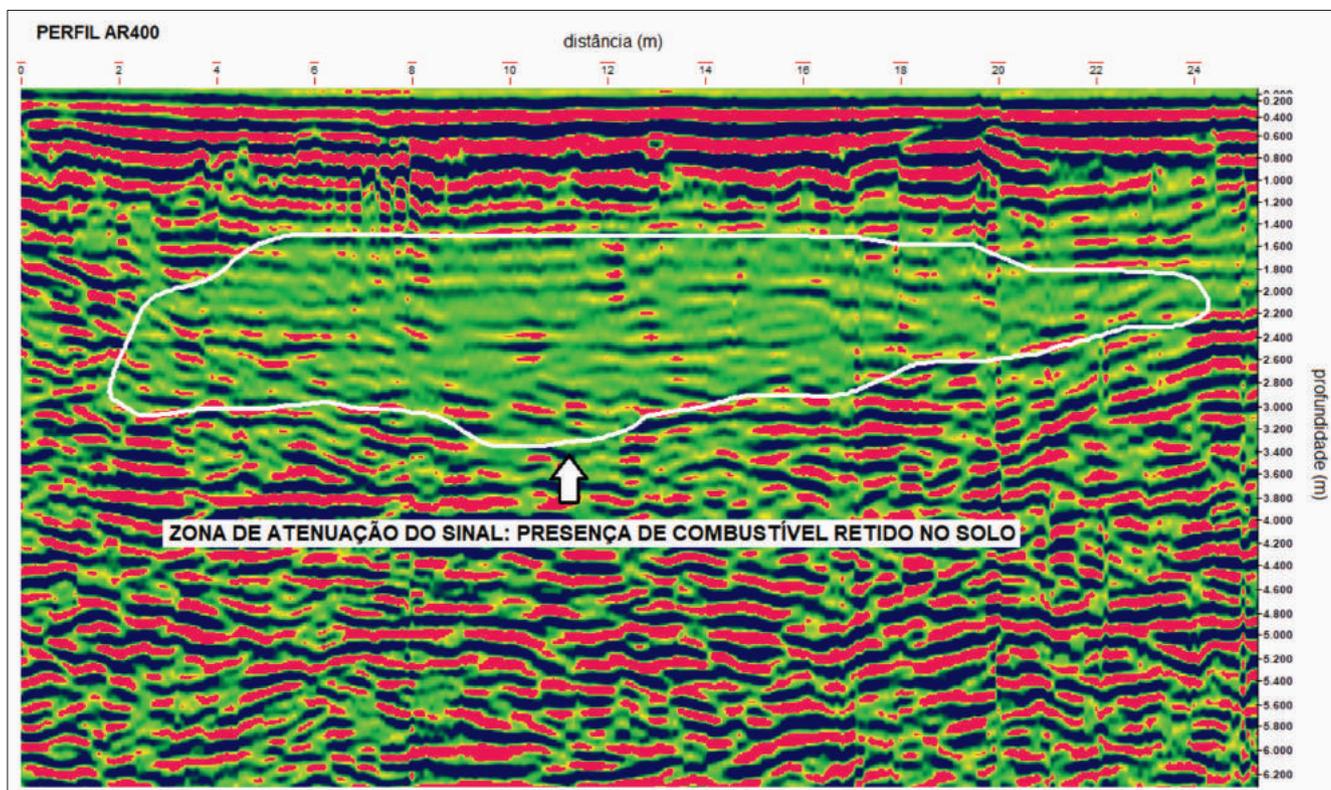


Figura 7. Seção GPR com atenuação associada à fase retida de combustível.

Fonte: os autores.

Na seção da Figura 7, observa-se que a presença de combustível em fase retida na zona não saturada é detectada pela visualização de região com atenuação do sinal GPR e que é produzida pela baixa constante dielétrica que este possui, reduzindo, assim, a amplitude das reflexões.

5.6 Pluma orgânica na zona saturada

Outro exemplo de detecção de contaminação orgânica em subsuperfície se refere à aplicação do método de Resistividade Capacitiva (RC), o qual tem indicado resultados muito promissores para este tipo de levantamento. No caso em questão, a atividade executada no local avaliado é o manejo de resíduos domésticos e onde havia setor de lubrificação e abastecimento de caminhões, que

apresentava contaminação comprovada por fase livre de produto na zona saturada e que foi interceptada pelos perfis geofísicos conforme visto a seguir (Figura 8a).

O resultado do levantamento pode ser visualizado na seção a seguir (Figura 8b), onde se verifica a presença de duas zonas de altas resistividades elétricas mais ao centro e que foi interpretada como a zona de abrangência da contaminação orgânica, sendo dividida pela atuação do poço de bombeamento ali instalado.

Nesta figura, também podem ser constatadas duas zonas de baixas resistividades elétricas na parte inicial do perfil em profundidades mais rasas e que podem indicar a infiltração de contaminação inorgânica na porção superficial do solo a partir dos resíduos domésticos ali operados.

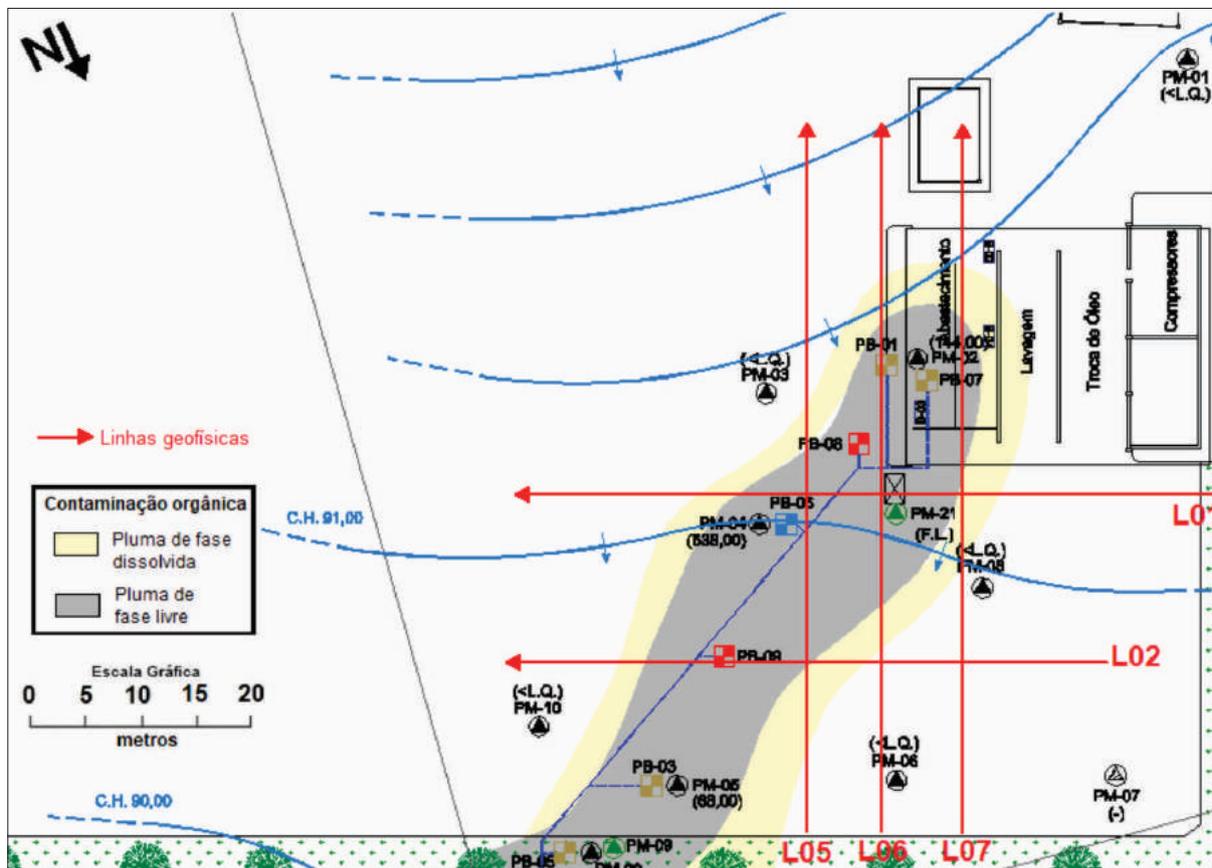


Figura 8a. Linhas de Resistividade Capacitiva na área investigada.

Fonte: os autores.

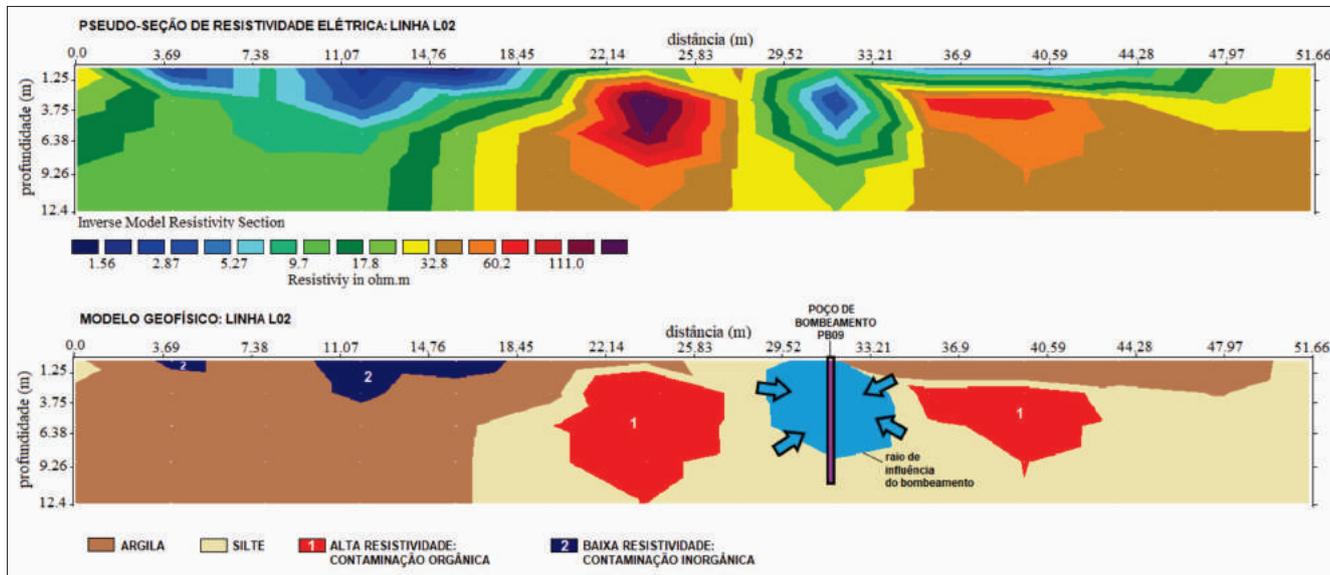


Figura 8b. Pseudo-seção e modelo da linha L02 indicando contaminações.

Fonte: os autores.

5.7 Rejeitos de mineração

O próximo caso se refere a avaliação de antiga de cava de mineração de areia, localizada em

várzea de rio, onde havia o histórico de preenchimento com rejeitos de atividade minerária (escória metálica), sendo o levantamento geofísico aplicado para determinação de área e volume de

material aterrado. Para a investigação em questão, foi empregado o método GPR, utilizando-se o equipamento Ramac/GPR com antenas não blindadas de frequência de 100 MHz, adotando-se o

arranjo dipolo (ou *common off-set*) e 10,0 cm como intervalo de medidas (amostragem), sendo os perfis dispostos em formato de malha, com espaçamento médio de 5,0 m (Figura 9a).

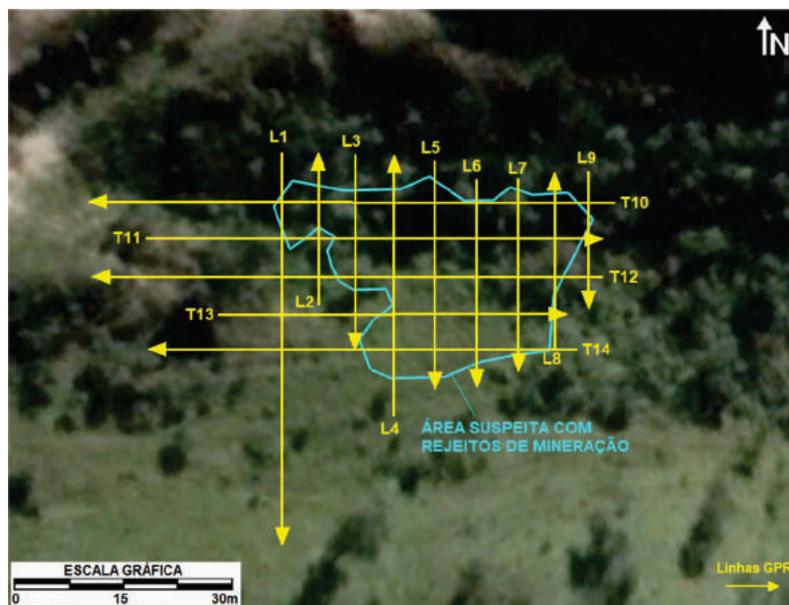


Figura 9a. Perfis GPR na área suspeita de conter resíduos de mineração.
Fonte: os autores.

Após o levantamento de campo, o processamento de dados e a elaboração das seções GPR revelaram a configuração da cava contendo os

resíduos de mineração, cujo exemplo pode ser observado na seção do Perfil T12, apresentada na sequência na Figura 9b.

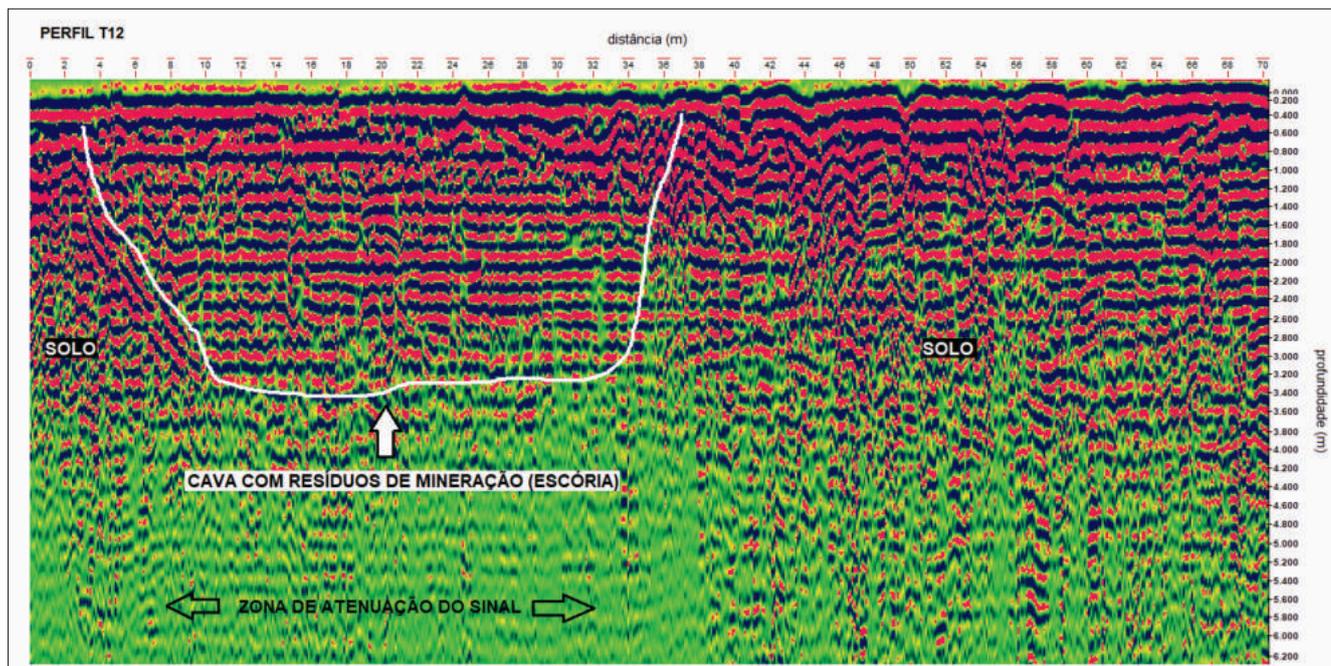


Figura 9b. Seção GPR do Perfil T12 com indicação de cava com rejeitos.
Fonte: os autores.

Tanto na seção da Figura 9b, como em outras deste levantamento, foi possível observar a configuração da cava, sendo que neste exemplo sua extensão é da ordem de 34,0 m e profundidade máxima de 3,5 m. Destaca-se, nesta imagem, a feição de refletores plano-paralelos no interior da cava que é característico de reverberações do sinal GPR quando da presença de material muito condutivo, representados, neste caso, pela escória metálica. Além disso, deve ser observada a atenuação do sinal GPR em níveis pouco mais profundos e que pode indicar a lixiviação a partir do material da cava, formando, possivelmente, uma pluma de contaminação, sendo que o nível d'água raso existente no local, em torno de 2,0 m de profundidade, favorecerá este processo.

5.8 Contaminação difusa da agricultura

Decorrente das grandes dimensões das propriedades agrícolas, é difícil a definição de pon-

tos de amostragem para uma eventual investigação confirmatória caso a área seja suspeita de apresentar contaminação. Neste caso, os levantamentos geofísicos podem contribuir de forma relevante na determinação dos pontos de maiores concentrações dos contaminantes, principalmente os métodos eletromagnéticos indutivos, como é o caso do exemplo a seguir, no qual foi realizado o rastreamento em local de cultura de cana de açúcar onde ocorreu a disposição de lodo biológico industrial e cinzas de biomassa.

O levantamento em questão se desenvolveu através da utilização do equipamento EM-31, sendo realizados perfis transversais à área de disposição, espaçados em 20,0 m, com leituras em intervalos de 10,0 m e nas duas faixas de profundidades de 3,0 m e 6,0 m, cujas variações medidas de condutividade elétricas podem ser verificadas no exemplo a seguir (Figura 10a).

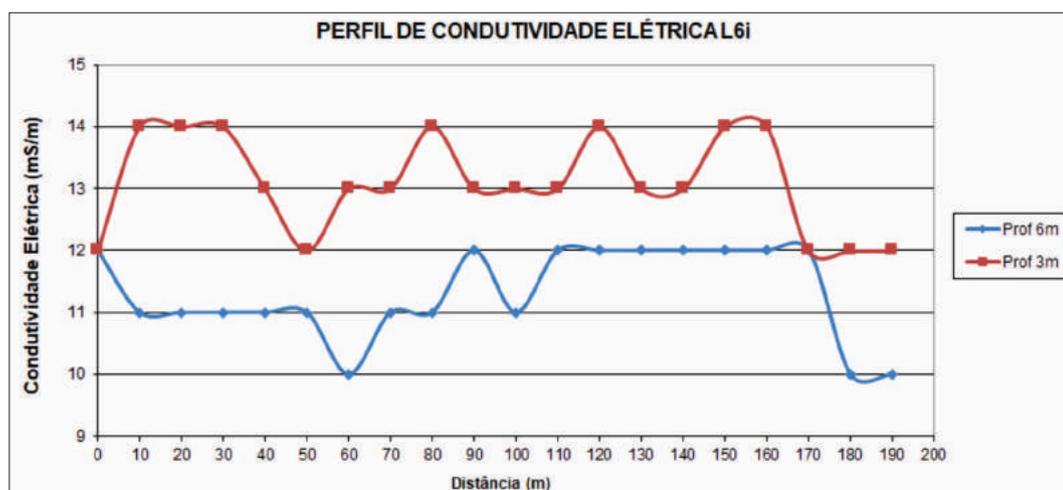


Figura 10a. Perfil L6i de condutividade de até 3,0 m e 6,0 m de profundidade.

Fonte: os autores.

Comparando o comportamento dos gráficos anteriores, se observa que os valores medidos de condutividade elétrica para a faixa de profundidade de 3,0 m são maiores que os apresentados para 6,0 m, o que não é muito comum, mas é coerente com a situação investigada onde os resíduos foram dispersos em superfície e sua infiltração permanece nas camadas mais rasas do solo.

Posteriormente, os mapas de anomalias de condutividade elétrica do local foram confeccionados ao se interpolar os dados obtidos nos perfis, sendo possível visualizar as variações da condutividade elétrica na área investigada e distinguir, conforme exemplo a seguir (Figura 10b), duas faixas principais de anomalias com maiores valores, mais ao norte e mais ao sul, e onde foi verificado

in loco pequenas porções com resíduos expostos e misturados ao solo, o que é concordante aos resul-

tados aqui expressos, indicando, assim, a eficiência do método geofísico empregado.

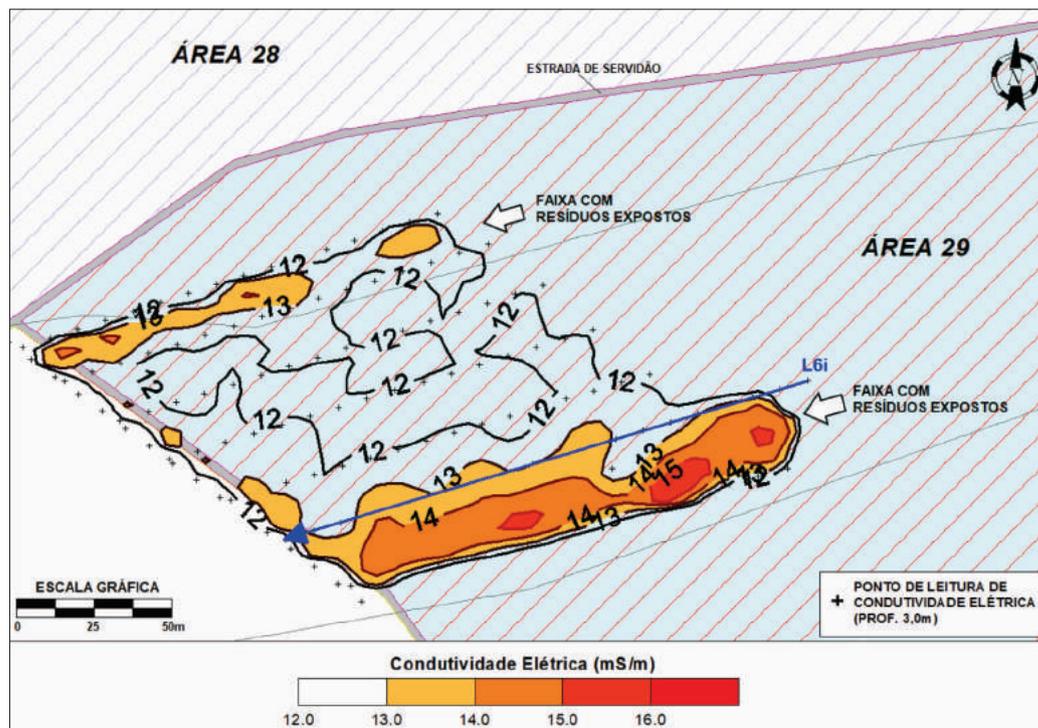


Figura 10b. Mapa de condutividade elétrica na profundidade de até 3,0 m.

Fonte: os autores.

5.9 Necrochorume

De acordo com Silva (2018), os cemitérios apresentam risco potencial de contaminação ambiental, em particular, para águas subterrâneas de menor profundidade, ou seja, para o aquífero freático, decorrente da percolação de líquidos oriundos da decomposição de cadáveres e dos materiais dos invólucros e que constituem, assim, o necrochorume.

Neste contexto, os métodos geofísicos podem ser aplicáveis para mapeamento das anomalias de baixas resistividade elétrica (altas condutividades) indicativas de locais de maior concentração

de contaminantes em subsuperfície, como será visto a seguir, principalmente pela aplicação do método de Resistividade Capacitiva (RC).

O estudo de caso a seguir corresponde apenas a um exemplo onde a metodologia da Resistividade Capacitiva (RC) foi aplicada para diagnóstico de contaminação subterrânea em diversos cemitérios de diferentes dimensões. Na área em questão, os trabalhos de campo se desenvolveram através da execução de uma malha de perfis de Imageamentos Elétricos Capacitivos, com linhas longitudinais e transversais, contemplando todo o local (Figura 11a).



Figura 11a. Linhas de Resistividade Capacitiva executadas em cemitério.

Fonte: os autores.

Em várias seções de resistividade elétrica obtidas neste levantamento, observou-se a presença de anomalias de baixos valores, sendo que um dos resultados mais proeminentes é o observado

na seção do Perfil T2, cuja zona anômala pode representar uma pluma de contaminação subterrânea decorrente de sua feição alongada e da profundidade verificada.

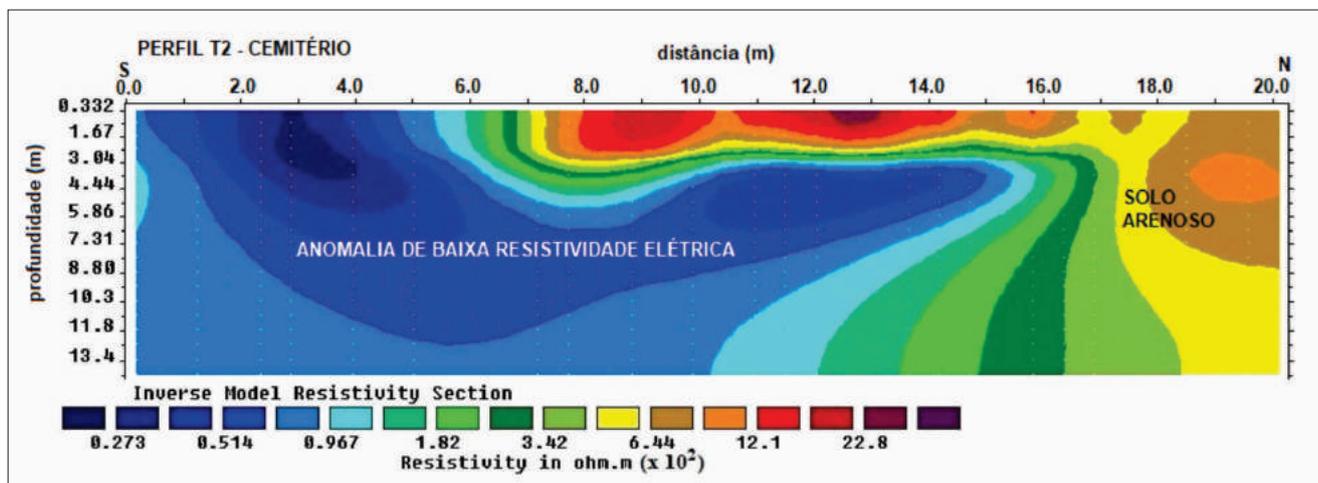


Figura 11b. Seção do Perfil T2 com anomalia de baixa resistividade elétrica.

Fonte: os autores.

Posteriormente, integrando-se e interpolando-se os valores de resistividade elétrica dos diferentes perfis de campo, foram elaborados mapas de anomalias de resistividade elétrica, sendo apresentado, como exemplo, o mapa de profun-

didade de corte de 2,0 m, que reflete a situação pouco abaixo das bases de sepultamento, e onde se observam os menores valores na parte sul do cemitério e que são os locais mais indicados às sondagens confirmatórias e amostragens de solo.

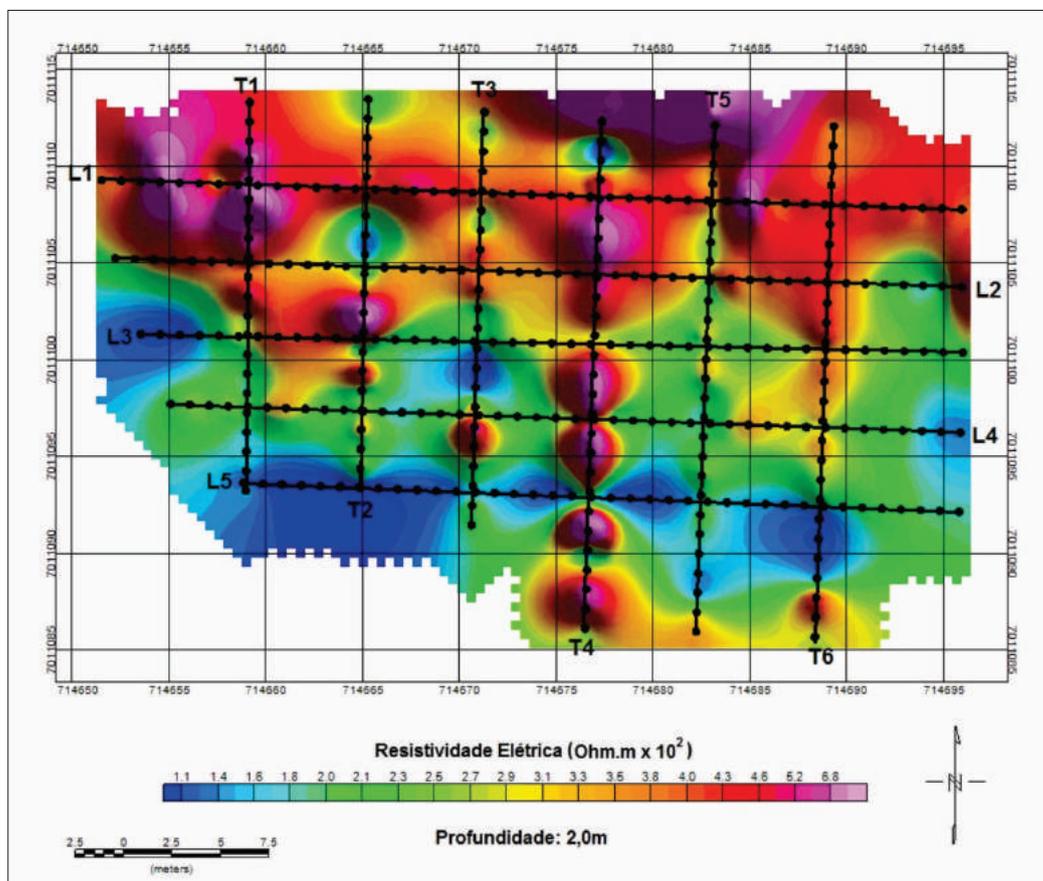


Figura 11c. Mapa de resistividade elétrica na profundidade de corte de 2,0 m.

Fonte: os autores.

Deve ser ressaltado que, no trabalho em questão, a aplicação da Resistividade Capacitiva (RC) demonstrou grande potencialidade em função, principalmente, da alta sensibilidade e resolução na detecção das anomalias geofísicas, rapidez na execução em campo e ausência de interferências externas nas medições, o que permite inferir, assim, que essa metodologia se mostrou mais eficiente quando comparada a outros métodos geofísicos que também poderiam ser empregados neste tipo de levantamento.

5.10 Lodo proveniente de esgoto

Como exemplo ilustrativo de como seria a detecção do sinal anômalo de disposição de lodo proveniente de esgoto, ou oriundo de estações de tratamento, é apresentada a seguir a seção obtida em levantamento com o equipamento Ramac/GPR, sendo empregadas as antenas não blindadas de 400 MHz de frequência, com intervalo de distância de amostragem de 10,0 cm e arranjo *common off-set*, e que foi aplicado em local onde haviam sido aterrados materiais removidos de fossas sépticas.

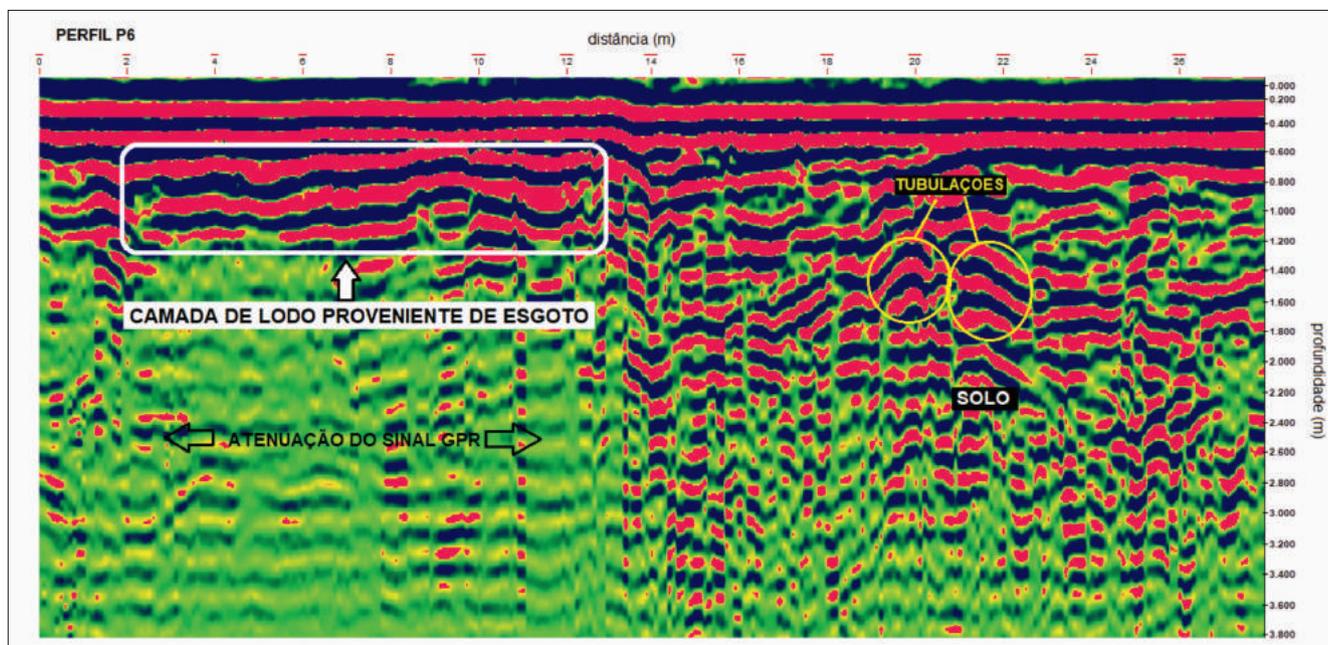


Figura 12. Seção GPR com feição anômala de camada de lodo de esgoto.

Fonte: os autores.

Observa-se na seção da Figura 12 o acamamento plano-paralelo como sinal GPR característico deste tipo de resíduo quando enterrado, contrastando com o aspecto do solo do entorno e que possui padrão difuso. Além disso, destaca-se a zona de atenuação do sinal abaixo de onde estão presentes esses resíduos, provocada por suas altas condutividades elétricas, e que decorrem da existência de compostos inorgânicos, principalmente nitritos ou nitratos, que, além do material biológico, podem ser contaminantes potenciais da água subterrânea.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme apresentado neste artigo, verifica-se que a escolha da metodologia geofísica para a investigação ambiental de contaminação subterrânea deve ser definida, primordialmente, pela correlação das propriedades físicas do contaminante com a potencialidade que os métodos geofísicos possuem para detectar e medir suas variações. Desta forma, observou-se nos exemplos apresentados que os tipos de fonte de contaminação mais comuns que impactam o solo e a água subterrânea podem ter suas presenças identificadas pela aplicação de determinados métodos geofísicos

e conforme suas especificações. Além disso, nos casos reportados é possível verificar quais seriam os sinais que esses contaminantes provocam nos resultados obtidos, produzindo, portanto, as assinaturas das diferentes fontes de contaminação subterrânea nos dados geofísicos. Em relação à geologia local que poderia afetar a eficiência do método geofísico, esta situação pode ser solucionada através de modificações na metodologia empregada, tais como mudança do método escolhido, da configuração dos parâmetros de aquisição, das técnicas de campo e da forma de amostragem dos dados, entre outros, e que se reflete na diversidade dos casos aqui apresentados. Contudo, em pesquisas da Geofísica Ambiental para avaliação da contaminação subterrânea é necessário que o profissional envolvido tenha pleno conhecimento das propriedades físicas e do comportamento físico-químico dos contaminantes em subsuperfície, além do domínio do método geofísico a ser aplicado. Por fim, é importante destacar, entre outras vantagens, que a utilização da metodologia geofísica se mostra adequada à sustentabilidade, pois envolvem tecnologias não invasivas e, devido a isso, não causam nenhuma alteração no meio investigado e nenhum prejuízo às pessoas ou danos aos bens materiais durante os trabalhos de pes-

quisa, contribuindo com a preservação do meio ambiente e da manutenção do bem-estar social.

REFERÊNCIAS

- Aquino, W.F.; Dehaini, J.; Mendes J.M.B. Geo-Radar para a detecção de contaminação por hidrocarboneto. Anais do II Encontro de Geotecnia e Meio Ambiente e II Workshop de Geofísica Aplicada, Rio Claro – SP. CD-ROM. 1998.
- Aquino, W.F. Métodos geofísicos eletromagnéticos aplicados ao diagnóstico da contaminação do solo e das águas subterrâneas em área de infiltração de resíduos industriais. São Paulo. 121p. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Recursos Minerais) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2000.
- Aquino, W.F.; Tonello P.S.; Resende, P.R. Experimentation and indirect methods applied to investigate the contaminated areas. Revista de Gestão e Sustentabilidade (GEAS). Edição Especial. p.568-586. 2019.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Norma n.15.935. Investigações ambientais: aplicações de métodos geofísicos, 21p. 2011. Disponível em <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=86681>.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard guide for selecting surface geophysical methods*. D 6429-99, 15p. 2006.
- Braga, A.C.O. Métodos de eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. Rio Claro, 126p. Tese (Livro Docência em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2006.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. Programa CETESB/GTZ. São Paulo. 389p. 2001.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Relatório de áreas con-
- taminadas e reabilitadas no estado de São Paulo. São Paulo. 12p. 2019. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2020/02/TEXTO-EXPLICATIVO-2019-12.02.20.pdf>
- Davis, J.L. & Annan, A.P. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v.37 (5), p 531-551. 1989.
- Dehaini, J. Detecção da pluma de contaminação de hidrocarbonetos em subsuperfície pelo método de radar de penetração. Tese (Doutorado em Hidrogeologia e Recursos Minerais) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 159p. 2001.
- EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Use of airborne, surface and borehole geophysical techniques at contaminated sites. A Reference guide EPA/625/R-92/007. Washington: Eastern Research Group. Chapter 1, pp. 1-37. 1993. Disponível em <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/geophysics-guide.pdf>. Acessado em 03 jun 2019.
- Greenhouse, J.P. Environmental geophysics: it's about time. *Geophysics: The Leading Edge*, v.10, p. 32-34. 1991.
- Greenhouse, J.P. Aplicações de metodologias geofísicas em estudos ambientais e geotécnicos. Rio Claro. Centro de Estudos Ambientais, Universidade Estadual Paulista, 111p. 1996.
- Gretsky, P., Barbour, R. & Asimenios, G.S. Geophysics, pit surveys reduce uncertainty. *Pollution Engineering*, p. 102-108. 1990.
- Habermann, M. & Gouveia, N. Requalificação urbana em áreas contaminadas na cidade de São Paulo Revista Estudos Avançados. v. 28 n. 82. p.129-137. São Paulo Oct./Dec. 2014.
- Kuras. The capacitive resistivity technique for electrical imaging of the shallow subsurface. Tese de doutorado. Universidade de Nottingham. Inglaterra, 286p. 2002.
- Parasnis. Principles of applied geophysics, 5 ed., Chapman & Hall Editores, London, 429p. 1997.

Reynolds, J.M. *An introduction to applied and environmental geophysics*, 2 ed., Wiley-Blackwell Editores. Oxford, 696p. 2011.

São Paulo. Lei n. 13.577, de 08 de julho de 2009. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá outras providências correlatas. Disponível em <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei-13577-08.07.2009.html>.

Silva, F.C. *Avaliação de metais potencialmente tóxicos em zona não saturada da necrópole de Nossa Senhora Aparecida, Piedade, SP*. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 249p. 2018.

Steeple, D. Uses and techniques of environmental geophysics. *Geophysics: The Leading Edge*, v.10, n. 9, p. 30-31. 1991.