

## A UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA DETECÇÃO DE ÁGUAS E SOLOS POLUÍDOS POR PETRÓLEO

Gustavo Ferreira Costa (1); Manoel Mariano Neto da Silva (2); Almir Mariano de Sousa Júnior (3);

1 Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Pau dos Ferros, - [mariano.paiva@ufersa.edu.br](mailto:mariano.paiva@ufersa.edu.br)

2 Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Pau dos ferros - [gustavoferreira675@gmail.com](mailto:gustavoferreira675@gmail.com)

3 Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Pau dos ferros - [almir.mariano@ufersa.edu](mailto:almir.mariano@ufersa.edu)

**Resumo:** As atividades petrolíferas propiciam grandes impactos ambientais, uma vez que estes são constituídos por hidrocarbonetos, que se caracterizam como compostos de carbono e hidrogênio. Além das cadeias orgânicas, há ainda outros elementos, dentre eles, o nitrogênio e o enxofre, que são altamente poluentes. Desse modo, este trabalho tem por objetivo expor e discutir os principais métodos geofísicos empregados na análise de solos e águas contaminadas pelo petróleo e seus derivados. Para tanto, foram consultados periódicos publicados em revistas, bem como publicações independentes, que nos possibilitassem ampliar o estudo. Os métodos geofísicos são muito eficazes na detecção e dimensionamento de áreas prejudicadas pelo petróleo, o que a torna uma ferramenta de controle e estudo ambiental. Dentro deste contexto, foram abordados alguns dos métodos mais comuns empregados, dentre eles, a eletrorresistividade, a polarização induzida, o potencial espontâneo e o método Ground Penetrating Radar. Assim, estudou-se os princípios elétricos e magnéticos que formam a base científica de cada método, bem como a forma de captura e processamento dos dados. Além disso, foram apontados os principais aspectos positivos de cada método.

**Palavras-chaves:** Métodos geofísicos, eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo, Ground Penetrating Radar.

### INTRODUÇÃO

O petróleo e seus derivados são fundamentais para a manutenção das necessidades humanas, visto que atualmente estes se apresentam como a principal fonte energética utilizada por toda a população e, além disso, possui uma vasta aplicação em muitos outros setores, como por exemplo, a indústria têxtil, de cosméticos e alimentícia. Entretanto, propiciam grandes impactos ambientais, uma vez que estes são constituídos por hidrocarbonetos, que se caracterizam como compostos de carbono e hidrogênio. Além das cadeias orgânicas, há ainda outros elementos, dentre eles, o nitrogênio e o enxofre, que são altamente poluentes. Todos esses elementos causam perdas irreparáveis para a conservação das propriedades do solo e findam por tornar as fontes hídricas inutilizáveis.

Nesse sentido, o solo e os lençóis freáticos são os principais alvos das contaminações, uma vez que a ocorrência de vazamentos em reservatórios é muito comum. Desse modo, essa problemática alcança grandes proporções devido ao fato de destruir partes importantes de diversos ecossistemas naturais. No que se refere à contaminação do solo e dos aquíferos, Elis [2012] afirma que os fluidos oriundos do petróleo e seus derivados seguem um percurso similar ao da infiltração da água no subsolo e assim formam plumas de poluição que abrangem uma área significativamente maior que o espaço ocupado pela fonte poluidora.

Mediante tais discussões, a geofísica apresenta métodos capazes de quantificar e mapear a poluição de solos e reservatórios de água contaminados por petróleo e outros poluentes, a partir do emprego de tecnologias e conhecimentos relacionados à eletricidade e ao magnetismo. Esses métodos são definidos ainda como não invasivos, uma vez que as análises são realizadas de forma indireta e auxiliam no estudo dos contrastes das propriedades físicas da área investigada. De acordo com Ortega [2006], esse fenômeno torna-se possível devido ao fato de que as propriedades elétricas e magnéticas são alteradas quando ocorrem contaminações. Assim, este trabalho tem por objetivo expor e discutir os principais métodos geofísicos empregados na análise de solos e águas contaminadas pelo petróleo e seus derivados. Portanto, faz-se necessário a realização de um estudo bibliográfico acerca dos principais fatores que desencadeiam a poluição dos solos e das águas, bem como compreender o funcionamento e os fatores que viabilizam a adoção destes métodos nos estudos químicos e ambientais.

## **METODOLOGIA**

Este estudo se caracteriza como uma abordagem de caráter qualitativa, visto que para o desenvolvimento da pesquisa e realização das discussões foram realizados apenas estudos bibliográficos acerca dos métodos geofísicos utilizados para detecção de solos e águas poluídos por hidrocarbonetos.

Para tanto, foram consultados periódicos publicados em revistas, bem como publicações independentes, que nos possibilitassem ampliar o estudo. Frente a tal realidade, alguns autores defendem a metodologia utilizada, dentre eles, podemos citar Severino [2007] e Gil [2009], que enfatizam que esta é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos.

## **MÉTODOS GEOFÍSICOS EMPREGADOS NA DETECÇÃO DE SOLOS E ÁGUAS CONTAMINADAS POR PETRÓLEO**

Partindo das pesquisas realizadas, verificou-se que uma série de métodos geofísicos são utilizados nos estudos voltados a detecção de solos e águas contaminadas por petróleo. Nesse

sentido, este trabalho irá abordar a eletrorresistividade, os estudos por potencial espontâneo e o método Ground Penetrating Radar, sendo que ambos são citados e discutidos por Lago [2009].

## **Eletrorresistividade**

E eletrorresistividade apresenta como principais técnicas de investigação a sondagem elétrica vertical e o caminhamento elétrico. Entretanto, Lago [2009] enfatiza que somente a sondagem convencional foi utilizada até a década de 80, quando o método foi implementado, e isso se deve à limitação do processamento e interpretação quantitativa dos dados obtidos pela técnica de caminhamento elétrico.

O autor afirma ainda que este método é de fácil execução e baixo custo, e a propriedade física investigada é a resistividade e a condutividade elétrica. Sendo que o objetivo desse método é determinar a distribuição da resistividade na subsuperfície a partir de medidas feitas na superfície do terreno.

Frente a este contexto, Menezes et al [2011] enfatiza este é método geofísico mais utilizado, devido à possibilidade de aplicação nos diversos campos de estudo, como: mineração, geologia, hidrogeologia, estudos ambientais e estudos agrícolas.

Para compreendermos a funcionalidade desse método, faz-se necessário compreender os processos físicos envolvidos. Desse modo, Lago [2009] afirma que Em qualquer superfície esférica  $S$ , a uma distância  $r$  da origem, a corrente flui radialmente. Considerando um semi-espço, a corrente flui radialmente em uma semi-esfera. Aplicando uma corrente elétrica  $I$  através de um eletrodo na superfície do semi-espço, a corrente flui radialmente para fora através da semi-esfera de raio  $r$ , e superfície  $2\pi r$ . Desta maneira, a densidade de corrente  $J$  é a corrente  $I$  dividida pela área  $A$  em que a corrente está distribuída em uma semi-esfera  $A = 2\pi r$ , e a densidade de corrente diminui com o aumento da distância da fonte de corrente. Portanto, a densidade de corrente para um eletrodo pontual no semi-espço homogêneo é dada pela equação 01 e a Figura 01 apresenta a direção do fluxo da corrente.

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1)$$

Se denominarmos a resistividade elétrica homogênea e isotrópica como  $\rho$ , é possível escrever a Lei de Ohm como sendo:

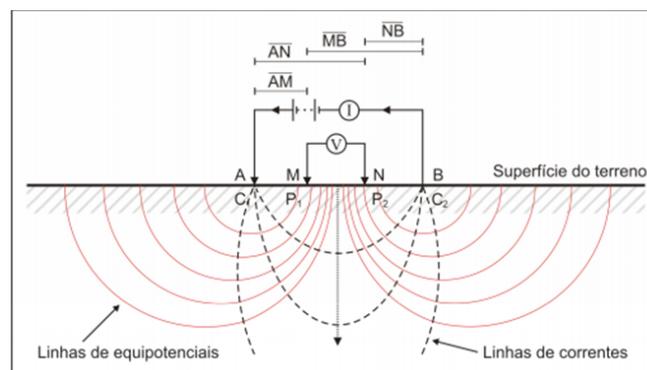
$$\vec{E} = J\rho = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (2)$$

Onde é campo elétrico gerado pela corrente I. outro aspecto que necessita ser discutido é o potencial elétrico, que é determinado a partir da integração do campo elétrico, como expõe a equação 03.

$$V = \int_r^{\infty} \vec{E} dr = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (3)$$

Essa equação fornece a relação fundamental para todos os métodos de prospecção elétrica realizados na superfície da terra. Se considerarmos dois eletrodos de correntes de intensidade A (+I) e B (-I) posicionados na superfície de um sólido condutor nas posições C1 e C2, como apresenta a Figura 01:

Figura 1 – Linhas, de fluxos de correntes e equipotenciais, para duas fontes pontuais de corrente em um meio homogêneo.



Fonte: Lago [2009].

Verifica-se que os potenciais resultantes nos pontos M e N são:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi r} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] \quad (4)$$

Onde AM corresponde a distância entre C1 e P1 e MB a distância entre C2 e P1.

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi r} \left[ \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \quad (5)$$

Onde AN corresponde a distância entre C1 e P2 e MB a distância entre C2 e P2. Se considerarmos a diferença de potencial e colocarmos a equação em função da resistividade elétrica, tem-se:

$$\rho = \frac{\Delta V_{MN}}{I} \cdot K \quad (6)$$

Sendo, K o coeficiente geométrico que depende exclusivamente da geometria do arranjo de eletrodos;  $\rho$  a resistividade elétrica; a diferença de potencial entre os eletrodos; e I a intensidade de corrente. Quanto ao coeficiente geométrico, este é dado por;

$$K = \frac{2\pi}{\left[ \frac{1}{AM} \right] - \left[ \frac{1}{BM} \right] - \left[ \frac{1}{AN} \right] - \left[ \frac{1}{NB} \right]} \quad (7)$$

Dentro do método da eletrorresistividade existem várias técnicas de aquisições de dados de campo. Lago [2009] enfatiza que as técnicas de ensaios de campo mais comuns são: a Sondagem Elétrica Vertical, o Caminhamento Elétrico e a Perfilagem Elétrica de Poço, dentro das quais existe uma grande variedade de configurações eletródicas possíveis, o que confere ao método um elevado grau de versatilidade.

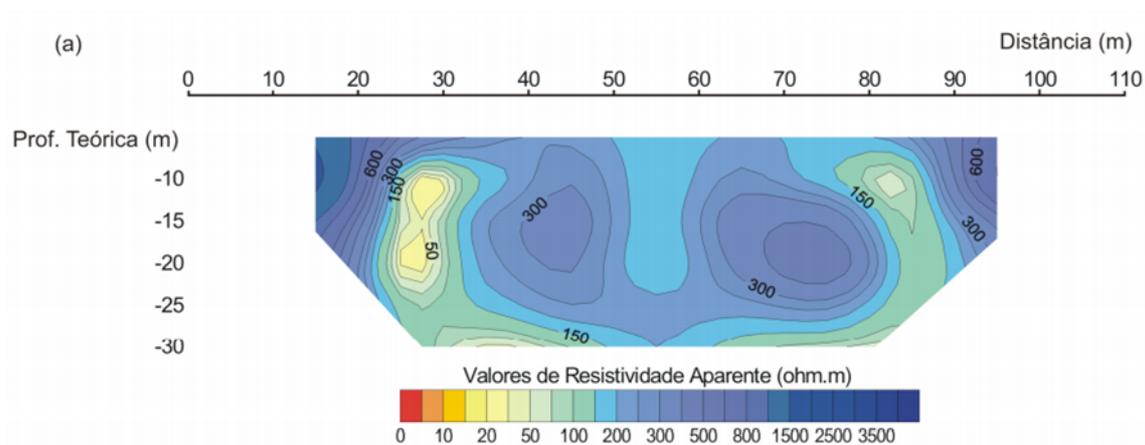
O mesmo autor afirma que a Sondagem Elétrica Vertical é aplicada quando é desejada uma informação pontual, com observação da variação vertical do parâmetro físico (resistividade) em profundidades cada vez maiores, através da separação crescente entre os eletrodos de corrente. Nesta técnica, a resistividade muda somente com a profundidade e não muda na direção horizontal, sendo aplicada em algumas situações geológicas onde o modelo 1D é aproximadamente verdadeiro. Esta técnica é bastante abordada, de modo satisfatório, na literatura geofísica existente.

Já o Caminhamento Elétrico consiste em obter a variação lateral de resistividade a profundidades aproximadamente constantes. Elis [1999] Apud Lago [2009] pontua que este método é aplicado em casos onde é importante a observação de variações laterais de resistividade, como por exemplo, na detecção de contatos geológicos laterais ou inclinados, mudanças de faces ou estruturas, como falhas e fraturas, além da avaliação de contaminação de aquíferos a partir de fontes poluidoras, prospecção de aquíferos em meio fissurado, prospecção de areia e cascalho, e aplicações na prospecção de sulfetos.

Quanto à Perfilagem Elétrica de Poço, é aplicada em investigações dentro de poços, em outras palavras, é um termo genérico usado para designar os perfis de poços que medem alguma propriedade elétrica da rocha.

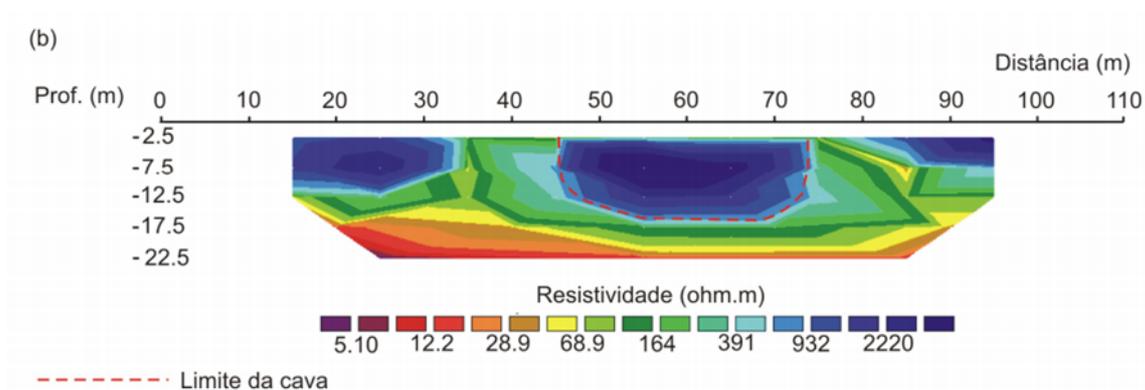
Direcionando a discussão à interpretação dos dados gerados a partir da eletrorresistividade, pode-se obter análises qualitativas e quantitativas. O que diferencia um caso do outro é o fato de que nos estudos qualitativos os valores de resistividade não são absolutos e tem por objetivo abordar a superfície da estrutura. Já nas abordagens quantitativas, implementa-se parâmetros quantitativos ao modelo. As Figuras 02 e 03 apresentam uma pseudoseção de resistividade e uma seção de resistividade, respectivamente.

Figura 2 – Pseudoseção de resistividade



Fonte: Lago [2009].

Figura 3 – Seção de resistividade



Fonte: Lago [2009].

A interpretação qualitativa, em levantamentos 2D, procura relacionar as variações laterais do parâmetro físico resistividade a estruturas, corpos e camadas geológicas, como contatos, zonas de falha/fratura e áreas com contaminação. Levando em consideração que o parâmetro físico é aparente e sofre influência de todos os elementos adjacentes, é necessária atenção para definir a posição de corpos e estruturas verticais e subverticais.

Frente a interpretação quantitativa, Lago [2009] afirma que atualmente existem dois tipos de modelagem: a modelagem com vínculo de suavização e a modelagem poligonal. Na modelagem por suavização as pseudoseções modeladas obtidas são apresentadas sob a forma de isolinhas de resistividade, que assumem as formas aproximadas dos corpos investigados. Na modelagem poligonal, vários polígonos caracterizam os corpos e camadas existentes. Cada qual tendo um valor constante de resistividade.

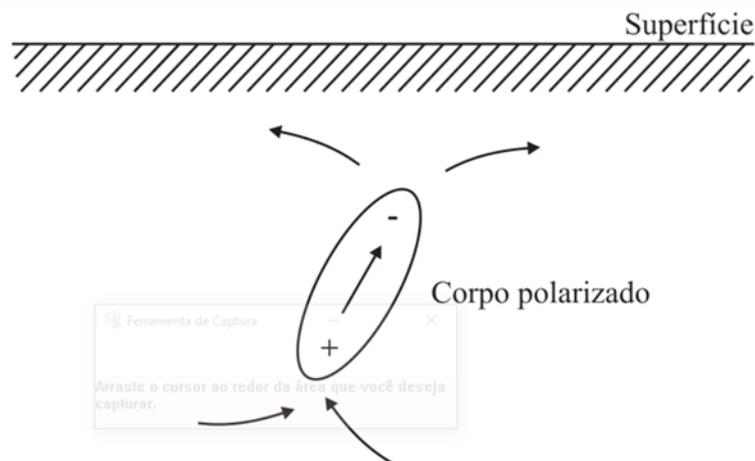
### **Potencial Espontâneo**

Potenciais elétricos naturais ou espontâneos ocorrem na subsuperfície terrestre e podem ser causados por atividades eletroquímica e eletrocinética. De acordo com Lago [2009], o fator de controle, em todos os casos, é a água subterrânea. Esses potenciais são associados com alteração de corpos de sulfetos, variações nas propriedades das rochas em contatos geológicos, atividade bioelétrica de materiais orgânicos, corrosão, gradientes termais e de pressão nos fluídos subterrâneos.

O mesmo autor pontua que as anomalias de potencial espontâneo são geradas pelos fluxos de fluidos, calor e íons no subsolo, e seu estudo tem sido útil para ajudar a localizar e delinear fontes associadas a esses fluxos. No caso de estudos ambientais, este método pode ser útil como indicativo de direções preferenciais de fluxos contaminados por poluentes, como churume e hidrocarbonetos. Em contraste com os outros métodos geofísicos, o potencial espontâneo é um método de campo natural, por não precisar de circuitos de emissão.

A principal vantagem da aplicação de acordo com os pesquisadores da área é sua simplicidade, tanto instrumental como em trabalho de campo. Além de baixo custo, baseia-se em determinadas condições, visto que certas heterogeneidades condutoras do subsolo se polarizam, tornando-se verdadeiras pilhas elétricas, que geram no subsolo correntes elétricas. Estas correntes produzem uma distribuição de potenciais observáveis na superfície do solo, o que revela a localização do corpo polarizado. A Figura 04 ilustra o processo descrito anteriormente.

Figura 4 – Polarização espontânea e localização dos polos de um corpo polarizado



Fonte: Lago [2009].

Ao analisar a Figura 04, pode-se identificar setas, que ilustram os caminhos de fluxo dos elétrons e íons negativos.

No que se refere a aquisição de dados a partir deste método, há duas maneiras básicas, que são o método de potenciais e o método de gradientes. Pesquisadores afirmam que são teoricamente equivalentes, entretanto, a prática de campo é bastante diferente, sendo o método de potenciais de uso mais recomendado.

O método dos potenciais consiste em determinar diretamente a diferença de potencial observada em relação a um ponto fixo. Para tanto, utiliza-se estações de medida distanciadas a intervalos regulares, em uma série de perfis paralelos entre si. Um dos eletrodos permanece fixo no início do primeiro perfil, junto com o equipamento de medida e o segundo eletrodo, móvel, é colocado sucessivamente nos pontos de observação previamente estaqueados sobre o perfil LAGO [2009]. O deslocamento do eletrodo móvel é feito por meio de um cabo, geralmente contido em uma bobina, que é desenrolada ou enrolada à medida que avança o levantamento.

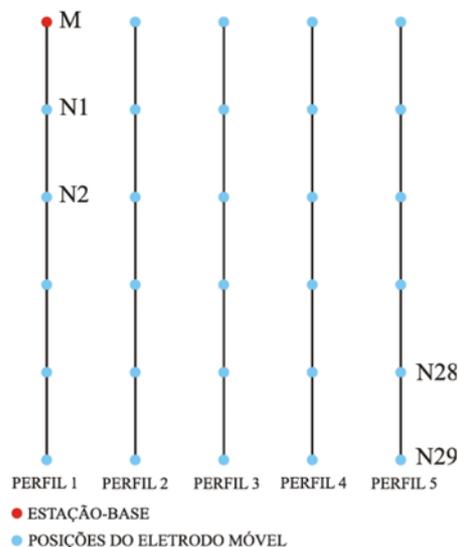
No método dos gradientes consiste na realização de medições das diferenças de potencial de forma seguida, como mostra a equação 08:

$$\Delta V1 = U1 - U0, \Delta V2 = U2 - U1 \quad (8)$$

Após a tomada da medida entre os pontos, o arranjo é deslocado no perfil de medidas, normalmente a intervalos regulares e iguais. O Menezes et al [2011] recomenda esse tipo de

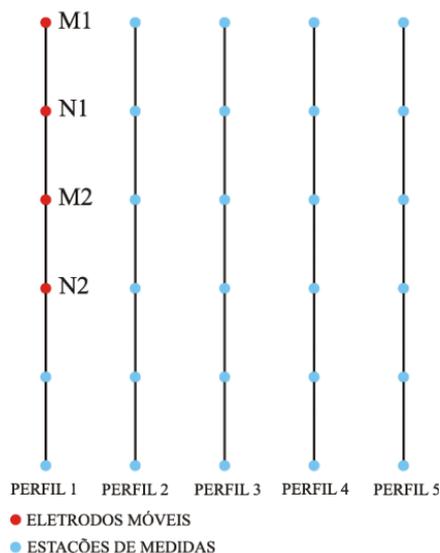
procedimento em áreas onde ruídos naturais ou de origem industriais tenham valores elevados. As Figuras 05 e 06 esquematizam ambos os métodos de coleta de dados.

Figura 5 – Aquisição de dados pelo método dos potenciais



Fonte: Lago [2009].

Figura 6 – Aquisição de dados pelo método dos potenciais



Fonte: Lago [2009].

Os dados obtidos pelo método do potencial espontâneo são apresentados sob a forma de perfis e mapas de equipotenciais. Quando sob a forma de perfis isolados, o único tratamento aplicado aos dados é, quando necessário, as correções devidas a alguns dos ruídos citados nos itens anteriores GALLAS [2005] apud Lago [2009]. Já no caso da apresentação dos resultados sob a forma de

mapas, pode ser necessário filtrar os dados. Menezes et al [2011], os dados SP podem ser interpretados qualitativamente, geometricamente ou analiticamente. A interpretação dependerá dos objetivos da investigação, da qualidade dos dados de campo, da quantidade de informações geológicas e geofísicas disponíveis e dados hidrológicos, bem como o tempo e recursos computacionais disponíveis para a fase de interpretação da investigação.

A interpretação qualitativa envolve a preparação de perfis, contornos e inspeção visual dos dados para procurar padrões conhecidos ou características de fontes desejadas. Esta interpretação tem-se revelado útil em muitos casos onde os dados do potencial espontâneo foram utilizados, primeiramente, para indicar localizações para investigações geotécnica ou geofísica mais detalhada. Porém, a utilização da técnica de interpretação geométrica, que requer um esforço adicional mínimo, ajuda a fornecer informações acerca da profundidade e configuração das fontes de anomalia, assim como sua localização. A interpretação quantitativa é geométrica, envolvendo a utilização de curvas calculadas e contornos gerados por modelos de geometria simples.

## Ground Penetrating Radar

Este método baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas em altas frequências. O princípio físico e a metodologia de aquisição de dados GPR são semelhantes à técnica de reflexão sísmica e a técnica de sonar, mas neste caso utiliza-se a reflexão de ondas eletromagnéticas. Para Annan [2002], este método destaca-se em investigações rasas, devido a sua elevada resolução e aquisição de um grande volume de dados tomados em um pequeno intervalo de tempo. Trata-se de um método relativamente novo em relação aos outros métodos geofísicos.

A energia refletida é então registrada em função do tempo de chegada, amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido de um computador. Após o processamento dos dados, o resultado obtido é uma imagem de alta resolução da subsuperfície.

Os princípios físicos que descrevem este métodos são baseados nas Equações de Maxwell, que por sua vez definem o comportamento de um campo eletromagnético:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (10)$$

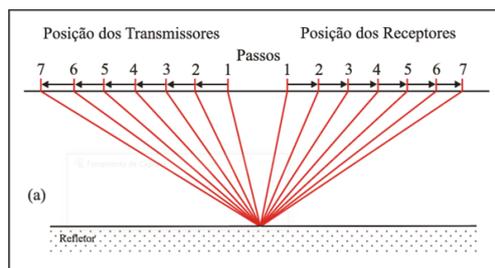
A introdução das relações constitutivas do meio nas equações de Maxwell faz-se necessária para a obtenção de informações sobre as propriedades elétricas dos materiais por onde atuam os campos elétricos e magnéticos. Segundo Menezes et al [2011], as propriedades elétricas e magnéticas que caracterizam os materiais geológicos são: condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética.

Quanto a obtenção dos dados, existem três técnicas de aquisição de dados de campo: perfis de reflexão, sondagens de velocidade e trans-iluminação ou tomografia de radar.

Nos perfis de reflexão, uma ou mais antenas de radar são movidas simultaneamente na superfície do solo, e os traços são adquiridos em intervalos de distância ou tempo contínuos. O resultado deste processo consiste em um perfil, onde no eixo horizontal as posições das antenas mostram as variações das propriedades dielétricas de subsuperfície em função do tempo duplo dos refletores no eixo vertical.

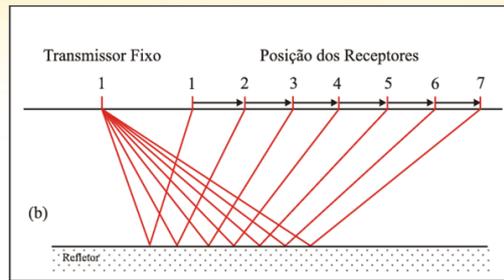
Quanto às sondagens de velocidade, são usadas para obter uma estimativa da velocidade do sinal GPR versus a profundidade na terra, através da variação do espaçamento das antenas para uma localização fixa e medindo-se a mudança de tempo duplo das reflexões de subsuperfície. Essa análise pode ser realizada a partir de suas técnicas: na técnica CMP, a abertura entre as antenas é crescente em sentidos opostos, partindo-se de um ponto central fixo. Já na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa, enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira. As Figuras 07 e 08 ilustram a sondagem CPM e WARR, respectivamente.

Figura 7 – Sondagem COM



Fonte: Lago [2009].

Figura 8 – Sondagem WARR



Fonte: Lago [2009].

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O petróleo se apresenta como um recurso indispensável para o bem-estar e manutenção das necessidades da população. Entretanto, se apresenta como um poluente altamente danoso ao meio ambiente visto que é constituído por cadeias de carbono, hidrogênio e outros materiais que contaminam o solo e água devido ao contato direto.

Nesse sentido, os métodos geofísicos são muito eficazes na detecção e dimensionamento de áreas prejudicadas pelo petróleo, o que a torna uma ferramenta de controle e estudo ambiental. Dentro deste contexto, foram abordados alguns dos métodos mais comuns empregados, dentre eles, a eletrorresistividade, a polarização induzida, o potencial espontâneo e o método Ground Penetrating Radar.

Assim, estudou-se os princípios elétricos e magnéticos que formam a base científica de cada método, bem como a forma de captura e processamento dos dados. Além disso, foram apontados os principais aspectos positivos de cada método.

## REREFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZAMBUJA, E.; COSTA, A. F. U.; NANNI, Arthur Schmidt. O EMPREGO DA PROSPECÇÃO GEOFÍSICA NA AVALIAÇÃO DE PLUMAS DE CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS. 1999. Disponível em: <<http://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/regeo99/1999-azambuja-costa.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2016.

ELIS, V. R. A geofísica como ferramenta para detectar e mapear contaminação. Disponível em: <[http://www.iag.usp.br/agua/geo/contaminacao\\_vagner.pdf](http://www.iag.usp.br/agua/geo/contaminacao_vagner.pdf)>. Acesso em: 18 maio 2016.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

LAGO, A. L. Investigação geofísica 2D e 3D com aplicação em meio ambiente: estudo sobre uma área de disposição de resíduos de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto-SP. 2009. 207 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/dou\\_lago.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/dou_lago.pdf)>. Acesso em: 18 maio 2016.

MENEZES, A. M. et al. ESTUDO GEOFÍSICO DE VAZAMENTO DE COMBUSTÍVEIS EM POSTO DE ABASTECIMENTO. Geociências, São Paulo, v. 30, n. 4, p.601-609, set. 2011. Disponível em: <<http://ppegeo.igc.usp.br/pdf/geosp/v30n4/v30n4a08.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2016.

MÉTODOS geofísicos. 1999. Disponível em: <<http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2013/11/6200.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2016.