



Arranjo gradiente otimizado para a detecção de lixiviado em aterro sanitário

José Agnelo Soares¹, Danilo Brito da Costa², Luisa Thaynara M. de Souza Silva², Wlysses Wagner M. L. Costa²

¹Laboratório de Geofísica e Petrofísica, Universidade Federal de Campina Grande

²Grupo de Geotecnia Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Este artigo apresenta resultados obtidos pela aplicação de tomografia de resistividade elétrica (ERT) usando configurações alternativas de eletrodos para a detecção de lixiviado de um aterro sanitário. Foram registradas três linhas no entorno do conjunto de quatro lagoas de contenção de lixiviado, anexo à célula de resíduos sólidos. Para todas as linhas foi adotada a técnica do caminhamento elétrico com o arranjo gradiente multinível. O espaçamento entre os eletrodos de corrente foi de 50 metros, enquanto a distância entre os eletrodos de potencial foi de 2 ou de 4 metros, assim como o deslocamento lateral entre dois segmentos (*spreads*) sucessivos. Pontos repetidos de investigação em subsuperfície não foram registrados. As seções geoeletricas para todas as configurações testadas detectaram a ocorrência de água subterrânea suscetível à contaminação por lixiviado em locais posteriormente confirmados pela escavação de trincheiras, indicando que as configurações propostas não reduziram consideravelmente a capacidade de imageamento do método para o fim proposto, havendo um ganho de tempo na aquisição de dados.

Introdução

A resistividade elétrica é a propriedade física que apresenta um maior intervalo de valores possíveis em comparação com outras grandezas físicas medidas por outros métodos geofísicos. Neste sentido, o método da eletrorresistividade tem sido largamente utilizado na prospecção geofísica em estudos de exploração de água subterrânea e em diagnósticos geoambientais, dentre outras aplicações.

Os métodos geofísicos de investigação, particularmente os métodos elétricos são de natureza não invasiva, não alterando o meio físico, além de apresentarem fácil aplicação e rapidez na avaliação com custo relativamente baixo (BRAGA, 2006). Com relação aos estudos voltados para a investigação de água subterrânea e em diagnósticos geoambientais, o uso do método da eletrorresistividade tem apresentado boa resposta em relação aos parâmetros de interesse (SARAIVA, 2010).

Neste método as correntes elétricas artificialmente geradas são introduzidas no solo e as diferenças de potencial resultantes são medidas na superfície. Os desvios do padrão esperado das diferenças de potencial

forneem informações sobre a forma e as propriedades elétricas de heterogeneidades da subsuperfície (KEAREY et al., 2009). Para a aplicação deste método é preciso adotar um determinado tipo de arranjo de eletrodos, que consiste na maneira como os eletrodos de injeção de corrente e de medição do potencial elétrico são dispostos no terreno (MESSIAS et al., 2019).

Dahlin & Zhou (2004) conduziram simulações numéricas para comparar a resolução e a eficiência do método da eletrorresistividade usando dez diferentes tipos de arranjo de eletrodos. Eles concluíram que os arranjos dipolo-dipolo e gradiente apresentam alta resolução e vantagens logísticas em comparação com os demais tipos de arranjo. Aizebeokhai & Oyeyemi (2014) também avaliaram a eficiência do arranjo gradiente e concluíram que tal arranjo apresenta melhor logística de aquisição de dados e resulta em imagens geoeletricas de maior resolução quando comparado ao arranjo Wenner. Martorana et al. (2017) geraram dados sintéticos de levantamentos de eletrorresistividade para quatro diferentes arranjos de eletrodos (dipolo-dipolo, polo-dipolo, Schlumberger e gradiente). Os resultados mostraram que, para obter imagens geoeletricas com boa resolução, e ao mesmo tempo realizar a aquisição de dados com uma elevada velocidade, é recomendável usar os arranjos dipolo-dipolo ou gradiente. No entanto, a relação sinal-ruído do arranjo gradiente é melhor do que a do dipolo-dipolo (DAHLIN & ZHOU, 2004; SOARES & BATISTA, 2019), sendo esta a razão pela qual o arranjo gradiente multinível foi adotado neste trabalho.

A etapa de inversão dos dados registrados no campo resulta em imagens geoeletricas da subsuperfície e foi realizada utilizando o *software* Res2Dinv (GEOTOMO, 2003). Esse programa divide a subsuperfície em uma quantidade finita de blocos retangulares cujo arranjo é definido pela distribuição espacial dos dados registrados no campo. A inversão de dados é baseada no método dos mínimos quadrados, sendo aplicado algoritmo de inversão *smoothness-constrained least-squares*, o qual consiste na minimização da diferença entre os valores calculados de resistividade aparente e os medidos em campo, para isso fazendo o ajuste da resistividade de cada bloco (GROOT-HEDLIN & CONSTABLE, 1990; SASAKI, 1992; LOKE & BARKER, 1996). A profundidade final da imagem gerada está diretamente relacionada com a geometria do arranjo de eletrodos utilizado e com os valores de resistividade das unidades geológicas.

O arranjo gradiente multinível consiste em registrar diferenças de potencial elétrico entre sucessivas posições (eletrodos M e N) dentro do espaço compreendido entre os pontos de injeção de corrente (eletrodos A e B), conforme esquematizado na Figura 1. O valor de resistividade aparente para cada medição é

assinalado como representativo de um ponto em subsuperfície (x) cuja posição lateral e vertical depende das respectivas locações dos quatro eletrodos. À medida que o dipolo MN se afasta do eletrodo A o ponto x se afasta para a direita e se torna mais profundo, atingindo sua profundidade máxima quando o dipolo MN se encontra no centro do *spread*. Ao passar pelo centro do segmento e se aproximar do eletrodo B, o ponto assinalado em subsuperfície se torna cada vez menos profundo e mais próximo do eletrodo B, descrevendo uma trajetória em “V”, como se observa na Figura 1A.

Quando no levantamento se adota a técnica do caminhamento elétrico, todo o arranjo é deslocado lateralmente, de modo que a resistividade aparente de novos pontos de medição distribuídos em “V” na subsuperfície é registrada, conforme se observa na Figura 1B onde o registro do segundo *spread* se encontra sobreposto ao do primeiro (dois “V”s).

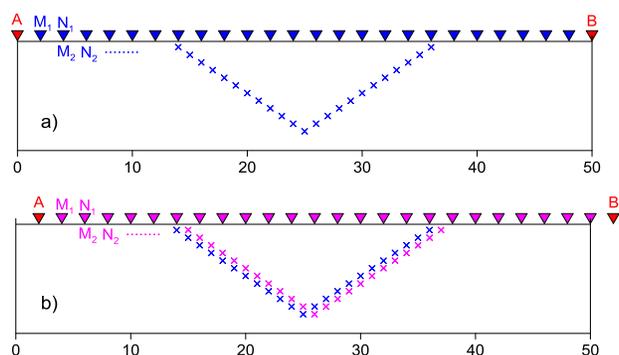


Figura 1 – a) Posições dos eletrodos de injeção de corrente (A e B) e de medição do potencial elétrico (M e N) para o primeiro *spread* do arranjo gradiente multinível, com respectivos pontos de medição (x) da resistividade aparente em subsuperfície; b) Localização dos eletrodos do segundo *spread* com sobreposição dos novos pontos de medição em relação aos de a).

O deslocamento lateral (*shift*) do arranjo em uma aquisição de dados por caminhamento elétrico é um múltiplo inteiro da distância mínima entre eletrodos. Para um determinado espaçamento entre eletrodos, temos a resolução lateral máxima quando esse múltiplo é igual a 1, pois os pontos de medição em subsuperfície estarão mais próximos entre si na direção horizontal (como na Figura 1b, como exemplo). Por sua vez, para uma determinada distância AB, a resolução vertical do arranjo gradiente é diretamente proporcional ao número de dipolos de potencial.

Ao se deslocar o arranjo sucessivamente, pontos de medição em subsuperfície podem se sobrepor, dando origem a uma redundância nos dados que torna o trabalho de registro de dados desnecessariamente mais demorado, especialmente quando se realiza a aquisição com um equipamento monocal, onde a troca de posição dos eletrodos é feita manualmente.

A depender dos objetivos do levantamento geoeletrico pode-se privilegiar as resoluções vertical, horizontal ou a agilidade da aquisição. Para isso pode-se trabalhar com diferentes configurações de eletrodos em termos do número de dipolos de potencial, do deslocamento do

arranjo entre dois *spreads* consecutivos e evitando-se o registro repetido para pontos de subsuperfície onde a medição já tenha sido anteriormente realizada.

Neste trabalho o método ERT foi aplicado com o objetivo de identificar a presença de lixiviado no entorno de lagoas de contenção de um aterro sanitário do município de Campina Grande, no estado da Paraíba. Três linhas geoeletricas foram registradas com diferentes configurações para testar se ao se privilegiar a agilidade no registro dos dados a perda de resolução não prejudicaria a capacidade de detecção do alvo.

Metodologia

Neste trabalho foram registradas três linhas de eleorresistividade no modo caminhamento elétrico no entorno de quatro lagoas de contenção de lixiviado adjacentes a uma célula de aterro sanitário (Figura 2).

No local investigado ocorre o Complexo São Caetano, de idade neoproterozóica (≈ 597 milhões de anos), onde ocorrem muscovita-biotita gnaisses homogêneos a bandados com transição para gnaisses migmatíticos eventualmente cisalhados e milonitizados (CPRM, 2022).



Figura 2 – Imagem de satélite mostrando a disposição da célula de deposição de resíduos, das lagoas de contenção de lixiviado e das três linhas geoeletricas.

Para a aquisição de dados foi utilizado um eleorresistivímetro monocal Bodensewerk GGA 30, disponível no Laboratório de Geofísica e Petrofísica da UFCG, com quatro eletrodos ativos em configuração de arranjo gradiente multinível. Para todas as linhas o espaçamento entre os eletrodos de injeção de corrente foi mantido fixo em 50 metros, enquanto o espaçamento entre os eletrodos de medição de potencial e o deslocamento entre *spreads* sucessivos do caminhamento elétrico foram de 2 ou 4 metros. A Tabela 1 apresenta os parâmetros variáveis adotados nos levantamentos. Em todas as linhas foram evitadas as medições que resultariam em pontos de medição em subsuperfície repetidos.

Como indicado na Tabela 1, a linha 1 foi adquirida com os parâmetros mais rígidos, o que lhe confere maior resolução, tanto vertical quanto lateral; a linha 2 com o

dobro do deslocamento entre *spreads*, portanto com menor resolução lateral; e a linha 3 adicionalmente com o dobro do espaçamento entre os eletrodos de medição de potencial, resultando na imagem geoeletrica de mais baixa resolução. Inversamente, como se observa na última coluna da Tabela 1, há uma crescente agilidade na aquisição de dados entre a primeira e a terceira linha.

Tabela 1 – Parâmetros adotados para o registro das linhas geoeletricas.

| Linha | Extensão (m) | \overline{MN} (m) | Shift (m) | Nº de medições | Medições/m |
|-------|--------------|---------------------|-----------|----------------|------------|
| 1 | 220 | 2 | 2 | 1098 | 5,0 |
| 2 | 78 | 2 | 4 | 159 | 2,0 |
| 3 | 200 | 4 | 4 | 244 | 1,2 |

A Figura 3 apresenta a disposição dos pontos de medição da resistividade aparente em subsuperfície para as três configurações apresentadas na Tabela 1. Nela vê-se de forma didática o efeito da variação dos parâmetros de aquisição sobre as resoluções horizontal e vertical.

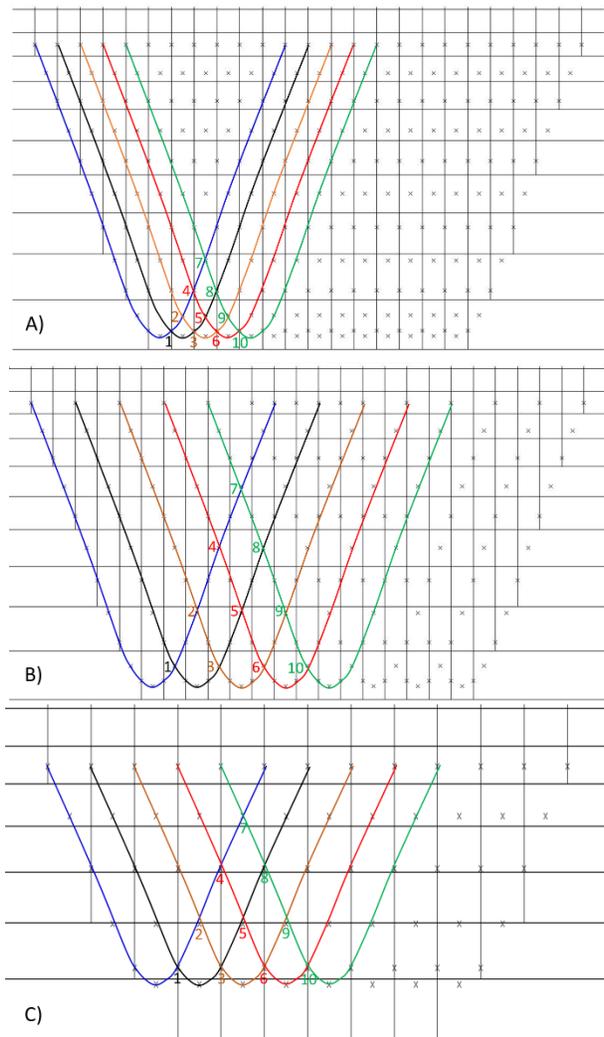


Figura 3 – Disposição dos pontos de medição em profundidade para: A) $\overline{MN} = \text{shift} = 2\text{m}$; B) $\overline{MN} = 2\text{m}$ e $\text{shift} = 4\text{m}$ e C) $\overline{MN} = \text{shift} = 4\text{m}$. Os números indicam, como exemplos, os pontos para os quais se evitou a medição repetida da resistividade aparente.

Na Figura 3 o número 1 indica que durante a medição do segundo *spread* (linha preta) não é necessário realizar a medição relativa ao ponto de cruzamento com a linha azul, pois a mesma já havia sido feita durante o registro do primeiro *spread* (linha azul). De maneira similar, os pontos 2 e 3 não precisam ser registrados durante as medições do terceiro *spread* (linha laranja), e assim sucessivamente. Ao se evitar essa redundância há uma redução no trabalho de campo sem perda de qualidade.

A inversão dos dados registrados foi realizada no *software* Res2Dinv v. 3.4, sendo adotado o refinamento da malha de blocos (largura dos blocos igual à metade do espaçamento mínimo de eletrodos). A fim de facilitar a comparação entre os valores de resistividade elétrica, adotou-se a mesma escala de cores para as três seções geoeletricas (em escala logarítmica).

Finalmente, foram realizadas escavações a fim de conferir se havia percolação de lixiviado nos locais indicados pela geofísica. Feições geológicas aflorantes também foram identificadas nas imagens geoeletricas.

Resultados

A Figura 4 apresenta as seções geoeletricas geradas para as três linhas registradas. Na Figura 5 as imagens georeferenciadas das seções geoeletricas se encontram superpostas à imagem de satélite a fim de correlacionar as zonas condutivas e resistivas com as suas posições em relação às lagoas de contenção.

Na linha 1, próxima da base da célula de deposição de resíduos (Fig. 6A), predominam valores baixos de resistividade elétrica ($\rho < 20 \text{ ohm.m}$) no terço final (NW) da seção até aproximadamente 4,5 metros de profundidade. Na vizinhança da posição 176 m dessa linha foi escavada uma trincheira que confirmou a presença de água a cerca de 4 m de profundidade, conforme se observa na Figura 7A. Esta água estaria sujeita à contaminação em caso de vazamento de lixiviado das lagoas de contenção, ou mesmo diretamente da célula de deposição de resíduos.

A linha 2 exibe uma zona condutiva contínua em toda a seção em toda a seção com aproximadamente 4 m de profundidade média, apresentando um suave decréscimo de espessura dessa zona condutiva em direção à extremidade SW da seção.

Na linha 3 a metade NW da seção também apresenta uma zona condutiva contínua próxima à superfície mas de menor espessura média (cerca de 2,5 m). Na posição 172 m há indicação de um possível paleocanal condutivo. Ocorre ainda uma feição resistiva subvertical aflorante na posição 44 m. Nesta posição foi observado um dique rochoso aflorante de rocha gnássica, conforme mostrado na Figura 7B.

De modo geral o estudo geofísico indicou uma área de perigo potencial em caso de vazamento de lixiviado na parte norte da área investigada, especialmente na área da lagoa de contenção 4, com fluxo subterrâneo no sentido SW em direção à lagoa natural de drenagem das águas pluviais.

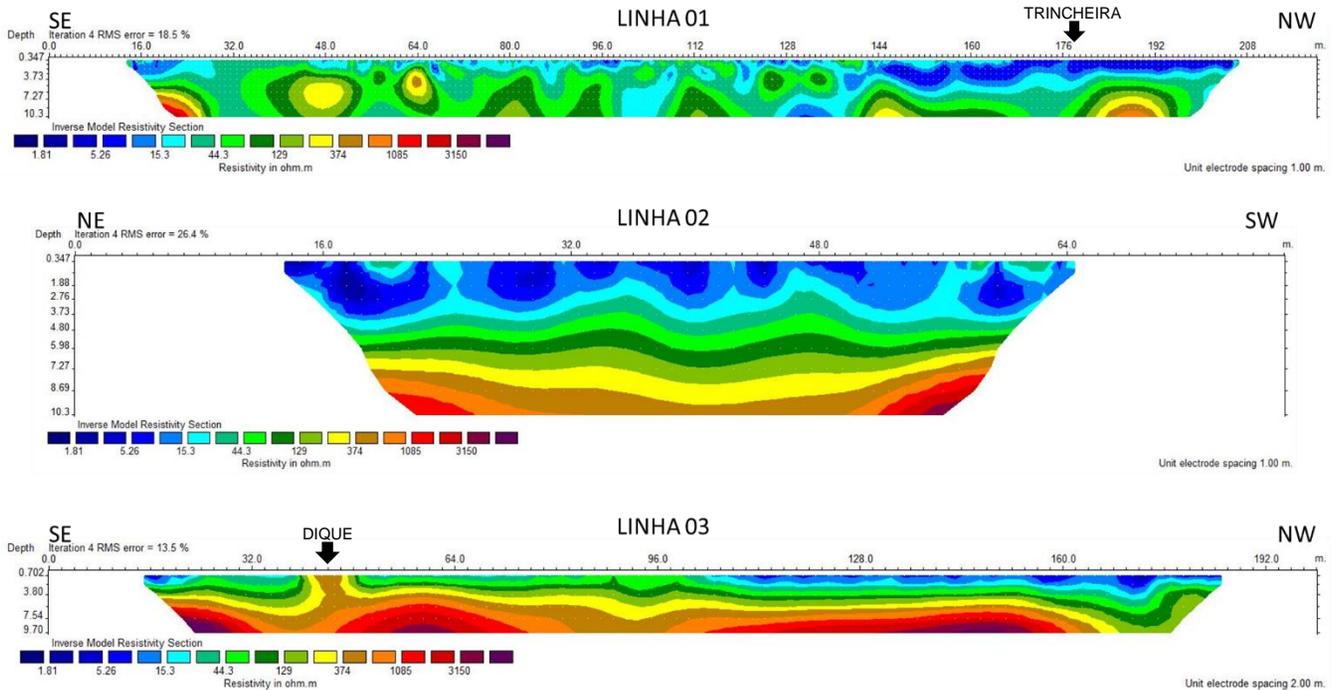


Figura 4 - Seções geoeletricas obtidas para as três linhas registradas no entorno das lagoas de contenção de lixiviado do aterro sanitário. As zonas azuladas (baixos valores de resistividade) indicam a presença de água e/ou lixiviado saturando o subsolo, enquanto que as regiões de elevada resistividade indicam a presença de rocha seca.



Figura 5 - Sobreposição das imagens geoeletricas georeferenciadas na imagem de satélite. Identifica-se que a região norte da área investigada se encontra mais susceptível à potencial percolação por lixiviado.

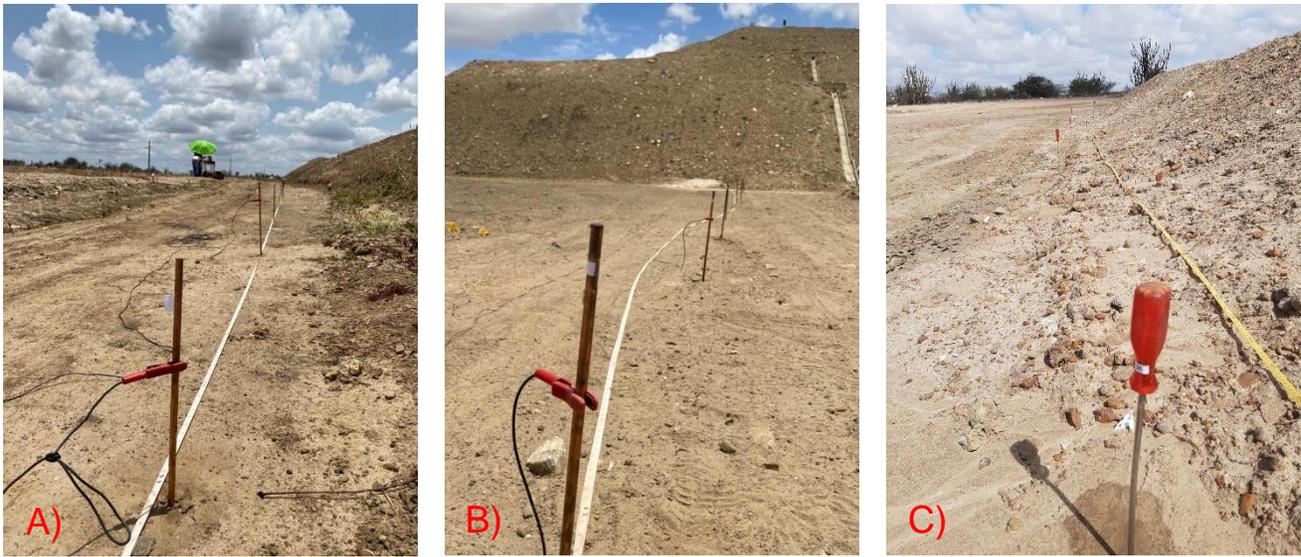


Figura 6 – Fotografias das linhas geoeletricas: A) Linha 1, paralela à base da célula de resíduos; B) Linha 2, perpendicular à base da célula; e C) Linha 3, entre as lagoas de contenção de lixiviado e a lagoa natural de drenagem das águas pluviais.



Figura 7 – A) Trincheira com saturação de líquidos a aproximadamente 4 metros de profundidade nas imediações da posição 176 m da linha 1. B) Dique subvertical de rocha gnáissica correspondente à feição resistiva aflorante na posição 44 m da Linha 3.

Discussão e Conclusões

O arranjo gradiente multinível se mostrou eficiente para a detecção de níveis saturados em subsuperfície. Esse tipo de arranjo é um dos preferidos para uso em levantamentos realizados com equipamento multicanal, onde o registro dos dados é realizado de forma automática, sem a necessidade de troca manual da posição dos eletrodos de medição.

Neste trabalho o arranjo gradiente multinível foi aplicado para a detecção de possível lixiviado percolando o subsolo no entorno de lagoas de contenção de um aterro sanitário. Para isso foi utilizado um eletrorresistivímetro monocanal, portanto realizando a troca de posição dos eletrodos de forma manual.

Com o objetivo de reduzir o tempo necessário para o levantamento geofísico, foram testadas três configurações alternativas para a aquisição dos dados. A primeira configuração consistiu em apenas evitar o registro de pontos redundantes de medição em subsuperfície. A segunda configuração adicionalmente adotou um deslocamento entre dois *spreads* sucessivos igual ao dobro do deslocamento adotado na primeira configuração. Por fim a terceira configuração adotou, adicionalmente à segunda configuração, um comprimento de dipolo de potencial igual ao dobro do comprimento utilizado nas linhas 1 e 2.

Embora as configurações mais simples apresentem uma perda de resolução (lateral no caso da linha 2, e tanto lateral quanto vertical no caso da linha 3), todas detectaram com sucesso o alvo pretendido. Níveis saturados em subsuperfície geralmente se apresentam na forma de estruturas relativamente planares, portanto são menos exigentes em relação ao nível de resolução (especialmente horizontal) necessário para a sua correta detecção, permitindo a adoção segura das configurações otimizadas testadas neste trabalho. Surpreendentemente feições geológicas de menores dimensões como o dique de rocha gnássica e o provável palocanal foram também detectados na linha 3, a de configuração mais otimizada.

As estratégias de simplificação para a configuração do arranjo gradiente multinível apresentadas neste trabalho multiplicam o potencial de uso desse arranjo por sistemas simples de aquisição de dados multicanal, gerando imagens ERT confiáveis e de amplas aplicações para o diagnóstico geoambiental, reduzindo o tempo necessário para medição, o que é benéfico em se tratando de investigações de grandes áreas e na diminuição da exposição dos operadores em ambientes insalubres como aterros sanitários, contribuindo ainda para redução de custos com mobilização de operadores e aumento da vida útil dos equipamentos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio logístico oferecido pela empresa Ecosolo Gestão Ambiental de Resíduos Ltda.

Referências

AIZEBOKHAI, A.P.; OYEYEMI, K.D. 2014. The use of the multiple-gradient array for geoelectrical resistivity and

induced polarization imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 111: 364–376.

BRAGA, A.C.O. 2006. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e prática. Tese (Livre Docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 121 p.

BRAGA, A.C.O. 2016. Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia. Editora Oficina de Textos, 2016, 160p.

CPRM, 2022. Serviço Geológico do Brasil. Portal GeoSGB. Mapa litoestratigráfico na escala 1:100.000. Disponível em <https://geoportao.cprm.gov.br/geosgb/>. Acesso em 18/06/2022.

DAHLIN, T.; ZHOU, B. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical prospecting*, 52(5): 379–398.

GEOTOMO. 2003. Software RES2DINV: Rapid 2-D resistivity & IP inversion using the least-squares method. Malaysia, ver. 3.53, 125 pp.

GROOT-HEDLIN, C.; CONSTABLE, S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55(12): 1613–1624.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. 2009. Geofísica de Exploração. Editora Oficina de Textos, 438 p.

LOKE, M.H.; BARKER, R.D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44: 131–152.

MARTORANA, R.; CAPIZZI, P.; D'ALESSANDRO, A.; LUZIO, D. 2017. Comparison of different sets of array configurations for multichannel 2D ERT acquisition. *Journal of Applied Geophysics*, 137: 34–48.

MESSIAS, G.C.; SOARES, J.A.; KIPPER, F.; GOMES, I.F.; SOARES JÚNIOR, V.P.; ALVES DA SILVA, J.F. 2019. Hydrogeophysics in fractured crystalline aquifers in English Guyana. *Brazilian Journal of Geophysics* 37(3): 299–308. ISSN 0102-261X.

SARAIVA, F.A. 2010. Avaliação de Métodos Geofísicos no Comportamento Espacial de Plumas de Necrochorume. Tese de Doutorado. Programa de Pósgraduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, 103 p.

SASAKI, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40: 453–464.

SOARES, J.A.; BATISTA, J.T. 2019. Detection of a fractured aquifer through multiple vertical electric soundings and by multilevel electric profiling. *Brazilian Journal of Geophysics* 37(4): 369–380. DOI: 10.22564/rbgf.v37i4.2015.