

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

**Aplicação de métodos de eletrorresistividade em sedimentos marinhos:
Uma revisão**

HEYDE GONÇALVES GOMES CORREA

2016

MUSEU NACIONAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Aplicação de métodos de eletrorresistividade em sedimentos marinhos:

Uma revisão

HEYDE GONÇALVES GOMES CORREA

Monografia apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geologia do Quaternário, Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Geologia do Quaternário.

Orientadora: Eliane Guedes.

Rio de Janeiro

Maior de 2016

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE ELETORRESISTIVIDADE EM
SEDIMENTOS MARINHOS: UMA REVISÃO**

Heyde Gonçalves Gomes Correa

Orientadora: Eliane Guedes

Monografia submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia do Quaternário, Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Geologia do Quaternário.

Aprovada por:

Presidente, Prof. Dra. Eliane Guedes

Prof. Dra. Luciana Carvalho

Prof. Arthur Ayres Neto

Rio de Janeiro

Mai de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Correa, Heyde Gonçalves Gomes
Eletrorresistividade/ Heyde Gonçalves Gomes Correa. – Rio de Janeiro: UFRJ, 2016.
Xi, 260f.: il.; 31 cm.
Orientador: Eliane Guedes.
Monografia – UFRJ/MUSEU NACIONAL/Programa de Especialização de Geologia do Quaternário Pós-graduação, 2016.
Referências Bibliográficas: f. 89-95.
1. Estratégia Empresarial. 2. Estrutura organizacional. I. Bethlem, Agrícola de Souza. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Pós-graduação e Pesquisa em Administração. III. Título.

DEDICATÓRIA

Ao Deus Eterno!

RESUMO

Aplicação de métodos de eletrorresistividade em sedimentos marinhos:

Uma revisão

HEYDE GONÇALVES GOMES CORREA

Orientadora: Eliane Guedes

Resumo da Monografia submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia do Quaternário, Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Geologia do Quaternário.

Este trabalho apresenta a descrição da técnica geofísica de eletrorresistividade na forma de uma revisão bibliográfica. A técnica é utilizada com o objetivo determinar a resistividade elétrica de sedimentos através da medição do potencial gerado em dois eletrodos nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície (Telford, 1990). Para esta pesquisa foi abordado o método de eletrorresistividade e suas técnicas propícias em estudos ambientais. A investigação por eletrorresistividade reduz consideravelmente a necessidade de coleta de amostras e ensaios de laboratório implicando diretamente nos custos e prazos associados a projetos de avaliação ambiental. A conclusão visou estabelecer a funcionalidade do método para estudos de sedimentos marinhos através da medição de suas propriedades físicas.

Palavras- chaves: geofísica, eletrorresistividade, métodos geofísicos, revisão bibliográfica.

Rio de Janeiro

Maio de 2016

ABSTRACT

Application of electrical resistivity methods in marine sediments: A
review

Heyde Gonçalves Gomes Correa

Orientadora: Eliane Guedes

Abstract da Monografia submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia do Quaternário, Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Geologia do Quaternário.

This paper presents the description of the electrical resistivity geophysical technique in the form of a literature review. The technique is used in order to determine the electrical resistivity of the sediments by measuring the potential generated at the two electrodes near the current flow, thereby calculating the real or apparent resistivity in subuperficie (Telford, 1990). For this research was approached the electrical resistivity method and its favorable techniques in environmental studies. Research by electrical resistivity considerably reduces the need for sampling and laboratory tests involving directly the costs and time associated with environmental assessment projects. The conclusion method aimed to establish functionality for marine sediments studies by measuring their physical properties.

Key words: geophysics, electrical resistivity, geophysical methods, literature review.

Rio de Janeiro

Maio de 2016

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	VIII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SIGLAS	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVO	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE GEOFÍSICA	13
3.2. MÉTODOS GEOELÉTRICOS	14
4. MÉTODOS GEOFÍSICOS: ELETRORRESISTIVIDADE	18
4.1. TÉCNICA DE SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL (SEV)	19
4.2. IMAGEAMENTO ELÉTRICO (IE)	20
4.3. PERFILAGEM ELÉTRICA (PERF)	20
4.3.1. ARRANJO SCHLUMBERGER	23
4.3.2. ARRANJO WENNER	24
4.3.3. ARRANJO DIPOLO-DIPOLO (D-D).....	25
4.3.4. ARRANJO PÓLO-PÓLO (P-P)	26
5. SÍNTESE DE DADOS E COMPARAÇÃO	27
6. APLICAÇÃO DE ELETRORRESISTIVIDADE EM SEDIMENTOS	
MARINHOS.....	31
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	32
8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	33

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: Principais métodos geofísicos, destacando em vermelho o Método de Eletrorresistividade (ER), o intuito deste estudo	14
FIGURA 2: Princípio do método de eletrorresistividade	18
FIGURA 3: Técnicas utilizadas em ensaios de campo para o método de eletrorresistividade	19
FIGURA 4: Arranjo Schlumberger	23
FIGURA 5: Arranjo Wenner com espaçamento entre os eletrodos	24
FIGURA 6: Arranjo Wenner alfa, beta e gama	25
FIGURA 7: Arranjo Dipolo-Dipolo	26
FIGURA 8: Arranjo Pólo-Pólo	27

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Métodos geolétricos e os parâmetros físicos analisados	17
TABELA 2: Valores de resistividade para alguns tipos litológicos e água associada	18
TABELA 3: Valores de A, B, C, para comparar as suas diferentes configurações	23

LISTA DE SIGLAS

LNAPL – Fases líquidas não aquosas.

IP – Polarização Induzida

SEV- Sondagem Elétrica Vertical

EM- Eletromagnético Induzido

ER- Eletroresistividade

SP- Potencial Espontâneo

GPR- Radar de Penetração

SEV- Sondagem Elétrica Vertical

IE- Imageamento Elétrico

PERF- Perfilagem Elétrica

D-D- Dipolo-Dipolo

P-P- Pólo- Pólo

1- INTRODUÇÃO

A Geofísica é uma ciência multidisciplinar que estuda a estrutura, composição e processos atuantes no interior da Terra, e as propriedades dos materiais que a compõe, a partir de dados coletados por instrumentos específicos, que utilizam diversos métodos físicos para obtenção das informações a serem analisadas (Kearey *et al.* 2002).

Como o interior da Terra é inacessível à observação direta, são necessários métodos indiretos de investigação, como a geofísica global (Kearey & Vine, 1996) ou a geofísica com fins de engenharia, prospecção mineral e ambiental (Vogelsang, 1995).

A geofísica é uma área da física que utiliza técnicas não destrutivas para o reconhecimento de estruturas subsuperficiais, onde a sua aplicação se dá tanto em regiões mais profundas da Terra como estruturas mais superficiais (Teixidó, 2012).

Ao longo do tempo, com o desenvolvimento da área da computação, os métodos geofísicos vem fornecendo resultados cada vez mais precisos, pois com a necessidade de ferramentas de aplicação rápida e de relativo baixo custo para avaliar e monitorar contaminação, estes métodos tem atraído a atenção de diversos pesquisadores.

A eletrorresistividade é um método geofísico baseado no fato de que diferentes materiais geológicos apresentam diferentes valores de resistividade elétrica, ou seja, é um método baseado na capacidade dos materiais naturais de transmitirem corrente elétrica contínua ou de frequência muito baixa (frações em Hz), geradas naturalmente ou injetadas artificialmente, o qual é introduzido no solo por intermédio de um par de eletrodos. E com as medições realizadas na superfície, pode-se determinar, no subsolo, a existência de corpos minerais e reconhecer estruturas geológicas em subsuperfície (Telford *et al.* 1990).

O objetivo deste trabalho é demonstrar a importância da eletrorresistividade e suas aplicações em estudos ambientais aplicados a sedimentos marinhos.

2- OBJETIVO

Identificar por meio de revisão bibliográfica as aplicações do método de eletrorresistividade em sedimentos marinhos para avaliação das técnicas em estudo de campo.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo constitui-se de uma revisão da literatura realizada entre setembro de 2015 e abril de 2016, no qual realizou-se uma consulta aos livros sobre o tema de Geofísica de Prospecção e Geofísica Aplicada. E a periódicos presentes através de buscas no banco de dados do Scielo, AGU Publications, ASTM Internacional, USGS, Science Direct, CPRM, e outros. Foi também utilizado dados de monografias encontradas em outras universidades sendo acessadas via internet como UNESP, UFF, UFPA e etc.

3.1- LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE GEOFÍSICA

A geofísica é um meio eficiente e eficaz em termos de identificação de informações geológicas em subsuperfície (U.S.EPA, 2008).

Sua palavra vem do grego e significa *Física da Terra*, referindo-se portanto a investigação do nosso planeta a partir de fenômenos físicos naturais ou provocados que nele se manifestam (Luiz & Silva, 1995).

A geofísica envolve diversos métodos de investigação, sendo que os mais empregados estão baseados em ondas (mecânicas e eletromagnéticas) e campos (eletromagnéticos) (Bortolin, 2009). Dentre estes, se destacam os métodos geofísicos (Figura 1).

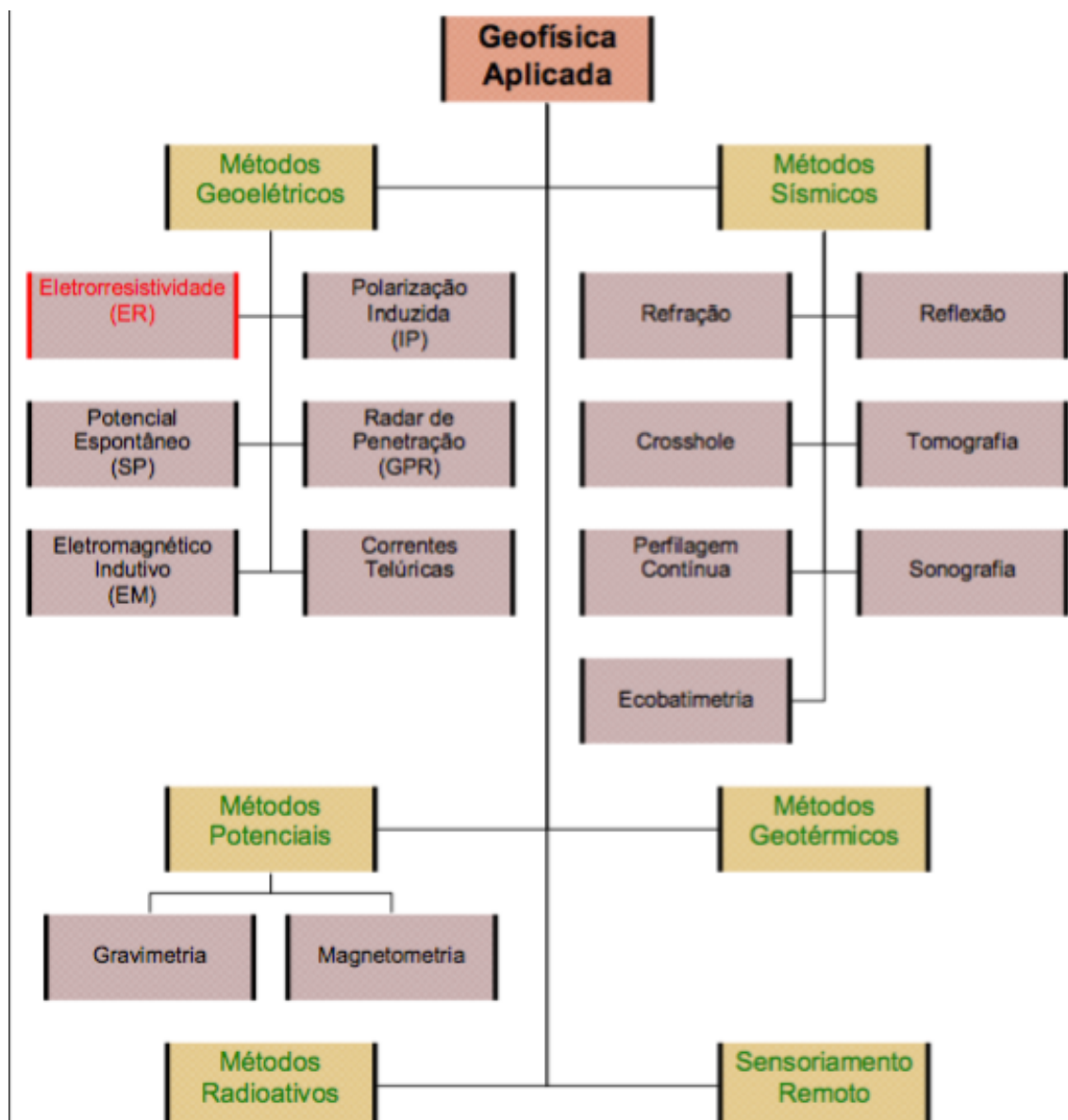


Figura 1: Principais métodos geofísicos, destacando em vermelho o Método de Eletrorresistividade (ER), o intuito deste estudo. Fonte: Bortolin, 2009.

3.2- MÉTODOS GEOELÉTRICOS

Dentre os principais métodos geofísicos para o estudo das estruturas geológicas da parte superior da crosta terrestre, destacam-se os métodos geoeletricos, os quais fundamentam os campos elétricos e eletromagnéticos (Braga, 2007).

Pertencentes ao grupo de métodos geoeletricos, podemos destacar os métodos de Eletrorresistividade, Polarização Induzida, Potencial Espontâneo, Radar de Penetração,

Eletromagnético Indutido (Tabela 1). Estes métodos, com exceção do potencial espontâneo, são artificiais; ou seja, o campo físico a ser estudado é criado por meio de equipamentos apropriados podendo produzir quadros mais detalhados e mais bem resolvidos na geologia da subsuperfície (Braga, 2007).

Os diferentes tipos de métodos geofísicos são escolhidos por necessidades diferentes de engenharia e suas aplicações.

O método de Polarização Induzida (IP) é um fenômeno elétrico estimulado por corrente, observado como resposta retardada à voltagem, em materiais naturais (Summer, 1976). O fenômeno se observa quando se faz passar corrente elétrica através de um eletrólito que contém corpos ou partículas que possuem condutividade eletrônica. O método da polarização induzida possibilita, de forma análoga a eletrorresistividade, a realização de sondagens e caminhamentos, utilizando as diversas configurações eletrônicas possíveis (Elis *et al.* 2014).

O método de IP é muito usado na determinação de variações laterais, detecção de estruturas, corpos subverticais (falhas e diques) e na detecção de alguns poluentes (Zampieri, 2009). Além de ser empregada na identificação de plumas de contaminação de resíduos inorgânicos e em estudos de depósitos minerais, principalmente em jazidas de sulfetos (West *et al.* 1983; Gallas, 2000).

Os dados obtidos com IP podem ser utilizados em conjunto com a resistividade elétrica, possibilitando uma melhoria da interpretação geofísica. Podem ser utilizadas para distinguir camadas geológicas que não respondem favoravelmente a um levantamento de eletrorresistividade ou para medição de outra propriedade física (cargabilidade) com intuito de melhorar uma interpretação hidrogeológica (Schoenleber, 2005).

Sua melhor vantagem é a determinação da direção de corpos e estruturas, permitindo visualização de anomalias em perfis. Mas requer grande arranjo artificial de fios e bons contatos entre os eletrodos e as camadas superficiais, onde são afetados por ruídos elétricos e eletromagnéticos, que podem prejudicar assim a sua funcionalidade (Zampieri, 2009).

O método de Potencial Espontâneo (SP) baseia-se na presença de um campo elétrico natural, que possibilita medir a diferença de potencial entre dois eletrodos introduzidos no terreno.

O método de SP constitui uma das mais antigas técnicas de prospecção geofísica e tem sido continuamente utilizado, com sucesso, numa grande variedade de estudos de

hidrogeologia, geotecnia e prospecção (Medeiros & Lima, 1999).

O método SP é causado por atividade eletroquímica ou mecânica. A água subterrânea é o agente mais importante no mecanismo de geração de SP. Os potenciais podem estar associados à presença de corpos metálicos, contatos entre rochas de diferentes propriedades elétricas (principalmente condutividade), atividade bioelétrica de materiais orgânicos, corrosão, gradientes térmicos e de pressão nos fluidos de subsuperfície (Gallas, 2005).

Sua principal vantagem é sua simplicidade, tanto instrumental como sua utilização no campo (Gallas, 2005). Sua vantagem se dá em dados qualitativos da profundidade dos corpos, mas também são susceptíveis a ruídos elétricos e eletromagnéticos (Zampieri, 2009).

O método de Eletromagnético Indutivo (EM) é bastante utilizado em estudos ambientais para medir a condutividade aparente do terreno em diversas profundidades e para monitoração de plumas de contaminação em aterros sanitários (Moreira *et al.* 2007).

Os métodos de EM não deve ser confundido com o método da resistividade elétrica. A diferença entre as duas técnicas é a forma que as correntes elétricas são forçadas a fluir no subsolo. No método eletromagnético, as correntes são induzidas no subsolo pela aplicação de campos magnéticos variáveis no tempo, enquanto no método de resistividade elétrica, a corrente é injetada no solo por meio de eletrodos de superfície. O método mede a condutividade eletromagnética em massa (o inverso da resistividade) do material do subsolo abaixo do transmissor e receptor de bobinas do instrumento (Schoenleber, 2005).

Sua principal vantagem é sua facilidade de aquisição de dados, versatilidade do equipamento em campo e a possibilidade de varredura de grandes áreas em um curto espaço de tempo e por ser utilização em investigações de poluição da água (McNeill, 1980a). Pode ser usado para localizar tubulações, cabos, cilindros de aço enterrados, resíduos enterrados e plumas contaminantes. O método também pode ser utilizado para mapear características geológicas rasas, tais como mudanças litológicas, camadas de argila, e zonas de falhas. Suas principais limitações são a susceptibilidade a ruídos elétricos e eletromagnéticos e a presença de materiais metálicos na superfície (Zampieri, 2009).

Já o método Radar de Penetração (GPR) emprega ondas de rádio entre 1 a 1000MHZ para adquirir informações relacionadas a subsuperfície. Variações nas propriedades elétricas do meio, principalmente condutividade elétrica e da permissividade dielétrica, fazem com que parte do sinal seja refletido para a superfície e parte continue se

propagando em subsuperfície (Alves, 2011). Quando necessário, a técnica de GPR deve ser integrada a outros métodos geofísicos e geológicos, para que forneça informações mais abrangentes e precisas do local de estudo (Schoenleber, 2005).

O método de GPR fornece em seu funcionamento um traço como resposta da propagação da onda eletromagnética em cada ponto do terreno amostrado. Este traço possui amplitudes proporcionais ao contraste elétrico dos materiais por onde a onda se propaga e quando colocados paralelamente formam uma imagem da subsuperfície a qual denomina-se radargrama (Alves, 2011).

Sua funcionalidade tem como identificar feições naturais da subsuperfície, como camadas rochosas de diferentes litologias e é bastante útil em estudos hidrogeológicos para localização de superfície freática e a delimitação de plumas contaminantes. Pode também ser empregado para localização de fontes pontuais de contaminação em subsuperfície, como reservatórios e tubulações (Benson, 1995). Sua principal desvantagem é sua limitação em investigação de profundidade e a presença de ruídos causados por objetos na superfície do solo, como cercas, linhas de transmissão de energia, prédios e árvores (Zampieri, 2009).

MÉTODOS GEOELÉTRICOS	PARÂMETROS FÍSICOS
Eletrorresistividade	Resistividade Elétrica
Polarização Induzida	Variações de voltagem
Potencial Espontâneo	Potencial natural
Eletromagnético	Condutividade
Radar de Penetração	Constante dielétrica / permissividade

Tabela 1: Métodos geoeletricos e os parâmetros físicos analisados. Fonte: Iamondi, 2009.

De um modo geral, a escolha de um método geofísico adequado ao estudo de um local contaminado se deve ao tipo de informação necessária para avaliação do problema, podendo ser usado um ou mais métodos em uma única investigação para corroboração do resultado.

4- MÉTODOS GEOFÍSICOS: ELETRORRESISTIVIDADE

Dentre os métodos geoeletricos, a eletroresistividade é provavelmente o mais simples para manipulação e entendimento. Este método procura identificar a distribuição da resistividade no solo e utilizá-la como subsídio no estudo da subsuperfície (Telford, *et al.* 1990).

O método de eletroresistividade emprega uma corrente elétrica artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos ou por contato de linha de comprimento (Figura 2), com o objetivo é medir o potencial gerado em outros dois eletrodos nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície. Neste contexto, a técnica de resistividade é superior, pelo menos teoricamente a todos os outros métodos elétricos, em função dos resultados quantitativos serem obtidos através de uma fonte controlada de dimensões específicas (Telford, *et al.* 1990).

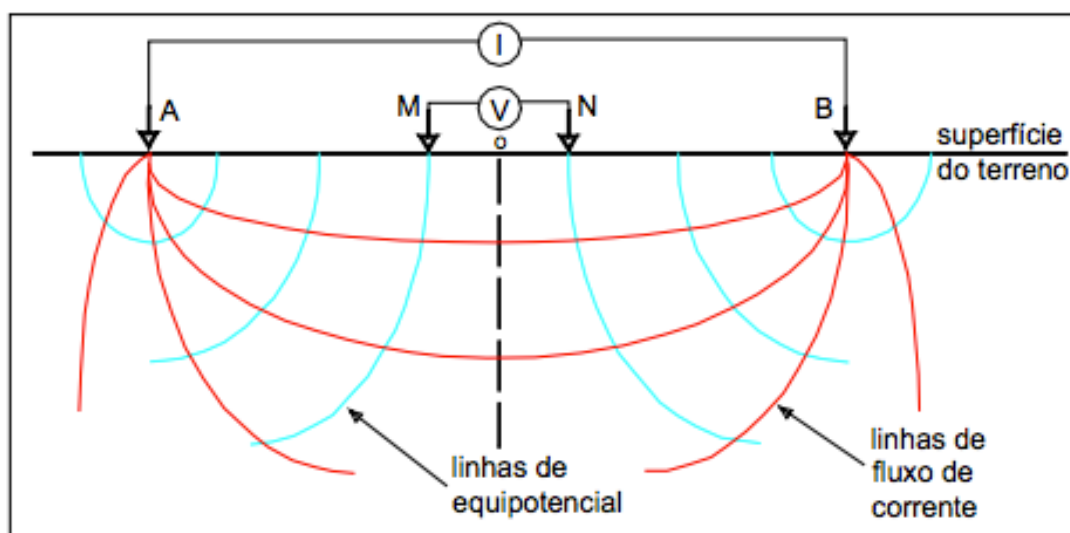


Figura 2: Princípio do método de eletroresistividade. Fonte: Erbe *et al.* 2010.

A aplicação de técnicas em campo (Figura 3) para o método de eletroresistividade podem ser por: Sondagem Elétrica Vertical (**SEV**) caracterizada pela investigação vertical pontual de parâmetros físicos com a profundidade; Imageamento Elétrico (**IE**) caracterizada pela investigação lateral das variações dos parâmetros físicos a uma ou várias profundidades constantes ; e Perfilagem Elétrica (**PERF**) caracterizada pela investigação lateral e vertical das variações de parâmetros físicos efetuadas no interior de furos de sondagens (Costa, 2008).

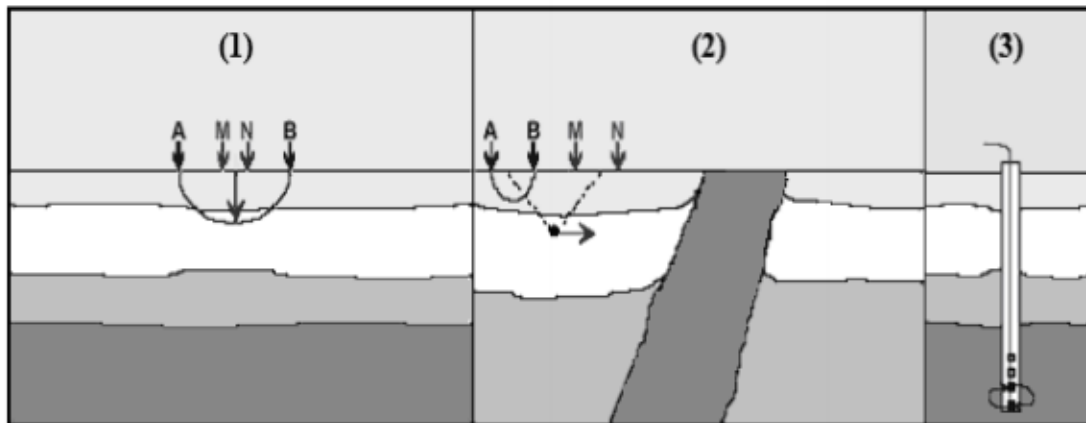


Figura 3: Técnicas utilizadas em ensaios de campo para o método de eletroresistividade. (1) SEV; (2) IE; (3) PERF. Fonte: Modificado de Braga, 2001.

4.1- Técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

A técnica da SEV consiste em investigar a variação vertical de resistividade em profundidade de uma seção geológica.

É considerada a melhor técnica para se detectar camadas geoeletricas de diferentes resistividades dispostas horizontalmente ou levemente inclinadas, possibilitando determinar profundidade de nível freático, assim como avaliar a vulnerabilidade de contaminação de aquíferos (Telford *et al.* 1990; Cutrim & Campos, 2010). A técnica consiste em injetar corrente elétrica no solo por dois eletrodos (A e B) e medir a diferença de potencial entre outros dois pontos (M e N), localizados entre os eletrodos de corrente. A resistividade aparente (ρ_a) do meio é calculada pela diferença de potencial (V), pela corrente elétrica (I) e pelo fator geométrico (k) (Bhattacharya & Patra, 1968):

$$\rho_a = \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \left(\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right)$$

Como a corrente flui de modo radial, à medida que se aumenta a distância entre os eletrodos A e B aumenta-se a profundidade de investigação, pois diversos fatores podem influenciar a real profundidade de investigação (Bortolin, 2009).

4.2- Imageamento Elétrico (IE)

A técnica do imageamento elétrico está baseada na realização de medidas da resistividade aparente ao longo de um perfil, com o objetivo de investigar suas variações em um ou mais níveis em profundidade (Gandolfo, 2007).

A técnica IE pode fornecer informações sobre limites de subsuperfícies distintas e podem indicar variações da litologia do solo ou rocha (Snyder *et al.* 1999).

Na prática dos levantamentos do IE denomina-se geralmente a fonte de corrente como transmissor e os circuitos relacionados com os eletrodos de potencial como receptor.

O arranjo dos eletrodos normalmente utilizados neste tipo é o dipolo-dipolo (mais sensível na identificação de estruturas verticais), onde a separação entre os eletrodos de corrente (AB) é a mesma dos eletrodos de potencial (MN). O procedimento mais comum é posicionar os eletrodos de corrente (AB) no início da linha. As leituras são feitas através de pares sucessivos de eletrodos de potencial (MN), igualmente espaçados. O transmissor (AB) é então deslocado para a próxima posição, na mesma linha, e o procedimento é então repetido (Stevenato *et al.* 2002)

Ou arranjo gradiente onde utiliza-se uma distância fixa (AB) entre os eletrodos de corrente e as medidas de diferença de potencial são procedidas em linhas paralelas (retângulo gradiente), não maiores que $L = AB/2$, ou em uma única linha (perfil gradiente) (Bertin & Loeb, 1976).

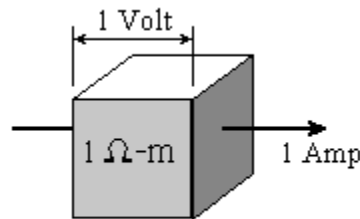
4.3- Perfilagem Elétrica (PERF)

A Perfilagem Geofísica é um método capaz de gerar perfis verticais integrando vários métodos geofísicos em um mesmo ponto, como Gama natural (mede a radioatividade natural das paredes do poço); Sônico (mede a variação da velocidade de propagação de onda); Resistividade Elétrica (mede a variação da resistividade das rochas) e outros (Nery, 1989).

Esta técnica consiste na descida de uma sonda, através do guincho até o fundo de um poço. Ao subir, a sonda realiza medições nas paredes do poço, que podem ser de radioatividade, resistividade, magnética, sônica e outros. Após concluir este procedimento obtém-se um perfil geofísico do poço, com o resultado integrado de todas as sondas utilizadas (Nery, 1989).

A diferença básica entre estas técnicas está no procedimento do campo, ou seja, na disposição dos eletrodos na superfície do terreno ou no interior de furos de sondagens (Braga, 2001).

A resistividade é uma propriedade pertencente a todos os materiais que permite ou inibe um maior fluxo de corrente elétrica. É definida como a tensão medida através do comprimento de um cubo de qualquer material, medida em V/m, dividida pela corrente que flui através da seção transversal deste mesmo cubo, medida em A/m².



Para realizar as medições e obter dados de distribuição da resistividade ao longo de pseudo secções, o equipamento mais utilizado é um resistivímetro, que está ligado a um grande número de eletrodos de forma automática, onde são efetuadas as leituras e armazenadas em computador para que seja realizado seu processamento de dados e inversão, onde transformará resistividade aparente em real. Na prática, a resistividade aparente é calculada por:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k$$

Sendo : (ρ_a) a função de forma de heterogeneidade da resistividade;
(k) é chamado fator geométrico do dispositivo;
(V) potencial resultante;
(I) corrente elétrica;
(ΔV) diferença de potencial elétrico.

A obtenção de um mapa com a distribuição da resistividade em profundidade envolve os seguintes passos (Oliveira, 2009):

1. Utilização do equipamento eletrorresistivímetro que conta com um microprocessador interno que realiza cálculos, fornecendo, entre outros parâmetros, o valor da resistência elétrica mediante os valores de corrente injetada e potencial medido;
2. Planejamento da prospecção;

3. Escolha do dispositivo elétrico;
4. Colocação dos eletrodos no solo e ligação dos cabos;
5. Obtenção e registro das leituras;
6. Transferência dos dados para o computador;
7. Processamento por inversão, onde será transformada em resistividade real.

A propagação de corrente elétrica em solos e rochas se dá devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras, sendo afetada principalmente pela composição mineralógica, porosidade, teor em água e quantidade e natureza dos sais dissolvidos. Estas condições é que possibilitam a aplicação da eletrorresistividade em estudos ambientais e hidrogeológicos, onde a presença de água nos poros e descontinuidades da rocha pode ser investigada pelo método (Elis *et al.* 2004).

Uma tabela com valores de resistividade (em ohm.m), ilustra a variação de alguns tipos litológicos (Tabela 2).

Tipo Litológico	Resistividade (ohm. m)
Zona não saturada	100 - 30.000
Água do mar	0,2
Água de aquífero aluvionar	10-30
Areia e cascalho seco	1.000-10.000
Areias e cascalho contendo água doce	50-500
Areia e cascalho contendo água salgada	0,5 - 5
Arenito argiloso contendo água doce	50 -300
Arenito quartzoso contendo água doce	300 – 10.000
Siltito argiloso	10 - 60
Siltito arenoso	10 - 60
Marga	20-100
Argilito	10 - 20
Arenito	80 -200
Calcário	500 - 1.000
Material argiloso	≤ 20
Material argiloarenoso	20 - 40
Material arenoargiloso	40 - 60
Material arenoso	≥ 60
Basalto/Diabásio	200 - 500
Gnaisse e granito alterados	100 - 1.000
Granito e Gnaisse	1.000 - 10.000

Tabela 2: Valores de resistividade para alguns tipos litológicos e água associada. Fonte: Palheta (2008), modificado Braga, 2007; Astier, 1975.

Os arranjos de campo referem-se a configuração dos eletrodos na superfície onde variam em função dos propósitos do levantamento, situação geológica e do tipo e qualidade de informações que se deseja obter (Gallas, 2000). Estes arranjos são feitos a partir da combinação com uma das três técnicas de ensaios e com um dos diversos arranjos propostos (Figura 4) para assim obter a aquisição de eletrorresistividade compatível com a situação geológica estudada (Filho, 2008). Dentre eles os mais usados em superfície são: Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo, Polo-Polo e outros (Tabela 3).

	Identificação de estruturas horizontais	Identificação de estruturas sub-verticais	Profundidade de investigação	Resposta do sinal	Cobertura horizontal
Wenner	A	C	B	A	C
Schlumberger	B	B	B	B	B
Dipolo-dipolo	C	A	B	C	A
Polo-polo	C	C	A	B	A

Tabela 3: Valores de A, B, C, para comparar as suas diferentes configurações (A= mais adequado, B= adequado, C= menos adequado). Fonte: Loke, 1999.

4.3.1- Arranjo Schlumberger

No arranjo Schlumberger, empregado principalmente em Sondagens Elétricas Verticais (SEV), os quatro eletrodos são dispostos em linha, sendo que os eletrodos de potencial (MN) são colocados entre os de corrente (AB) e distribuídos simetricamente em relação a um ponto central, sendo que a distância MN deve ser menor que a distância AB (Figura 4).

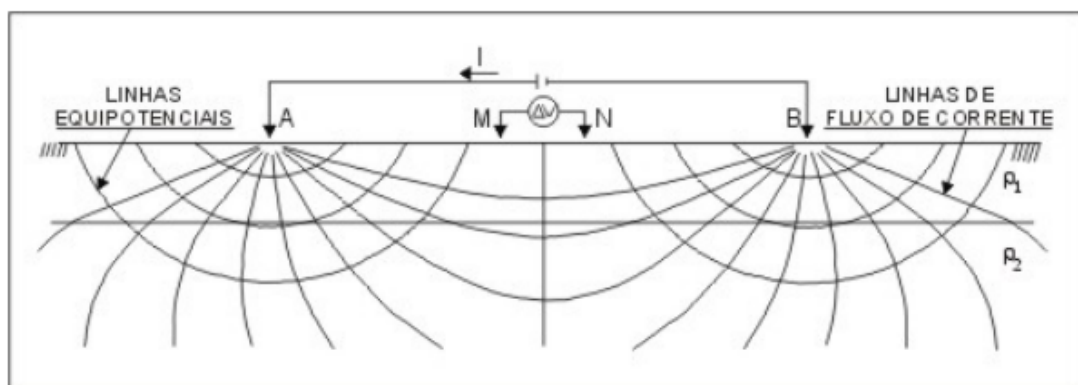


Figura 4: Arranjo Schlumberger. Fonte: Telford *et al.* 1990.

O arranjo Schlumberger é muito rápido, sendo necessário, praticamente, o deslocamento de apenas dois pares de eletrodos, do que decorrem leituras relativamente livres de ruídos parasitários. Neste tipo de arranjo o coeficiente geométrico K é obtido pela seguinte equação:

$$K = \pi \cdot (|AM| \cdot |AN|) / |MN|$$

É um arranjo com grande potencialidade de resolução de camadas horizontais, sendo utilizado para execução de SEV. Mas segundo Barker (1981), este arranjo se sobressai sobre o Wenner, pois a sensibilidade a efeitos laterais próximos a superfície (característica indesejável em SEV) pode ser efetivamente reduzida.

4.3.2- Arranjo Wenner

O arranjo Wenner utiliza quatro eletrodos dispostos em linha e igualmente espaçados. A menor distância entre dois eletrodos adjacentes é denominada “a”. A profundidade de investigação aumenta com a abertura dos eletrodos, sempre sendo múltipla de “a”. Desta forma, a distância “na” entre eletrodos AM, MN e BN, sempre se mantém constante no decorrer do levantamento (Figura 5).

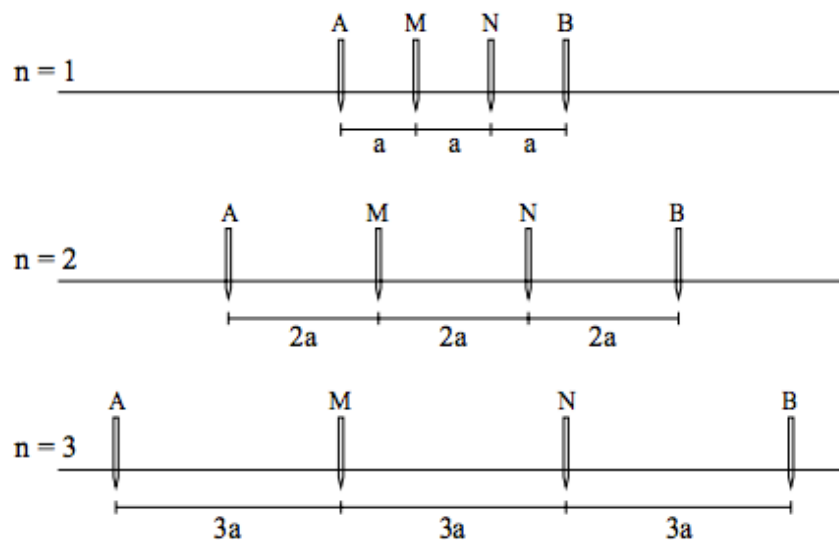


Figura 5: Arranjo Wenner com espaçamento entre os eletrodos. Fonte: Gandolfo, 2007.

Dependendo da disposição entre os eletrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N) este arranjo recebe três distintas denominações: alfa, beta e gama (Figura 6) (ter & Habberjam, 1956) .

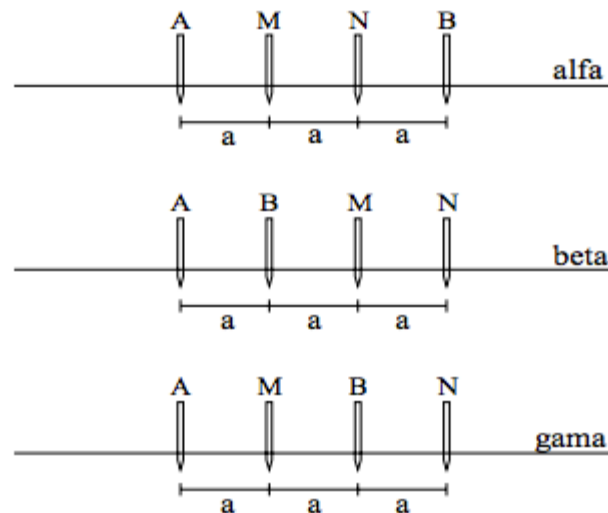


Figura 6: Arranjo Wenner alfa, beta e gama. Fonte: Gandolfo, 2007.

Dados obtidos com o arranjo de Wenner são menos susceptíveis a variações superficiais de resistividade, se comparados com arranjo de dipolo-dipolo. Sua principal vantagem está na elevada razão sinal/ruído, sendo que sua desvantagem se dá na rápida perda de cobertura de profundidade, pois com o aumento de espaçamento entre os eletrodos, a cobertura horizontal em subsuperfície diminui gradativamente (Gandolfo, 2007).

4.3.3- Arranjo Dipolo-Dipolo (D-D)

O arranjo Dipolo-Dipolo é considerado o mais difundido entre diversos arranjos existentes, sendo largamente utilizado em mineração, prospecção de água subterrânea, estudos ambientais e geologia de engenharia (Orellana, 1972).

Neste arranjo, os eletrodos são dispostos em linha e o espaçamento entre dois eletrodos de corrente e potencial permanecem fixos durante o levantamento. A aquisição de dados de campo consiste em executar uma série de medidas mantendo-se fixo o espaçamento dos dipolos de emissão (AB) e recepção (MN), aumentando a separação entre

eles de acordo com o fator $n'a$ (Figura 7). Cada afastamento corresponde a um nível de investigação de profundidade (Gandolfo, 2007).

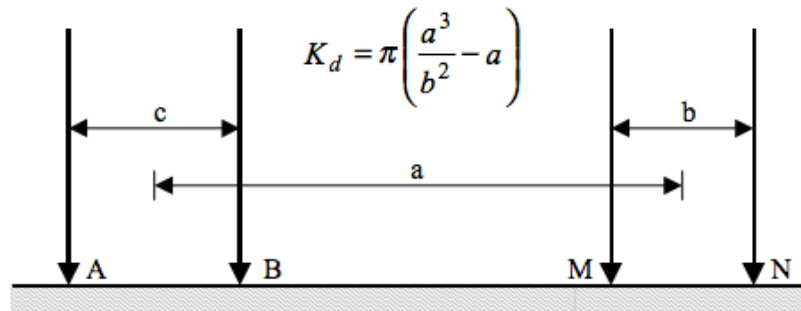


Figura 7: Arranjo Dipolo-Dipolo. Fonte: Silva, 2002.

O arranjo D-D por ser um arranjo simétrico, apresenta bom desempenho no mapeamento de estruturas verticais (mas não é considerado adequado na identificação de estruturas horizontais) e possui facilidade operacional em campo (Ward, 1990).

Oferece uma melhor resolução, se comparado aos arranjos gradiente e Polo-Dipolo. Porém, as anomalias são influenciadas por irregularidades da cobertura superficial (Coggon, 1973; Ward, 1990; Gandolfo, 2007).

4.3.4- Arranjo Pólo-Pólo (P-P)

O arranjo Pólo-Pólo é semelhante ao arranjo Pólo-Dipolo, onde um dos eletrodos de corrente (B) são mantidos a uma distância relativamente maior que outro eletrodo que permanece na linha, e um dos eletrodos de potencial (N) é espaçado com uma abertura, em média, dez vezes maior da abertura de outros eletrodos externos. Na linha de levantamento possui apenas dois eletrodos (Figura 8), um de corrente (A) e um de potencial (M), o que confere vantagens logísticas e operacionais na aquisição de dados em campo (Gandolfo, 2007).

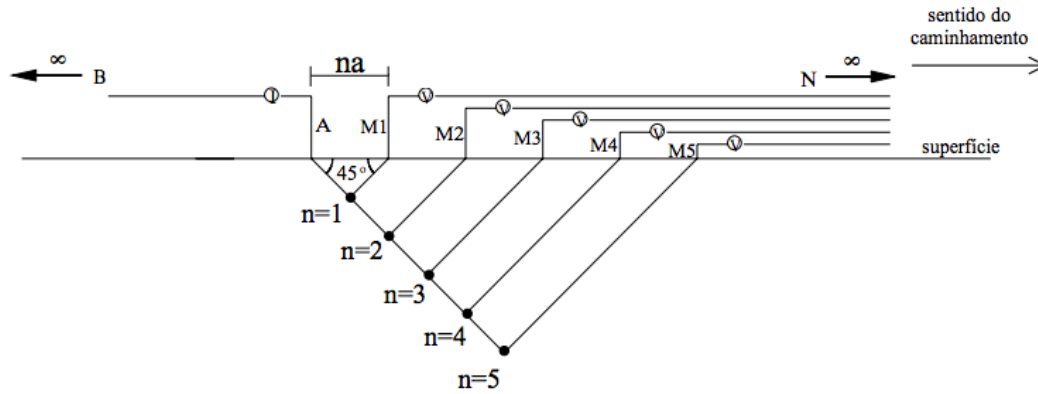


Figura 8: Arranjo Pólo-Pólo. Fonte: Gandolfo, 2007.

A principal vantagem do arranjo P-P está na possibilidade de ser alcançado níveis de investigação devido a elevada razão sinal/ruído. Mas em contrapartida, esta geometria é susceptível a ruídos de natureza telúrica, devido a grande distância existente entre os eletrodos de potencial, aliada a necessidade de espaço físico para sua instalação (Gandolfo, 2007).

No entanto, em termos de profundidade de investigação, o arranjo P-P oferece melhor desempenho (se comparado aos arranjos de Wenner e Dipolo-Dipolo), por apresentar maior cobertura horizontal, sendo ele determinante para levantamentos 3D, apesar da alta susceptibilidade a ruídos (Roy & Apparao, 1971; Gandolfo, 2007).

5- SÍNTESE DE DADOS E COMPARACÃO

Vários trabalhos podem ser encontrados na literatura relatando a utilização de métodos geofísicos em estudos de contaminação ambiental, geologia de engenharia, em caracterização de aquíferos, em áreas de disposição de resíduos sólidos e em pesquisas de águas subterrâneas.

Em estudos de solo, o método de eletroresistividade é considerado como um *proxy* para a variabilidade temporal e espacial de outras propriedades físicas (teor da água ou composição do fluido). Samouelian *et al.* (2005), realizaram estudos de levantamento e de imagens bidimensionais, onde explicaram os princípios básicos de interpretação de dados. Uma de suas conclusões antecipou que mesmo que não haja necessidade de perfuração dos solos para os estudos, as medições elétricas dão melhor compreensão da estrutura do solo e

de seu funcionamento em campos variados como agronomia, pedologia, geologia e engenharia civil.

O trabalho de Sauck (2000) identificou zonas de contaminação provocadas por vazamentos de hidrocarboneto em terreno arenoso. Sendo que devido a dinâmica do vazamento, a região é apontada como anômala de baixa resistividade na parte inferior da zona vadosa e superior ao aquífero, onde acontecem as flutuações do nível de água e a atividade microbiológica. Esta anomalia condutiva encontrou comprovação nos resultados de GPR e medições diretas no VRP (*vertical resistivity probes*).

Alguns trabalhos sugerem que a biodegradação de compostos (LNAPL) podem mudar as propriedades geoquímicas do aquífero de forma acentuada, que resultam em alterações significativas nas medidas de resistividade e na propagação de ondas eletromagnéticas (Sauck, 2000; Atekwana *et al.* 2000; Cassidy *et al.* 2001).

Em áreas contaminadas por derivados de petróleo sob remediação, um estudo utilizando o método de eletrorresistividade mostrou a neoformação mineral de óxidos e hidróxidos de ferro no centro e nas áreas adjacentes em Araras, São Paulo, apresentando valores de resistividade extremamente elevada presente nos solos de percolação recente (Braga & Moreira, 2009). As técnicas geofísicas utilizadas foram SEV, GPR, EM, onde são aplicáveis na caracterização e monitoramento de áreas contaminadas por NAPL (fase líquida não aquosa).

Em áreas de formações ferríferas, os métodos de eletrorresistividade possuem grande êxito na delimitação das áreas de exploração, pois diferenciam materiais mineralizados de estéreis, estabelecendo critérios para definir novos alvos de exploração (Costa, 2007).

Nas ocorrências de minério de ferro nas jazidas de Boa Esperança, Minas Gerais, com o grande contraste de resistividade elétrica entre as rochas da formação ferrífera (itabirito e hematita magnetíticas) e os gnaisses encaixantes, o método de eletrorresistividade forneceu o contorno da área de formação ferrífera, por meio do procedimento das Cartas de resistividade. O método também permitiu avaliar as ordens de grandeza das espessuras dessa formação pelo emprego do procedimento de sondagens elétricas (Davino, 1973). A baixa resistividade do gnaiss se deve à baixa resistividade das águas (da ordem de 5 ohm.m) que impregnam suas fissuras e fraturas, de acordo com a relação de Archie (1942). A diminuição da resistividade das águas e profundidade deve-se à sua lenta circulação e conseqüente enriquecimento em sais e reflete, de um certo modo, a natureza das rochas, as

condições climáticas e a morfologia da região. Já na Mina de Brucutu, também em Minas Gerais, Costa (2007) indicou a possibilidade de ocorrência de minério fora dos limites estabelecidos pelos modelos geológicos da mina, onde os valores de resistividade foram maiores em rochas encaixantes e com baixos valores em xistos.

Com finalidade de enriquecer o conhecimento sobre a estratigrafia em uma importante encosta coluvionar na Serra do Mar do Paraná, foram realizados ensaios por tomografias elétrica em 2D, obtendo inversão das resistividades aparentes para as resistividades reais, e sobrepondo as sondagens SPT para auxiliar na interpretação dos perfis. Vogt (2012), obteve dificuldade em classificar o solo pela resistividade, onde com a maior presença de água nas regiões estudadas, a eletrorresistividade apresentou valores mínimos. Isto pode ser devido a presença de descontinuidades eletroresistivas e zonas preferenciais de fluxo que contribuem para o fenômeno de rastejo da região, sendo necessária uma avaliação criteriosa em resultados fornecidos pela geofísica.

Alves (2011) analisou a aplicabilidade do GPR (Radar de Penetração no Solo) e método de eletrorresistividade na detecção de tubulações metálicas enterradas em subsuperfície utilizadas para o transporte de gás, óleo e derivados. O autor concluiu que a associação do método de GPR com o método de eletrorresistividade possibilitou correlacionar os dados contidos nos radargramas com os dados de resistividade aparente contidos nos perfis elétricos, de forma a mostrar que o modelo RAMAC foi capaz de fornecer informações de subsuperfícies somente nas regiões onde a resistividade aparente fosse superior a 90 ohm.m.

Freitas (2008), usando como base de modelagem dados de perfilagem de dois poços, verificou que o exame das curvas teóricas de resistividade e de efeito IP permitem reconhecer a presença de camadas de petróleo tanto por valores discretos de resistividade aparente quanto por distorções mais notáveis na curva de variação de IP. Ou seja, os métodos se mostraram sensíveis à quantidade de saturação de óleo das rochas, sendo mais eficaz em profundidade relativamente baixa.

O método eletrorresistivo mostrou-se eficiente também ao imagear as formações de Marizal e São Sebastião, contribuindo para melhor entendimento geológico da região e do seu aquífero, localizado na sede municipal de Alagoinhas, Bahia (Ribeiro, 2008).

Investigações geofísicas para caracterização de aquíferos em rochas fraturadas no complexo de granito em Itu, São Paulo, auxiliaram na localização de poços tubulares para exploração de águas subterrâneas como contribuição para a comunidade local, pois as principais fontes de água em superfície estão contaminadas. Metodologias como radar de

penetração no solo (GPR), levantamento elétricos, espectrometria e manometria de gás foram utilizadas e os seus resultados mostraram uma excelente concordância entre os métodos, permitindo a caracterização de perfis verticais de água nos granitos em uma profundidade de 30 m (Porsani, *et al*, 2005).

Rossetti *et al.* (2012), realizaram uma investigação na Ilha do Marajó, Pará, que consistiu com dados geofísicos de subsuperfície rasa, incluindo levantamentos de resistividade elétrica baseado em sondagem elétrica vertical (SEV) e radar de penetração no solo. Os altos valores de resistividade dos depósitos lamacentos foram ocasionados pela presença de um horizonte discordante de paleossolo laterítico, como é observado em várias bacias em todo o Norte do Brasil.

Medeiros & Lima (1999), realizaram medidas de Potencial Elétrico Espontâneo (PE) no interior de poços e na superfície da terra, ao longo de seções transversais sobre aquíferos fissurais em rochas cristalinas no Estado da Bahia, utilizando seções de resistividade aparente e perfis de PE em campo. Concluíram que o método PE pode ser usado como uma técnica geofísica complementar ao método de eletrorresistividade na distinção de áreas com permeabilidade relativamente alta no interior de aquíferos com porosidade fissural.

Silva (2008), investigou e mapeou a contaminação de neochorume em água subterrânea no aquífero freático do cemitério de Vila Rezende, em Piracicaba, São Paulo e aplicou os métodos de eletrorresistividade por meio de técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) e imageamento elétrico (2D). O autor conclui que as áreas de baixa de resistividade demonstram que a contaminação do local tem ligação com a profundidade do lençol freático e com o tempo de sepultamento. No entanto Bortolin (2009), realizou um monitoramento temporal da pluma de contaminação de um aterro controlado em Rio Claro, São Paulo por meio da eletrorresistividade, imageamentos elétricos com dipolo- dipolo, nos anos de 1999 e 2008 e concluiu que estes métodos mostraram-se eficazes na caracterização geométrica da cava de resíduos e do entorno do aterro, determinando níveis geométricos associados às formações geológicas, ocorrência de contaminação por chorume, profundidade do substrato rochoso local, profundidade do nível freático e sentido do fluxo de água subterrânea.

6- APLICACÃO DE ELETORRESISTIVIDADE EM SEDIMENTOS MARINHOS

Alguns ambientes geológicos podem apresentar características elétricas semelhantes por centenas de metros, enquanto outros consistem em camadas de rochas com diferentes resistividades e espessuras variáveis. O que determina as medidas geoelétricas num volume rochoso não homogêneo é a forma como essas propriedades variam no meio (Freitas, 2008).

O método eletrorresistivo permite o estudo de formações sub-horizontais, como também a determinação de formações sub-verticais (falhas), mesmo em grandes profundidades (Mendes, 1998).

Os métodos geofísicos em geral, tradicionalmente usados na prospecção de bens minerais, têm se mostrado de grande utilidade para este fim ao longo dos últimos 30 anos. Auken *et al.* (2006), ressaltam que as mais recentes aplicações de métodos elétricos e eletromagnéticos concentram-se na área ambiental, principalmente na avaliação de resíduos químicos em solos e em sedimentos. Vogelsang (1995) e Sharma (1997) descrevem vários exemplos de aplicação dos métodos geofísicos (eletroresistividade, eletromagnetismo, magnetometria, sísmica, geotermia, etc.) na avaliação de problemas ambientais. Entretanto, existe uma carência de estudos desta natureza em regiões costeiras.

Dois destes métodos tem mostrado especial aplicabilidade na investigação de problemas ambientais em áreas submersas; os métodos elétricos e a magnetometria.

Em relação aos métodos elétricos, foi trabalho pioneiro o estudo da caracterização geoelétrica realizado por Boice (1968) em sedimentos do Mar de Behring. Chessman *et al.* (1987), também desenvolveram estudos de condutividade em sedimentos marinhos utilizando métodos transientes eletromagnéticos. Ambos os estudos confirmaram que a eletrorresistividade de sedimentos marinhos superficiais variam grandemente, entre 0,1 e 10.000 ohm.m e é controlada pelo teor de argila, pela presença de água rica em íons dissolvidos e temperatura. Por outro lado, artefatos antropogênicos de caráter condutor, tais como resíduos metálicos, lixo e metais pesados, ou isolantes, como contaminantes orgânicos, afetam esta capacidade de conduzir corrente elétrica, resultando em valores anômalos (Auken *et al.* 2006; Atekwana *et al.* 2004).

Ayres *et al.* (1997 e 1998) mostram que a composição química do eletrólito presente em sedimentos marinhos superficiais 100% saturados que se sobrepõe ao arranjo estrutural da matriz do sedimento, tornando-se o principal fator controlador da resistividade elétrica nestes materiais. Fukue *et al.* (1999), estudou a contaminação de sedimentos marinhos por ferro, alumínio, manganês, titânio, cobre, zinco, vanádio e fósforo notando uma forte relação entre o desenvolvimento industrial e o grau de contaminação dos sedimentos marinhos. Shevnin *et al.* (2007), estudou a dependência do teor de argila na eletrorresistividade de sedimentos marinhos em estudos para dispersão de contaminação por hidrocarbonetos. Jansen *et al.* (2005), realizou medições *in-situ* de eletrorresistividade em sedimentos marinhos na costa da Ilha de Vancouver, Canadá, e evidenciou a relação entre estes valores e a porosidade e a condutividade térmica do sedimento.

Rocha *et al.* (1998), realizaram um levantamento de medidas geolétricas em regiões costeiras, mostrando que não foi possível realizar medidas profundas, uma vez que, a presença de sedimentos marinhos muito porosos e saturados com águas salinas impediram a passagem de corrente elétrica para as camadas subjacentes, ocorrendo assim uma baixa resistividade.

Por fim, deve-se ressaltar que somente os resultados dos ensaios geofísicos não são suficientes para se afirmar a existência de contaminação do solo, já que estes apenas fornecem indícios da existência de contaminantes. A contaminação e os níveis de contaminantes somente podem ser confirmados por meio de análises físico-químicas de amostras de solo e água, obtidas por meio de sondagens e poços de monitoramento.

7- CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A conclusão esperada foi esclarecer a funcionalidade do método de eletrorresistividade para estudos de sedimentos marinhos.

A razão de um levantamento bibliográfico de métodos geofísicos, como o método de eletrorresistividade visou estabelecer sua funcionalidade e se mostrou eficiente como uma ferramenta de detecção de possíveis contaminantes em diversas litologias. Mas não se descarta a necessidade de análises físico-químicas ou então a aplicação integrada de técnicas e métodos geofísicos para aprimoramento das análises com relação as quantificações e características dos materiais geológicos.

Os métodos de eletrorresistividade são úteis para trabalhos de prevenção contra a poluição, e também como monitoramento de processos que se encontram em desenvolvimento. Pode ser empregada no mapeamento do fluxo subsuperficial de águas contaminadas, fornecer informações sobre o perfil natural do solo, profundidade do substrato rochoso e zona saturada, detecção e mapeamento de contaminação, avaliação de infiltrações de barragens, determinação de fissuras, fraturas e a caracterização de solos, rochas e sedimentos.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves A.A. 2011. Análise da aplicabilidade do GPR e Eletrorresistividade na detecção de dutos. Trabalho de Conclusão de Curso. Bahia.
- Archie G.E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Petroleum Technology Tech.* Publ. 1422. Vol.5.
- Astier J.L. Geofísica aplicada a la hidrogeologia. Madrid: Ed. Paraninfo, 1975. 344 p.
- Atekwana E.A., Sauck, W.A., Werkema J.R.D.D. 2000. Investigations of geoelectrical signature at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics*, **44**, n. 2-3, p.167-180.
- Atekwana E.A., Roweb R.S.,Werkema J.R.D.D.,Legalld F.D. 2004. The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. *Journal of Applied Geophysics*. **56**. P: 281– 294.
- Auken E., Pellerin L., Christensen N.B., Sørensen, K. 2006. A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods. *Geophysics*, **71**, No. 5. 249– 260.
- Ayres A.N, Theilen F., Zeiler M., Schawarzer K. 1997. Electric Resistivity of Near Surface Marine Sediments of the German Coast at the North Sea. 5th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, São Paulo, Brazil.
- Ayres A., Theilen F., Zeiler M. & Schawarzer K. 1998. Der elektrischen Widerstand mariner Sedimente aus der deutschen Bucht. 58th Annual Meeting of the German Geophysical Society, Göttingen, Germany.
- Benson A. K. 1995. Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities. *Journal of Applied Geophysics*. **33**, 177-193.
- Bhattacharya P.K., Patra H.P. 1985. Direct Current Geoelectric Sounding. *Elsevier Publishing Company*, New York, 134p.
- Barker R. D. 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, **54**, n.8, p. 1031-1037.
- Braga A. C. O. Métodos Geométricos aplicados: Modulo Hidrogeologia. Universidade Estadual Paulista UNESP/IGCE/DGA. Rio Claro. 2001, 91 p.
- Braga A.C.O. 2007. Métodos Geométricos Aplicados. Módulo: Hidrogeologia. Unesp. Campus Rio Claro. Acessado pela internet: 25/12/2015.
- Braga A.C.O., Moreira C.A. 2009. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. *Eng. Sanit. Ambient.* vol.14 n.2. Rio de Janeiro.

- Bertin J. & Loeb J. 1976. Experimental and Theoretical Aspects of Induced Polarization. *Geoexploration Monographs*, 1, n.1. 250p.
- Boice R.E. 1968. Electrical resistivity of modern marine sediments from the Bering Sea. *Journal of Geophysical Research*. **73**, Issue 14. Pages 4759–4766.
- Bortolin J.R.M. 2009. Monitoramento Temporal da Pluma de Contaminação do Aterro Controlado de Rio Claro (SP) por meio do Método da Eletroresistividade. Dissertação de Mestrado em Geociências e Meio Ambiente. Rio Claro (SP).
- Boyce R.E. 1968. Electrical Resistivity of Modern Marine Sediments from the Bering Sea. *J. Geophys. Research*, **73**. 4759-4766.
- Bussian A.E. 1983. Electrical Conductance in a Porous Medium. *Geophysics*, **48**, No. 9. 1258-1268.
- Carpenter P.J., Kaufmann R.S & Price B. 1990. The use of resistivity soundings to determine landfill structure. *Groundwater*, **28**: 569-575.
- Cassidy D.P. 2001. The effects of LNAPL biodegradation products on electrical conductivity measurements. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, **6**, n. 1, p. 47-52, 2001.
- Chessman S.J., Edwards R.N. & Chave A.D. 1987. On the theory of sea-floor conductivity mapping using transient Electromagnetic Systems. *Geophysics*, **52**, no.2. P: 204-217.
- Cosenza P., Marmet E., Rejiba, F., Cui, Y.J., Tabbagh A. & Charlery Y. 2006. Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics*. 165–178.
- Coggon J.H. 1973. A comparison of IP electrode arrays. *Geophysics*, **38**(4): 737-761.
- Costa R.T. 2007. Análise de dados de cargabilidade, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética na Mina de Brucutu, Mg. Dissertação De Mestrado Em Geociências. Porto Alegre.
- Costa A.F. 2008. Emprego do método de eletroresistividade na caracterização da lixeira de Porto Velho – RO assentada em meio fraturado. Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente. Rio Claro/SP.
- Cutrim A.O. & Campos J.E.G. 2010a. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT), usando os métodos GOD e POSH. *Revista de Geociências, UNESP*, v. 29, p. 401-411.
- Davino A. 1973. Prospecção elétrica de ocorrências de ferro na Faixa Nova Era - Itamarandiba, Minas Gerais. *Boletim IG.Instituto De Geociências, Usp*, V. 4 : 53- 70.

- Elis V.R., Barroso C.M.R., Kiang C.H. 2004. Aplicação de ensaios de resistividade na caracterização do Sistema Aquífero Barreiras / Marituba em Maceió - AL. *Rev. Bras. Geof.* **22**, n.2, pp.101-113.
- Elis V.R., Pejon O.J., Gato M.C.H., Ustra A.T. 2014. Resistividade e polarização induzida no estudo de depósito de resíduos instalado em depressão originada de processos erosivos . *SBGF. Sociedade Brasileira de Geofísica*. Thirteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Erbe M.C.L., Stevanato R., Ferreira F.J.F. Aplicação da eletrorresistividade na avaliação de passiva ambiental: vala séptica de Curitiba – PR. *SBGF. IV Simpósio Brasileiro de Geofísica*. 2010.
- Freitas F.D.S. 2008. Modelagem geolétrica de reservatórios em ambientes de águas doces: estudos de sensibilidade de medidas de IP-Resistividade na exploração petrolífera. Trabalho de Conclusão de Curso. Salvador.
- Fukue, M., Minato T. 1999. "The microstructure of clays given by resistivity measurements." *Engineering Geology* . **54**. 43 - 53.
- Gallas J.D.F. 2000. Principais métodos geolétricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. Tese de doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Campus Rio Claro. Unesp. 174 p, Rio Claro.
- Gallas J.D.F. 2005. O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. *Rev. Bras. Geof.* **23**, n.2, pp.133-144.
- Gandolfo O.C.B. Um estudo do imageamento geolétrico na investigação rasa. São Paulo, 2007. 215 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Iamondi G.V. 2009. Geofísica aplicada no diagnóstico preliminar do antigo lixão do município de Rio Claro. - SP. Monografia do Curso de Engenharia. Rio Claro, São Paulo.
- Jansen D.T., Heesemann B., Pfender M., Rosenberger A., & Villinger, H. 2005. In situ measurement of electrical resistivity of marine sediments, results from Cascadia Basin off Vancouver Island. *Marine Geology*. **216**, 17–26.
- Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002. An Introduction to Geophysical Exploration. 3^a nd. Edition, Blackwell Publishing. 2006, 262 pp.
- Loke M.H. 1999. Electrical Imaging Surveys for Environment and Engineering Studies: A practical guide to 2D and 3D surveys. Malaysia.
- Luiz J.G. & Silva L.M.C. 1995. Geofísica de Prospecção. Belém: UFPA; *Cejup*, 24p.
- McNeill J. 1980a. Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers. Technical Note TN, 6: 6-15. Disponível em: < <http://www.geonics.com> > . Acesso em: 26 abril 2016.
- Mendes R.M. 1998. Utilização do método de inversão linearizada e do algoritmo genético na inversão de sondagens elétricas verticais. Trabalho Conclusão De Curso. Salvador.

- Medeiros W. E., Lima O.A.L. 1999. Origem Do Potencial Elétrico Espontâneo Em Rochas Cristalinas Fraturadas E Sua Utilização Na Locação De Poços. *Rev. Bras. Geof.* **17**,n.2-3, 103-116.
- Moreira C. A. *et al.*, 2007. Aplicação do método eletromagnético indutivo (EM) no monitoramento de contaminantes em subsuperfície. *Revista Brasileira de Geofísica*, **25**, n.4, São Paulo.
- Nery G.G. 1989. Perfilagem Geofísica de Poços., Boletim técnico da Petrobras.
- Oliveira J.P.L. 2009. Caracterização da pluma de contaminação numa antiga lixeira com o método de Resistividade Elétrica. Dissertação De Mestrado. Universidade Nova Lisboa.
- Orellana E. 1972. Prospección geoelectrica en corriente continua. Ed. Paraninfo, madrid, 523p.
- Palheta E.S.M. 2008. Estudo da compartimentação e arcabouço neotectônico da Ilha de Mosqueiro – Pará, empregado na prospecção hídrica subterrânea. Tese de doutorado. UFPA. Belém.
- Porsani J.L., Elis V. R., Hiodo F.Y. 2005. Geophysical Investigations For The Characterization Of Fractured Rock Aquifers In Itu, SE Brazil. *Journal Of Applied Geophysics*, **57**, 199-128.
- Ribeiro G.L. 2008. Avaliação geoeétrica da contaminação urbano-industrial do aquífero recôncavo no entorno de Alagoinhas, Bahia. Trabalho Conclusão De Curso. Salvador.
- Rocha P.L., Silva G.C., Polivanov H., Ribeiro N.M.S., Mores E.O. & Sobreira G.V.A. 1998. Environmental and Engineering Geophysics - 4rth Meeting - EEGS'98-European Section, Barcelona (Espanha).
- Rossetti D.F., Souza L.S.B., Prado R.L., Elis V.R. 2012. Neotectonics in the northern equatorial Brazilian margin. *Journal of South American Earth Sciences*, **37**,175–190.
- Roy A. & Apparao A. 1971. Depth Of Investigation In Direct Current Methods. *Geophysics*, **36**: 943-959.
- Sauck W.A. 2000. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics*, **44**, n. 2, p. 151-165.
- Samouëlian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richard G. 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil & Tillage Research*. **83**, 173–193.
- Schoenleber R.J. 2005. Field Sampling Procedures Manual. Department of Environmental Protection. New Jersey. Chapter 8.
- Pollack H.N. 1997. Thermal characteristics of the Archean. *In*: M. de Wit & L.D. Ashwal (eds.) *Greenstone belts*. Oxford Monographs on Geology and Geophysics, 25, Oxford University Press, p.: 223-232.
- Sharma P.V. 1997. Environmental and Engineering Geophysics. *Cambridge University Press*.

Sen P.N. & Goode P.A. 1992. Influence of Temperature on Electrical Conductivity on Shaly Sands. *Geophysics*, **57**, No. 1. 89-96.

Shevnin V., Mousatov A., Ryjov A., Rodriguez O.D. 2007. Estimation of clay content in soil based on resistivity modeling and laboratory measurements. *Geophysical Prospecting*. **55**, 265–275.

Snyder C., Havlin J., Kluitenberg G., Schroeder T. 1999. Evaluating the economics of precision agriculture. *In: Proceedings of the Fourth International Conference of Precision Agriculture, Part B, ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI, pp. 1621–1632.*

Silva R.S. 2002. Aplicação dos métodos geofísicos elétrico e eletromagnético na determinação de unidades sedimentares costeiras tropicais em Bragança Nordeste do Pará. Dissertação (Mestrado em geofísica) – Universidade Federal do Pará. 63p.

Silva R.W.C. 2008. Aplicação do método da eletrorresistividade na investigação e mapeamento da contaminação por cemitérios - o exemplo do cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/Sp. Dissertação De Mestrado Em Geociências e Meio Ambiente. Rio Claro, SP.

Stevenato R., Ferreira F.J.F., FILHO E.F.R., HINDI E. C. 2002. Imageamento Elétrico 2-D Aplicado à Exploração de Água Subterrânea no Embasamento da Bacia de Curitiba (PR). *In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002, Florianópolis-SC. Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas - Aquíferos Transfronteiriços.*

Sumner J. S., 1976, Principles of induced polarization for geophysical exploration: *Elsevier Scientific*, Amsterdam, 277p.

Teixidó T. 2012. The Surface Geophysical Methods: a useful Tool for the Engineer. *Elsevier*. 1st International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry. *Procedia Engineering*. **46**. 89 – 96.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. 1990. Applied Geophysics. New York: *Cambridge University Press*, 1990, Second Edition 770 p.

U.S.EPA, Use of Airborne, Surface, and Borehole Geophysical Techniques at Contaminated Sites. A Reference Guide, EPA/625/R-92/007, September 2008.

Vogelsang D. 1995. Environmental Geophysics. A Practical Guide. (Springer-Verlag Eds), p. 173.

Vogt V. 2012. Avaliação das propriedades geotécnicas de uma encosta coluvionar no oleoduto Araucária-Paranaguá (Olapa). Dissertação De Mestrado. Curitiba.

Zampieri M.R. 2009. Trabalho Geotecnia Ambiental. Engenharia Ambiental. Universitário Espírito Santo do Pinhal.

Ward S.H. 1990. Resistivity And Induced Polarization Methods. *Geotechnical And Environmental Geophysics. Tulsa: Society Of Exploration Geophysicists*.1: Review And Tutorial, P. 147-89.

