



## Detalhamento elétrico da contaminação ácida no aquífero Caraíba usando um sistema eletromagnético Sirotem Mk3

Emerson S. M. dos Santos, Olivar A. L. de Lima e Hédison K. Sato CPGG/IGEO/UFBA

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> 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

This work discuss the use of the transient EM method SIROTEM, for the underground monitoring of the Caraíba Metais Metallurgic industry, located in the northwestern corner of the Camaçari Petrochemical Complex (COPEC), Dias D'Ávila county, Bahia. Its main goal was to delineate a sulfuric acid plume that is invading a portion of the Caraíba aquifer block bellow that industrial unit. Five transverse profiles were surveyed, all irradiating from the acid sulfuric unit, using a EM system SIROTEM MK3 from CPGG/UFBA. To interpret and to invert these results, we used the software package EMvision v.2.0 from Encon Technology Pty Ltd. In the inverted resistivity-time sections in terms of the resistivity versus depth it is possible to precisely delineate, the lateral extent of the contaminated zone, but also the geometrical configuration of the aquifer substractum in the area. The results, free of environmental noises, were useful to confirm and to better detail the electrical anomalies previously detected with conventional electrical methods.

### Introdução

Devido aos recentes avanços tecnológicos e computacionais, os métodos eletromagnéticos têm se tornado cada vez mais úteis e aplicados tanto na exploração mineral quanto no monitoramento ambiental.

Desse modo, os desenvolvimentos instrumentais associados à modelagem matemática tri-dimensional em microcomputadores têm demonstrado que as técnicas EM transientes são eficientes e rápidas e dão resultados práticos satisfatórios em problemas de detecção e monitoramento ambiental.

No presente trabalho usamos a técnica EM transiente SIROTEM para detalhar uma pluma de contaminação por ácido sulfúrico na área industrial da metalúrgica Caraíba Metais.

Cinco seções geoeletricas foram investigadas, todas elas irradiadas a partir da fonte de contaminação superficial representada pela unidade de produção do ácido sulfúrico. No entanto serão apresentadas apenas duas das principais aquisições que serão representadas pelas

Linhas 1 e 2 que representam as principais zonas contaminadas. Na aquisição dos dados de campo usamos o sistema SIROTEM MK3, na forma de operação em bobina única (transmissor-receptor), quadrada, de lado com 10 e 20 m. Apesar da presença freqüente de ruídos criados pelas construções, instalações elétricas e rede de aterramento industrial, os resultados obtidos são bastante satisfatórios e permitem delinear, com riqueza de detalhes, a extensão lateral da contaminação e a configuração do substrato do aquífero freático da área.

Este trabalho faz parte do convênio entre a metalúrgica Caraíba Metais e o CPGG/UFBA.

### Arcabouço Geológico

O bloco aquífero Caraíba é definido como um paralelepípedo quase retangular com 3,2 km de comprimento, 2,1 km de largura e cerca de 50 m de profundidade (Figura 1). Sua definição foi, basicamente, efetuada com base na estrutura geológica e no padrão de fluxo hidráulico subterrâneo, de sorte que seus limites laterais correspondem às correntes da drenagem superficial, ou zonas de descarga do bloco. Esse aquífero livre arenoso, com camadas impermeáveis, tem forma de uma cunha inclinada para NE, com mergulho inferior a cinco graus.

A zona de recarga deste bloco inclui toda a área industrial da Caraíba. Como um sistema de porosidade intergranular, o comportamento hidráulico do aquífero freático e fortemente dependente da textura e das estruturas internas dos arenitos. Estas foram herdadas dos processos deposicionais das formações, posteriormente modificadas por diagenesis e tectonismo que atuaram durante a evolução geológica do Recôncavo. Um conhecimento da geometria dos corpos arenosos e da heterogeneidade espacial nas suas propriedades hidráulicas são requisitos básicos para entender o sistema de fluxo e o transporte de poluentes no aquífero, tanto nas condições naturais quanto em sua extração por bombeio de poços. Mineralogicamente os arenitos da Formação Marizal são compostos predominantemente de quartzo, feldspato alteradas (caulinita), pequenas quantidades de mica, nódulos ou concreções de óxidos e hidróxidos de ferro e manganês e proporções variáveis de argilas diagenéticas (caulinita-ilita). O conteúdo carbonático dos arenitos varia de 0 a 5 %, em peso. As zonas lenticulares ricas em argilas contém 70 % de caulinita, 10 % de illita e carbonato de cálcio entre 5 e 10%. Estruturalmente, o Supergrupo Bahia foi densamente seccionado por falhas de gravidade subverticais orientadas segundo NNE-SSW, com orientações conjugadas secundárias segundo NW-SE.

Os sistemas de falhamentos no rifte se deram de forma intermitente até depois da deposição da Formação São Sebastião.

A análise de dados de sondagens elétricas, perfis geofísicos de poços e seções de radar penetrante no solo (Lima, 1999) permitiram concluir que os arenitos da Formação Marizal foram depositados como corpos tabulares superpostos de barras de areias (2 m a mais de 10 m de espessura). Cada unidade arenosa é normalmente selada por uma fina camada de lamitos de alguns decímetros de espessura. Além disso, cada barra individual é identificada por uma diminuição granulométrica ascensional, culminando com os depósitos argilosos da cobertura de inundação. Isso se reflete basicamente como uma diminuição da porosidade efetiva e da permeabilidade, em direção ao topo das barras. Em afloramentos é possível observar que os bancos arenosos possuem estratificações paralelas e cruzadas, bem como estruturas de deformações contemporâneas, tais como encurvamentos de estratos e falhas sinclinais.

Toda essa heterogeneidade interna deve ser devidamente considerada nas simulações das respostas hidráulicas do aquífero ao cenário de remediação programado.

Caracterização geofísica com o método eletro-magnético transiente

O equipamento SIROTEM - MK3 é um sistema eletromagnético que opera no domínio do tempo, fabricado pela empresa australiana Geoinstruments Pty Ltd. Trata-se de um sistema controlado e operado por microprocessador com armazenamento interno das informações adquiridas. Neste trabalho, foi usado num padrão de aquisição em bobina única (*single loop*) para transmissão e recepção dos pulsos e sinais eletromagnéticos.

O levantamento realizado na região da Caraíba Metais teve como objetivo principal contribuir para melhor mapear a distribuição espacial da resistividade dos materiais geológicos em subsuperfície, até cerca de 20m de profundidade, ou seja, até à base do substrato do aquífero.

O cálculo de resistividade aparente no SIROTEM, para configuração de bobina coincidente, em um semi-espaço homogêneo, é baseado na seguinte fórmula assintótica:

$$r = 6,32 \times 10^{-12} A^{2/3} b^{4/3} (V/I)^{-2/3} t^{-5/3}$$

onde  $r$  é a resistividade aparente (ohm.m),  $A$ , a área efetiva da bobina,  $b$ , o comprimento do lado da bobina,  $(V/I)$ , a resposta transiente, e  $t$  o tempo de decaimento (s).

### Resultados Experimentais

Das 85 estações TDEM executadas na área da Caraíba Metais medidas, mostramos apenas 28 que

correspondem às linhas 1 e 3 do projeto, indicadas Figura 2.

Logo no início, um decréscimo acentuado da resistividade com o tempo, em resposta ao elevado contraste de resistividade entre a zona não-saturada da Formação Marizal e o aquífero local, em grande parte contendo águas com variados graus de contaminação. Estas curvas, geralmente terminam com tendências assintótica para valores entre 2 e 10 ohm.m, ou mostram ainda decaimento para valores abaixo de 1,0 ohm.m. Alguns pontos de inflexão intermediários demonstram haver uma estratificação elétrica no material aquífero da área estudada.

Na Figura 3 é mostrado um gráfico representativo das curvas de decaimento experimental e teórica obtidas na área. No caso, tratam-se de duas estações da linha 1. Através destes gráficos, é possível verificar o grau de precisão alcançado no ajuste unidimensional, iterativo.

A Figura 4 contém a combinação de pseudo-seções obtidas ao longo da linha 1 com uma bobina de 20m de lado, iniciada próximo a cerca de proteção do fundo da fábrica e se estendendo para sul até a estação de número 28. No modelo geoeletrico final mostrado na base da figura, se delinea uma zona de muito baixa resistividade ao longo de todo o perfil, presente a partir de 10 a 15 m de profundidade e que se estende, provavelmente, até a base do aquífero.

Uma zona de transição é observada possuindo resistividades variando entre 10 e 56 ohm.m, em função, possivelmente, de variabilidades no conteúdo de argila nos arenitos. Observam-se, nas pseudo-seções de resistividade aparente, duas notáveis anomalias condutivas que dão conta das dimensões e intensidades das atuais fontes de contaminação.

A Figura 5 mostra a combinação de pseudo-seções obtidas ao longo da linha 3, também com bobina de 20 m de lado. Essa linha foi iniciada na proximidade do poço de monitoramento PM-18 e terminada em frente à torre de resfriamento da planta de ácido sulfúrico. O modelo geoeletrico final, mostrado na base da figura, indica a presença de uma zona muito condutora, estendendo-se de uma profundidade de cerca de 7 m até à profundidade máxima alcançada na área, estimada em cerca de 25 m. O substrato de 2,4 ohm.m, verificado na extremidade NW do perfil, é interpretado representar o espesso pacote de folhelhos da Formação São Sebastião, que delimita a base do aquífero freático na maior parte do Bloco Caraíba. O intervalo superior, de resistividade entre 37 e 76 ohm.m, representa a zona saturada do aquífero em transição para dois núcleos mais condutivos, bem visíveis nas pseudo-seções de resistividade aparente.

O mapa de contornos da resistividade verdadeira do aquífero mostrado na Figura 2 delimita, claramente, a extensão lateral da pluma ao entorno do perímetro industrial da empresa. Todavia, há também sugestivas indicações de uma tendência de seu crescimento. Os resultados de SIROTEM na linha 3 indicam, nitidamente, a presença de um eixo de propagação preferencial do contaminante na direção mencionada, que deve estar associado a uma faixa mais permeável do aquífero.

## Conclusão

O levantamento geofísico EM com SIROTEM realizado na área da Caraíba Metais foi planejado para ser executado ao longo de linhas transversais estrategicamente localizadas em relação à anomalia elétrica mapeada com a técnica convencional de eletrorresistividade (Lima, 2000). O objetivo deste levantamento foi o de confirmar e estender a geometria da pluma ácida anteriormente detectada, para locais ou regiões onde a técnica eletrorresistiva havia apresentado resultados incertos ou ambíguos.

Os resultados obtidos demonstram que a técnica TDEM, mesmo em locais com fortes, mas localizados ruídos, pode produzir resultados coerentes e satisfatórios. No presente caso, os resultados globais possibilitaram não só avaliar as informações dos trabalhos geofísicos anteriores, mas também revelar a presença da contaminação em áreas não tão bem identificadas.

Esses resultados basicamente confirmam a configuração de duas zonas principais de contaminação ácida: a mais forte delas localizada sob a área de produção do ácido sulfúrico; e a outra situada. Essas zonas consistem de um núcleo basal acidificado de resistividade muito baixa (por vezes inferior a 1 ohm.m). Este núcleo é envolvido por uma zona de transição, na qual a resistividade varia tanto em função de variações na qualidade da água armazenada, quanto em função da quantidade de argila disseminada nos arenitos.

Há também boa coincidência entre os valores de profundidade e de resistividade elétrica obtidos com as técnicas elétrica e eletromagnética. Cabe ainda registrar a vantagem operacional da técnica SIROTEM, na modalidade bobina coincidente, cuja execução é bem mais rápida que a da sondagem elétrica vertical.

Também registra-se que as dimensões das bobinas e as orientações das linhas usadas no presente levantamento foram fixadas com base no espaço físico disponível para operação e para atingir uma profundidade suficiente para obter respostas provenientes do substrato aquífero. Apesar desse compromisso, se obteve uma boa definição da configuração da auréola e do topo do núcleo da pluma. Todavia, apenas localmente se observou resposta proveniente do substrato. Isso se deveu, em parte, a limitação na profundidade de investigação, mas resultou também do pequeno contraste de resistividade entre a pluma e os folhelhos da Formação São Sebastião.

## Referências

- Lima, O. A. L. (1999) Caracterização hidrológica e dos padrões de migração da poluição no sistema aquífero do Recôncavo, Tese para concurso de professor titular, Universidade Federal da Bahia, Salvador-Ba.
- Lima, O. A. L. (2000) Estudo da contaminação no aquífero freático sob a área da Caraíba Metais: caracterização do sistema e análise de sua recuperação, CPGG/UFBA, Salvador.
- Lima, O. A. L. (2002) Estudo da contaminação no aquífero freático sob a área da Caraíba Metais: caracterização e remediação, CPGG/UFBA, Salvador.
- Moura Palma, C. (2004) Detalhamento elétrico de uma pluma de contaminação no Bloco Aquífero Caraíba usando eletrodos enterrados, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador-Ba.
- Hoekstra, P. Blohm, M. W. (1980) Case Histories of Time-Domain Elettromagnetic Soundings in Enviromental Geophysics, SEG, 2.
- Danielsen, J. E. ; Auken, E. ; Jorgensen, F.; Sondergaard, V. Sorasen, K. I. (1982) The application of the transient eletromagnetic method in hydrogeophysucal surveys, Journal Applied Geophysics, 53:181-198.
- Nabighian, M. N. Macnae, J. C. (1996) Time domain electromagnetic prospecting methods, Geophysics nº 3, New York.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Caraíba Metais, pelo apoio a este trabalho. Ao geofísico Athaebson Bezerra Santos, pelo apoio no processamento de dados do Sirotem.

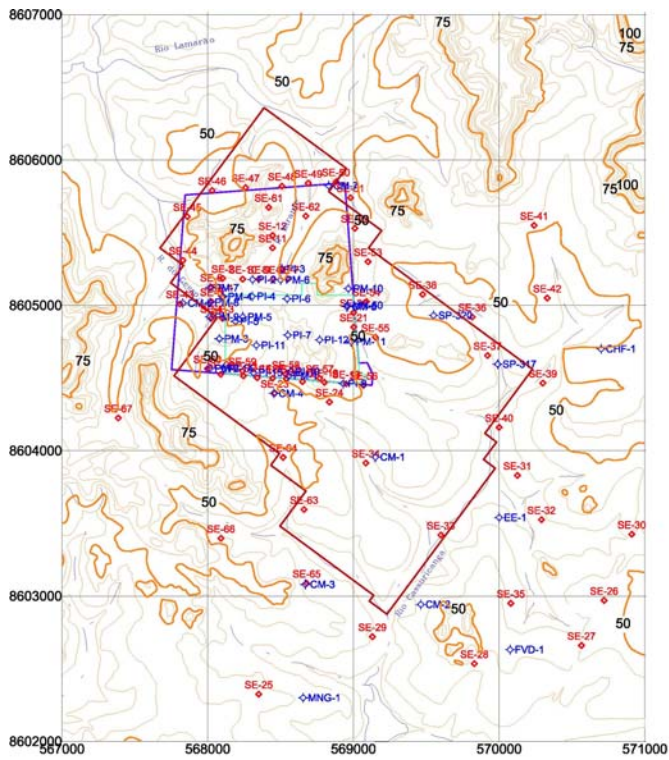


Fig. 1 - Mapa topográfico da região da Caraíba Metais

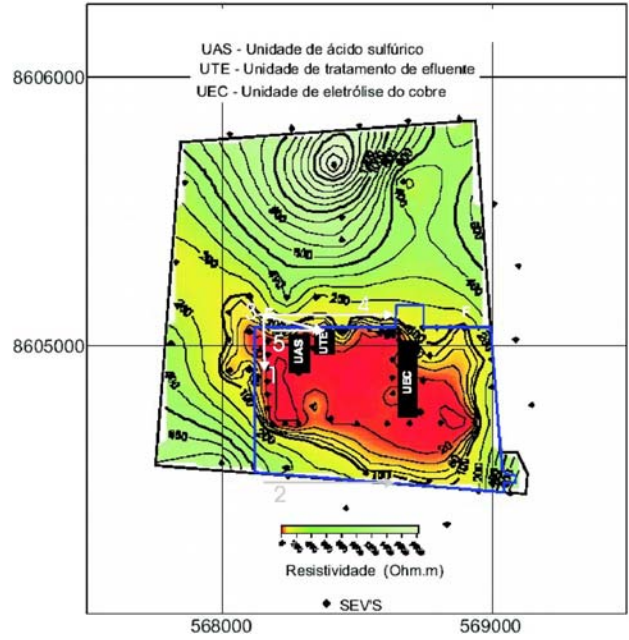
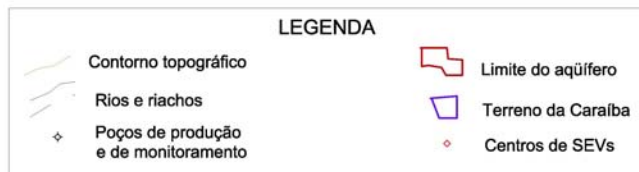


Fig. 2 – Mapa da resistividade aparente e localização das linhas de levantamento

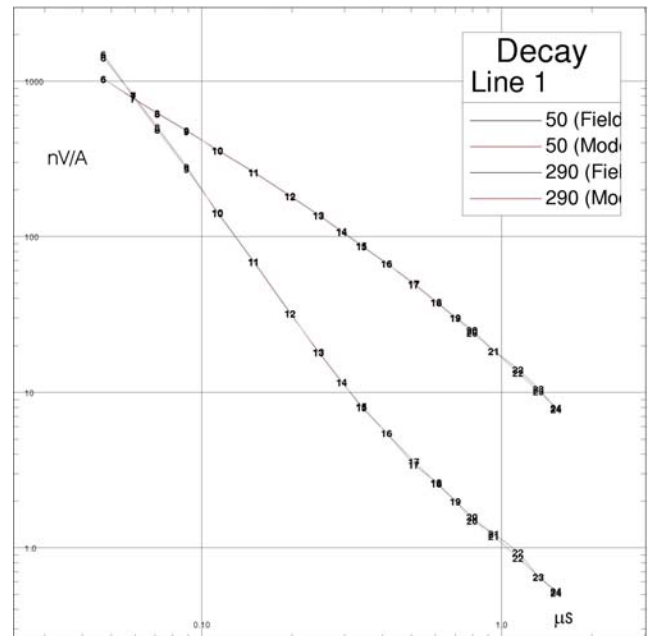


Fig. 3 – Curvas de decaimentos observados e modelados da estação a 190 m do início da Linha 1



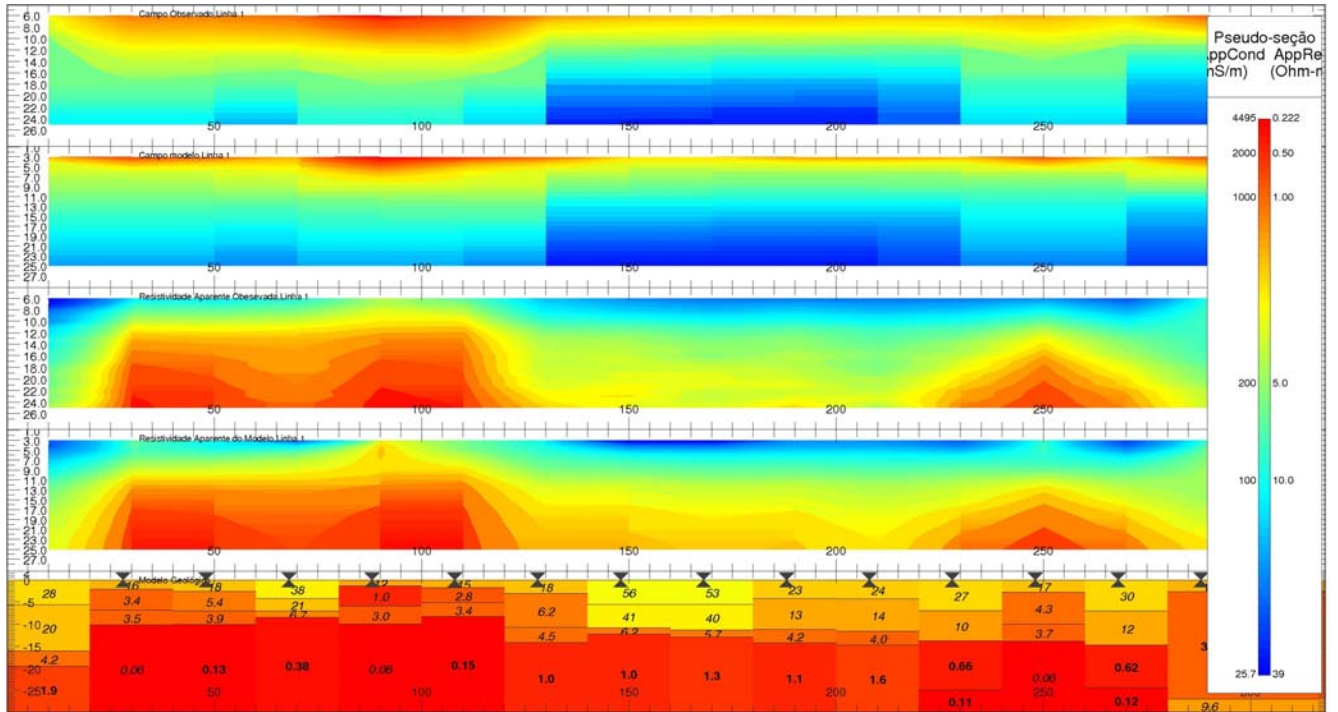


Fig. 4 – Linha 1: (i) pseudo-seções com dados de campo, (ii) modelada, (iii) resistividade aparente de campo, (iv) resistividade aparente modelada e (v) modelo geoeletrico.

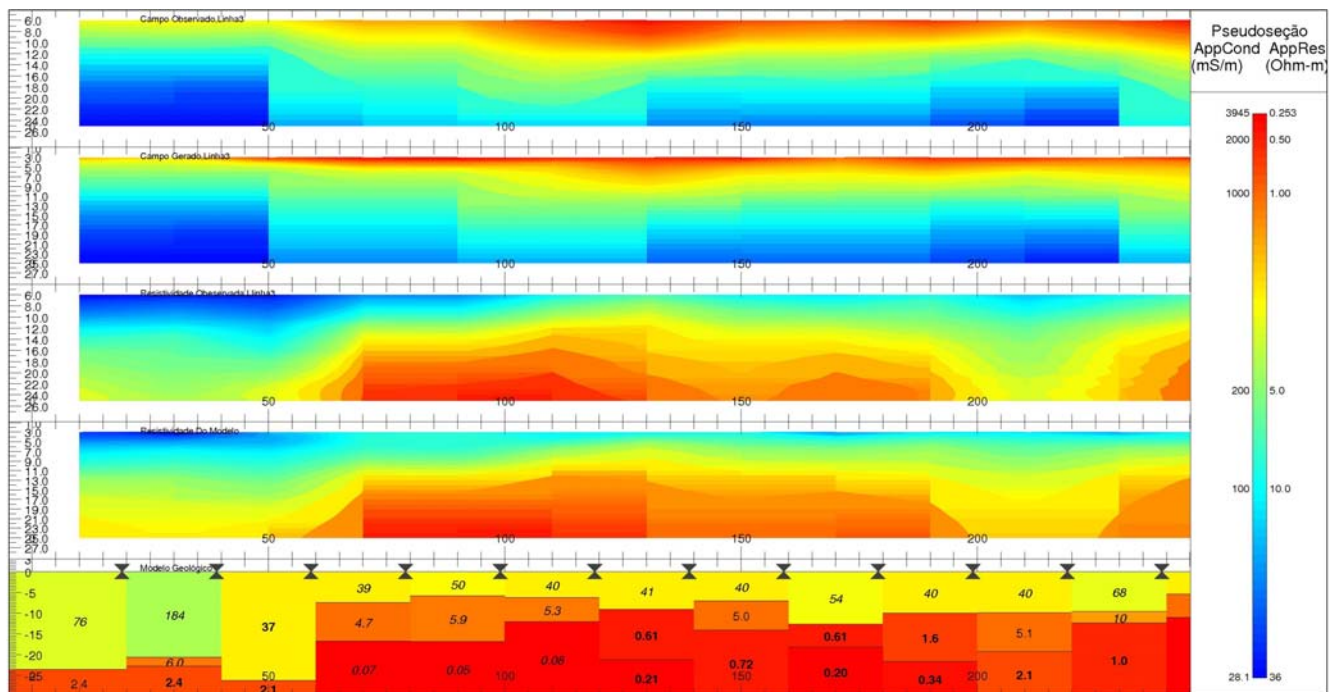


Fig. 4 – Linha 3: (i) pseudo-seções com dados de campo, (ii) modelada, (iii) resistividade aparente de campo, (iv) resistividade aparente modelada e (v) modelo geoeletrico.