



## MODELAGEM DE DADOS ERT EM CONTAMINAÇÃO DE TERMINAIS

Ana Karoline Ramos Alves (BCMT,UFRJ)\*, Gleide Alencar Nascimento Dias ( IGEO,UFRJ), Marco Antônio da Silva Braga (IGEO, UFRJ)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15<sup>th</sup> 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.

### Resumo

O método geofísico Eletroresistividade (ER) ou Tomografia Elétrica de Resistividade (ERT) tem sido aplicado em estudos de contaminação do solo por hidrocarbonetos, no intuito de detectar a extensão em subsuperfície da contaminação provocada por vazamentos de gasolina em terminais. Nesse estudo foram realizadas simulações através do Método das Diferenças Finitas usando o programa RES2DMOD. O arranjo utilizado na simulação foi o dipolo-dipolo em 4 modelos geoeletrico, o primeiro modelo apresenta somente os tipos litológicos (geoeletricos) sem contaminação com 3 camadas: zona não saturada (145  $\Omega$ m/areno-argiloso), franja capilar (65  $\Omega$ m/areno-argiloso parcial com água) e zona saturada (21 $\Omega$ m/areno-argiloso completo com água) e os demais modelos foram inseridos os valores da contaminação por gasolina (230  $\Omega$ m) correspondendo com os valores em média de cada camada variando-se a sua profundidade no modelo. A modelagem serviu para verificar nas pseudo-seções de resistividade aparente o comportamento da gasolina no solo variando a profundidade de saturação com o tempo, esses resultados poderão auxiliar futuramente a interpretação dos dados reais geoeletricos para o mesmo caso de estudo.

### Introdução

O ERT provou ser um instrumento chave para localizar áreas poluídas no subsolo como resultado da atividade industrial e urbana (Meju, 2000) com resultados confiáveis e satisfatórios (De la Vega *et al.*, 2003). O mapeamento do subsolo tem como característica adquirir informações de funcionalidade, como: em diversas áreas ambientais podendo ser usado na investigação de plumas de contaminação. O ERT é uma técnica pertinente na tentativa de gerar imagens a partir das propriedades elétricas do material do subsolo. Visto que, a umidade do solo e as águas subterrâneas são na maioria condutoras de eletricidade, a resistividade medida pelo ERT é usualmente controlada pela quantidade de íons dissolvidos na água. Apesar de ERT, ter uma resolução baixa, ele é capaz de visualizar as

cavidades como um meio resistivo (Cardarelli *et al.*, 2006; Ezersky, 2008; Martínez-Pagan *et al.*, 2013 apud Afshar *et al.*, 2015) em profundidades maiores que o GPR.

Um dos problemas de difícil solução nas atividades voltadas para a proteção ambiental consiste na detecção da extensão, em subsuperfície, da contaminação provocada por vazamentos em tanques de combustíveis (gasolina e óleo diesel). As investigações têm sido conduzidas por métodos diretos de prospecção, os problemas desse método, em que pese a sua boa acurácia, estão relacionados com o seu custo e morosidade. Os métodos geofísicos elétricos podem auxiliar consideravelmente na solução do problema, permitindo a delimitação rápida e contínua da distribuição lateral e em profundidade da pluma de contaminação. O contraste de resistividade elétrica entre as águas subterrâneas e os hidrocarbonetos é muito grande, normalmente 1 para 10<sup>11</sup>. As dificuldades que podem ocorrer, e que em certas situações podem resultar em insucessos na aplicação dos métodos, resultam da forma como os contaminantes (gasolina e óleo diesel) comportam-se em subsuperfície e das características elétricas do meio em que se encontram (Mazác *et al.*, 1994). No petróleo existem centenas de hidrocarbonetos, que são compostos mais simples dentro da química orgânica e constituem - se de hidrogênio e carbono. Este combustível fóssil é originado a partir do soterramento de matéria orgânica (principalmente gases) juntamente com sedimentos lacustres ou marinhos em ambiente anaeróbico até chegar a sua utilização final, os derivados de petróleo passam por vários processos naturais e industriais, o aumento que aumenta sua complexidade dos produtos finais.

### Metodologias ERT

As correntes elétricas produzidas são inseridas no solo, que por sua vez, gera campos elétricos que são observados. Esse estudo é um meio de medir a resistividade da terra na exploração geofísica. A resistividade é a propriedade de um material em tolerar o fluxo da corrente elétrica. Em 1827, Georg Ohm definiu empiricamente a relação entre um fluxo de corrente que flui através de um fio e o potencial de tensão para ativar a corrente. Ele descobriu a proporcionalidade entre a corrente (i) e a tensão (V) para uma grande classe de materiais.

Lei de Ohm

$$V = Ri$$

A constante de proporcionalidade é a resistência do material e tem as unidades de tensão V (VOLTS) e corrente i (AMPERES) ou princípio ôhmico. A declaração de sua lei foi em termos de densidade de corrente e campo elétrico. O problema da medição de resistência é

que ela depende do material do qual o fio é feito e também da geometria do fio. Se aumentarmos o comprimento do fio, a resistência aumentaria. Se diminuíssemos o diâmetro do fio, a resistência iria aumentar. Definimos uma propriedade independente do fator geométrico, que é chamado de resistividade ( $\rho$ ). Resistividade é definida como a resistência no fio, vezes a área da secção transversal do fio dividida pelo comprimento do fio. As unidades associadas à resistividade são, portanto, ohm - m (ohm - m). A primeira estimativa de resistividade: a mudança de tensão a partir de um único eletrodo é feita pela expressão:

$$V = \frac{\rho * i}{2\pi r}$$

V é a tensão, i é a corrente, o símbolo  $\rho$  representa a resistividade, e r é a distância entre o eletrodo e a corrente do ponto de tensão é medida. É a lei de Ohm. Colocando dois eletrodos de corrente (A e B) e dois eletrodos de potencial (M e N) e fechando o circuito. Observamos que a corrente flui radialmente, a partir dos eletrodos de correntes, tendo um novo fluxo durante o caminho curvo entre os eletrodos. Esse método é baseado na capacidade do equipamento em introduzir uma corrente elétrica no subsolo, através de espaçamentos entre os eletrodos A e B, e calcular a resistividade. Um par é utilizado para introduzir a corrente e o outro para medir a diferença de potencial entre eles. Para termos melhores resultados não movem os potenciais e atuais eletrodos pra fechar junto, tensões maiores seriam registradas. Isso reduziria os ruídos e maximizaria a profundidade onde as medições são sensíveis, tensões maiores seriam registradas. Sabendo as posições dos quatro elétrodos, medindo a quantidade de corrente para o solo, e a diferença de tensão entre os dois elétrodos potenciais, podemos calcular a resistividade do meio. Independente da localização dos quatro eléctrodos,  $\rho_a$  (resistividade aparente) será igual à resistividade do meio. Sendo r (r1, r2, r3 e r4) a distancia entre eletrodos.

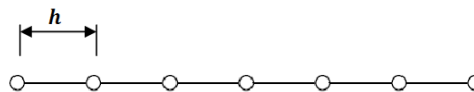
$$\rho_a = \frac{2\pi \cdot DV}{i \left[ \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]}$$

**Arranjo Dipolo-Dipolo**

Este tipo de arranjo revela-se como um dos mais precisos e rápidos de serem executados no campo. Uma de suas grandes vantagens reside no fato de que, o estudo da variação lateral do parâmetro físico pode ser efetuado em vários níveis de profundidades, obtendo-se uma caracterização dos materiais, em subsuperfície, tanto horizontalmente como verticalmente. O centro dos eletrodos AB e MN se deslocam ao longo da linha a ser levantada, o espaçamento entre os eletrodos A-B é igual ao M-N. Cada dipolo MN refere-se a um nível de investigação.

**Modelagem**

Na maioria das vezes, os problemas que envolvem equações diferenciais complexas precisam de abundantes ferramentas para a resolução. Além de soluções analíticas, variados métodos numéricos podem ser usados na resolução aproximada de uma equação diferencial parcial. Os principais métodos numéricos usados na resolução das equações são: método das diferenças finitas, método dos elementos de contorno e método dos volumes finitos. A ideia principal dos métodos numéricos é a discretização, que diminui o problema contínuo, com um número infinito de variáveis, em um problema discreto com um número finito de variáveis, podendo ser resolvido computacionalmente. (Franco, 2006). A princípio para resolver as equações diferenciais parciais por um método numérico é preciso discretizar a região onde se procura a solução. Para isso, define-se uma malha, que é um conjunto finito de pontos pertencentes ao domínio, chamados nós da malha. (Ferreira & Lima, 2010). A Figura 1 refere-se a uma malha unidimensional uniforme, onde o tamanho da lacuna é igual para cada intervalo figurado por h.



$x - nh \quad \dots \quad x - h \quad x \quad x + h \quad \dots \quad x + nh$

Figura 1 - Malha computacional unidimensional, (Melo, 2011).

A Figura 2 refere-se a uma malha cartesiana ortogonal uniforme para um problema bidimensional. Os pontos são representados por (i; k) e os seus vizinhos são representados por (i+1, k+1 ou i-1, k-1).

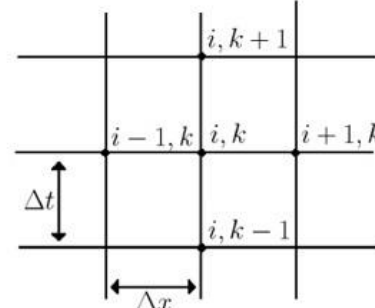


Figura 2 - Malha Bidimensional (Vargas, 2012).

**Métodos das Diferenças Finitas**

O método numérico das Diferenças Finitas é utilizado como ferramenta alternativa para obter a aproximação da solução de uma equação diferencial parcial. A ideia consiste em transformar a resolução de uma equação diferencial em um sistema de equações algébricas, substituindo as derivadas por diferenças. (Ruggiero, 1996). Esse método consiste na discretização do domínio e na substituição das derivadas da equação diferencial por aproximações usando valores numéricos da função. A ferramenta básica para o cálculo das aproximações é a fórmula de Taylor (Franco, 2006). Dada a função f como mostra Figura 3.

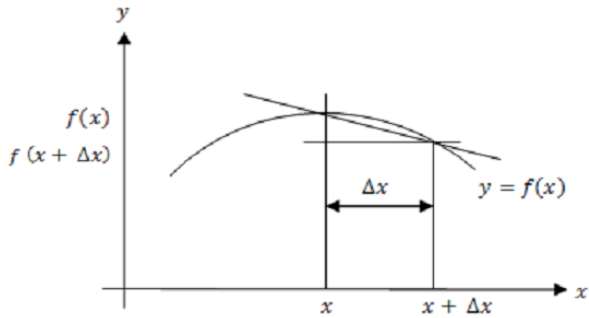


Figura 3 - Função  $f(x)$  para a expansão de Taylor (Melo, 2011).

O valor da função  $f$  a uma distancia  $\Delta x$  de um ponto  $x$  qualquer, pode ser presumido por meio de uma expansão de Taylor.

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{df}{dx}(x) + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{d^2f}{dx^2}(x) + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{d^3f}{dx^3}(x) + \dots + \frac{\Delta x^n}{n!} \frac{d^n f}{dx^n}(x) + \dots$$

Que pode ser reescrita na forma,

$$f(x + \Delta x) \approx f(x) + \Delta x \frac{df}{dx}(x)$$

E reformulada:

$$\frac{df}{dx}(x) \approx \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

Então, foi obtido um quociente de diferenças que descreve uma aproximação de primeira ordem para a primeira derivada da função  $f$ , na direção  $x$ , usando diferenças ascendentes ou progressivas. Essa primeira derivada foi aproximada pela inclinação da reta que une os pontos  $(x, f(x))$  e  $(x + \Delta x, f(x + \Delta x))$ . (Ferreira & Lima, 2010). Com um raciocínio parecido, o valor da função " $f$ " pode ser estimado em um ponto anterior de  $x$ , como representado na Figura 4.

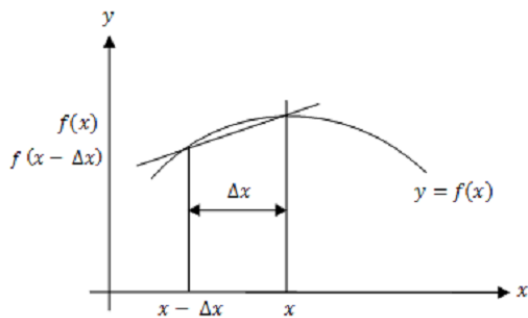


Figura 4-Função  $f(x)$  para expansão de Taylor e determinação da diferença atrasada (Melo, 2011).

Utilizando a expansão de Taylor para determinar  $f(x - \Delta x)$

$$f(x - \Delta x) = f(x) - \Delta x \frac{df}{dx}(x) +$$

$$\frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{d^2f}{dx^2}(x) - \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{d^3f}{dx^3}(x) + \dots + (-1)^n \frac{\Delta x^n}{n!} \frac{d^n f}{dx^n}(x) + \dots$$

Pode ser aproximada na forma,

$$f(x - \Delta x) \approx f(x) - \Delta x \frac{df}{dx}(x)$$

E reformulada:

$$\frac{df}{dx}(x) \approx \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x}$$

A expressão reformulada é chamada de diferenças descendentes, retrogradadas ou atrasada.

Uma terceira expressão pode ser considerada para a aproximação, somando as duas equações anteriores termo a termo, obtemos a seguinte expressão:

$$\frac{df}{dx}(x) \approx \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x}$$

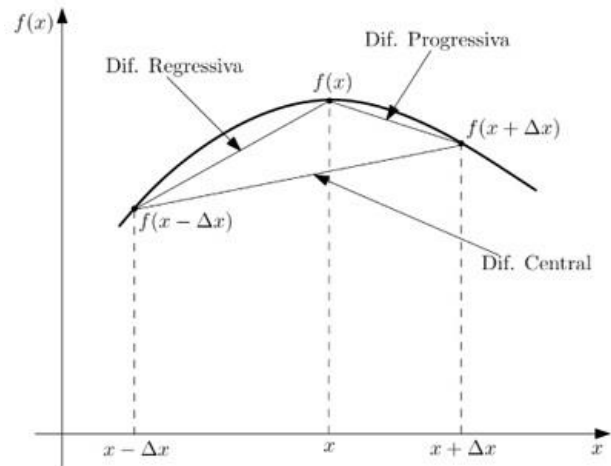


Figura 5 - Diferentes formas para a definição de quocientes por diferenças (Vargas, 2012).

O mesmo processo descrito anteriormente pode ser feito para a função de segunda ordem, usando o termo da segunda derivada da expressão de Taylor.

$$f(x + \Delta x) \approx f(x) + \Delta x \frac{df}{dx}(x) + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{d^2f}{dx^2}(x)$$

$$f(x - \Delta x) \approx f(x) - \Delta x \frac{df}{dx}(x) + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{d^2f}{dx^2}(x)$$

Para obter as aproximações combinamos as duas equações, como anteriormente.

$$\frac{d^2f}{dx^2}(x) \approx \frac{f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x)}{(\Delta x)^2}$$

### Modelos e Resultados

O programa RES2DMOD é uma ferramenta avançada de modelagem direta, o qual faz o cálculo da resistividade aparente de uma pseudo-seção para um modelo 2D de

subsuperfície definida. Os arranjos suportados pelo programa são: Wenner, Pólo-Pólo, Gradiente, Dipolo-Dipolo, Pólo-Dipolo e Equatorial Dipolo-Dipolo (Edwards, 1977). O programa permite que se escolha o arranjo adequado baseado em fatores como o custo da profundidade de investigação, resolução e natureza prática. O programa é fundamentado no método da diferença finita, a qual divide uma subsuperfície em um número de blocos utilizando uma malha retangular como mostra a Figura 6.

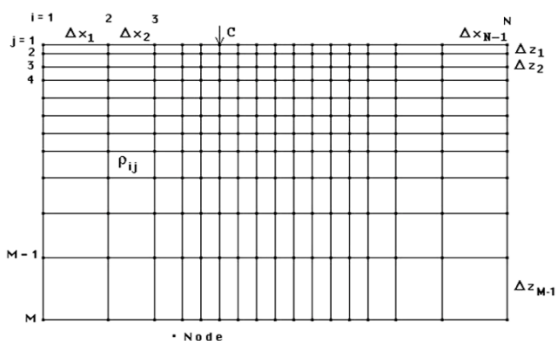


Figura 6 - Diagrama esquemático da malha de diferenças finitas usada pelo programa RES2DMOD (Loke, 2002).

O programa permite ao usuário que se faça edições dentro do próprio modelo escolhido, como definir forma geométrica do alvo a ser estudado, incluir valores resistividades, sem, no entanto, modificar a malha de diferenças finitas. Além de especificar o número de eletrodos. O modelo geolétrico utilizado para o estudo do comportamento da resistividade elétrica no solo após um vazamento de gasolina é demonstrado na Figura 7.

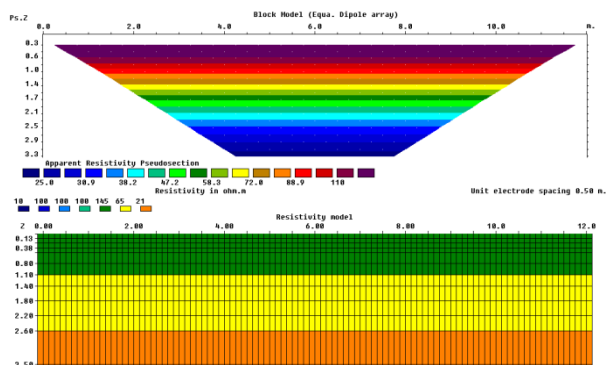


Figura 7 – Modelo editado usado para simulação programa RES2DMOD.

A simulação consiste na utilização do método do caminhamento elétrico em arranjo dipolo-dipolo para 9 níveis de investigação com 3,5 m de profundidade e 17 eletrodos em linha com extensão de 12 metros. O modelo geolétrico tem 3 camadas caracterizadas por zonas, saturada, insaturada e franja capilar. Os valores da resistividade do solo e da gasolina são fundamentos em Braga & Cardinali (2008), Tabela 1. A introdução de 2 litros de gasolina foi inserida no centro do modelo em 6 m do comprimento. Considerou-se água destilada na zona da franja capilar para a simulação do nível freático. Em cada modelo simulado foram inseridos a resistividade de

gasolina gerando 4 modelos (Figuras 8 a 11). Sendo um a amostra litológica e os outros 3 registrando as variações na quantidade de gasolina. Os dados foram processados no programa RES2DMOD, onde foram geradas pseudo-seções e modelos de inversão com distancia e profundidade. Esse trabalho apresenta profundidade teórica ou máxima investigação, no intuito de representar o comportamento da contaminação do subsolo pela gasolina.

	Zona saturada	Zona insaturada	Franja Capilar
Antes da contaminação	22 Ωm	145 Ωm	65 Ωm
Depois da contaminação 1	126 Ωm	188 Ωm	148 Ωm
Depois da contaminação 2	178 Ωm	209 Ωm	189 Ωm
Depois da contaminação 3	204 Ωm	220 Ωm	210 Ωm

Tabela 1 – Dada recolhidos durante o experimento.

**Interpretação e discussão dos resultados**

Primeiramente foi realizada uma linha de caminhamento elétrico para definir as condições naturais do material, ou seja, antes da contaminação. Essa linha apresenta três horizontes principais estratificados: a zona não saturada (alta resistividade - 145 Ωm/areno-argiloso), a franja capilar (resistividade intermediaria - 65 Ωm/areno-argiloso parcial com água) e a zona saturada (baixa resistividade- 22Ωm/areno-argiloso completo com água) (Figura 8). O nível freático é definido entre a franja capilar e a zona saturada. A segunda pseudo seção realizada após a injeção de gasolina indica o aumentos pontuais da resistividade na zona saturada e na franja capilar, com perturbações nos horizontes que anteriormente apresentavam-se planos, com valores de 126 Ωm e 148 Ωm. Na zona não saturada as perturbações apresentam variâncias maiores que a franja capilar, essa diferença se dá por conter água que cauda uma perturbação menor do que a zona não saturada (Figura 9).

Na terceira podemos observar o progresso da gasolina no solo em direção a camada inferior, o aumento das perturbações em os horizontes, com extremos de 178 Ωm para a zona saturada, 189 Ωm para a franja capilar e 209 Ωm para a zona não saturada (Figura 10).

Na última seção realizada, é possível observar a interação do contaminante (gasolina) em todos os horizontes nos valores da resistividade em todos os horizontes, com extremos de 204 Ωm na zona saturada, 210 Ωm na franja capilar e 220 Ωm para a zona não saturada (Figura 11).

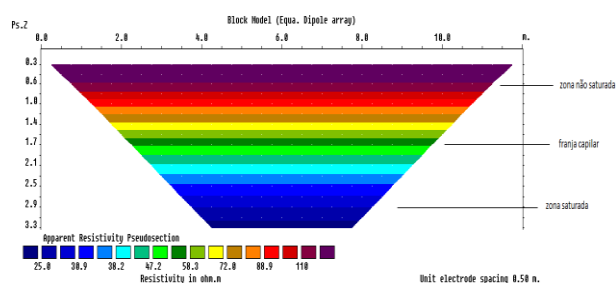


Figura 8 – Linha de referencia sem contaminação.

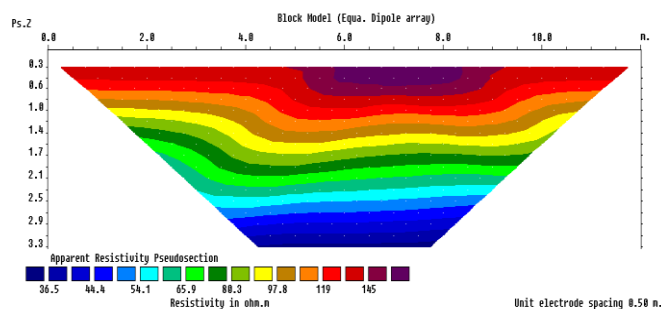


Figura 9 - Segunda seção do calculo da resistividade.

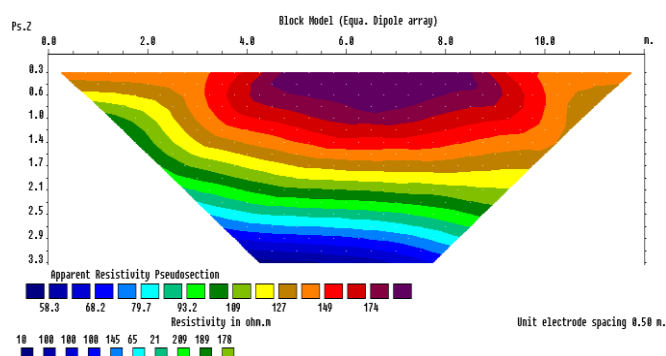


Figura 10 – Terceira seção do calculo da resistividade.

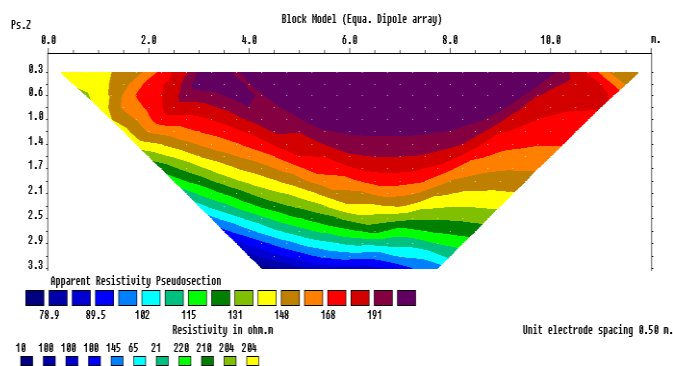


Figura 11- Quarta seção do calculo da resistividade.

### Conclusão

A variação da resistividade elétrica apresentada no experimento pode estar relacionada ao grau de degradação da gasolina. Como observamos no

experimento, após a contaminação, registramos um aumento brusco da resistividade nos horizontes. No primeiro instante, foram observadas às perturbações na zona não saturada e na franja capilar, as primeiras camadas a serem contaminadas. A diferença apresentada entre as primeiras zonas (zona não saturada e franja capilar) contaminadas podem estar relacionadas a processos de percolação do contaminante.

A expulsão do ar contido nos poros da zona insaturada e seu preenchimento por gasolina aparentemente precisa de um tempo maior. Quando comparado com a zona saturada e a franja capilar, onde ocorre a diluição e dispersão em meio aquoso. Como não teve nenhuma injeção de gasolina posteriormente é esperado que após o processo de degradação da gasolina os valores da resistividade voltem para os valores naturais de resistividade do solo.

### Bibliografia

- AFSHAR, A.; ABEDI, M.; NOROUZI, G. H.; RIAHI, M. A. 2015. Geophysical investigation of underground water content zones using electrical resistivity tomography and ground penetrating radar: A case study in Hesarak-Karaj, Iran.
- BRAGA, A. C. O.; MOREIRA, C. A.; CARDINALI, M. T. I. 2008. Variação temporal da resistividade elétrica em contaminação por gasolina. Revista Geociências, v.27, n. 4, p. 517-525.
- CARDARELLI, E. ;DI FILIPPO, G. ; TUCCINARDI, E. ; 2006. Electrical resistivity tomography to detect buried cavities in Rome: a case study. Near Surf. Geophys. 4, 387–392.
- DE LA VEGA, M.; OSELLA, A.; LASCANO, E. 2003. Joint inversion of Wenner and dipole–dipole data to study a gasoline-contaminated soil. J. Appl. Geophys. 54, 97–109.
- EDWARDS, L. S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced - polarization. Geophysics, Tulsa, OK, v.42, p.1020-1036.
- EZERSKY, M. 2008. Features of the subsurface geoelectric structure in the Ein Gedi sinkhole occurrence sites of the Dead Sea shore. J. Appl. Geophys. 64, 56–69.
- FERREIRA, V. G. & LIMA, G. A. B. 2010. Solução numérica de equações diferenciais parciais. Universidade Federal da Paraíba.
- FRANCO, N. B. 2006. Cálculo numérico. São Paulo: Person Prentice Hall.
- LOKE, M. H. 2002. RES2DMOD ver. 3.01 for Windows 95/98/Me/2000 and NT – Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite-difference and finite-element methods. M.H. Loke Software User's Manual.
- MARTÍNEZ-PAGÁN, P; GÓMEZ-ORTIZ, D. ; MARTÍN-CRESPO, T; MANTECA, J. I. ; ROSIQUE, M. 2013. The electrical resistivity tomography method in the detection of shallow mining cavities. A case study on the

Victoria Cave, Cartagena (SE Spain). Eng. Geol. 156, 1–10.

**MAZÁC, O.; BENES, L. ; LANDA; MASKOVA, A.** 1994. Determination of extent of oil contamination in groundwater by geoelectrical methods. Geotechnical and Environmental Geophysics, Ed: Stanley H. Ward, SEG, V. 11, 1994, pp.107-112.

**MEJU, M.,** 2000. Geoelectrical investigation of old abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a generic diagnosis approach. J. Appl. Geophys.44, 115–150.

**MELO, K. J. M. 2011.** Monografia Aplicação do método das diferenças finitas explícito na solução da equação do calor para o caso transiente e unidimensional. Universidade Federal Rural do Semi-árido Campo Angicos, Angicos –RN.

**RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R.** Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais. 2 ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1996.

**VARGAS, M.; GRAMANI, L. M.; KAVISKI, E. ; BALBO F. A.** 2012. Modelagem do fluxo de pedestres pela teoria macroscópica Revista Brasileira de Ensino Física. vol.34 nº. 4 São Paulo Oct./Dec.