



Combinação de dados elétricos de superfície e poço no imageamento de depósitos minerais

Eduardo L. Abreu, Cassiano Bortolozzo, Carlos A. Mendonça, IAG/USP, Brazil

Copyright 2009, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors responsibility 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

Resistivity methods when applied to investigate depths of about some hundred of meters often suffer from resolution loss and lacking of open space to deploy electrode arrays. Common surveys apply linear dipole-dipole arrays to obtain a 2D resistivity section from data inversion. Here we investigate the possibility to obtain a 3D resistivity model from inverting a profile set of dipole-dipole data, with and without potential electrodes within a drill hole. In general we observe a significant improvement in the inverted resistivity models either in terms of targets shape and depth as well as their resistivity values.

Resumo

O método geofísico da eletro-resistividade quando aplicado para investigar profundidades de algumas centenas de metros é prejudicado por perda de resolução e limitação de espaço para a disposição de eletrodos. Os levantamentos normalmente utilizam arranjos lineares dipolo-dipolo e o imageamento de resistividade utiliza modelos bidimensionais produzindo uma seção geométrica. Neste trabalho investigamos a possibilidade de efetuar o imageamento 3D usando arranjos lineares dipolo-dipolo com e sem eletrodos de potencial colocados dentro de furos de sondagem. De um modo geral observamos uma melhoria significativa do imageamento elétrico, no que se refere a forma, a profundidade e aos valores de resistividade dos alvos imageados.

Introdução

O método da resistividade 3D tem sido utilizado na prospecção mineral para localizar e definir a forma de corpos minerais condutivos, sulfetos principalmente. Por facilidade operacional os arranjos de campo utilizam eletrodos em superfície, normalmente no modo de caminhamento dipolo-dipolo, objetivando a obtenção de

uma seção geométrica com a inversão dos dados. A configuração com eletrodos em superfície e em profundidade (eletrodos em poços ou furos de sondagem) potencialmente pode ser utilizada para aprimorar a definição de alvos ou investigar a vizinhança do furo/poço. Colocando sensores mais próximos do alvo é possível melhorar a resolução do imageamento mesmo em níveis mais profundos. Pode ser também uma alternativa para áreas confinadas por acidentes geográficos ou com acesso restrito em superfície em decorrência de direitos proprietários ou ambientais. Em áreas urbanas e industriais, a combinação superfície-poço também pode ser uma alternativa para investigações relacionadas à construção de túneis e galerias ou caracterização de plumas de contaminação.

Neste trabalho efetuamos testes de simulação numérica para verificar se o imageamento elétrico 3D de alvos condutivos, na profundidade de uma ou duas centenas de metros, pode ser melhorado usando combinações de dados de superfície e de poço. Em superfície empregamos arranjos convencionais dipolo-dipolo no modo de caminhamento, mas incorporamos eletrodos de potencial em um furo de sondagem para complementar a base de dados. Para realizar as simulações elaboramos um programa que calcula o problema direto para resistividade 3D (RESFWM3D) que complementa o pacote *open source* RESINVM3D (Pidlisecky et al., 2007), escrito em *MATLAB* e disponibilizado pela SEG (*Society of Exploration Geophysicists*).

Aspectos teóricos

Problema direto

No método da resistividade leituras de potencial elétrico são tomadas em resposta à injeção de corrente elétrica no substrato. Este fenômeno é regido pela equação

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi) = I(\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s^+) - \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s^-)) \quad (1)$$

sendo ϕ o potencial elétrico, I a corrente injetada, σ a condutividade do meio, \mathbf{r}_s^+ e \mathbf{r}_s^- os pontos com fontes de corrente e $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s^+)$ a função delta de Dirac, centrada no ponto de corrente com o polo positivo. A formulação por diferenças finitas produz a relação matricial (Pidlisecky et al., 2006, 2007)

$$\mathbf{D}\mathbf{S}_\sigma\mathbf{G}\mathbf{u} = \mathbf{A}_\sigma\mathbf{u} \quad (2)$$

sendo \mathbf{D} e \mathbf{G} matrizes para os operadores divergente e gradiente, respectivamente, \mathbf{S}_σ uma matriz diagonal contendo os valores de condutividade, \mathbf{u} o vetor com os valores de potencial nos nós da malha e \mathbf{A}_σ a matriz de rigidez associada ao problema. O potencial elétrico resultante é obtido resolvendo

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}_\sigma^{-1}\mathbf{q} \quad (3)$$

sendo \mathbf{q} o vetor que contém os termos de fonte.

Problema inverso

O objetivo final da inversão de dados resistivos é obter um modelo de resistividade para o substrato. O processo de inversão consiste em minimizar o funcional Φ , dado por

$$\Phi = \frac{1}{2} \|\mathbf{d}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{obs}\|^2 + \frac{\beta}{2} \|\mathbf{W}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{ref})\|^2 \quad (4)$$

sendo \mathbf{d}_{obs} o vetor de dados, $\mathbf{d}(\mathbf{m})$ o vetor contendo os dados calculados a partir de um modelo de condutividade \mathbf{m} (com base na Equação 3). O segundo termo da Equação 4 contém um funcional regularizador que introduz informação a priori sobre a solução procurada. O parâmetro β é denominado parâmetro de regularização e \mathbf{W} é uma matriz diagonal de pesos.

O funcional Φ é minimizado usando a linearização Gauss-Newton (Haber et. al, 2000) que envolve a atualização do modelo $\mathbf{m}_{i+1} = \mathbf{m}_i + \delta\mathbf{m.g}$ tal que

$$\mathbf{H}\delta\mathbf{m} = \mathbf{g} \quad (5)$$

sendo

$$\mathbf{H} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \beta \mathbf{W}^T \mathbf{W}) \quad (6)$$

e

$$\mathbf{g} = -\mathbf{J}^T (\mathbf{Q}\mathbf{A}^{-1} \mathbf{q} - \mathbf{d}_{obs}) - \beta \mathbf{W}^T \mathbf{W}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{ref}). \quad (7)$$

A matriz \mathbf{Q} é denominada matriz de amostragem; \mathbf{g} é uma aproximação do gradiente de Φ , \mathbf{J} a matriz jacobiana e \mathbf{H} uma aproximação da matriz hessiana. O modelo de condutividade \mathbf{m}_{ref} serve tanto como ponto de partida do processo iterativo quanto para estabelecer um modelo de referência. Nos testes realizados neste trabalho, \mathbf{m}_{ref} contém a média das resistividades aparentes da base de dados, excluindo-se os alvos.

Aspectos computacionais

O programa RESINVM3D (Pidlisecky et al., 2007) tal como distribuído não possui uma rotina específica para realizar o cálculo do problema direto. Para suprimir tal deficiência, criamos um programa (RESFWM3D) que resolve o problema direto na Equação 3. Este programa, escrito em MATLAB, incorpora formatos pré-estabelecidos pelo programa RESINVM3D e adicionalmente apresenta uma interface gráfica que facilita a criação de novos modelos, a execução do problema direto e o interfaceamento com o RESINVM3D nos testes de inversão.

O programa RESINVM3D tem 35 rotinas que utilizam diversas funções intrínsecas e estruturas do MATLAB. Sua distribuição vem acompanhada de dois modelos (na pasta ModelData) para ilustrar a utilização do programa. No modelo Surface, um cubo de resistividade é invertido a partir de um conjunto de dados obtidos em superfície; o modelo Borehole incorpora dados de poços à base pré-existente. As informações requeridas para rodar o algoritmo de inversão estão basicamente em duas estruturas de dados, denominadas MTX e para. A primeira contém informações referentes ao modelo de resistividade e arranjo de eletrodos; a segunda contém os parâmetros referentes à inversão propriamente dita (β , tolerância do ajuste, etc.). As Figuras 1 e 2 mostram o conteúdo destes arquivos.

Imageamento 3D na prospecção mineral: uma possibilidade?

Investigamos neste trabalho a possibilidade de se empregar uma configuração superfície-furo para melhorar o imageamento de alvos na prospecção mineral. O arranjo em superfície continuaria sendo o caminhamento dipolo-dipolo convencional, porém, seriam incorporadas leituras de potencial em eletrodos colocados ao longo de furos de sondagem. Este procedimento pode ser facilmente incorporado na investigação de áreas já intensamente mineradas (*brown fields*) e, em menor escala, em áreas já num estágio mais avançado de prospecção no qual pelo menos um furo foi realizado. Para realçar os resultados obtidos com o imageamento, empregamos dois modelos de resistividade, um bastante simples (prisma condutivo) apenas para ilustrar o procedimento adotado, e outro mais complexo incorporando feições representativas de um depósito mineral. Para cada modelo, os testes de imageamento foram realizados usando três configurações de dados; a primeira empregando apenas dados de superfície, a segunda incorporando (aos dados de superfície) os dados obtidos dentro de um furo que atravessa parte do depósito mineral, e a terceira considerando um furo passa na vizinhança do alvo.

Caso 1: Prisma condutivo

O modelo deste teste (Figuras 3a, 4a e 5a) é composto por um prisma condutivo (40 ohm.m) no interior de um terreno com resistividade de 200 ohm.m. O alvo tem 6 m de comprimento, 3 m de espessura, 4 m de largura e está situado a 1,75 m de profundidade. O cubo de resistividade possui 19040 células (34 arestas na direção X, 35 na Y e 16 na Z), sendo as maiores com uma dimensão de 1x0.5x0.5 metros.

O arranjo de superfície (Figura 3a) contém seis linhas com quinze eletrodos cada. O espaçamento entre os eletrodos é de 1 m e a separação entre linhas de 3 m. A base de dados contém 468 medições de potencial. Na segunda abordagem (Figura 4a), a base de dados incorporou dados ao longo de um furo vertical que atravessa o centro do alvo. Ao longo do furo 10 eletrodos de potencial, espaçados em 1 m, foram colocados. A base de dados contém 1224 medições de potencial. O terceiro arranjo (também superfície-furo) incorpora aos dados de superfície os dados obtidos ao longo de um furo inclinado ao lado do alvo. A base de dados contém 1224 medições de potencial. Nos três casos os eletrodos de superfície possuem a mesma configuração (caminhamento elétrico dipolo-dipolo linear). Os eletrodos em furos foram utilizados apenas para leitura de potencial.

A inversão de dados para os três arranjos foi feita com o RESINVM3D usando $\beta = 5$. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 3b, 3c, 3d e 3e. Para dados de superfície (Figura 3b), a inverão identifica a posição do alvo, mas a sua forma fica distorcida e deslocada na vertical. A propriedade física do alvo não é recuperada. Para o segundo arranjo (Figuras 4b, 4c, 4d e 4e) observamos que a resistividade do alvo é melhor recuperada. A forma e a posição do alvo são melhor delineadas, embora persista um ligeiro achatamento do corpo junto à superfície. No terceiro caso (Figuras 5b, 5c, 5d e 5e) observa-se que o imageamento é inferior ao caso anterior, porém ainda melhor que no primeiro

caso (dados apenas de superfície). O modelo obtido por inversão identifica o alvo condutivo ao redor do furo mas não consegue uma definição mais realista de sua forma e propriedade física.

Caso 2: Corpo irregular

Neste caso, o alvo é bem maior que o anterior e procura em escala e valores de propriedade física representar feições comumente encontradas na prospecção de sulfetos maciços. O modelo possui dois corpos disjuntos com resistividade de 30 ohm. O alvo maior tem o topo a 100 m de profundidade e base a 250 m, com comprimento e espessura de 200 m. A resistividade do meio de fundo é 1000 ohm.m. O cubo de resistividade possui 16.150 células (38 arestas em X, 25 em Y e 17 em Z), cada constituída por um cubo com aresta de 20 m.

O arranjo de superfície (Figura 6a) contém cinco linhas com dezessete eletrodos cada. O espaçamento entre os eletrodos é de 40 m e a distância entre as linhas é de 100 m. A base de dados contém 525 medições de potencial. A segunda configuração (Figura 7a) adicionalmente incorpora sete eletrodos de potencial com separação de 40 m dentro de um furo vertical que atravessa o corpo maior. A base de dados contém 1005 medições de potencial. No terceiro arranjo de teste (Figura 8a) o furo vertical foi substituído por um furo inclinado passando entre os dois alvos. Os eletrodos de superfície possuem a mesma configuração do arranjo de superfície (cinco linhas com dezessete eletrodos cada). Dentro do furo sete eletrodos de potencial com espaçamento de 40 m foram considerados estendendo a base de dados para 1005 medições.

A inversão de dados utilizou $\beta = 500$. Para dados de superfície (Figuras 6b, 6c, 6d e 6e) apenas o corpo maior foi percebido. Para o segundo arranjo (Figuras 7b, 7c, 7d e 7e), observa-se uma melhor determinação da propriedade física bem como da forma e posição do corpo, especificamente na vizinhança do furo. O corpo menor (longe do furo) não é identificado. No terceiro arranjo (Figuras 8b, 8c, 8d e 8e) nota-se que os dois alvos são percebidos embora sua geometria não seja recuperada. Isso ocorre também devido a propriedade física ser melhor imageada na região próxima ao furo, assim as formas dos corpos ficam distorcidas.

Conclusões

Este trabalho sugere que a colocação de eletrodos para a medida de potencial no interior de furos, à medida que um levantamento convencional dipolo-dipolo se desenvolve em superfície, pode sensivelmente melhorar a caracterização do substrato. Operacionalmente consideramos viável a inclusão deste procedimento na prospecção mineral tanto em termos de aquisição quanto de inversão de dados usando programas existentes. Configurações superfície-furo com métodos eletromagnéticos (Eadie & Staltari, 1987) tem sido incorporadas e é possível que o mesmo aconteça com levantamentos de resistividade ou de polarização induzida. A mesma estratégia tem potencial para estudos em áreas urbanas ou industriais, normalmente com severas restrições para a instalação de arranjos em superfície.

Referências

- EADIE, E. T. ; STALTARI, G., 1987, Downhole electromagnetic methods: Exploration Geophysics, v. 18, n. 3, p. 247-351.
- Haber, E., U. M. Ascher, and D. Oldenburg, 2000, On optimization techniques for solving nonlinear inverse problems: Inverse Problems, 16, 1263-1280.
- Pidlisecky, A., R. Knight, and E. Haber, 2006, Cone-based electrical resistivity tomography: Geophysics, 71, no. 4, G157-G167.
- Pidlisecky, A.; Haber, E.; Knight, R., 2007, RESINVM3D: A 3D resistivity inversion package: Geophysics, Volume 72, Issue 2, pp. H1-H10.

| | | |
|-----------------|---|--|
| para.BETA | Parâmetro de regularização | |
| para.maxit | | |
| para.tol | | |
| para.intol | Parâmetros que controlam a tolerância para todas as soluções internas | |
| para.inintol | | |
| para.inintol | | |
| para.init | | |
| para.ilutol | | |
| para.c | | |
| para.abx | Parâmetros que controlam os pesos e a anisotropia do modelo | |
| para.aly | | |
| para.alz | | |
| para.als | | |
| para.e | Parâmetros de pesos dos dados. | |
| para.maxerr | | |
| para."filename" | Existem 7 arquivos de entradas que são usados para calcular a estrutura "MTX" | |

Figura 1: Discretização dos componentes da estrutura para. Os valores são definidos pelo usuário e geram a estrutura MTX. Os valores dos componentes podem ser vistos e editados no arquivo DCdriver*.m.

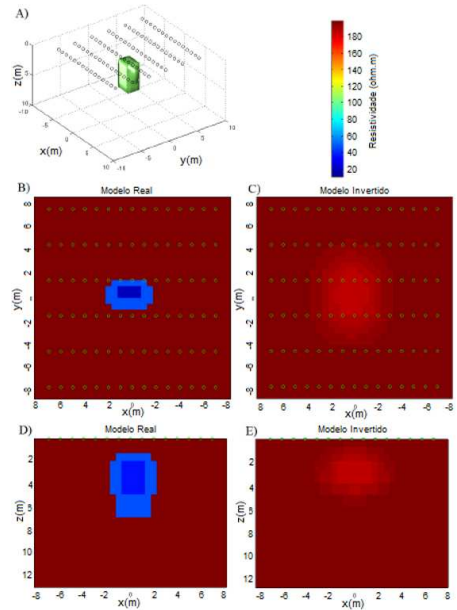


Figura 3: Modelo geológico surface com corpo alongado no centro do grid, analisado através de arranjo de superfície (caminhamento elétrico dipolo-dipolo em linha) e seu imageamento 3D visto de diferentes ângulos: A) visualização em 3D do modelo geológico e das posições dos eletrodos; B) Modelo real visto de cima com um corte em z=3 m; C) Modelo Invertido visto de cima com um corte em z=3 m; D) Modelo real visto de perfil; E) Modelo invertido visto de perfil.

| | |
|------------|---|
| MTX.GRID | Contem a discretização de X, Y e Z |
| MTX.RHS | A matriz "q" para o modelo direto |
| MTX.SRCNUM | Índice da posição da fonte para cada dado |
| MTX.OBS | Matriz "Q" |
| MTX.dobs | Dados observados |
| MTX.DTW | Vetor de desvio padrão dos dados |
| MTX.mref | Vetor contendo o modelo de referência |
| MTX.ACTIVE | Vetor contendo quais células são ativas |
| MTX.wt | Vetor contendo os pesos do modelo |
| MTX.WTW | Matrix de regularização |
| MTX.WdW | Matrix de pesos dos dados |
| MTX.FOR | Operador direto |
| MTX.PL | Matriz de condicionamento 1 |
| MTX.PU | Matriz de condicionamento 2 |

Figura 2: Discretização dos componentes da estrutura MTX. Os valores são calculados em duas etapas, a primeira é criada pela função generateMTX.m; a segunda pela função invmain.m. Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada no arquivo DCdriver*.m de cada modelo.

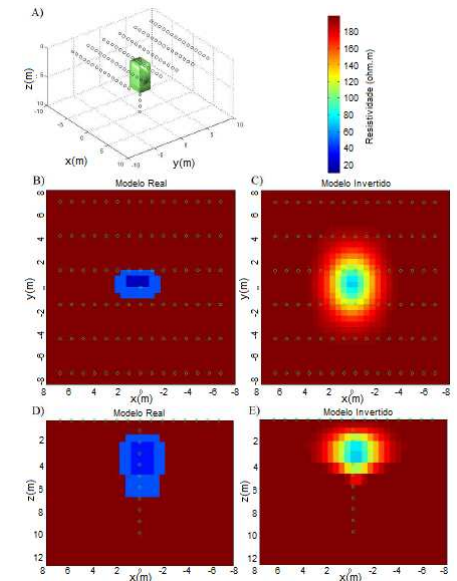


Figura 4: Modelo geológico surface com corpo alongado no centro do grid, analisado através de arranjo de superfície-furo (caminhamento elétrico dipolo-dipolo em linha) com o furo vertical atravessando o corpo maior e seu imageamento 3D visto de diferentes ângulos: A) Visualização em 3D do modelo geológico e das posições dos eletrodos; B) Modelo real visto de cima com um corte em z=3 m; C) Modelo Invertido visto de cima com um corte em z=3 m; D) Modelo real visto de perfil; E) Modelo invertido visto de perfil.

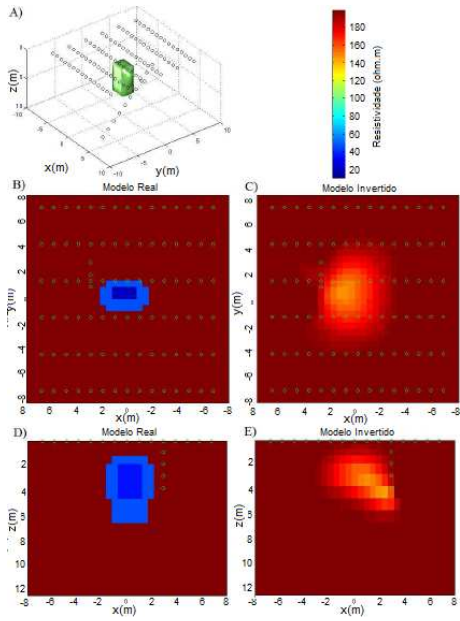


Figura 5: Modelo geoeétrico surface com corpo alongado no centro do grid, analisado através de arranjo de superfície-furo (caminhamento elétrico dipolo-dipolo em linha) com o furo inclinado tangenciando os dois corpos e seu imageamento 3D visto de diferentes ângulos: A) Visualização em 3D do modelo geoeétrico e das posições dos eletrodos; B) Modelo real visto de cima com um corte em $z=3$ m; C) Modelo Invertido visto de cima com um corte em $z=3$ m; D) Modelo real visto de perfil; E) Modelo invertido visto de perfil.

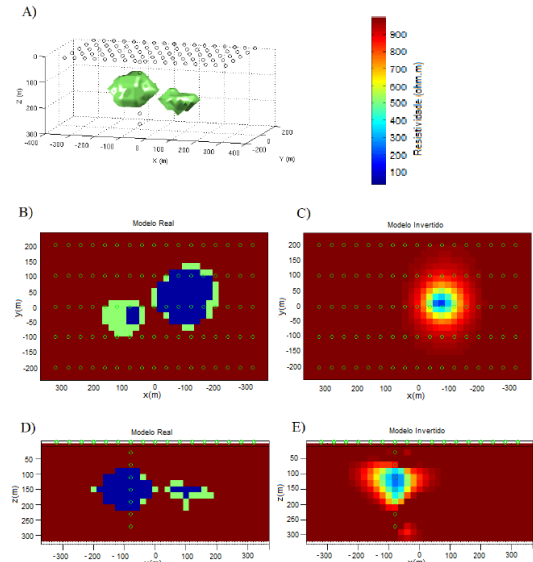


Figura 7: Modelo geoeétrico com dois corpos irregulares analisado através de arranjo de superfície-furo (caminhamento elétrico dipolo-dipolo em linha) com o furo vertical atravessando o corpo maior e seu imageamento 3D visto de diferentes ângulos: A) Visualização em 3D do modelo geoeétrico e das posições dos eletrodos; B) Modelo real visto de cima com um corte em $z=140$ m; C) Modelo Invertido visto de cima com um corte em $z=140$ m; D) Modelo real visto de perfil; E) Modelo invertido visto de perfil.

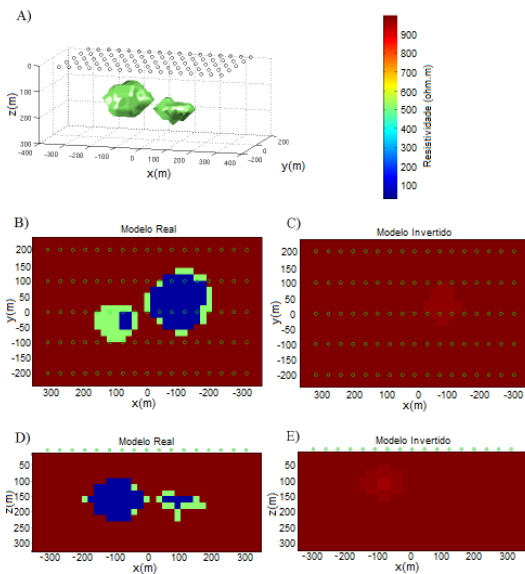


Figura 6: Modelo geoeétrico com dois corpos irregulares ana-lisado através de arranjo de superfície (caminhamento elétrico dipolo-dipolo em linha) e seu imageamento 3D visto de diferentes ângulos: A) Visualização em 3D do modelo geoeétrico e das posições dos eletrodos; B) Modelo real visto de cima com um corte em $z=140$ m; C) Modelo Invertido visto de cima com um corte em $z=140$ m; D) Modelo real visto de perfil; E) Modelo invertido visto de perfil.

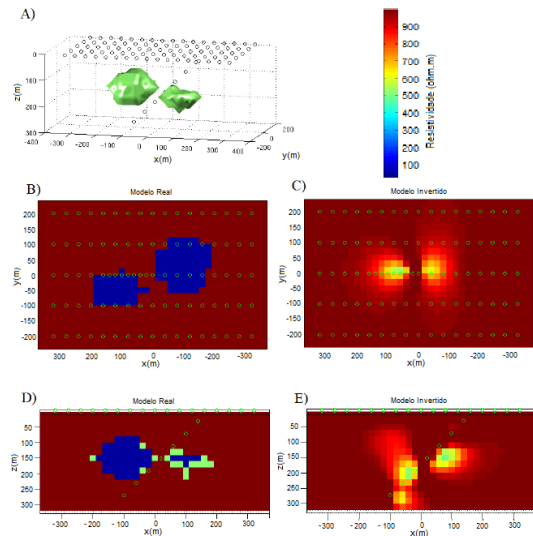


Figura 8: Modelo geoeétrico com dois corpos irregulares analisado através de arranjo de superfície-furo (caminhamento elétrico dipolo-dipolo em linha) com o furo inclinado tangenciando os dois corpos e seu imageamento 3D visto de diferentes ângulos: A) Visualização em 3D do modelo geoeétrico e das posições dos eletrodos; B) Modelo real visto de cima com um corte em $z=140$ m; C) Modelo Invertido visto de cima com um corte em $z=140$ m; D) Modelo real visto de perfil; E) Modelo invertido visto de perfil.