



Estudo do efeito de polarização induzida em meios contaminados por hidrocarbonetos – resultados preliminares

Andréa Ustra, IAG/USP, Brasil

Vagner Elis, IAG/USP, Brasil

Marina Minozzo, IGCE/UNESP, Brasil

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Uma área contaminada por hidrocarbonetos com conhecida atividade bacteriológica foi investigada pelos métodos Eletroresistividade e Polarização Induzida (IP). O objetivo desse estudo é relacionar a distribuição da resposta IP observada em uma área contaminada por derivados de hidrocarbonetos à presença de contaminantes e ocorrência de biodegradação natural. A área de estudos é uma indústria química que desenvolve atividades relacionadas à fabricação de tintas destinadas ao mercado automotivo. O levantamento de resistividade e IP foi realizado em uma área com conhecida contaminação por BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno) onde foram coletadas amostras de solo para contagem de bactérias. O levantamento geofísico consistiu na aquisição de uma malha retangular, composta por seis linhas paralelas de caminhamento elétrico, com o arranjo dipolo-dipolo. O espaçamento entre as linhas foi de 3 m, mesma distância entre os eletrodos de corrente e potencial. Os dados das seis linhas foram concatenados em um único conjunto de dados que foi submetido a rotina de inversão 3D. Baixas resistividades e cargabilidades e altas cargabilidades normalizadas foram interpretadas como resultantes do processo de biodegradação intrínseca e atenuação natural da contaminação local.

Introdução

O interesse na aplicação do fenômeno da polarização induzida (IP) para a investigação de processos ambientais tem crescido nos últimos anos. Os maiores problemas ambientais da atualidade incluem, entre outros, locais de disposição de resíduos originados por diversas atividades. Atividades industriais que produzam e disponham resíduos de hidrocarbonetos sobre o solo constituem séria ameaça para o meio ambiente. Apesar do reconhecimento como uma ferramenta útil para investigações geoambientais, o método da Polarização Induzida (*Induced Polarization* – IP) ainda reserva muitas

questões não respondidas em relação aos mecanismos físico-químicos que geram o sinal elétrico.

Sogade *et al.* (2006) investigaram uma pluma de contaminação com elevadas concentrações de benzeno e dibrometo de etileno, com concentrações acima do nível máximo permitido. Dados de IP foram coletados ao longo de uma linha que atravessava zonas contaminadas e não contaminadas. Os dados foram invertidos separadamente, a partir das janelas de curto e longo tempo de decaimento, produzindo uma diferença de cargabilidade espectral. Tanto a cargabilidade (invertida sem separar as janelas de aquisição) quanto a diferença de cargabilidade espectral, revelaram a localização da pluma, concordante com dados de poços. Martinho *et al.* (2006) realizaram experimentos de IP no domínio do tempo com o objetivo de estudar o sinal IP gerado pela contaminação de amostras argilosas por contaminantes orgânicos. Os resultados mostraram que valores mínimos para cargabilidade, constante de decaimento e capacitância, foram alcançados para certa quantidade de poluente. Um processo onde moléculas orgânicas revestem as superfícies das partículas de argila foi proposto e a diminuição do efeito de polarização de membrana pode explicar a interação entre minerais de argila e moléculas orgânicas.

Desde 1998 diversos trabalhos relataram a mudança da resposta elétrica de meios contaminados por hidrocarbonetos e essa mudança foi atribuída a biodegradação intrínseca e consequente atenuação natural da contaminação, realizada por microorganismos naturalmente presentes no solo (Sauck *et al.*, 1998, Sauck, 2000). Ntarlagiannis *et al.* (2005a) investigaram a sensibilidade de medidas de polarização induzida de baixa frequência em experimentos de precipitação de metal sulfeto micróbio induzida. Em um primeiro experimento, um fluxo contínuo ascendente de nutrientes e metais foi estabelecido através das amostras. Análises mostraram que a redução de sulfato micróbio-induzida levou à precipitação de metal nas células de bactérias, formando biominerais móveis. Em um segundo experimento as mesmas condições biogeoquímicas foram estabelecidas, exceto que não foi adicionado nenhum metal à solução. Observou-se a ausência de anomalias de polarização. Os autores atribuem ao aumento de polarização no primeiro experimento, um mecanismo interfacial metal/fluido que se desenvolve conforme metais de sulfeto se precipitam sobre as células microbiais e formam biominerais. Mudanças temporais na polarização e condutividade refletem mudanças na (1) quantidade de área interfacial metal/fluido, e (2) quantidade de condução eletrônica

resultante do crescimento microbial, movimento bacteriano e coagulação final. Ntarlagiannis *et al.* (2005b) estudaram a resposta elétrica de amostras de areia com diferentes concentrações de bactérias (metabolicamente inativas). Os autores observaram uma dependência da polarização em baixa frequência com a biomassa. Para baixas concentrações de bactérias a polarização diminuiu em até 60%, enquanto que para altas concentrações a polarização aumentou em até 15%. Os autores atribuem a polarização em baixas densidades celulares a alterações na interface mineral-fluido devido a interações mineral-células. A intensificação da polarização para altas densidades celulares é possivelmente um mecanismo de constricção de poro resultante da diminuição da mobilidade iônica e transferência de elétrons devido ao acúmulo de células nos poros.

Abdel Aal *et al.* (2006) mediram a resposta elétrica de amostras de uma área contaminada por hidrocarbonetos e com ocorrência de biodegradação. O aumento da fase e condutividade imaginária foram observados na zona contaminada por hidrocarbonetos na fase residual, em relação ao valores observados para amostras contaminadas por hidrocarbonetos na fase dissolvida, que por sua vez foram maiores do que as amostras não contaminadas. A condutividade real, entretanto, não revelou uma forte relação com a contaminação. Os autores sugerem que processos microbiais são responsáveis pelo aumento da resposta IP observada nos locais contaminados. Davis *et al.* (2006) mediram o espectro de condutividade complexa para investigar o efeito do crescimento microbial nas propriedades elétricas de meios porosos. Os autores observaram na condutividade imaginária coincidentes com os picos de concentração microbial nas amostras. Os autores sugerem que as mudanças na condutividade imaginária resultam do crescimento e fixação dos micróbios e biofilmes nas superfícies dos grãos de areia.

O objetivo desse estudo é relacionar a distribuição da resposta IP observada em uma área contaminada por derivados de hidrocarbonetos à presença de contaminantes e ocorrência de biodegradação natural. O levantamento de resistividade e IP foi realizado em uma área com conhecida contaminação por BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno) onde foram coletadas amostras de solo para contagem de bactérias. Baseado nessa contagem bacteriológica, a área do levantamento foi selecionada.

Área de estudo

A área de estudos é uma indústria química que desenvolve atividades relacionadas à fabricação de tintas destinadas ao mercado automotivo. O processo de produção empregado utiliza diversos solventes contendo hidrocarbonetos derivados de petróleo e organoclorados.

A área selecionada para o estudo foi contaminada por derrames acidentais de produto na porção jusante da fábrica. Salles (1999) apresentou mapas de isoconcentrações de Benzeno, Tolueno e Xileno, além de organoclorados, detectados nos poços de monitoramento da área.

O solo local varia entre argila e areia fina, com maior distribuição no intervalo de abrangência de silte, silte arenoso e areia argilosa. O sentido do fluxo subterrâneo na área é para o sul e sudeste.

Minozzo (2009) conduziu ensaios geofísicos na área da indústria, com os métodos Eletroresistividade, Polarização Induzida e Eletromagnético Indutivo. Os resultados sugerem a presença de contaminação e seu caminho preferencial, que segue o sentido do fluxo da água subterrânea. A contagem direta de colonias de bactérias confirmam a ocorrência de biodegradação natural no local. Com base nos resultados desse estudo, a região com presença de bactérias foi selecionada para uma investigação geofísica mais detalhada. A tabela 1 apresenta a contagem bacteriológica das amostras onde foi detectada a presença de bactérias. A figura 2 destaca a área selecionada para esse estudo.

Metodologia

A polarização induzida (*Induced Polarization – IP*) é um fenômeno elétrico estimulado por corrente elétrica observado como uma resposta retardada à voltagem, em materiais naturais. Em alguns corpos que são atravessados por uma corrente elétrica, quando esta é interrompida, a diferença de potencial gerada não desaparece bruscamente, mas é atenuada gradualmente. Durante o tempo de fluxo original injetado, presume-se que alguma energia seja armazenada no material. O decaimento da voltagem no material, medido após esse fluxo, representa a volta do material para o seu estado natural após o distúrbio gerado pela corrente aplicada (Telford *et al.* 1990).

O efeito IP é medido pela aplicação de uma corrente elétrica artificial no terreno/amostra através de dois eletrodos, e medição do potencial gerado em outros dois eletrodos nas proximidades do fluxo de corrente. Medidas do efeito IP podem ser realizadas tanto no domínio do tempo (*frequency domain – FD*) como no domínio da frequência (*time domain – TD*).

No domínio do tempo a medição é feita durante o fluxo de corrente e após seu cessamento. A corrente é periodicamente ligada e desligada e a voltagem inicial V_C emitida durante o intervalo de fluxo de corrente e a voltagem residual $V(t)$ existente em um tempo t após o corte da corrente são medidas. A voltagem residual deve ser medida antes que tenha decaído ao nível de ruído. O parâmetro medido no domínio do tempo é a cargabilidade, definida pela integração da curva de descarga durante um intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$, fornecida por

$$m = \frac{1}{V_C} \int_{t_1}^{t_2} V(t) \cdot dt \quad (1).$$

A cargabilidade m está associada à intensidade do efeito de polarização e depende dos mecanismos de polarização da superfície dos grãos, assim como dos mecanismos de condução elétrica. Conseqüentemente

fornece uma pobre quantificação dos processos de polarização superficial. Um parâmetro que quantifica a magnitude da polarização superficial é a cargabilidade normalizada, definida como a cargabilidade dividida pela resistividade (Slater and Lesmes 2002).

O levantamento geofísico consistiu na aquisição de uma malha retangular, composta por seis linhas paralelas de caminhamento elétrico (no sentido do segmento AB da figura 3, com o arranjo dipolo-dipolo. O espaçamento entre as linhas foi de 3 m, mesma distância entre os eletrodos de corrente e potencial. De acordo com Loke (2010), o padrão de sensibilidade do arranjo dipolo-dipolo faz com que esse seja o arranjo mais sensível a efeitos tridimensionais, comparado aos demais arranjos comumente utilizados. Com espaçamento entre linhas menor do que três vezes a distâncias entre os eletrodos, os dados ainda terão informações 3D significantes. Modelos obtidos com esse tipo de aquisição são mais pobres do que modelos obtidos por uma aquisição 3D completa, mas ainda assim são capazes de revelar as feições mais contrastantes.

Os equipamentos utilizados foram o Syscal R2 (injeção de corrente) e ElRec Pro (leitura de potencial com 10 canais de leitura simultânea), ambos da Iris Instruments. Eletrodos metálicos foram utilizados para injeção de corrente e eletrodos não-polarizáveis foram utilizados para as leituras de potencial (Cu/CuSO₄). O período da corrente elétrica injetada foi de 2000 milissegundos. As medições de IP começaram a ser registradas 160 milissegundos após o corte de corrente e os tempos de integração foram 120, 220, 420 e 820 milissegundos.

Os dados das seis linhas foram concatenados em um único conjunto de dados que foi submetido a rotina de inversão 3D, realizada pelo software comercial RES3DINV (Geotomo Software, 2010). Utilizou-se o método dos mínimos quadrados com vínculo de suavização, e o método Gauss-Newton completo para o cálculo da matriz Jacobiana (recalculada em cada iteração).

Resultados

A figura 4 apresenta a seção de corte dos modelos de resistividade, cargabilidade e cargabilidade normalizada na profundidade de 1,6 m. Observa-se uma zona de baixa resistividade ($\rho < 100 \Omega\text{m}$, fig. 4a), baixas cargabilidades ($m < 12 \text{ mV/V}$, fig. 4b) e altas cargabilidades normalizadas ($m_n > 0.03 \text{ S/m}$, fig. 4c) na porção noroeste da área investigada.

De acordo com a tabela 1, a contagem bacteriológica realizada nos dois pontos de amostragem, na profundidade de 1m, apresentou quantidades significativas de bactérias. A presença de bactérias em um meio contaminado por hidrocarbonetos comprova a ocorrência de biodegradação na área. Assim, a anomalia geofísica observada foi interpretada como uma área mais contaminada que está sofrendo biodegradação intrínseca e atenuação natural da contaminação local. Essa interpretação está de acordo com resultados apresentados na literatura, que reportam baixas resistividades em locais onde ocorre biodegradação natural, devido ao

aumento de sólidos totais dissolvidos com resultado do intemperismo mineral pelo ácidos produzidos pelos processos de degradação (Sauck, 2000). As baixas cargabilidades podem ter sido afetadas pela condutividade do meio. As altas cargabilidades normalizadas, entretanto, mostram o aumento da polarização na região. Esse resultado está de acordo com diversos estudos que apresentam o aumento da polarização gerado pela presença de bactérias e/ou atividade microbiana (Ntarlagiannis *et al.* 2005a, Ntarlagiannis *et al.* 2005b, Abdel Aal *et al.* 2006, Davis *et al.* 2006).

A figura 5 apresenta a seção de corte dos modelos de resistividade, cargabilidade e cargabilidade normalizada na profundidade de 4,4 m. Observa-se uma zona de resistividade intermediária ($\rho < 300 \Omega\text{m}$, fig. 5a), baixas cargabilidades ($m < 1 \text{ mV/V}$, fig. 5b) e baixas cargabilidades normalizadas ($m_n < 0.01 \text{ S/m}$, fig. 5c) a noroeste da área investigada, ao redor do ponto de amostragem de solo A1. Ainda a noreste, ao redor do ponto de amostragem A2, o que se observa são resistividades intermediárias ($\rho < 300 \Omega\text{m}$), cargabilidades intermediárias ($m \sim 20 \text{ mV/V}$) e altas cargabilidades normalizadas ($m_n > 0.1 \text{ S/m}$).

De acordo com a tabela 1, apenas a amostra A01 apresentou quantidades significativas de bactérias na profundidade de 4,4 m. Conclui-se então que, para a área estudada, baixas resistividades, baixas cargabilidades e altas cargabilidades normalizadas são observadas nas áreas onde ocorre biodegradação.

Conclusões

Uma área contaminada por hidrocarbonetos com conhecida atividade bacteriológica foi investigada pelos métodos Eletrorresistividade e Polarização Induzida (IP). O levantamento geofísico foi realizado em uma área com conhecida contaminação por BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno) onde foram coletadas amostras de solo para contagem de bactérias. Baixas resistividades e cargabilidades e altas cargabilidades normalizadas foram interpretadas como resultantes do processo de biodegradação intrínseca e atenuação natural da contaminação local. Os resultados sugerem que o método IP tem grande aplicabilidade na detecção e monitoramento de biodegradação natural em áreas contaminadas por hidrocarbonetos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (processo 08/52888-7) pelo financiamento do projeto de pesquisa "Estudo da resposta do efeito IP meios contaminados por hidrocarbonetos e chorume" e ao CNPq (477330/2009-6) pelo financiamento do projeto de pesquisa "Estudo da resposta da resistividade e polarização induzida em solos contaminados por hidrocarbonetos e chorume". Agradecemos também aos técnicos Ernande Costa Santos e Marcelo Cesar Stangari e aos alunos de graduação Luis Otávio Ferreira Sardinha e José Aparecido Alberto.

Referências

Abdel Aal G. Z., Slater, L. D. and Atekwana, E. A., 2006. Induced-polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation: *Geophysics*, 71, H13-H24.

Davis, C. A., Atekwana, E., Atekwana, E., Slater, L. D., Rossbach, S., Mormile, M. R., 2006. Microbial growth and biofilm formation in geologic media is detected with complex conductivity measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L18403, doi:10.1029/2006GL027312.

Geotomo Software, 2010. RES3DINV. Rapid 3D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. <http://www.geoelectrical.com/downloads.php>. Accessed em 29 November 2010

Loke MH, 2010. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. <http://www.geoelectrical.com/downloads.php>. Accessed em 29 November 2010.

Martinho, E., Almeida, F. and Senos Matias, M.J., 2006. An experimental study of organic pollutant effects on time domain induced polarization measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 60, 27–40.

Minozzo, M., 2009. Métodos geoeletricos aplicados na avaliação ambiental em uma indústria química na cidade de São Paulo: Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Ntarlagiannis, D., Williams, K.H., Slater, L., and Hubbard S., 2005a. The low frequency electric response to microbially induced sulfide precipitation: *Journal of Geophysical Research*, 110, G02009.

Ntarlagiannis, D., Yee, N. and Slater, L., 2005b. On the low-frequency electric polarization of bacterial cells in sands: *Geophysical Research Letters*, 32, L24402.

Salles, F. A. F., 1999. Avaliação de área contaminada por compostos orgânicos as margens da represa de Guarapiranga, no Município de São Paulo-SP: Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 110p.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R.E. and Keys, D. A., 1990. *Applied Geophysics*: Cambridge University Press, 860 p.

Slater LD, Lesmes D, 2002. IP interpretation in environmental investigations. *Geophysics* 67, 77.

Sogade JA, Scira-Scappuzzo F, Vichabian Y, Shi W, Rodi W, Lesmes DP, Morgan FD, 2006. Induced-polarization detection and mapping of contaminant plumes. *Geophysics* 71(3): B75-B84.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R.E. and Keys, D. A., 1990. *Applied Geophysics*: Cambridge University Press, 860 p.

Tabela 1: Contagem bacteriológica das amostras coletadas na área, em diferentes profundidades (modificado de Minozzo, 2009)

Amostra	UFC/g
A 1 (1 m)	$3,85 \cdot 10^5$
A 1 (2 m)	$0,078 \cdot 10^5$
A 1 (3 m)	$0,106 \cdot 10^5$
A 1 (4 m)	$0,087 \cdot 10^5$
A 2 (1 m)	$0,003 \cdot 10^5$
A 2 (2 m)	0
A 2 (3 m)	0
A 2 (4 m)	0

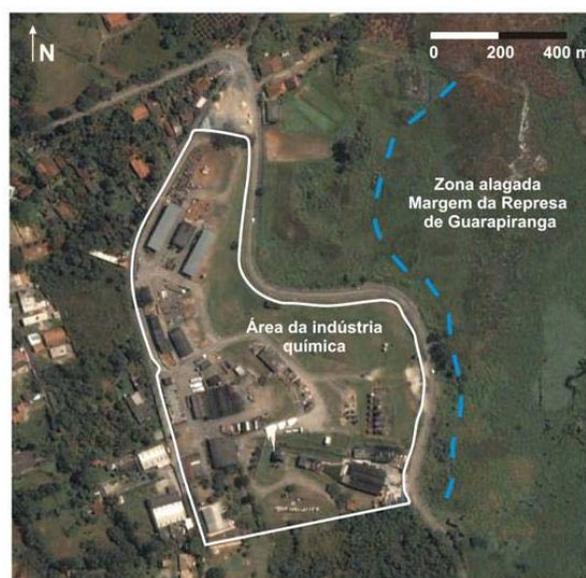


Figura 1. Foto aérea da indústria química.

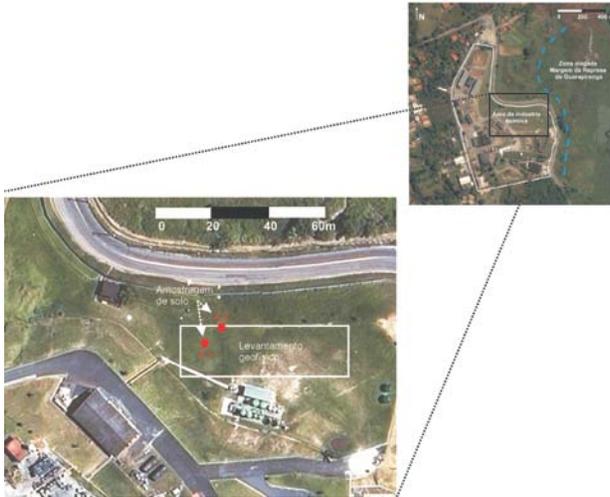


Figura 2. Área selecionada para o levantamento geofísico. A figura em destaque apresenta a localização do ensaio geofísico e dos pontos de amostragem de solo.

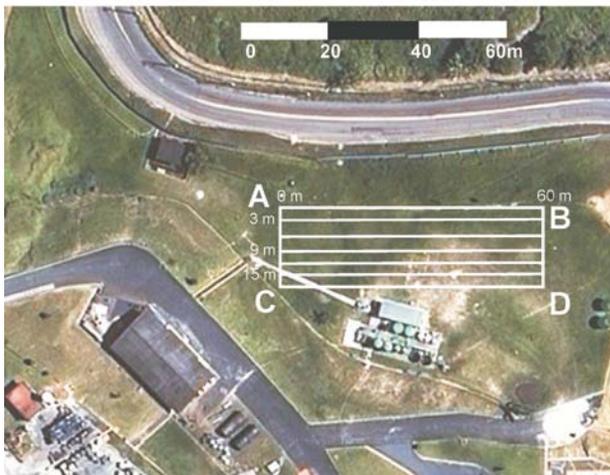


Figura 3. Croqui do levantamento geofísico. A topografia da área pode ser considerada plana.

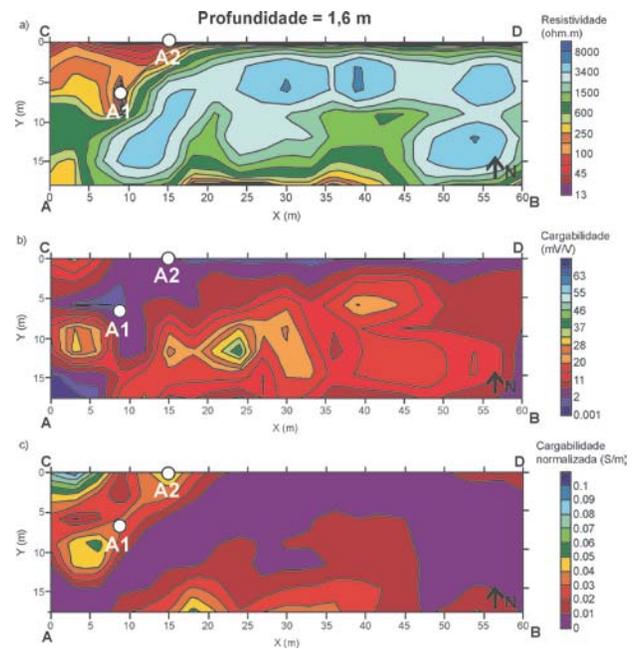


Figura 4. Seção de corte dos modelos de a) resistividade, b) cargabilidade e c) cargabilidade normalizada na profundidade de 1,6 m.

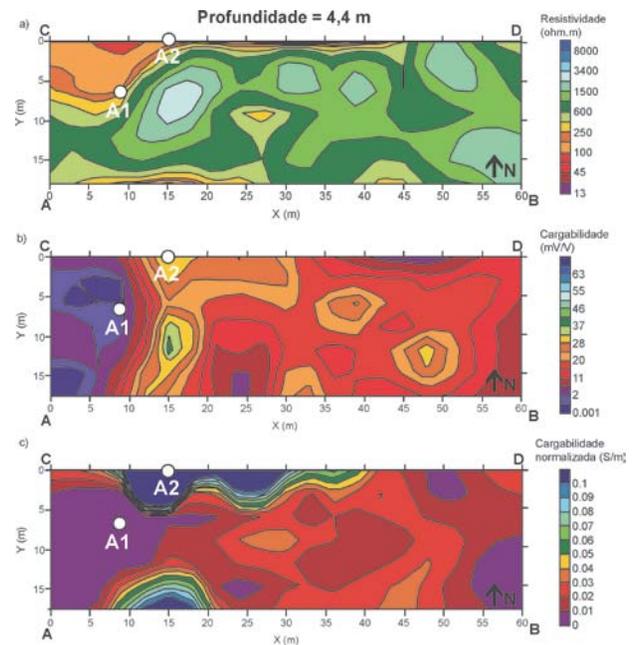


Figura 5. Seção de corte dos modelos de a) resistividade, b) cargabilidade e c) cargabilidade normalizada na profundidade de 4,4 m.