

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Geofísica

Vitor Lucas Sobottka Cavenaghi

**Caracterização geométrica de alvos rasos no Sítio  
Controlado de Geofísica Rasa-II – IAG/USP através do uso  
de resistividade capacitiva**

São Paulo

2017



VITOR LUCAS SOBOTTKA CAVENAGHI

**CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE ALVOS RASOS NO  
SÍTIO CONTROLADO DE GEOFÍSICA RASA-II – IAG/USP  
ATRAVÉS DO USO DE RESISTIVIDADE CAPACITIVA**

Dissertação apresentada ao Instituto de  
Astronomia, Geofísica e Ciências  
Atmosféricas da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de Mestre  
em Geofísica.

Área de concentração: Geoelétrica.

Orientador: Dr. Vagner Roberto Elis

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.

São Paulo

2017





**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas**

**CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE ALVOS RASOS NO  
SÍTIO CONTROLADO DE GEOFÍSICA RASA-II – IAG/USP  
ATRAVÉS DO USO DE RESISTIVIDADE CAPACITIVA**

**Vitor Lucas Sobottka Cavenaghi**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOFÍSICA**

Prof. Dr. Vagner Roberto Elis – orientador - IAG/USP

Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas – IGc/USP

Prof. Dr. Otávio Coaracy Brasil Gandolfo – IPT/USP

São Paulo

2017



Dedico este trabalho com todo o amor e carinho aos meus pais, irmãos e à minha amada Bruna.

*“A única maneira de se definir o limite do possível é ir além dele, para o impossível.”*

Arthur C. Clarke

*“O que antes parecia impossível torna-se possível quando alguém se sente apto a transpor todos os obstáculos, conhecendo a sua verdadeira grandeza interior.”*

Nuno Cobra





## AGRADECIMENTOS

Mais um ciclo se completou em minha vida e, com muito orgulho, alcancei os objetivos traçados. Para que isso fosse possível, contei com a ajuda e compreensão de muita gente, que me doaram o seu tempo e conhecimento e que no qual sem eles tudo isso não seria possível.

Agradeço primeiramente aos meus pais Sueli e Vitório que sempre me deram opções na vida e me possibilitaram escolher àquelas que mais me agradaram. Por isso, este trabalho é de vocês.

Às minhas irmãs Marcella, Michelle e Monique pela parceria de sempre, tão necessária e que fez toda a diferença.

Aos meus tios Antônio Cavenaghi e Bernadete.

À minha amada Bruna, por todo o carinho, amor e companheirismo e pelo apoio incondicional às minhas decisões.

Ao meu orientador Vagner Elis por todo o processo, desde a primeira conversa, aonde eu não havia nem prestado a prova do mestrado, até a entrega final deste trabalho, doando para mim um pouco do seu conhecimento e me mostrando caminhos que não enxerguei por si só durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos técnicos de campo do IAG, Ernande e Marcelo, pela ajuda nas atividades de campo e pelos bons momentos de risada e descontração.

Aos demais funcionários do IAG por toda a estrutura dada.

Aos professores do IGc e do IAG na qual fui aluno e que contribuíram para a minha formação.

Aos amigos Bruno Poluha, Luiz Hamada, Rodrigo Rangel, Carol Rivadeneyra, Ana Paula, Diogo Chernieski, Lucas Mamede, Alexandre Abreu, Ivan Böttger, Massao Hito, Adriana Simões, Dona Laura, Mirela, Alice, Pedro Antonio (Preto), Mel, Natasha Silveira, Carlinha e tantos outros que contribuíram, sejam com discussões, sejam com boas risadas para a conclusão deste trabalho.



## Resumo

O presente trabalho teve como objetivo determinar as vantagens e limitações do método geofísico de resistividade capacitiva na identificação de materiais enterrados de diferentes tamanhos e propriedades físicas e em diversas profundidades, localizados no Sítio Controlado de Geofísica Rasa II (SCGR-II), em frente ao IAG-USP. Para isso, a COMGAS, em parceria com o IAG-USP adquiriu o equipamento OhmMapper, possibilitando a aquisição de dados através do método capacitivo. Anteriormente à aquisição dos dados de campo, foram adquiridos os valores de resistividade aparente referentes ao *background* da área, para então realizar a instalação dos alvos. Após a instalação do sítio controlado, determinou-se a melhor técnica de aquisição em relação ao objetivo proposto, mostrando-se a técnica de aquisição contínua, com marcação de posição a cada 10m a mais adequada para o projeto em questão. Com a definição da melhor técnica de aquisição de dados, foi realizada a modelagem sintética dos alvos para que os resultados fossem confrontados com os obtidos em campo; a modelagem demonstrou que o método sintético utilizado (descrito no item 6.2) é capaz de definir contrastes de resistividade em profundidades inferiores a 0,8m e em alvos que apresentem dimensões de no mínimo 10cm. Para a avaliação do método capacitivo, realizou-se após a aquisição dos dados, uma análise 2D e 3D das anomalias. A análise dos dados reais demonstrou boa correlação com os ensaios sintéticos, exceto para alvos metálicos que apresentaram forte anomalia condutiva, enquanto que os mesmos alvos apresentaram anomalias resistivas no modelo criado. A análise das seções 2D do SCGR-II demonstrou boa resposta do método capacitivo utilizado para a caracterização geoeletrica de tambores de plástico cheios de água, tambores de aço vazios, cano metálico e tubos de cerâmica e PVC com água – anomalias condutivas, tambores de plástico vazios, manilhas de concreto de grande diâmetro e vazias, caixa de areia acoplada a tubo vertical de PVC, vasos de cerâmica vazios, caixa com material cerâmico, caixa com brita de granito, tubos de PEAD vazios e tubos de polietileno e PVC de pequeno diâmetro e em até 0,5m de profundidade – anomalias resistivas. Os dados 3D sumarizam as anomalias apresentadas nas diversas seções 2D, auxiliando na visualização dos contornos condutivos e resistivos do SCGR-II. Recomenda-se que a caracterização dos alvos pontuais seja, sempre que possível, realizada com o uso mútuo de no mínimo dois equipamentos distintos em suas técnicas e métodos, de forma a se evitar a interpretação precipitada das anomalias observadas e a reduzir os erros implícitos a interpretação, garantindo boa correlação com os dados diretos de campo.

Palavras Chave: OhmMapper, Resistividade Capacitiva, SCGR-II.



## **Abstract**

The present work had as objective to determine the advantages and limitations of the capacitive resistivity method in the identification of buried materials with different dimensions, physical properties and located at different depths, at the Shallow Controlled Geophysical Site II (SCGR-II) IAG-USP. For this, the enterprise COMGAS, in partnership with the IAG-USP, acquired the capacitive equipment OhmMapper, enabling a data acquisition through the capacitive method. Previously to the acquisition of field data for the SCGR-II targets, the background apparent resistivity of the area were acquired, and then the targets were installed. After the installation of the targets, several acquisitions of test data were performed to define the best acquisition technique for the proposed objective, showing the technique of continuous acquisition, with mark spacing every 10m, the most appropriate for the project. After setting the best technique data acquisition, a synthetic modeling of the targets was done so that the results were compared with the field data; The modeling showed that the synthetic method used (described in item 6.2) is able to define resistivity contrasts in depths lower than 0.8m and in targets that have dimensions of at least 10cm. For the evaluation of the capacitive method, a 2D and 3D analysis of the anomalies was performed with the field data. The results showed a good correlation with the synthetic model, except to metallic targets that presented strong conductive anomaly, whereas the same targets at the modeling presented resistive anomalies. The analysis of the 2D sections at SCGR-II demonstrated that the capacitive method used for the geoelectric characterization got good responses for water filled plastic drums, empty steel drums, metal pipe and ceramic and PVC pipes with water - conductive anomalies, empty plastic drums, empty concrete sleeves with large diameter, sandbox coupled with a vertical PVC pipe, empty ceramic pots, box with ceramic material, box with crushed granite, empty PEAD pipes and tubes of polyester and small diameter PVC that is located up to 0.5m depth - resistive anomalies. The 3D data summarized the anomalies presented in the 2D sections, contributing to a better evaluation of the conductive and resistive contours observed on the sections of SCGR-II. It is recommended that the characterization of punctual targets, whenever possible, carried out with the mutual use of at least two different equipments which work with distinct techniques and methods, in order to avoid a hasty interpretation of the observed anomalies and to reduce the implicit errors in the interpretation, improving the geophysical correlation with direct field data.

Keywords: OhmMapper, Capacitive Resistivity, SCGR-II.



## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1.</b> Mapa geológico da cidade de São Paulo, com indicação visual da área de estudo. Escala: 1:100.000. Fonte: LIG-IGc-USP (1998). .....	05
<b>Figura 2.2</b> – Cilindro condutor homogêneo e a representação dos parâmetros utilizados na definição de resistividade elétrica. ....	07
<b>Figura 2.3</b> - Valores de resistividade elétrica de referência para os principais tipos de sedimentos e rochas (Braga, 2006).....	09
<b>Figura 3.1.</b> Localização esquemática do SCGR-II no campus Armando Salles de Oliveira da USP.....	11
<b>Figura 3.2.</b> Retroescavadeira utilizada para a abertura das valas nas linhas 1,2 e 3 do SCGR-II.....	12
<b>Figura 3.3.</b> Retroescavadeira utilizada para a abertura das valas nas linhas 1,2 e 3 do SCGR-II e aferição das medidas das valas.....	12
<b>Figura 3.4.</b> Localização das valas no SCGR-II entre 0 e 25m no eixo Y com marcação das linhas 1,2 e 3 onde os alvos foram posicionados.....	12
<b>Figura 3.5.</b> Localização das valas no SCGR-II entre 25 e 50m no eixo Y, com marcação das linhas 1,2 e 3 onde os alvos foram posicionados.....	13
<b>Figura 3.6.</b> Aferição da profundidade das valas escavadas.....	13
<b>Figura 3.7.</b> Aferição da profundidade do topo dos alvos posicionados nas linhas utilizando-se a estação total Leica TPS-300.....	13
<b>Figura 3.8.</b> Perfil das valas do SCGR-II, produzidos sobre as linhas 1,2 e 3 onde os alvos foram posicionados.....	14
<b>Figura 3.9.</b> Mapa base do SCGR-II do IAG/USP mostrando as marcas de controle, a disposição das três linhas de estudos e o cano metálico guia na posição de 25 m (direção E-W).....	15
<b>Figura 3.10.</b> Linha 1 do SCGR-II com a imagem dos alvos enterrados e croqui esquemático indicando a localização dos mesmos.....	17
<b>Figura 3.11.</b> Linha 2 do SCGR-II com a imagem dos alvos enterrados e croqui esquemático indicando a localização dos mesmos.....	18
<b>Figura 3.12.</b> Linha 3 do SCGR-II com a imagem dos alvos enterrados e croqui esquemático indicando a localização dos mesmos.....	19
<b>Figura 3.13.</b> Localização dos pontos de coleta no SCGR-II e perfil geológico produzido a partir das descrições realizadas.....	22
<b>Figura 3.14.</b> Ponto 1.....	23
<b>Figura 3.15.</b> Ponto 2.....	23



<b>Figura 3.16.</b> Ponto 4.....	23
<b>Figura 3.17.</b> Ponto 1.....	23
<b>Figura 3.18.</b> Ponto 7.....	23
<b>Figura 3.19.</b> Ponto 8.....	23
<b>Figura 4.1.</b> Fluxo de corrente causado por um eletrodo de corrente (A) em um semi-espaço. M é um eletrodo de potencial e r o raio da semi-esfera (modificado de TELFORD, 1990).....	25
<b>Figura 4.2.</b> Arranjo de eletrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N) após a aproximação dos mesmos em um meio homogêneo (adaptado de DOBRIN, 1960). (a) Vista no plano. (b) Seção vertical e (c) Variação do potencial na superfície.....	26
<b>Figura 4.3.</b> Principais arranjos eletródicos utilizados em campo e seus respectivos fatores geométricos (adaptado de LOKE, 2004).....	29
<b>Figura 4.4.</b> Técnica de caminhamento elétrico arranjo dipolo-dipolo, com 5 níveis de investigação (BRAGA, 2006).....	31
<b>Figura 4.5.</b> Conceituação básica das medidas da forma de aquisição convencional (esquerda) e da resistividade capacitiva (direita) (modificado de KURAS et al., 2006).....	33
<b>Figura 4.6.</b> Modelo conceitual do acoplamento capacitivo do método de resistividade capacitiva (YAMASHITA et al., 2004).....	34
<b>Figura 4.7.</b> Componentes que formam o sistema OhmMapper, da GEOMETRICS.....	38
<b>Figura 4.8.</b> Esquema de como o acoplamento capacitivo do OhmMapper funciona (modificado de YAMASHITA et al., 2004).....	39
<b>Figura 4.9.</b> Conceito de equivalência entre a abertura dipolar $L_{LA}$ para o método capacitivo (LA – Line Antenna) e $L_{DC}$ para o método convencional (DC – Direct Current). (Modificado de KURAS, 2006).....	41
<b>Figura 5.1.</b> Aquisição contínua de dados com o OhmMapper – Velocidade de aquisição variável (Modificado de ONDENBORGER G. A. AND LEBLANC A.M. - 2013).....	45
<b>Figura 5.2.</b> Aquisição discreta de dados com o OhmMapper – Velocidade de aquisição constante (Modificado de ONDENBORGER G. A. AND LEBLANC A.M. - 2013).....	46
<b>Figura 5.3.</b> Arranjo de campo do OhmMapper, com as distâncias de corda utilizadas em cada perfil.....	48
<b>Figura 5.4.</b> Linhas de campo realizadas na campanha de aquisição de 29 de agosto de 2016. Linhas em vermelho se referem às três principais linhas, onde se encontram o centro dos alvos enterrados.....	51
<b>Figura 5.5.</b> Linha de campo (linha 2 – 5m) realizada na campanha de aquisição de 19 de setembro de 2016.....	52
<b>Figura 5.6.</b> Linha de campo realizada na campanha de aquisição de 05 de outubro de 2016.....	53
<b>Figura 5.7.</b> Linhas de campo realizadas na campanha de aquisição entre os dias 15 a 17 de fevereiro de 2017. Linhas em vermelho se referem às três principais linhas, onde se encontram o centro dos alvos enterrados.....	54

<b>Figura 5.8.</b> Dados visualizados no programa MagMap2000, com a ocorrência de medições anômalas, anteriormente à filtragem dos dados.....	55
<b>Figura 5.9.</b> Dados visualizados no programa MagMap2000, sem a ocorrência de medições anômalas, após a filtragem dos dados.....	56
<b>Figura 5.10.</b> Linhas de campo antes do empilhamento nas posições reais de campo.....	56
<b>Figura 5.11.</b> Linhas de campo após o empilhamento nas posições reais de campo.....	57
<b>Figura 5.12.</b> Retirada de pontos discrepantes remanescentes através do programa Res2DInv. Os pontos em vermelho são as informações anômalas que serão excluídas do corpo de dados.....	58
<b>Figura 5.13.</b> Malha retangular de blocos com valores de resistividade utilizados para o cálculo da matriz jacobiana através da metodologia Gauss-Newton. Esta figura é uma interface do programa Res2DInv (GEOTOMO).....	59
<b>Figura 7.1.</b> Perfil de resistividade da linha 2 (5m), realizado em 29/08/16, através da técnica de aquisição contínua e sem marcação de posição ao longo da linha.....	66
<b>Figura 7.2.</b> Perfil de resistividade da linha 2 (5m), realizado em 19/09/16, através da técnica de aquisição contínua, com marcação de posição a cada 10m percorridos ao longo da linha.....	67
<b>Figura 7.3.</b> Perfil de resistividade da linha 2 (5m), realizado em 19/09/16, através da técnica de aquisição discreta, com medidas a cada metro percorrido ao longo da linha.....	68
<b>Figura 7.4.</b> Perfil de resistividade da linha 2 (5m), realizado em 05/10/16, através da técnica de aquisição discreta, com medidas a cada meio metro percorrido ao longo da linha.....	69
<b>Figura 7.5.</b> Dados de <i>background</i> da linha 01 - De cima para baixo: Pseudosseção da resistividade aparente medida em campo, pseudosseção da resistividade aparente calculada pelo programa e modelo de inversão dos valores de resistividade.....	72
<b>Figura 7.6.</b> Dados de <i>background</i> da linha 02 - De cima para baixo: Pseudosseção da resistividade aparente medida em campo, pseudosseção da resistividade aparente calculada pelo programa e modelo de inversão dos valores de resistividade.....	73
<b>Figura 7.7.</b> Dados de <i>background</i> da linha 03 - De cima para baixo: Pseudosseção da resistividade aparente medida em campo, pseudosseção da resistividade aparente calculada pelo programa e modelo de inversão dos valores de resistividade.....	74
<b>Figura 7.8.</b> Perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, dos trechos de 0-10m (superior), 10-20m e 20-30m (inferior) da linha 1 do SCGR-II. As posições das valas aparecem delimitadas por linhas brancas e os alvos estão demarcados com linhas e círculos pretos.....	78
<b>Figura 7.9.</b> Perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, dos trechos de 30-40m (superior) e 40-50m (inferior) da linha 1 do SCGR-II. As posições das valas aparecem delimitadas por linhas brancas e os alvos estão demarcados com linhas e círculos pretos.....	79
<b>Figura 7.10.</b> Perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, dos trechos de 0-10m (superior), 10-20m e 20-30m (inferior) da linha 2 do SCGR-II. As posições das valas aparecem	

delimitadas por linhas brancas e os alvos estão demarcados com linhas e círculos pretos.....	83
<b>Figura 7.11.</b> Perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, dos trechos de 30-40m (superior) e 40-50m (inferior) da linha 2 do SCGR-II. As posições das valas aparecem delimitadas por linhas brancas e os alvos estão demarcados com linhas e círculos pretos.....	84
<b>Figura 7.12.</b> Perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, dos trechos de 0-10m (superior), 10-20m e 20-30m (inferior) da linha 3 do SCGR-II. As posições das valas aparecem delimitadas por linhas brancas e os alvos estão demarcados com linhas e círculos pretos.....	86
<b>Figura 7.13.</b> Perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, dos trechos de 30-40m (superior) e 40-50m (inferior) da linha 3 do SCGR-II. As posições das valas aparecem delimitadas por linhas brancas e os alvos estão demarcados com linhas e círculos pretos.....	87
<b>Figura 7.14.</b> Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= -5 e 15m e em X=1,5m e 2,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (linhas em preto).....	91
<b>Figura 7.15.</b> Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= -5 e 15m para X=2,5m, <i>background</i> em X= 2,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas(linhas em branco) e dos alvos (linhas em preto).....	92
<b>Figura 7.16.</b> Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 5 e 25m e em X=1,5m e 2,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	94
<b>Figura 7.17.</b> Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 5 e 25m para X=2,5m, <i>background</i> em X= 2,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	95
<b>Figura 7.18.</b> Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 14 e 34m e em X=1,5m e 2,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (linhas e círculos em preto).....	97
<b>Figura 7.19.</b> Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 5 e 25m para X=2,5m, <i>background</i> em X= 2,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (linhas e círculos em preto).....	98
<b>Figura 7.20.</b> Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 25,0m e 45,0m e em X=1,5m e 2,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	100

<b>Figura 7.21.</b> Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 25,0m e 45,0m para X=2,5m, <i>background</i> em X= 2,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	101
<b>Figura 7.22.</b> Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 42 e 54m e em X=1,5m e 2,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	103
<b>Figura 7.23.</b> Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 42 e 54m para X=2,5m, <i>background</i> em X= 2,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	104
<b>Figura 7.24.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= -5 e 14m e em X=4,5m e 5,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).....	106
<b>Figura 7.25.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= -5 e 14m para X=5,5m, <i>background</i> em X= 5,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).....	107
<b>Figura 7.26.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 8 e 28m e em X=4,5m e 5,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	109
<b>Figura 7.27.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 8 e 28m para X=5,5m, <i>background</i> em X= 5,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	110
<b>Figura 7.28.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 21 e 38m e em X=4,5m e 5,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).....	113
<b>Figura 7.29.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 21 e 38m para X=5,5m, <i>background</i> em X= 5,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).....	114
<b>Figura 7.30.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 31 e 45m e em X=4,5m e 5,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).....	116
<b>Figura 7.31.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 31 e 45m para X=5,5m, <i>background</i> em X= 5,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).....	117
<b>Figura 7.32.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 41 e 54m e em X=4,5m e 5,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).....	119

<b>Figura 7.33.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 41 e 54m para X=5,5m, <i>background</i> em X= 5,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).....	120
<b>Figura 7.34.</b> Seções de resistividade real da linha 3 entre Y= -3 e 20m e em X=7,5m e 8,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	123
<b>Figura 7.35.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= -3 e 20m, para X=8,5m, <i>background</i> em X= 8,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	124
<b>Figura 7.36.</b> Seções de resistividade real da linha 3 entre Y= 10 e 30m e em X=7,5m e 8,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	126
<b>Figura 7.37.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 10 e 30m, para X=8,5m, <i>background</i> em X= 8,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	127
<b>Figura 7.38.</b> Seções de resistividade real da linha 3 entre Y= 22 e 40m e em X=7,5m e 8,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	129
<b>Figura 7.39.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 22 e 40m, para X=8,5m, <i>background</i> em X= 8,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	130
<b>Figura 7.40.</b> Seções de resistividade real da linha 3 entre Y= 34 e 52m e em X=7,5m e 8,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	132
<b>Figura 7.41.</b> Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 34 e 52m, para X=8,5m, <i>background</i> em X= 8,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).....	133
<b>Figura 7.42.</b> Seção de resistividade real no plano XY para as profundidades de Z=0,5 (superior) e Z=1,0m (inferior) – interface do programa Voxler (GOLDEN SOFTWARE, 2012).....	136
<b>Figura 7.43.</b> Seção de resistividade real no plano XY para as profundidades de Z=1,5 (superior) e Z=2,0m (inferior) – interface do programa Voxler (GOLDEN SOFTWARE, 2012).....	137
<b>Figura 7.44.</b> Seção de resistividade real no plano XY para as profundidades de Z=2,5 (superior) e Z=3,0m (inferior) – interface do programa Voxler (GOLDEN SOFTWARE, 2012).....	138
<b>Figura 7.45.</b> Seções 2D das três linhas do SCGR-II (linhas 1,2 e3 de baixo para cima), interligadas através de curvas de isovalores de resistividade condutivas (superior) e resistivas (inferior) – interface do programa Voxler (GOLDEN SOFTWARE, 2012).....	140

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 3.1.</b> Coordenadas e divisão dos horizontes pedológicos das valas do SCGR-II.....	21
<b>Tabela 6.1.</b> Valores de resistividade utilizados para a modelagem de dados, de acordo com a porção de solo considerada.....	61
<b>Tabela 6.2.</b> Valores de resistividade utilizados para a modelagem de dados, de acordo com a composição química dos alvos enterrados (BRAGA, 2006; BROOMFIELD, J. 2002; CHAVERINI, V. 1977; MOULSON, A.J. 2003).....	62
<b>Tabela 8.1.</b> Cronograma de atividades do atual projeto.....	86

## Sumário

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. Caracterização Geológica .....	3
2.1.1. Geologia Regional .....	3
2.1.2. Geologia Local .....	5
2.2. Geofísica.....	6
2.2.1. Resistividade Elétrica.....	6
2.2.2. A Resistividade Capacitiva – Histórico Recente .....	9
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – O SÍTIO CONTROLADO DE GEOFÍSICA RASA II .....	11
3.1. Localização do SCGR-II .....	11
3.2. Construção do SCGR-II.....	11
3.3. Caracterização Pedológica do SCGR-II .....	20
4. METODOLOGIA .....	24
4.1. Método da Eletrorresistividade de Prospecção Geofísica .....	24
4.1.1. Técnicas de Aquisição de Dados Utilizando-se o Método da Eletrorresistividade. ....	28
4.2. Método da Eletrorresistividade Capacitiva .....	32
4.2.1. Considerações Gerais .....	32
4.2.2. O Regime Quasi-Estático e a Condição de Baixo Número de Indução.....	35
4.3. O OhmMapper .....	37
4.3.1. O Cabo Capacitivo e o Cálculo do Fator Geométrico – K .....	39
4.3.2. Conceito de Equivalência com o Método Convencional.....	40
4.3.3. Profundidade de Investigação .....	42
4.3.4. O Conceito de <i>Skin Depth</i> no OhmMapper .....	42
4.3.5. Distância Aceitável Entre o Cabo Coaxial e o Solo .....	44
5. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS.....	45

5.1. Técnicas de Aquisição de Dados do OhmMapper .....	45
5.2. Espaçamentos de Corda Utilizados.....	47
5.3. Campanhas de Aquisição e Linhas de Campo Utilizadas .....	48
5.4. Tratamento dos Dados de Campo.....	55
5.5. Inversão de Dados.....	58
5.6. Análise 3D dos Dados de Campo.....	60
6. MODELAGEM .....	61
6.1. Aplicações da Modelagem.....	61
6.2. Simulações com o Programa ResIX IP2Di .....	61
6.2.1 Valores de Resistividade Utilizados para a Modelagem de Dados no ResIXIP2Di. .....	63
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	65
7.1. Definição da Melhor Técnica de Aquisição de Dados .....	65
7.2. Perfis de <i>Background</i> do SCGR-II.....	71
7.3. Modelagem de Dados.....	75
7.3.1. Análise dos Perfis de Resistividade Sintéticos – Linha 1 .....	76
7.3.2. Análise dos Perfis de Resistividade Sintéticos – Linha 2 .....	80
7.3.3. Análise dos Perfis de Resistividade Sintéticos – Linha 3 .....	85
7.4. Dados de Campo.....	88
7.4.1. Análise dos Perfis de Resistividade – Linha 1 .....	89
7.4.2. Análise dos Perfis de Resistividade – Linha 2.....	105
7.4.3. Análise dos Perfis de Resistividade – Linha 3.....	121
7.4.4. Análise 3D dos Perfis de Resistividade do SCGR-II.....	134
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	141
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	145



## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A geofísica aplicada pode ser definida como a utilização de parâmetros físicos dos materiais terrestres para o estudo de alvos geológicos de interesse em subsuperfície, como minérios, petróleo e água, entre outros. O emprego da geofísica é possível devido ao fato de que propriedades físicas dos materiais como densidade, velocidade de propagação de onda e condutividade elétrica variam amplamente em função da mineralogia, grau de alteração, teor de umidade, fraturamento, porosidade e outros fatores. Dessa forma, pode-se procurar por determinado material indiretamente, através do conhecimento da resposta de um desses parâmetros físicos para o material em questão.

Esse ramo das geociências foi desenvolvido, a princípio, para auxiliar a prospecção de minérios. No entanto, a natureza não invasiva dos métodos geofísicos (não afeta o meio), aliada ao baixo custo operacional, rapidez e facilidade de aplicação dos ensaios, torna-os uma excelente ferramenta para ser aplicada em estudos ambientais e de geologia de engenharia e, mais recentemente, em estudos arqueológicos e detecção de interferências no subsolo. Nesse último caso, têm-se destacado os métodos de *Ground Penetrating Radar* (GPR) e Eletrorresistividade.

Com o intuito de fomentar a pesquisa científica sobre o desenvolvimento de novas técnicas de eletrorresistividade, a Companhia de Gás de São Paulo (COMGAS) em parceria com o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP) adquiriu o equipamento “OhmMapper” – comercializado pela “Geometrics Incorporation”. Esta parceria possibilitou o planejamento e desenvolvimento deste projeto e tem como objetivo maior, possibilitar e aplicar o uso da metodologia de resistividade capacitiva, no qual tem como base os conceitos da eletrorresistividade, na identificação de anomalias resistivas rasas em áreas pavimentadas.

Utilizando-se dos princípios da eletrorresistividade e a partir da metodologia de resistividade capacitiva, no qual não exige contato galvânico entre o solo e os eletrodos, o projeto teve como finalidade identificar materiais com diferentes propriedades físicas e enterrados a até dois metros e meio de profundidade, localizados no SCGR-II. O desenvolvimento deste trabalho irá colaborar para o uso de uma nova técnica de investigação geofísica em regiões altamente urbanizadas, onde o terreno se encontra fortemente impermeabilizado, o que impossibilita o emprego das técnicas eletrorresistivas tradicionais.

O principal objetivo deste trabalho foi determinar as vantagens e limitações do método geofísico de resistividade capacitiva na identificação de materiais enterrados de diferentes tamanhos e propriedades físicas e em diversas profundidades, localizados no SCGR-II. A aplicação da metodologia capacitiva em estudos de resistividade do solo tem caráter inédito na pesquisa científica brasileira, apresentando-se como uma importante alternativa no estudo da resistividade em áreas impermeabilizadas, constantemente encontradas em regiões urbanizadas. Portanto, o desenvolvimento da metodologia capacitiva no atual trabalho irá auxiliar na identificação de estruturas subterrâneas presentes principalmente em regiões com impermeabilização.

Para a realização dos trabalhos de campo propostos, será utilizado o equipamento de resistividade capacitiva "OhmMapper", fornecido pela "Geometrics Incorporation". De posse do conjunto de dados de campo será feita a interpretação integrada dos dados, com posterior análise das vantagens e limitações deste método geofísico na detecção dos alvos. A caracterização da área de estudos e da metodologia a ser utilizada será exposta nos itens a seguir.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Caracterização Geológica

#### 2.1.1. Geologia Regional

A cidade de São Paulo possui duas unidades geológicas distintas, caracterizando-se pela presença de rochas cristalinas do embasamento pré-cambriano, sobrepostas por sedimentos paleógenos da Bacia Sedimentar de São Paulo.

A Bacia Sedimentar de São Paulo está inserida no contexto geológico do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), gerada a partir da abertura do Atlântico, juntamente com outros nove embaciamentos orientados na direção ENE entre as cidades de Curitiba-PR e Barra de São João-RJ (RICCOMINI & COIMBRA, 1992). A Bacia de São Paulo exibe forma irregular, aproximadamente elíptica, com uma área total de aproximadamente 1452 km<sup>2</sup> e espessura máxima de 290 metros (ROCHA et al., 1989). O embasamento do RCSB tem como principal composição, rochas metamórficas, migmatíticas e granitóides, associando-se ao Cinturão Ribeira (RICCOMINI & COIMBRA, 1992).

O embasamento pré-cambriano da Bacia de São Paulo é formado pelas seguintes unidades litoestratigráficas:

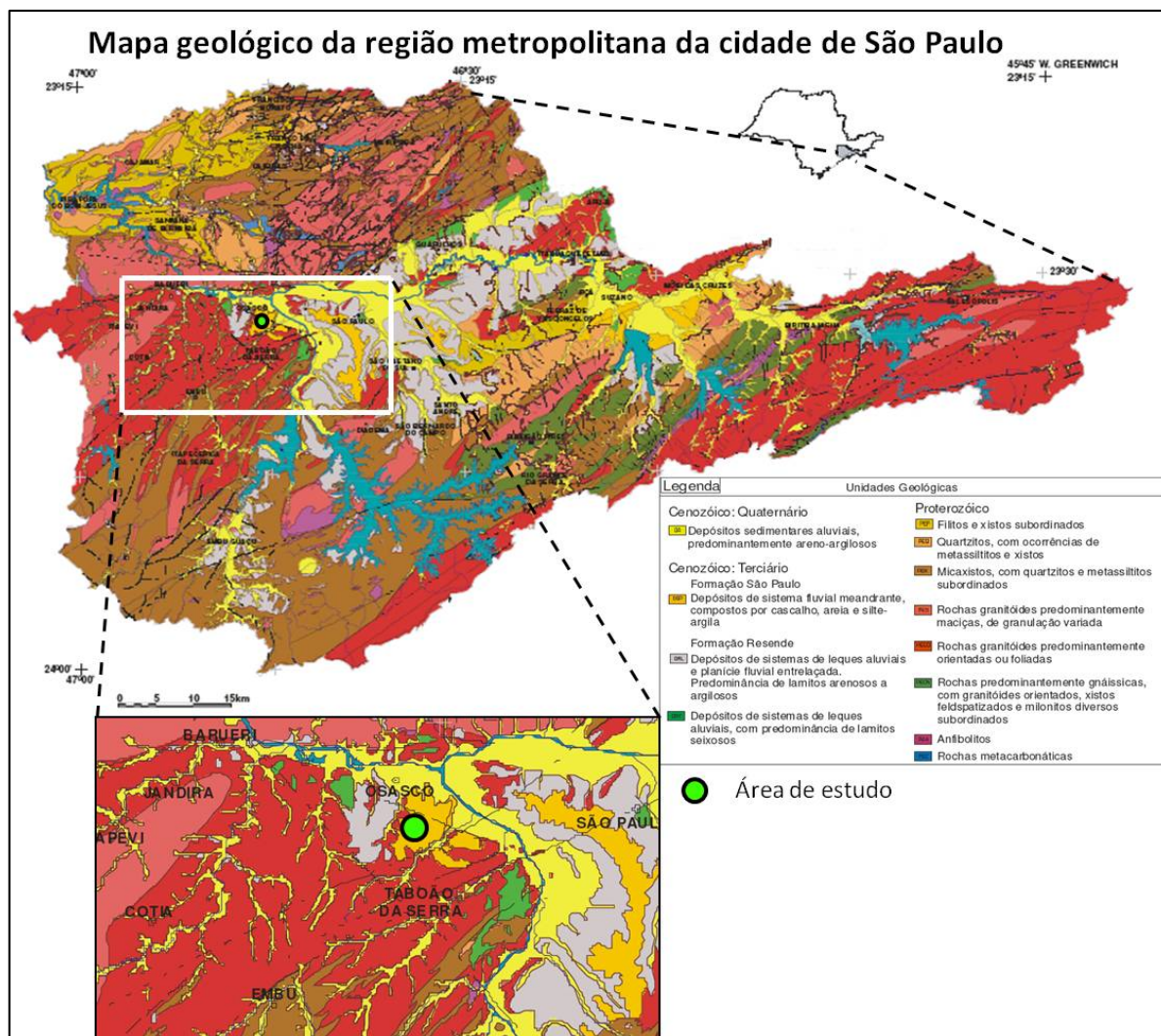
- a) Complexo Paraíba do Sul: Embasamento de composição gnáissica-migmatítica resultante de alto grau de metamorfismo e datado do Proterozóico Superior (JULIANI, 1992);
- b) Complexo Embu: Composto por xistos, filitos, migmatitos, gnaisses migmatizados, corpos lenticulares de quartzitos, anfibolitos e rochas calciossilicáticas (RODRIGUEZ & TAKIYA, 2004). Segundo JULIANI (1992) são metassedimentos provenientes de uma cobertura terrígena plataformar do Proterozóico Superior, com médio grau de metamorfismo e, por vezes, migmatizadas.
- c) Grupos São Roque e Serra de Itaberaba: São representados por rochas metavulcânicas e metassedimentares, com ocorrência de filitos, metarenitos e quartzitos, tendo como ocorrência secundária anfibolitos, metacalcários, dolomitos, xistos porfirobláticos e rochas calciossilicatadas (RODRIGUEZ & TAKIYA, 2004). São rochas datadas do proterozóico médio (TASSINARI et al., 1998).
- d) Suítes Graníticas: Rochas com composição variada entre tonalito e granito, com ocorrência de *augen* gnaisses em algumas localidades da bacia (JULIANI, 1992).

Segundo JANASI & ULBRICH (1991) são rochas intrusivas ocorrentes por todo o RCSB e de idade neoproterozóica.

Os depósitos sedimentares da Bacia de São Paulo são representados por sedimentos essencialmente argilosos e arenosos de sistema fluvial e de leques aluviais, podendo ser registradas algumas ocorrências de sedimentos pelíticos lacustres (RICCOMINI & COIMBRA, 1992). Pertencem à sequência basal da bacia as formações Resende, Tremembé e São Paulo, as quais compõem o Grupo Taubaté. Este Grupo é recoberto discordantemente pela Formação Itaquaquetuba (RICCOMINI & COIMBRA, 1992). A seguir são descritas as formações supracitadas, da base para o topo:

- a)** Formação Resende: arenitos, conglomerados, diamictitos e lamitos associados à planície aluvial e rios entrelaçados. Nos arredores dessa bacia podem ser encontrados diques e soleiras. É atribuída à Formação Resende a idade oligocênica (RICCOMINI, 1989);
- b)** Formação Tremembé: é composta predominantemente por argilitos, folhelhos, margas e calcários dolomíticos associados à sedimentação lacustre. Os sedimentos desta Formação são de idade oligocênica (RICCOMINI, 1989);
- c)** Formação São Paulo: arenitos conglomeráticos, arenitos, siltitos e argilitos, apresenta carapaças ferruginosas, sustentando altas colinas. A Formação São Paulo tem como ambiente de sedimentação sistemas fluviais meandantes e seus sedimentos são de idade oligocênica (RICCOMINI, 1989; RICCOMINI & COIMBRA, 1992)
- d)** Formação Itaquaquetuba: É composta por arenitos grossos arcoseanos, com ocorrência subordinada de lamitos e brechas. Como característica única que a diferencia das demais unidades geológicas da Bacia de São Paulo, esta Formação se encontra “alojada” às formações vizinhas através de contatos erosivos e tectônicos (RICCOMINI & COIMBRA, 1992). Foi constituída em ambiente de sedimentação fluvial entrelaçado e sua idade é de difícil interpretação devido às relações discordantes com as camadas superior e inferior que apresenta (RODRIGUEZ & TAKIYA, 2004).

As coberturas quaternárias estão associadas a sistemas aluvionares nas planícies e a sistemas coluvionares nas regiões de encosta. As coberturas quaternárias são compostas por linhas de seixos, horizontes argilo-arenosos, conglomerados e areias médias com estratificações cruzadas de pequeno porte (RICCOMINI, 1992).



**Figura 2.1.** Mapa geológico da cidade de São Paulo, com indicação visual da área de estudo. Escala: 1:100.000 (adaptado de LIG-IGc-USP, 1998).

### 2.1.2. Geologia Local

A área de estudos do SCGR-II está situada na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo em uma localidade onde se afloram as Formações Resende e São Paulo, sobrejacentes ao embasamento cristalino da bacia. Dados diretos de poços instalados nas proximidades da área mostram que a espessura de sedimento no local não ultrapassa os 53m (PORSANI et al., 2004). A caracterização granulométrica dos pacotes de solo encontrados e descritos durante a instalação dos alvos do SCGR-II será apresentada e discutida com maior detalhe no item 3.3 desta dissertação.

## 2.2. Geofísica

### 2.2.1. Resistividade Elétrica

Os princípios físicos da resistividade elétrica começaram a ser aplicados em estudos de prospecção mineral no início do século XX, com destaque para os trabalhos de Conrad Schlumberger, da “escola francesa”, e de Frank Wenner, da “escola americana”, que introduziram o arranjo de quatro eletrodos para medições de resistividade em subsuperfície.

Os métodos geoeletricos englobam os métodos elétricos e também os métodos eletromagnéticos e caracterizam-se pela medição em superfície livre da resposta do substrato geológico às excitações de campos elétricos e magnéticos naturais ou induzidos (WARD, 1990).

De acordo com TELFORD et al. (1990), a propriedade física de resistividade de um material é o inverso da condutividade elétrica do mesmo e é definida como a resistência que um determinado material tem em conduzir corrente elétrica, podendo ser atrelado à área e comprimento unitários de um cilindro condutor e homogêneo (**Figura 2.2**) e também às propriedades físicas de um determinado material. Esta relação é observada na **Equação 2.1**.

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} \quad (2.1)$$

onde

$\rho$  = resistividade elétrica (ohm.m)

$R$  = resistência elétrica (ohm)

$S$  = área da seção transversal do cilindro (m<sup>2</sup>)

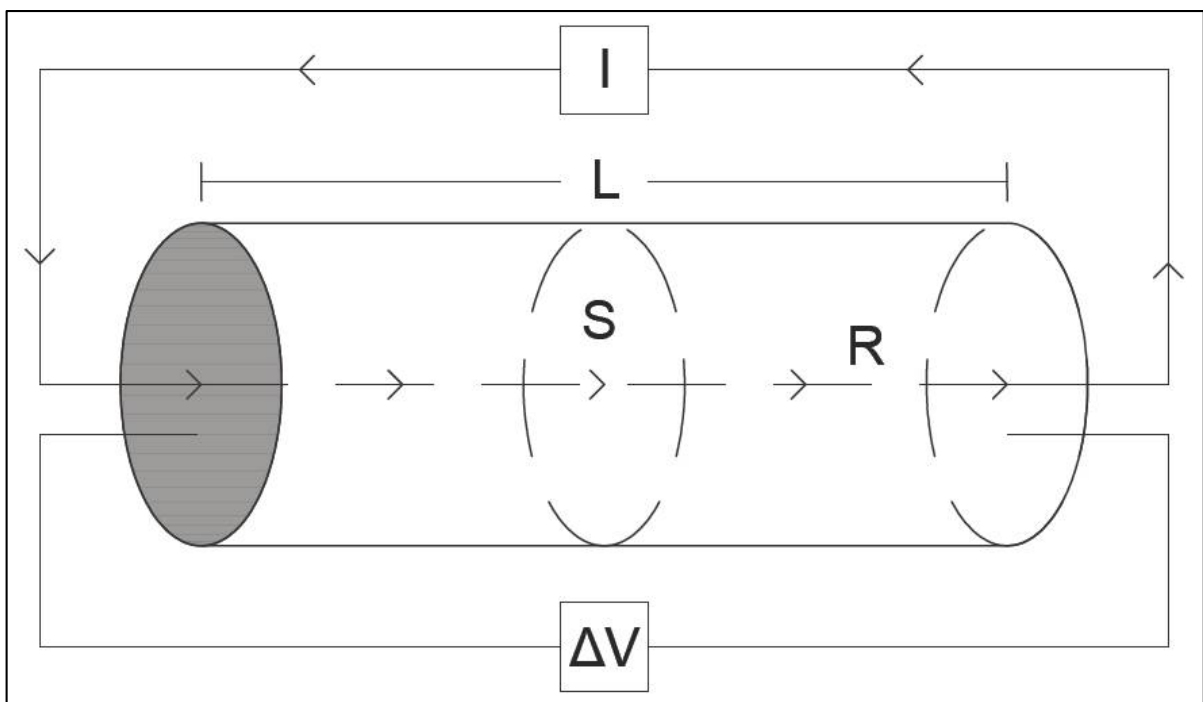
$L$  = comprimento do cilindro (m)

De acordo com a primeira lei de ohm, um cilindro atravessado por uma corrente elétrica “ $I$ ” será submetido a uma diferença de potencial “ $\Delta V$ ” e sua resistência será:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \text{ (ohm)} \quad (2.2)$$

e a equação 2.1 pode ser escrita como:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{S}{L} \text{ (ohm.m)} \quad (2.3)$$



**Figura 2.2** – Cilindro condutor homogêneo e a representação dos parâmetros utilizados na definição de resistividade elétrica (adaptado de TELFORD et al., 1990).

A corrente elétrica pode se propagar em um material geológico (solo e rochas) através da condução eletrônica e da condução eletrolítica (TELFORD ET. AL, 1990). A condução eletrônica ocorre através de materiais geológicos que possuam elétrons livres, como é o caso de minerais metálicos ou de sulfetos metálicos. A condução iônica ou eletrolítica é aquela onde a condução elétrica ocorre através de uma solução iônica, como entre os poros preenchidos com água de uma rocha ou solo.

Em geral, a condução elétrica em materiais geológicos é predominantemente eletrolítica, uma vez que a condução iônica exige grande quantidade de íons livres em subsuperfície, no que implicaria em grandes volumes de minerais metálicos e sulfetos

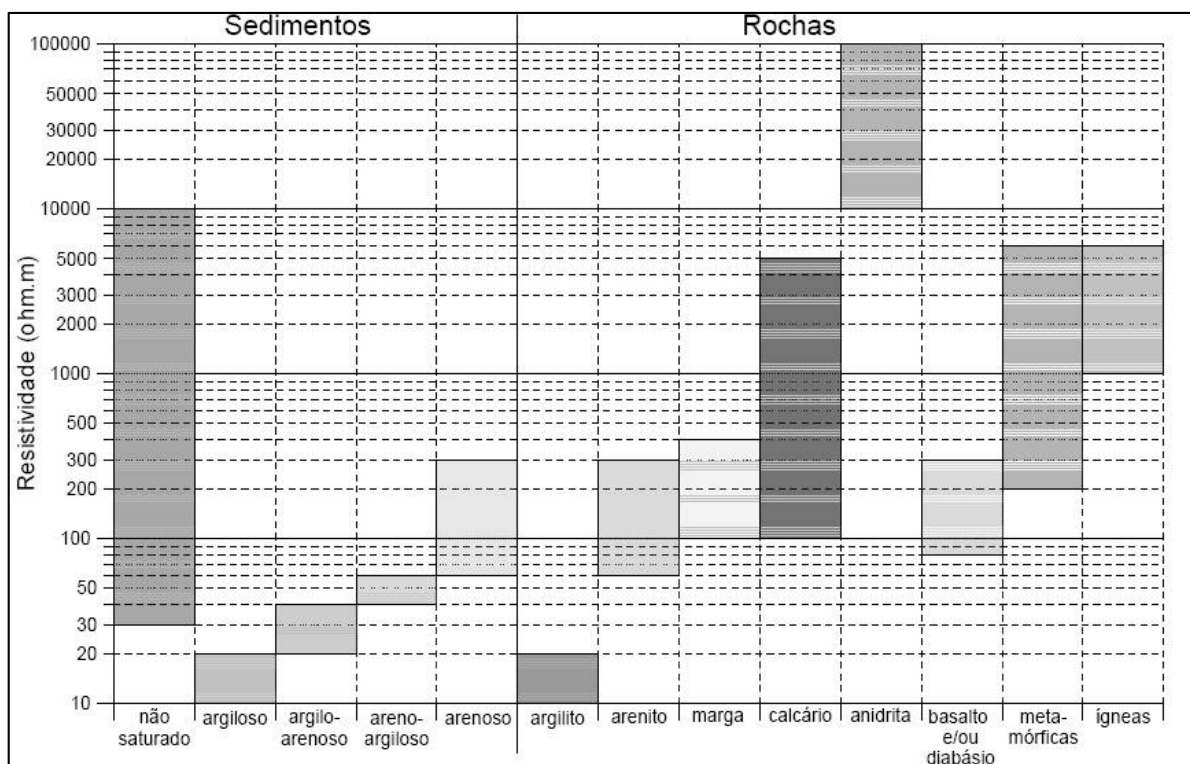
metálicos. A resistividade dos solos e rochas que possuem condutividade eletrônica depende diretamente dos seguintes fatores:

- a) Porosidade: Solos arenosos apresentam menos poros e, conseqüentemente, menor teor de água do que solos argilosos. Portanto, solos e rochas mais porosas apresentam, geralmente menor resistividade elétrica.
- b) Teor em água: A zona insaturada de um pacote rochoso, com os poros preenchidos com ar e água, irá apresentar maior resistividade em relação à rochas e solos presentes na zona saturada, onde todos os poros interconectados são preenchidos com água e, conseqüentemente, apresentam maior potencial de condução eletrolítica.
- c) Quantidade e natureza dos sais dissolvidos: Quanto maior o teor de sais dissolvidos em solução, maior será o potencial de condução eletrolítica e, portanto, menor será a resistividade.

O teor em água e quantidade de sais dissolvidos são os principais fatores para a alteração da resistividade em subsuperfície (ELIS, 1999).

Devido aos aspectos citados (itens de “a” a “c”), o subsolo investigado poderá apresentar grande variação em seus valores de resistividade, possibilitando uma boa resposta deste método em diversos tipos de materiais geológicos e em variáveis níveis de saturação dos poros em solos e rochas. A **Figura 2.3** sumariza os valores de resistividade dos principais tipos de sedimentos e rochas encontradas em subsuperfície.





**Figura 2.3** - Valores de resistividade elétrica de referência para os principais tipos de sedimentos e rochas (BRAGA, 2006).

### 2.2.2. A Resistividade Capacitiva – Histórico Recente

A utilização dos conceitos de resistividade capacitiva para a medição da resistividade aparente é originária da década de 1970 por pesquisadores russos, que construíram cabos capacitivos com o intuito de se utilizar na pesquisa elétrica e eletromagnética voltada à geotecnia (TIMOFEEV, 1973). A partir de então, vários equipamentos protótipos foram utilizados pela União Soviética para o estudo de áreas congeladas, como em pergelissolos (*permafrost*).

Na década de 1980 a tecnologia de equipamentos com operação capacitiva, voltada a estudos geofísicos, começou a ser utilizada por pesquisadores canadenses e norte-americanos, no qual foi aplicada em diferentes estudos geofísicos.

Na década de 1990, GRARD AND TABBAGH (1991) adaptaram o conceito de quadripolo, muito utilizado no caminhamento elétrico convencional, para equipamentos que operam com cabos capacitivos e realizam medições de resistividade aparente sem o contato galvânico de eletrodos. A partir de então, muitos equipamentos capacitivos foram desenvolvidos no Canadá, EUA, Rússia, Inglaterra entre outros, o que possibilitou a utilização da resistividade capacitiva para diversas finalidades dentro da geofísica e da geologia. Dentre os diversos estudos com aplicações de diferentes técnicas geofísicas utilizando-se a resistividade capacitiva, alguns merecem maior destaque no cenário

internacional. Em 2002, WALKER J. P. & HOUSER P. R. publicaram um estudo no qual o teor de umidade do solo pode ser correlacionável com a variação de resistividade elétrica e, com o uso do equipamento capacitivo OhmMapper, determinaram boa correlação entre a umidade e a resistividade aparente do solo em baixas profundidades. Devido à resposta obtida, os autores afirmam ser uma boa ferramenta para a investigação da composição do solo em níveis mais rasos.

YAMASHITA et al. (2004) realizaram um experimento onde foram comparados os perfis de resistividade do OhmMapper com um equipamento convencional em uma mesma localidade. Os resultados demonstraram uma grande equivalência entre os dois equipamentos, demonstrando a similaridade teórica entre a metodologia de caminhamento elétrico convencional – com contato galvânico de eletrodos – e a de caminhamento capacitivo. Portanto, o método capacitivo pode substituir o método convencional em estudos de campo, obtendo resultados similares, limitados unicamente pela menor profundidade de investigação.

Em 2006, KURAS et al. realizaram um extenso estudo sobre a resistividade capacitiva, evidenciando suas particularidades e suas semelhanças com o método convencional. Esta publicação passou a ser obrigatória para o entendimento do método capacitivo e sua aplicação nas geociências.

NEUKUM C. et al. (2009) utilizaram a resistividade capacitiva para o mapeamento cárstico na Alemanha. O estudo evidenciou a eficiência do equipamento OhmMapper no mapeamento de grandes cavidades e região cárstica.

Em Hong Kong, NIU Q. et al. (2014) demonstraram boa aplicabilidade do OhmMapper em estudos na zona aerada do solo – zona insaturada – no qual é possível a percepção de leves variações no teor de água entre os poros do solo insaturado através da resistividade aparente medida pelo equipamento.

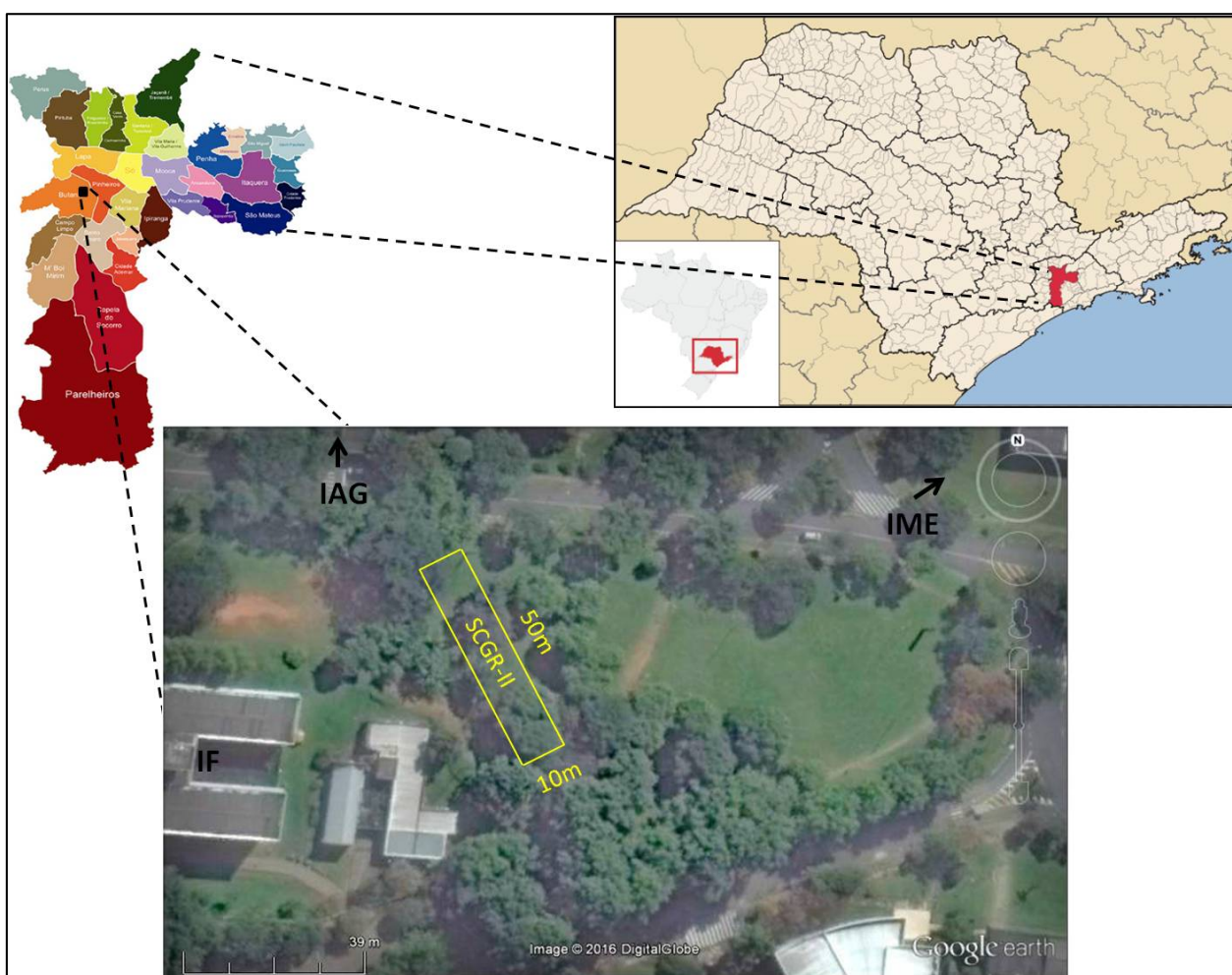
No Canadá, OLDENBORGER G. A. & LEBLANC A. M. (2015) realizaram um estudo de caracterização do *permafrost* no aeroporto internacional de Iqaluit utilizando-se da resistividade capacitiva. Através do uso do equipamento OhmMapper foi possível o mapeamento em subsuperfície da corpo de solo congelado nas dependências do aeroporto, sendo fundamental em locais aonde a cravação de eletrodos não podia ser feita.

Como demonstrado, o uso da resistividade capacitiva para estudos relacionados às geociências já é uma realidade e apresenta bons resultados para diversas aplicações distintas. O uso da resistividade capacitiva para o mapeamento de pequenos alvos enterrados em pequenas profundidades ainda não é difundido no âmbito científico, sendo necessário realizar mais pesquisas sobre a eficácia de equipamentos capacitivos para este tipo de investigação geofísica.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – O SÍTIO CONTROLADO DE GEOFÍSICA RASA II

#### 3.1. Localização do SCGR-II

O Sítio Controlado de Geofísica Rasa II (SCGR-II) do IAG-USP possui área de 500 m<sup>2</sup> (50 m x 10 m) e está localizado à frente do prédio do IAG-USP, Rua do Matão, 1226, Butantã, São Paulo-SP, no campus da USP Armando Salles de Oliveira. A **Figura 3.1** indica as dimensões da área de estudos bem como a sua localização em planta.



**Figura 3.1.** Localização esquemática do SCGR-II no campus Armando Salles de Oliveira da USP.

#### 3.2. Construção do SCGR-II

O solo foi escavado utilizando-se uma retroescavadeira (**Figuras 3.2 e 3.3**) e equipamentos manuais com o intuito de se interferir minimamente nas condições iniciais do

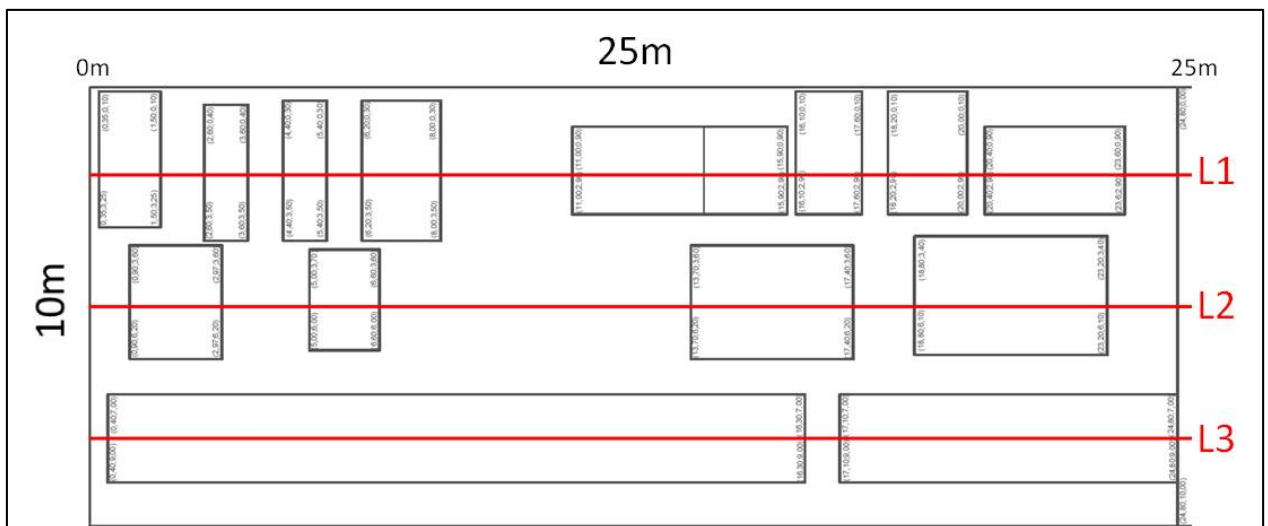
terreno para a instalação dos alvos em subsuperfície. Dessa forma, a retroescavadeira abriu valas apenas nas localidades pré-estabelecidas para o posicionamento dos alvos, garantindo o mínimo possível de alteração das condições naturais do solo. As **Figuras 3.4 e 3.5** apresentam a localização das valas realizadas no SCGR-II para a colocação dos alvos em subsuperfície, onde foram divididas em duas partes para a melhor visualização das mesmas. As delimitações foram aferidas com a utilização de uma trena durante as escavações e estão representadas nas direções X e Y nas figuras mencionadas.



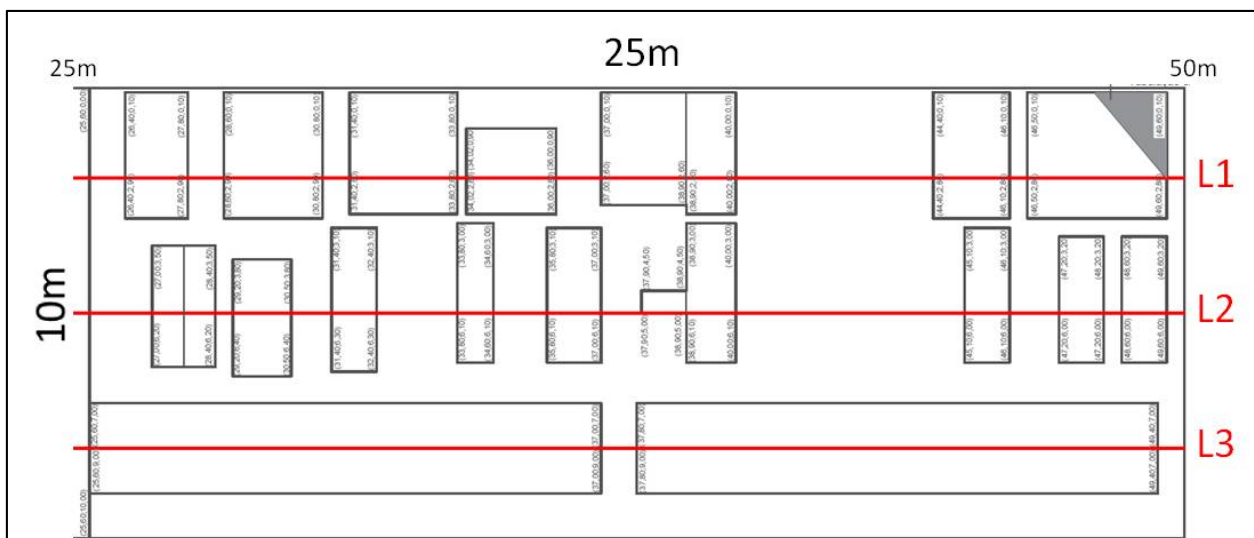
**Figura 3.2.** Retroescavadeira utilizada para a abertura das valas nas linhas 1, 2 e 3 do SCGR-II.



**Figura 3.3.** Retroescavadeira utilizada para a abertura das valas nas linhas 1, 2 e 3 do SCGR-II e aferição das medidas das valas.



**Figura 3.4.** Localização das valas no SCGR-II entre 0 e 25m no eixo Y com marcação das linhas 1, 2 e 3 onde os alvos foram posicionados.



**Figura 3.5.** Localização das valas no SCGR-II entre 25 e 50m no eixo Y, com marcação das linhas 1, 2 e 3 onde os alvos foram posicionados.

Durante as escavações do SCGR-II foram feitas medidas de profundidade das valas (**Figura 3.6**) e do topo dos alvos colocados, através do uso de uma estação total de topografia Leica TPS-300 (**Figura 3.7**). A **Figura 3.8** apresenta o perfil das valas escavadas para cada uma das linhas do SCGR-II.



**Figura 3.6.** Aferição da profundidade das valas escavadas.



**Figura 3.7.** Aferição da profundidade do topo dos alvos posicionados nas linhas utilizando-se a estação total Leica TPS-300.

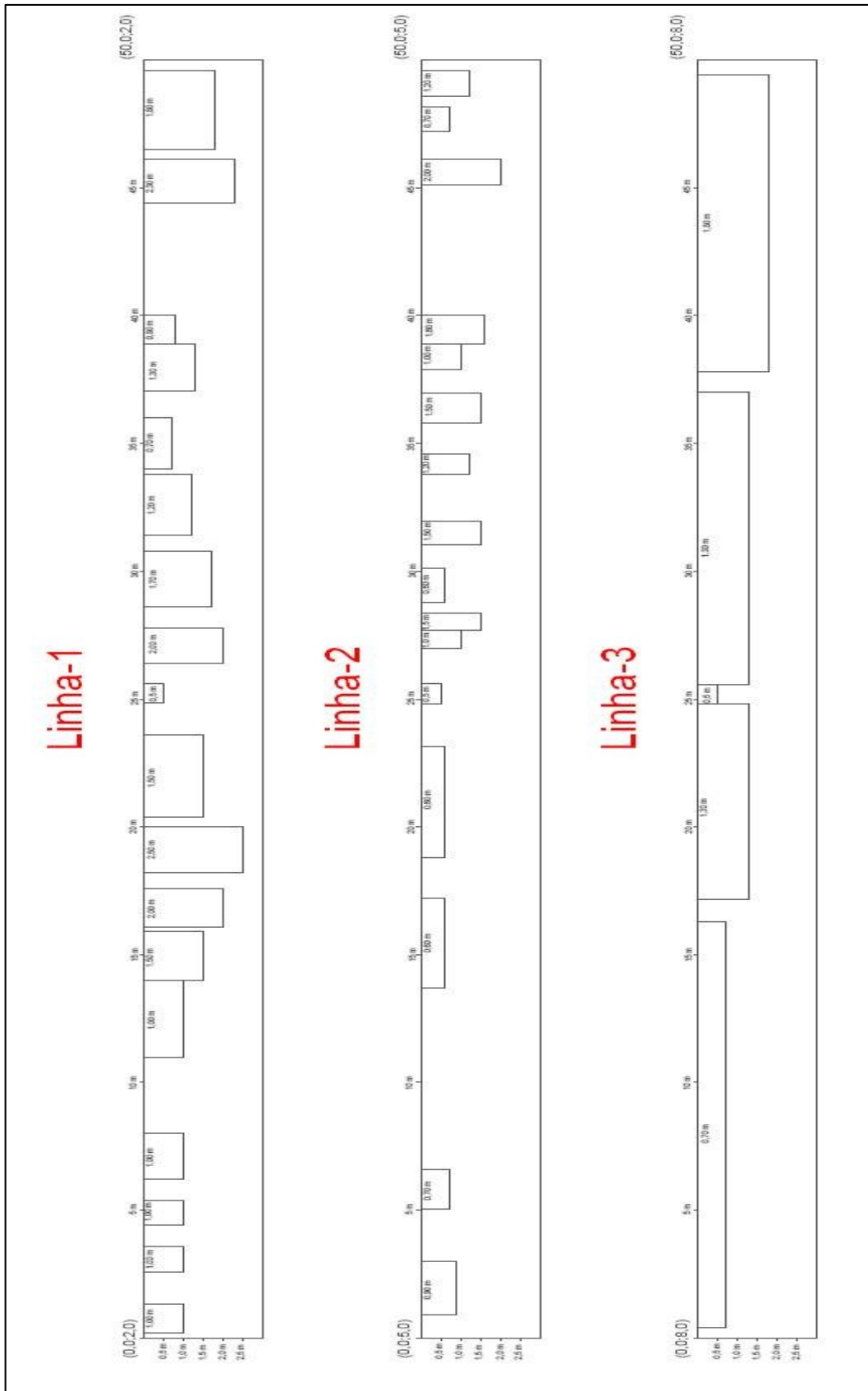
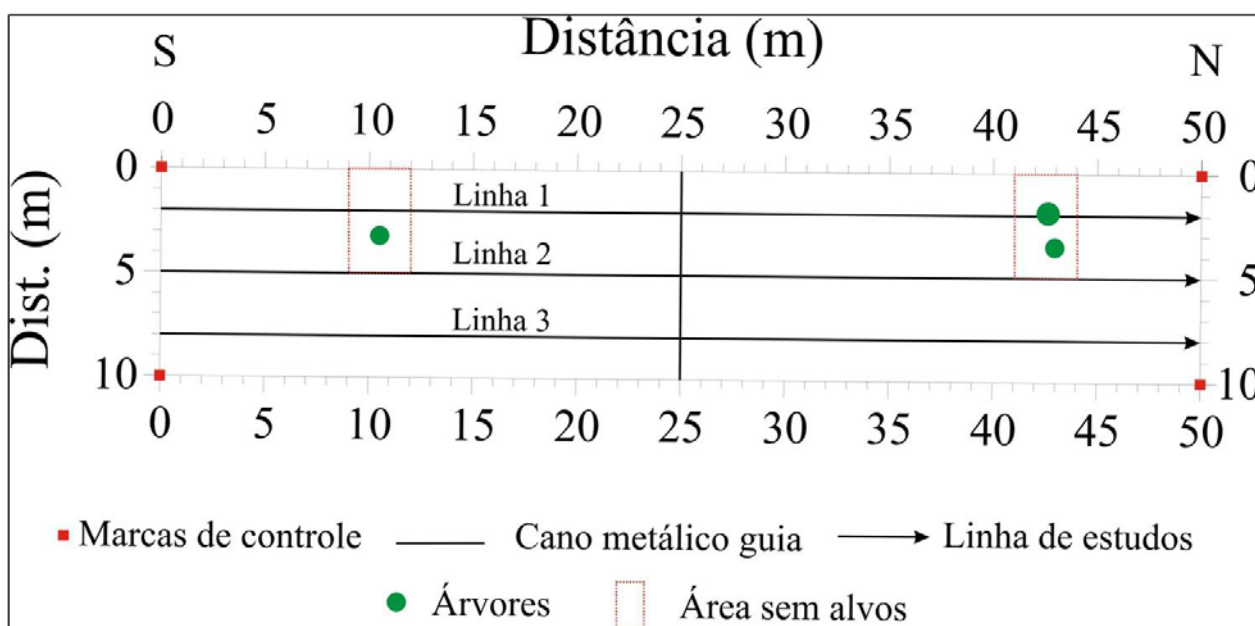


Figura 3.8. Perfil das valas do SCGR-II, produzidos sobre as linhas 1,2 e 3 onde os alvos foram posicionados.

O SCGR-II é dotado de vários alvos com geometrias e propriedades físicas conhecidas, tais como, tubos de PVC, polietileno, PEAD, ferro, cerâmica, conduítes de PVC para passagem de cabos de fibra ótica, cabos elétricos, tubulações de concreto, dentre outros, em diferentes profundidades, implementados em três linhas de estudos abrangendo os alvos de interesse da COMGÁS. A **Figura 3.9** mostra o mapa base do SCGR-II do IAG/USP com as marcas de controle nos vértices, as três linhas de estudos e o cano metálico-guia.



**Figura 3.9.** Mapa base do SCGR-II do IAG/USP mostrando as marcas de controle, a disposição das três linhas de estudos e o cano metálico guia na posição de 25 m (direção E-W) (PORSANI, 2015).

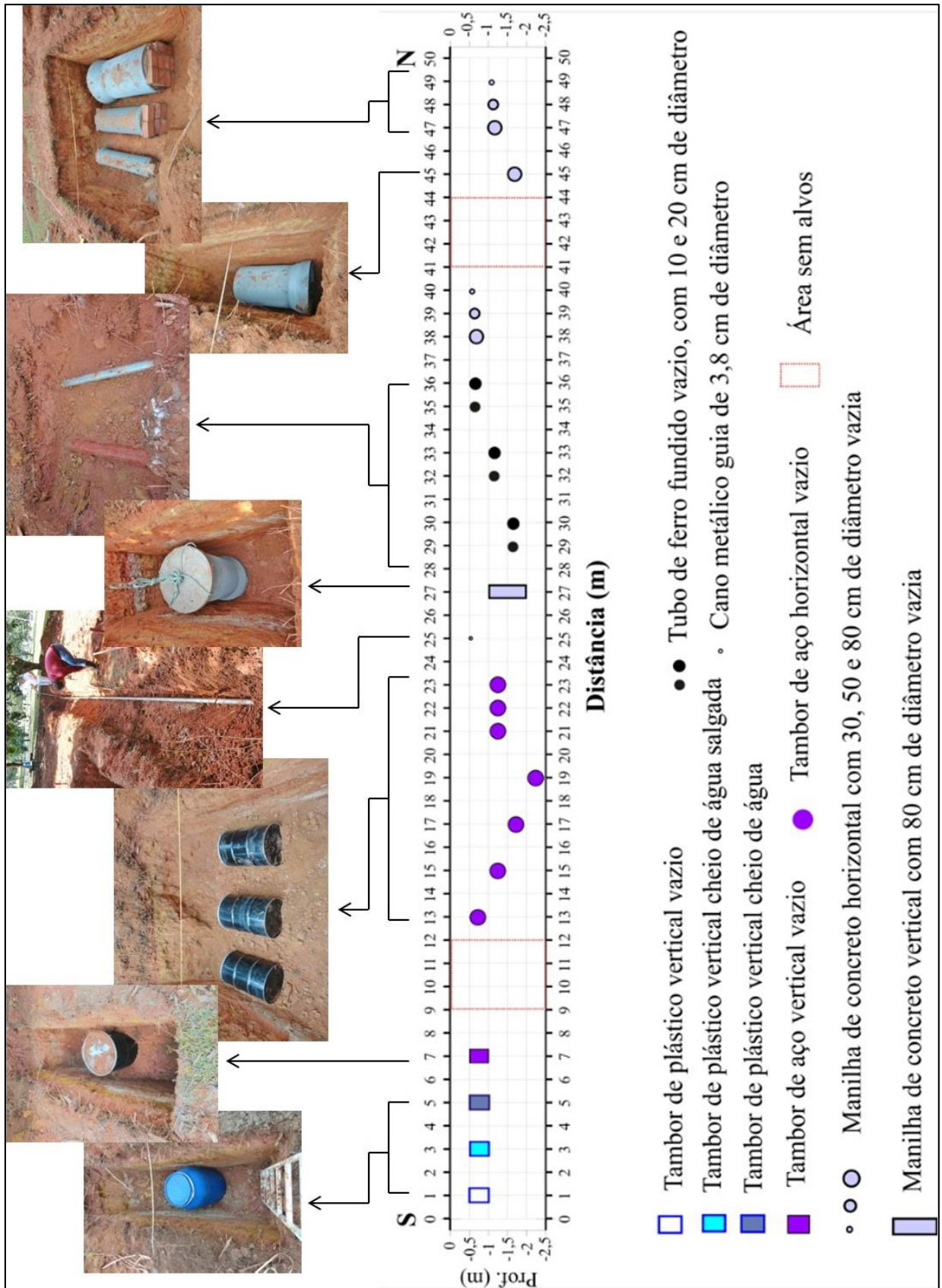
A **Figura 3.10** mostra os alvos da Linha 1 caracterizados por tambores de plástico de 100 litros (vazios, cheios de água de torneira e cheios de água salgada), tambores de aço (vazios) de 200 litros, manilhas de concreto com 26, 48 e 80 cm de diâmetro e tubos de ferro fundido.

A **Figura 3.11** mostra os alvos instalados na Linha 2, representados por caixas de areia, visando estudos de mudança de litologia e vazamento de água, muro de tijolos, que simulam restos de construções enterrados, conduítes de PVC para passagem de cabos de fibra ótica e de telefonia, cabos elétricos posicionados em diferentes profundidades, caixa com brita de granito, bem como alvos que simulam estudos arqueológicos, geológicos e de planejamento urbano como vasos de cerâmica, seixos de quartzo, caixa com materiais cerâmicos, chapas de alumínio e tubos de PEAD.

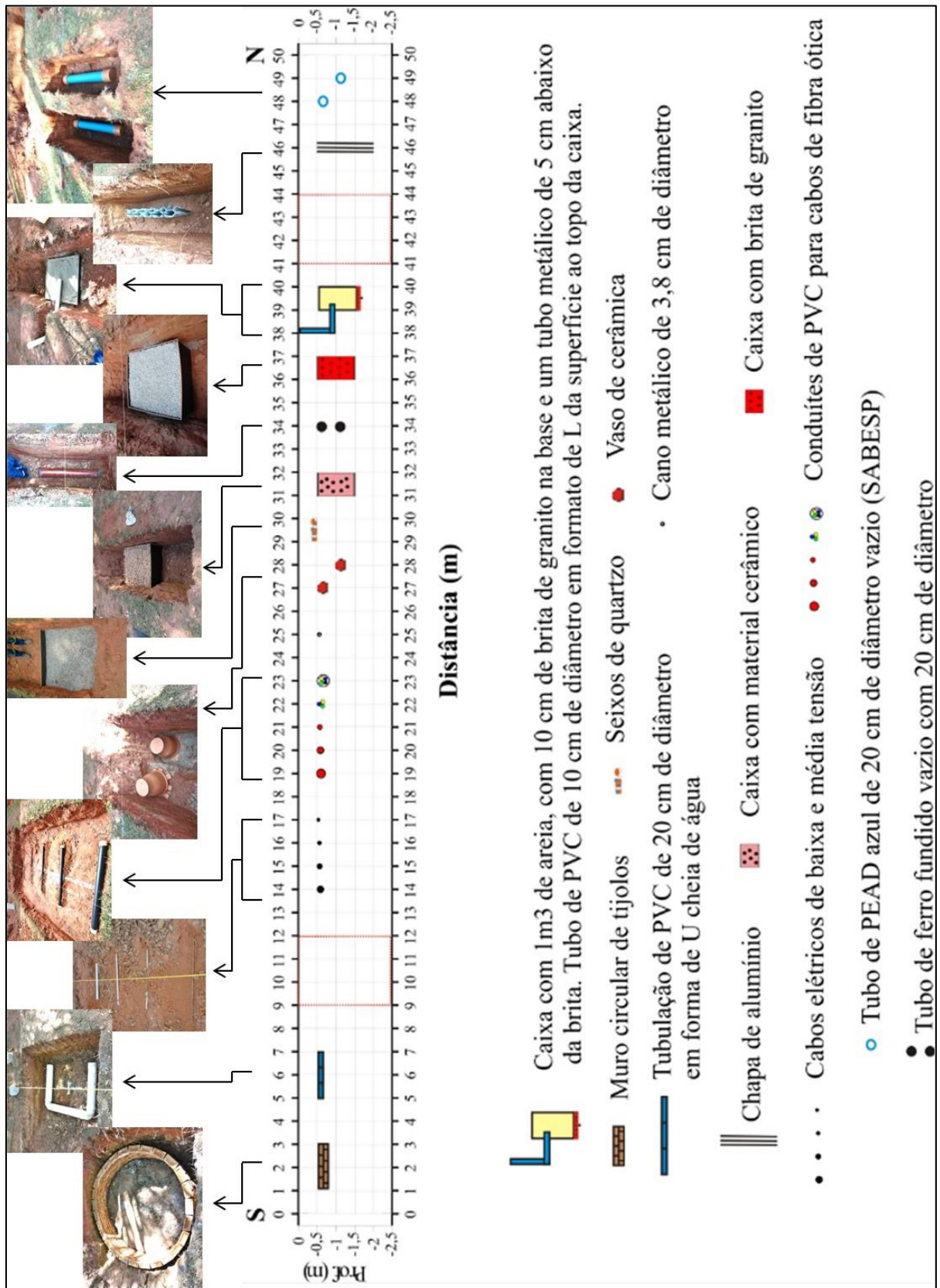
A **Figura 3.12** mostra a Linha 3, caracterizada pelas principais redes de infraestrutura, representadas por tubos de PVC, polietileno, PEAD, ferro, cerâmica e conduítes de PVC. As tubulações e os diferentes materiais utilizados na Linha 3 representam 90% dos ramais e redes de gás, abastecimento de água e de coleta de esgotos presentes em construções urbanas atualmente. Esta linha de estudos foi elaborada em conjunto com os engenheiros e técnicos da COMGÁS com o intuito de se adequar o projeto atual às necessidades diárias do mercado.

Os materiais escolhidos para a composição das linhas 1, 2 e 3 foram posicionados em diferentes profundidades e orientações para que se determine a acurácia do equipamento utilizado nas medições de resistividade de acordo com o tipo de material, profundidade e orientação no espaço.

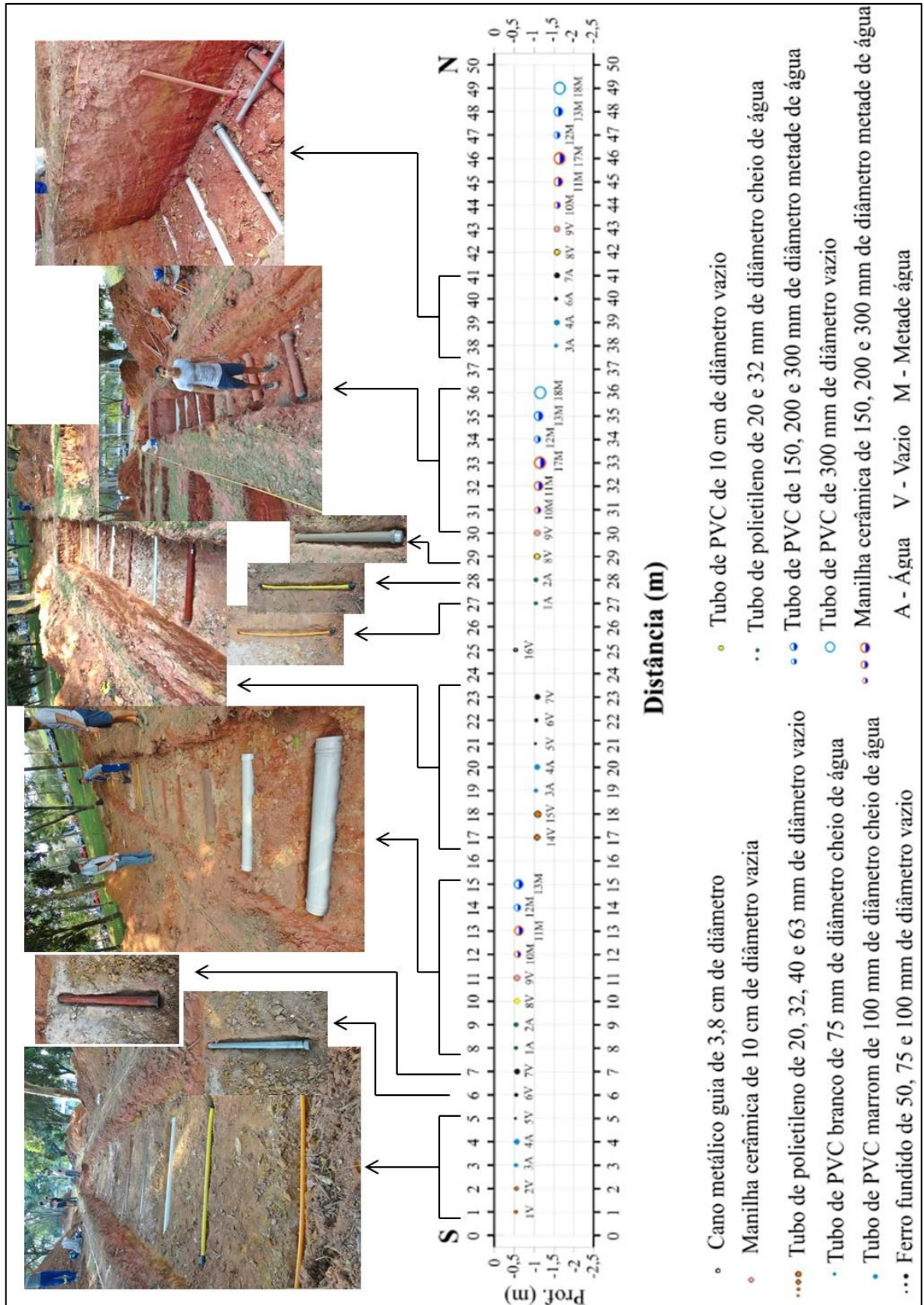




**Figura 3.10.** Linha 1 do SCGR-II com a imagem dos alvos enterrados e croqui esquemático indicando a localização dos mesmos (adaptado de PORSANI, 2015).



**Figura 3.11.** Linha 2 do SCGR-II com a imagem dos alvos enterrados e croqui esquemático indicando a localização dos mesmos (adaptado de PORSANI, 2015).



**Figura 3.12.** Linha 3 do SCGR-II com a imagem dos alvos enterrados e croqui esquemático indicando a localização dos mesmos (adaptado de PORSANI, 2015).

Os diferentes alvos foram dispostos na profundidade pré-estabelecida e adequadamente aterrados com solo compactado (segundo norma da concessionária envolvida, exemplo CPR12 da PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo), visando simular ao máximo as condições naturais encontradas no solo. Para possibilitar a detecção, os segmentos de tubo apresentavam em média 2 m de comprimento.

### **3.3. Caracterização Pedológica do SCGR-II**

Utilizando-se de dados diretos provenientes da escavação do SCGR-II, constata-se a presença de cobertura superficial antrópica (aterro), com espessura entre 0,8 e 1,1m nas linhas escavadas. De acordo com as características observadas visualmente e taticamente nas covas do SCGR-II foi realizada uma descrição pedológica, representativa de toda a área de estudos.

A descrição pedológica do SCGR-II foi realizada com base na observação visual e tátil de alguns pontos escavados, localizados pelas coordenadas da **Tabela 3.1**. A referida tabela também sintetiza as informações referentes às espessuras de cada horizonte identificado. De acordo com as características observadas, definiu-se a ocorrência de três horizontes pedológicos distintos (O, A e B) e bem definidos, com a utilização dos critérios de descrição e separação de horizontes pedológicos definidos por LEPSCH (2002).

O horizonte O apresenta coloração marrom escura a marrom acinzentado; a coloração observada pode ser atribuída a presença de matéria orgânica decomposta (húmus); apresenta espessuras entre 0,15 e 0,17m ao longo dos pontos observados; a transição deste horizonte para o subsequente é gradual e rápida.

O horizonte A, presente em todos os pontos, apresenta porções amareladas, devido a predominância de minerais oxi-hidróxidos de Ferro, intercalando-se com porções avermelhadas, devido a predominância de minerais ricos em óxidos de Ferro; pode-se associar este horizonte à camada de material antrópico presente (aterro), pois são encontrados frequentemente materiais alóctones (pequenos fragmentos de construção civil - brita) e o solo como um todo apresenta grande heterogeneidade; devido à heterogeneidade observada, o horizonte A apresenta granulometria variada, sendo predominantemente silto-argilosa; nota-se também a ocorrência predominante de microporos na estrutura do solo, comum em ambientes altamente permeáveis e diagnósticos de horizontes espessos como o caso; a consistência do solo em questão é dura para amostras secas, intermediária para amostras umedecidas e pegajosa para amostras encharcadas; a transição para o horizonte B ocorre de maneira abrupta, caracterizada pela grande variação da espessura.

Nos pontos 6 e 8 observou-se uma camada esbranquiçada, de espessura muito variável, descontínua, textura silto-arenosa, consistência solta para amostras secas, friável para amostras umedecidas e pegajosa para amostras encharcadas e não característica do horizonte A.

O horizonte B, presente logo abaixo do horizonte A, apresenta coloração vermelho escuro, devido a ocorrência de minerais ricos em óxidos de Ferro; o solo apresenta alta homogeneidade, sem sendo observados materiais alóctones; o material apresenta granulometria silto-argilosa com grânulos submilimétricos de quartzo; assim como no horizonte acima, predominam-se microporos na estrutura do solo, característicos de granulometria fina e homogênea; o material analisado apresenta consistência dura para amostras secas, intermediária para amostras úmidas e pegajosa com baixa plasticidade para amostras encharcadas. . A **Figura 3.13** apresenta a localização das valas e dos pontos onde foram feitas as descrições do solo, representativas de toda a área de estudo. A mesma figura também apresenta um perfil geológico produzido com base nas descrições observadas.

**Tabela 3.1.** Coordenadas e divisão dos horizontes pedológicos das valas do SCGR-II

Ponto	Y (m)	X (m)	Horizonte O	Horizonte A	Horizonte B
1	6,0	45,6	0-0,15	0,15-1,00	1,00 - 2,00 (base da escavação)
2	7,0	41,5	0-0,15	0,15-1,00	0,85 - 1,80 (base da escavação)
3	7,0	36,0	0-0,15	0,15-0,80	0,80 - 1,30 (base da escavação)
4	2,9	30,0	0-0,15	0,15-1,10	1,10 - 1,70 (base da escavação)
5	6,2	28,0	0-0,16	0,16-1,00	1,00 - 1,50 (base da escavação)
6	2,9	16,8	0-0,15	0,15-1,00	1,00 - 2,00 (base da escavação)
7	6,0	5,8	0-0,17	0,17-0,70	-
8	5,0	0,9	0-0,17	0,17-0,77	0,77 - 0,90 (base da escavação)

A descrição dos horizontes pedológicos, bem como da geologia local como um todo, pode ajudar na interpretação de anomalias de resistividade na escala de trabalho adotada. Graças às observações realizadas e sumarizadas neste item, é possível correlacionar os dados de anomalia de resistividade, presentes antes da instalação dos alvos, com a descrição direta do solo. As **Figuras 3.14 a 3.19** representam os pontos descritos acima, sendo auxiliar na interpretação dos horizontes delimitados.

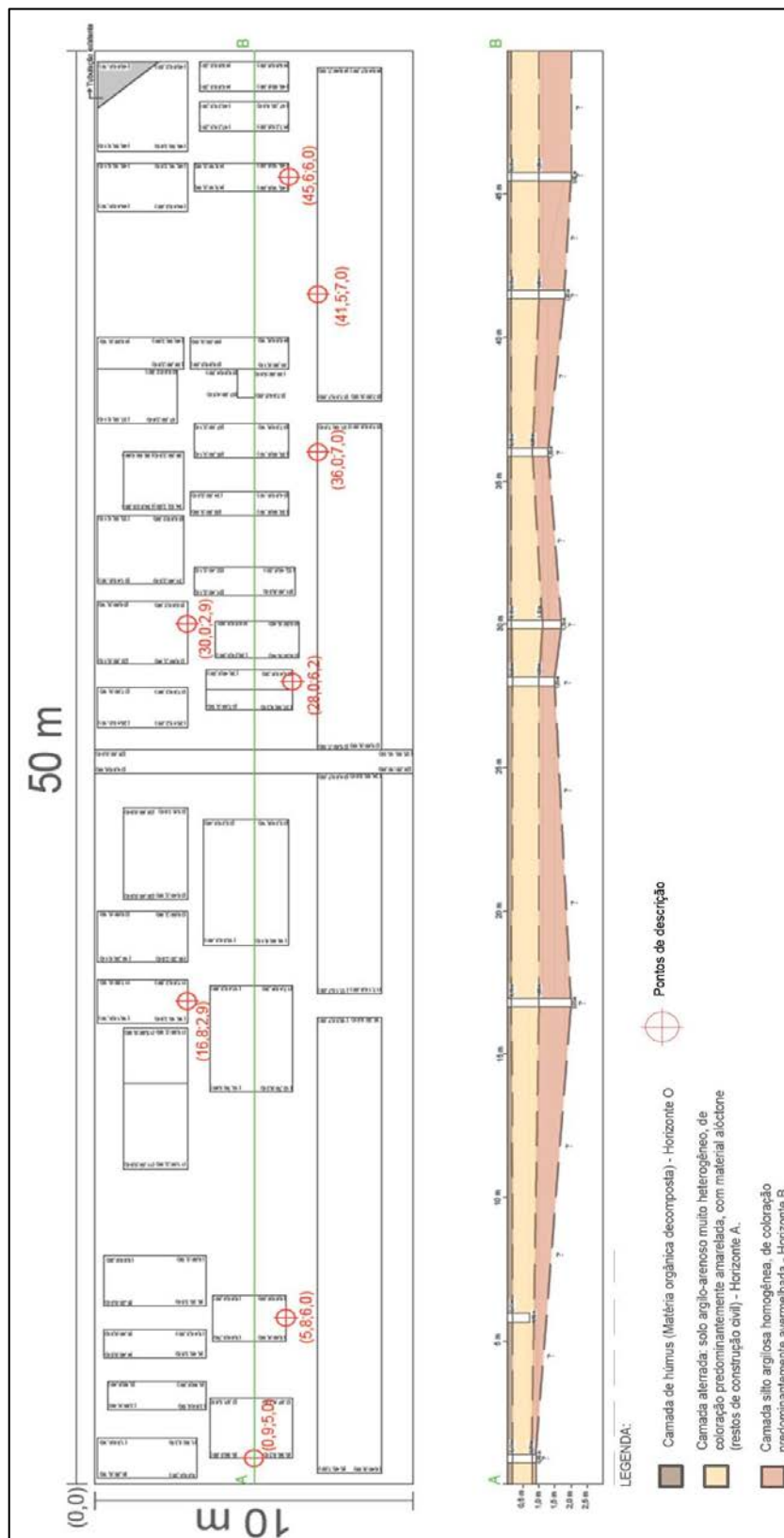
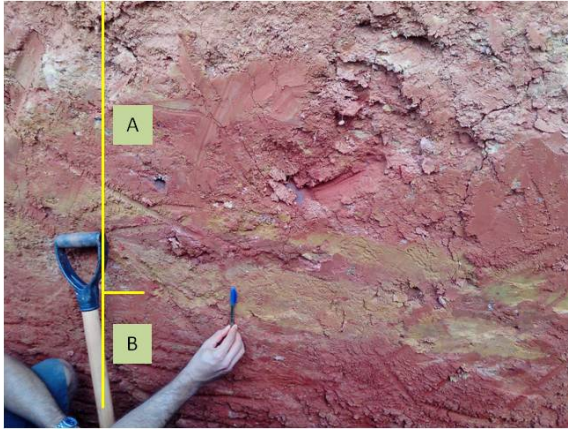
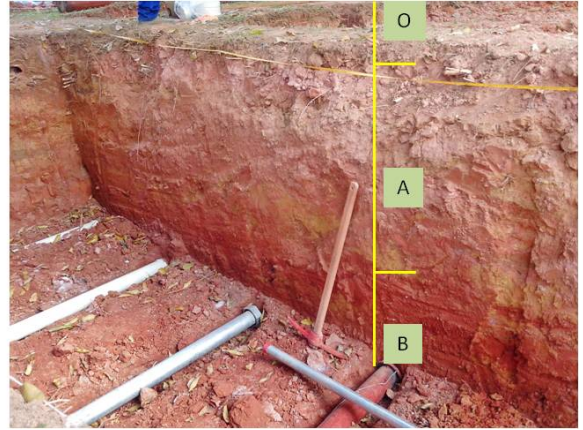


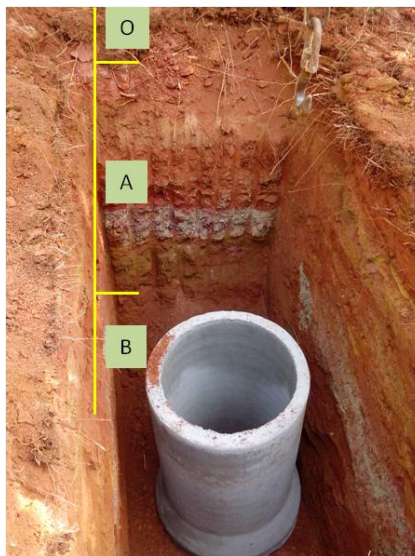
Figura 3.13. Localização dos pontos de coleta no SCGR-II e perfil geológico produzido a partir das descrições realizadas.



**Figura 3.14.** Ponto 1



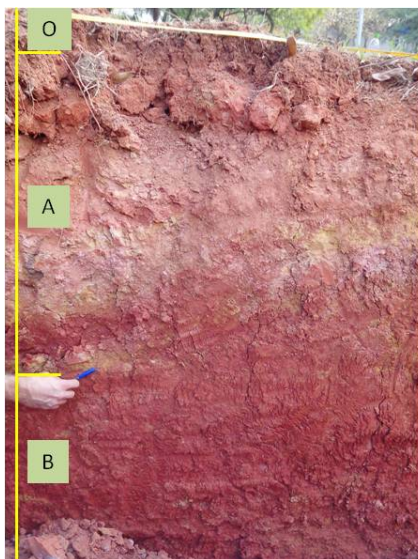
**Figura 3.15.** Ponto 2



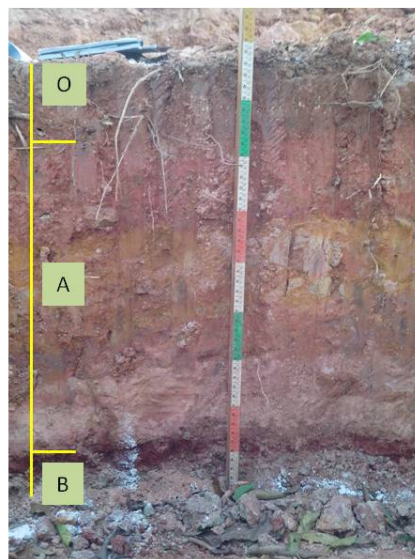
**Figura 3.16.** Ponto 4



**Figura 3.17.** Ponto 1



**Figura 3.18.** Ponto 7



**Figura 3.19.** Ponto 8

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Método da Eletrorresistividade de Prospecção Geofísica

O método da eletrorresistividade é um método indireto de investigação da subsuperfície, onde se consiste em aplicar uma corrente elétrica artificial no solo através de dois eletrodos de corrente em pontos distintos A e B, para a posterior medição do potencial elétrico, medidos através de dois eletrodos de potencial em pontos distintos M e N, nas proximidades do fluxo de corrente. O método trabalha com correntes contínua e baixas frequências, tipicamente 0,03 Hz a 3,0 Hz (WARD,1990). Através da medição do potencial elétrico da camada de solo percorrida pela corrente aplicada, é possível determinar a resistividade do subsolo após o processamento e elaborar perfis 2D e 3D de anomalias de resistividade. No método em questão há grande interesse na identificação de anomalias relativas em um perfil de resistividade, sendo estas na grande maioria das vezes mais relevantes para a interpretação do que os valores absolutos obtidos.

Devido ao fato de a corrente elétrica não se propagar no ar, todo o fluxo de corrente gerado irá necessariamente ser conduzido em subsuperfície, que passa a ser denominado de semi-espaço.

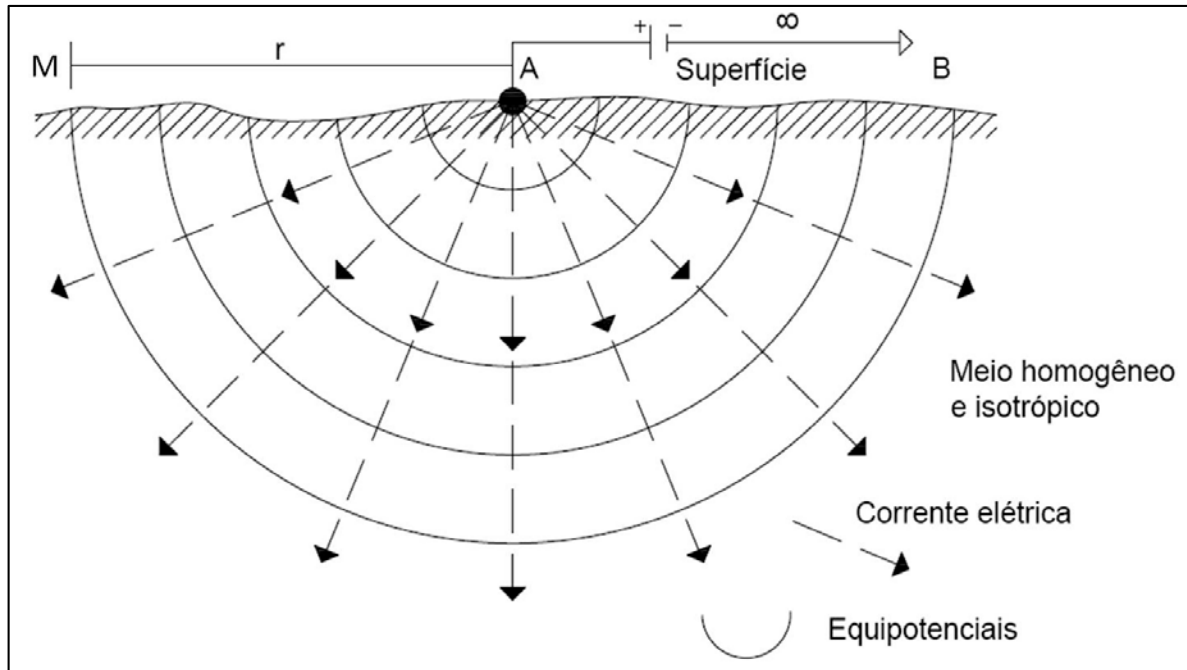
Os ensaios de eletrorresistividade permitem a obtenção de informações de subsuperfície de forma indireta e apresentam custo muito inferior aos tradicionais métodos diretos. Para se obter as medidas de resistividade do solo a partir das medidas de potencial elétrico dos eletrodos de potencial, faz-se necessário estimar o volume do semi-espaço amostrado pelo fluxo de corrente elétrica.

Uma forma para se estimar a resistividade ( $\rho$ ) é através da leitura da voltagem (V) em um ponto localizado nas proximidades do eletrodo de corrente. A partir da formulação apresentada na equação 2.3, pode-se isolar o valor de potencial e escrever a equação como:

$$V = \rho \cdot I \cdot \frac{L}{S} \quad (4.1)$$

Sendo a Terra um corpo tridimensional e a corrente apresentando dispersão semi-esférica (se dispersa igualmente em todas as direções em subsuperfície, considerando que o material geológico seja homogêneo e sem interfaces), faz-se necessário aplicar a equação 4.1 para um semi-espaço, onde um dos eletrodos de corrente é posicionado no infinito e o potencial investigado é medido entre A e M, de acordo com a **Figura 4.1** a seguir:





**Figura 4.1.** Fluxo de corrente causado por um eletrodo de corrente (A) em um semi-espaço. M é um eletrodo de potencial e r o raio da semi-esfera (adaptado de TELFORD et al., 1990).

Dessa forma, considerando o semi-espaço da Figura 2.2 tem-se:

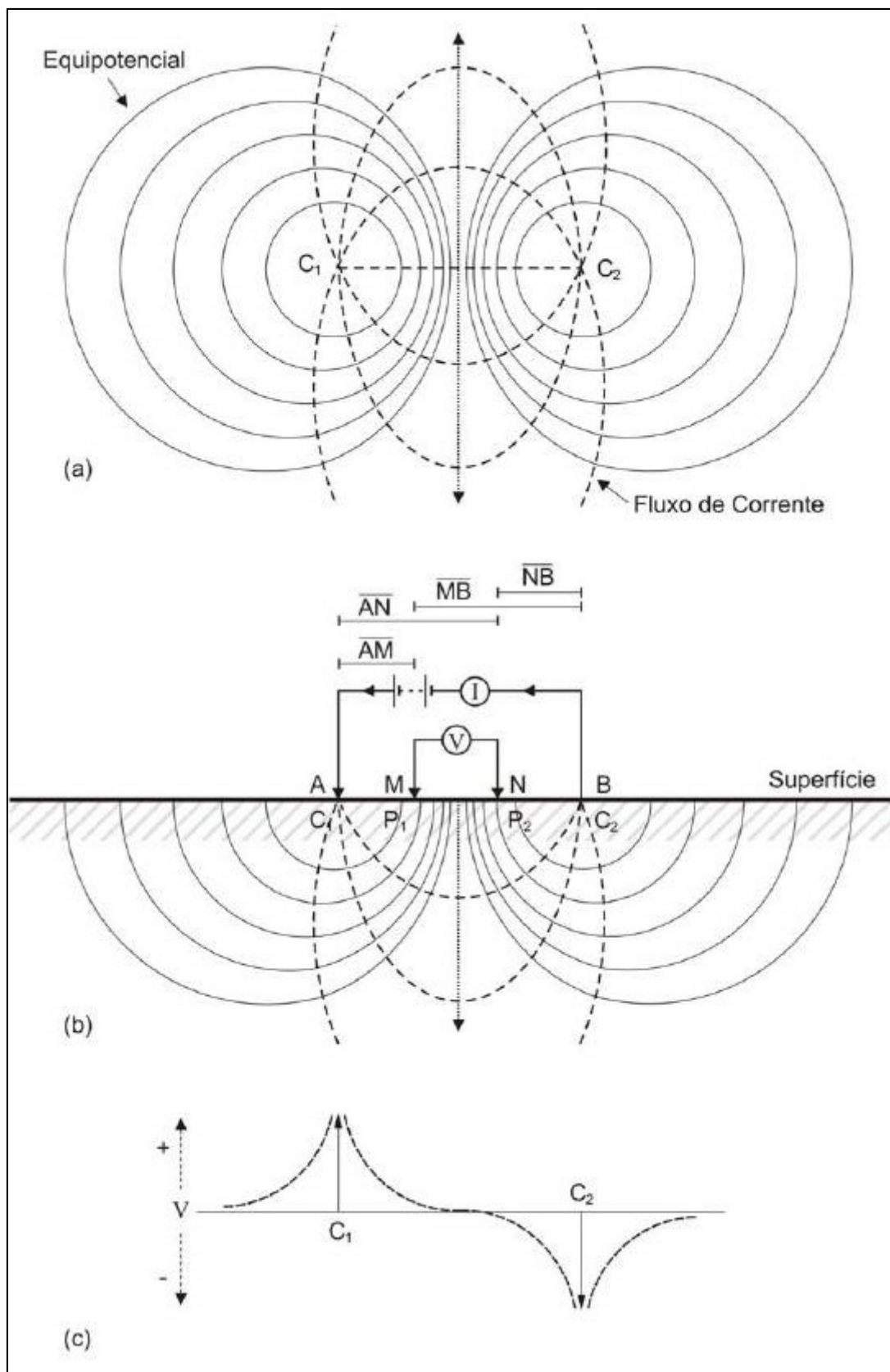
$$\frac{V}{I} = \frac{\rho \cdot r}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi r} \text{ (ohm)} \quad (4.2)$$

A variação de voltagem a partir de um único eletrodo de corrente para alguns pontos do meio, que representam o subsolo, é dada por:

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot r} \text{ (V)} \quad (4.3)$$

onde V é o potencial medido, I a corrente,  $\rho$  a resistividade e r a distância entre o eletrodo de corrente e ponto de medida de potencial.

No entanto, o arranjo de eletrodos sumarizados na figura 4.1 é inviável em escala de campo, devido a grande distância entre os eletrodos de corrente. Para contornar este problema, os eletrodos são aproximados de forma que as medições de potencial realizadas sejam influenciadas pelos dois eletrodos de corrente. A **Figura 4.2** exhibe o arranjo de eletrodos de corrente C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub> ou também chamados de A e B, em planta (Figura a), de corrente A e B e de potencial M e N em perfil (Figura b) e de corrente C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub> em perfil (figura c).



**Figura 4.2.** Arranjo de eletrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N) após a aproximação dos mesmos em um meio homogêneo (adaptado de DOBRIN, 1960). (a) Vista no plano. (b) Seção vertical e (c) Variação do potencial na superfície.

De acordo com a figura (b) acima, considerando-se dois eletrodos de corrente A e B em uma subsuperfície homogênea e isotrópica, o cálculo dos potenciais resultantes em M e N é dado pelas equações:

$$V_m = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (4.4)$$

e

$$V_n = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (4.5)$$

Como a diferença de potencial medida pelo equipamento é  $V_m - V_n$  tem-se:

$$\Delta V_{MN} = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right\} \quad (4.6)$$

Desse modo pode-se calcular a resistividade por:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (\text{ohm.m}) \quad (4.7)$$

onde,

$\rho$  = resistividade.

K = fator geométrico ou constante geométrica.

$\Delta V_{MN}$  = diferença de potencial entre os eletrodos M e N.

I = intensidade de corrente entre os eletrodos A e B.

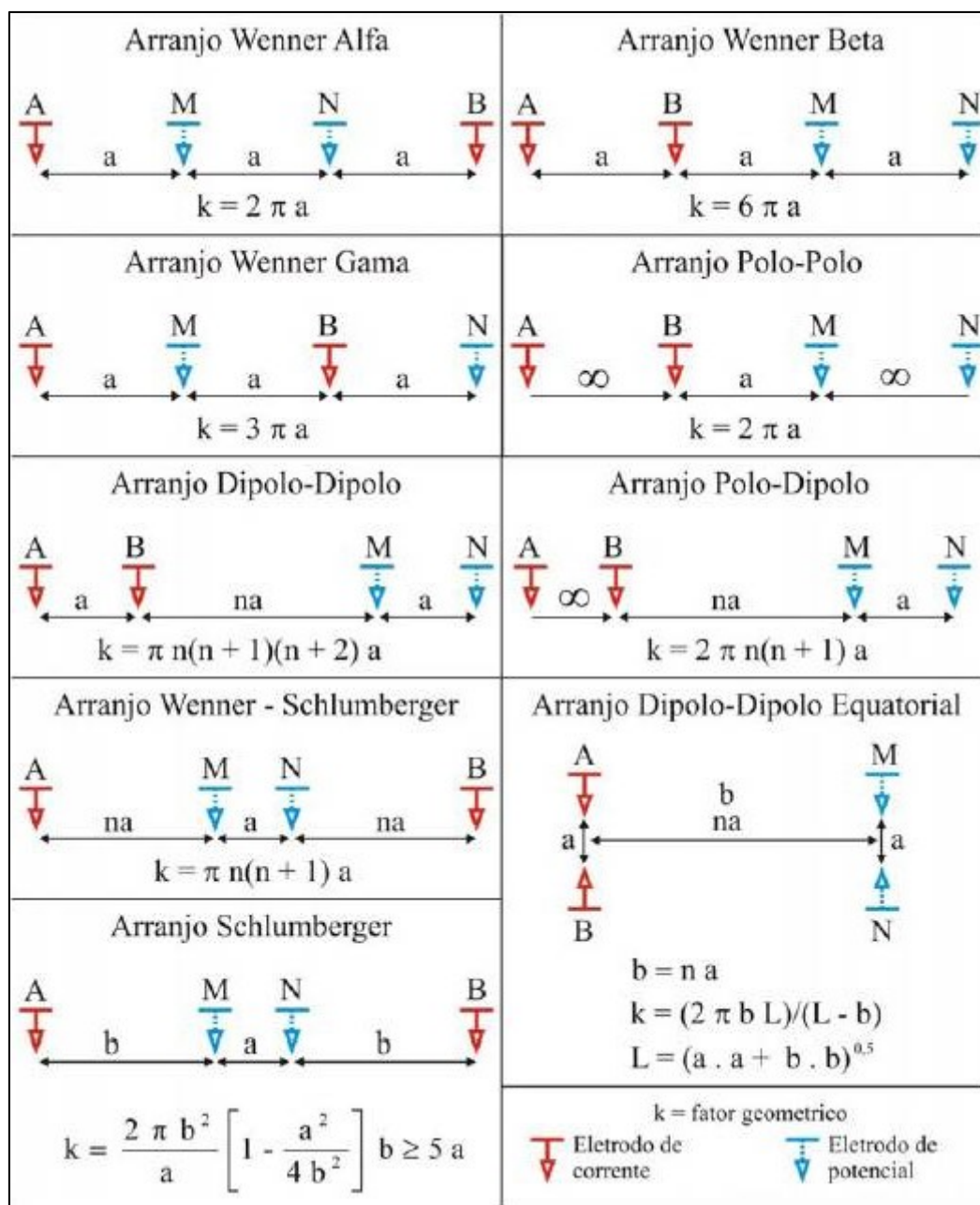
O fator geométrico (K) depende diretamente da geometria do arranjo utilizado e, neste caso, é dada por:

$$K = \frac{2\pi}{(1/AM) - (1/AN) - (1/BM) + (1/BN)} \quad (\text{m}) \quad (4.8)$$

É essencial ressaltar que o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo e isotrópico, pois os solos e as rochas são constituídos irregularmente por diversos minerais, com granulometrias e estruturas variadas. Portanto, os valores de resistividade medidos e que usamos para interpretar representam uma “média ponderada” de todo o volume em subsuperfície por onde a corrente elétrica fluiu, sendo chamada de resistividade aparente.

#### **4.1.1. Técnicas de Aquisição de Dados Utilizando-se o Método da Eletrorresistividade.**

O método da eletrorresistivo aplicado no estudo de subsuperfície possui diferentes técnicas, que dependem do objetivo a ser alcançado bem como do espaço e da resolução esperada. Investigações verticais do subsolo são realizadas através de técnicas de sondagem elétrica ou também chamado de técnica 1D; para investigações laterais do subsolo utiliza-se o caminhamento elétrico 2D ou também conhecido como imageamento elétrico 2D. As técnicas de investigação lateral e vertical podem ser aplicadas através de diferentes arranjos de campo (Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Lee, entre outros), como observado na **Figura 4.3**, sendo a escolha do arranjo dependente das condições de aplicação em campo e dos resultados esperados de um estudo.



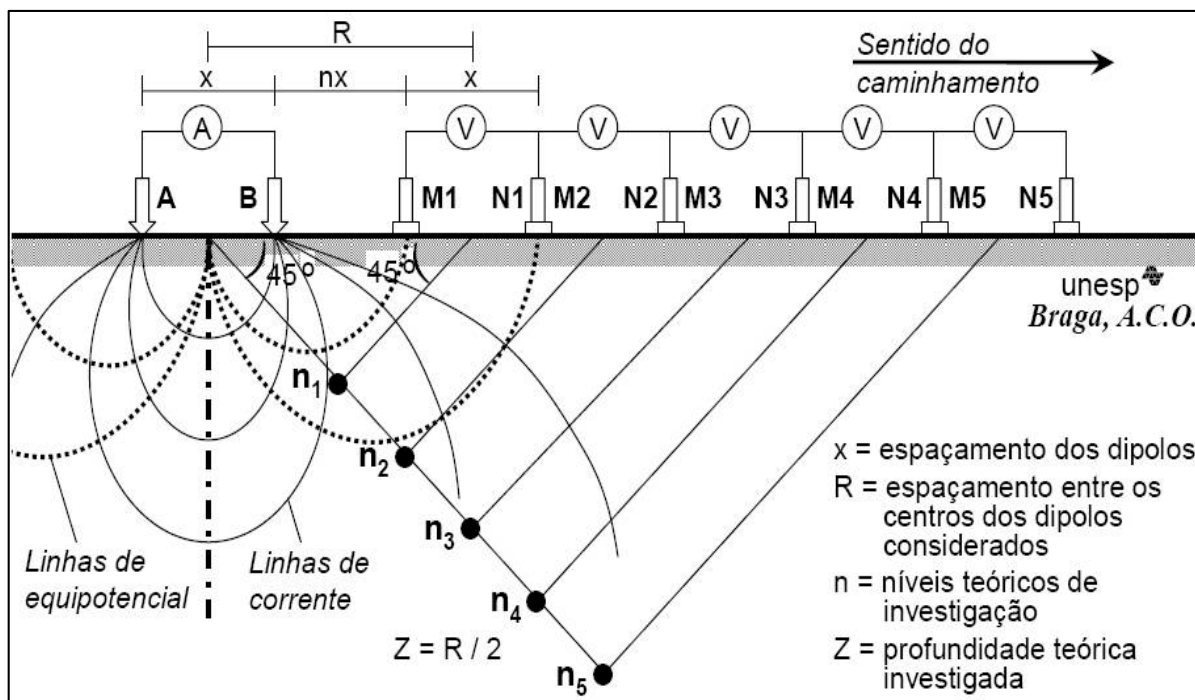
**Figura 4.3.** Principais arranjos eletródicos utilizados em campo e seus respectivos fatores geométricos (adaptado de LOKE, 2004).

A técnica de sondagem elétrica vertical (SEV) é adequada para caracterização de meios estratificados, onde se determina a variação vertical da resistividade aparente em um determinado ponto que, depois de interpretada, resulta em um modelo geoeletrico de camadas. Os valores de resistividade aparente são registrados em um gráfico bilogárítmico chamado de curva de sondagem elétrica, onde é possível observar grandes variações nos valores de resistividade aparente (SANTOS, 2006). A interpretação de uma SEV objetiva determinar a distribuição espacial dos estratos com diferentes resistividades no subsolo,

partindo dos dados de resistividade aparente medidos na superfície. Em uma analogia com ensaios diretos, essa técnica traz informações semelhantes a uma sondagem mecânica, com investigação dos materiais existentes no ponto central do arranjo de eletrodos em diferentes profundidades. Por isso é uma técnica de aquisição 1D e não é adequada para investigação de interferência no subsolo.

A técnica de caminhamento elétrico, por outro lado, é desenhada para o estudo da variação lateral de resistividade, sendo mais adequada para a detecção de interferências no subsolo (ELIS, 1999). O arranjo de campo que tem mostrado bons resultados em estudos ambientais e arqueológicos é o dipolo-dipolo, cujo esquema de campo para um levantamento com 5 níveis de investigação é ilustrado na **Figura 4.4**. Nesse arranjo, os eletrodos AB de injeção de corrente e MN de potencial são dispostos segundo um mesmo perfil e o arranjo é definido pelos espaçamentos  $x=AB=MN$ . A profundidade de investigação cresce com o espaçamento e teoricamente corresponde a  $R/2$ . Normalmente, as medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação, isto é  $n = 1, 2, 3, 4$  e  $5$ , atribuídas a intersecção das linhas que partem do centro de AB e MN com ângulos de  $45^\circ$ . A cada ponto de medida os dipolos são deslocados de uma distância igual a  $x$ , os dados obtidos são plotados nas posições  $n = 1$  a  $5$  e interpolados, gerando uma pseudo-seção de resistividade aparente. A resistividade aparente é calculada a partir da **Equação 4.9** onde o fator geométrico  $K$  é, nesse caso, dado por:

$$K = 2\pi \cdot G \cdot x, \text{ com } G = \frac{1}{(1/n) - (2/n+1) + (1/n+2)} \quad (4.9)$$



**Figura 4.4.** Técnica de caminhamento elétrico arranjo dipolo-dipolo, com 5 níveis de investigação (BRAGA, 2006).

Para a interpretação das pseudo-seções obtidas, é aplicada a técnica de inversão dos dados de campo através da utilização de softwares apropriados, como o RES2Dinv e RES3Dinv, obtendo seções 2D de resistividade e possibilitando a identificação de corpos e estruturas geológicas reais com mais detalhe.

A interpretação de um caminhamento elétrico é subdividida em 5 etapas. A etapa 1 requer uma análise qualitativa dos dados de resistividade obtidos em campo, considerando o sistema de plotagem de 45° graus e o posicionamento dos dipolos, para que se produza um modelo qualitativo final. A etapa 2, consiste em se processar os dados obtidos em campo através de programas computacionais adequados, obtendo os valores das resistividades e espessuras reais das camadas geológicas 2D. As etapas 3, 4 e 5 consistem em associar os resultados obtidos na etapa 2 com a geologia da área e a seguir estabelecer um modelo geológico final – 2D confiável (BRAGA, 2006).

Nas seções obtidas são observadas as variações de resistividade real, que podem estar relacionadas a corpos e estruturas geológicas, em caso de estudos de terrenos naturais, e alvos enterrados, em estudos arqueológicos e de interferências no subsolo. Porém é importante salientar que devido a necessidade de cravação de eletrodos no solo esse procedimento consome muito tempo para detecção de alvos de pequenas dimensões, sendo indicado o seu uso somente para alvos de tamanho considerável, como tambores plásticos e/ou metálicos e grandes manilhas de concreto.

## **4.2. Método da Eletrorresistividade Capacitiva**

### **4.2.1. Considerações Gerais**

A metodologia tradicional de medição de resistividade requer cravação de vários eletrodos (hastes metálicas de 30 a 50 cm de altura por 0,5 a 1 cm de diâmetro) no solo para possibilitar o fluxo de corrente elétrica e as medidas de potencial. Isso requer, primeiramente, que o terreno não apresente pavimentação e que o terreno não tenha superfície rochosa que impossibilite a cravação dos eletrodos. Esta é a principal limitação prática para o uso da metodologia eletrorresistividade em área urbana. Além disso, a instalação de eletrodos metálicos para arranjos de detalhe, como requerido para detecção de interferências, inviabiliza sua aplicação em ensaios de rotina pela enorme demanda de tempo para instalar eletrodos distanciados de poucos centímetros. Para um arranjo de 10 cm, necessário para detectar alvos de no mínimo 5 cm de diâmetro, estima-se duas horas de ensaio para o levantamento de uma linha de 10 metros de comprimento.

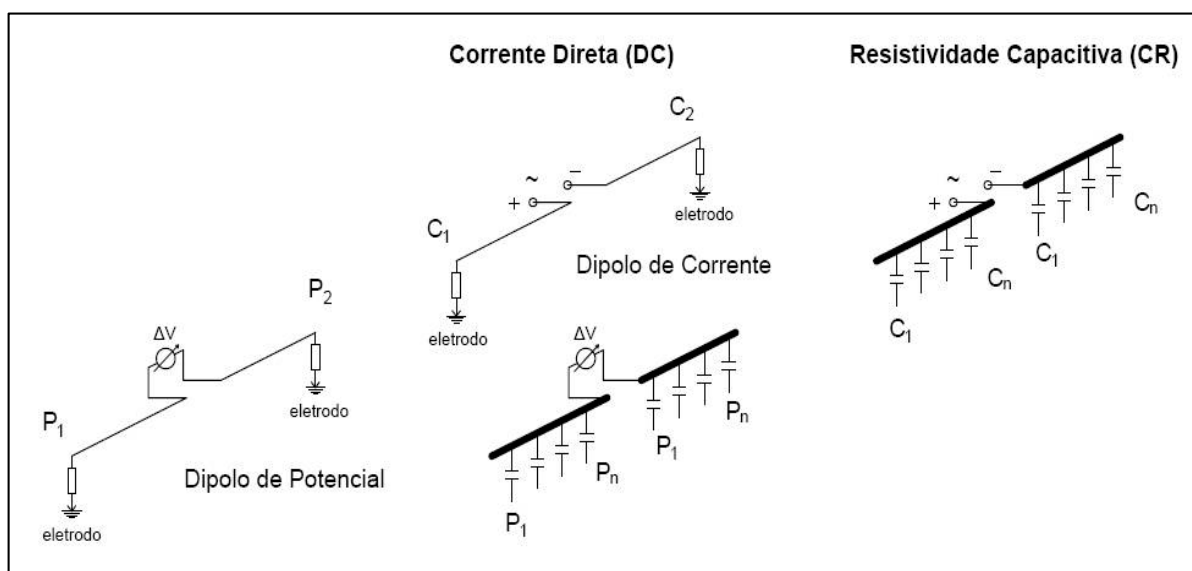
Dessa forma, visando obter um contato elétrico mais eficiente, foi desenvolvido um equipamento geoeletrico usando uma injeção de corrente alternada e acoplamento capacitivo, que pode ser usado em meios altamente resistivos e também em superfícies rígidas como asfalto ou concreto (OSELLA et al., 2012). A eletrorresistividade capacitiva se apresenta como uma forma de se utilizar a metodologia de resistividade elétrica sem a necessidade do acoplamento galvânico (cravação de eletrodos) com a superfície do terreno. Além disso, ela permite uma contínua aquisição de dados, possibilitando a investigação de grandes áreas com rápida operação de campo (KURAS et al., 2006, LOKE et al., 2013, PAN et al., 2014).

Assim como para o método tradicional de medição da resistividade do solo, o método da resistividade capacitiva também é melhor empregado através da técnica de arranjo dipolo-dipolo, pois este arranjo é geometricamente mais favorável para a aquisição de dados. O mecanismo de acoplamento entre o sensor e a superfície é predominantemente capacitivo e o efeito indutivo é negligenciável. Sob condições quasi-estáticas, as medidas capacitivas são essencialmente equivalentes ao método convencional.

Uma das grandes vantagens da utilização do arranjo dipolo-dipolo está no estudo da variação lateral, o qual permite maior qualidade nos resultados obtidos. No arranjo, os centros dos dipolos AB e MN não permanecem fixos, mas se deslocam ao longo da linha a ser levantada, e o espaçamento entre os eletrodos AB é igual ao espaçamento MN. A distância entre os centros dos conjuntos AB e MN, por sua vez, pode variar, sendo que cada dipolo definido por uma dessas distâncias refere-se a uma profundidade de investigação.



A **Figura 4.5** mostra dois arranjos esquemáticos de levantamentos de resistividade. À esquerda, está representado o arranjo comum de dipolo-dipolo para o método convencional de caminhamento elétrico, no qual apresenta acoplamento galvânico e, à direita, o arranjo similar dipolo-dipolo, mas com acoplamento capacitivo com o solo. Os sensores capacitivos do sistema realizam contínuas medidas conforme são rebocados em uma linha de perfil.



**Figura 4.5.** Conceituação básica das medidas da forma de aquisição convencional (esquerda) e da resistividade capacitiva (direita) (modificado de KURAS et al., 2006).

De acordo com KURAS (2002), a Resistividade Capacitiva tem um modo único de operação, com as seguintes características:

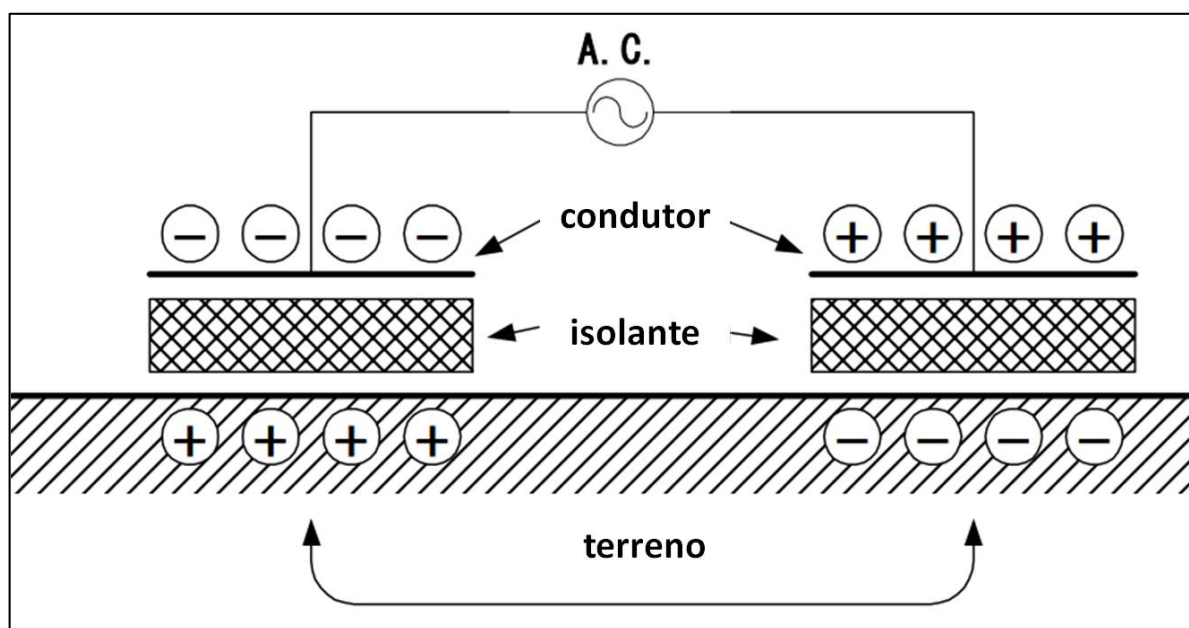
1. Um dipolo elétrico oscilante não ligado à superfície é usado como fonte controlada para criar um fluxo de corrente elétrica no terreno.
2. As frequências empregadas são moderadas, na faixa de áudio (16,5 KHz).
3. As medições operam em um modo quasi-estático sob condições de baixo número de indução.
4. O mecanismo de acoplamento entre o sensor e a superfície do terreno é por capacitância; ou seja, o acoplamento é principalmente fornecido por um campo elétrico e os efeitos indutivos são negligenciáveis. Os sensores são referidos como eletrodos capacitivos. Suas propriedades são essenciais para a extensão espacial do acoplamento.
5. Sob condições quasi-estáticas, nas quais o efeito indutivo pode ser desconsiderado, as medidas de resistividade capacitiva são essencialmente equivalentes às aquelas adquiridas pelo método de caminhamento elétrico

convencional (com cravação de eletrodos no solo). Sendo assim, as resistividades obtidas podem ser trabalhadas segundo as metodologias convencionais de interpretação.

Como dito anteriormente, diferentemente dos levantamentos de resistividade convencionais, o método capacitivo não necessita do acoplamento galvânico com a superfície em estudo.

Exceto pelo não acoplamento com o solo, o funcionamento de um levantamento de resistividade capacitiva é bastante semelhante ao de um levantamento convencional, necessitando de um par de “eletrodos” transmissores e pares de “eletrodos” receptores (no caso, os eletrodos são substituídos por cabos que funcionam como antenas).

Os sistemas de aquisição para a resistividade capacitiva são formados (em uma configuração básica) por um transmissor, um conjunto de receptores e o registrador dos dados. Sua fundamental diferença com relação ao sistema de caminhamento elétrico convencional é o não acoplamento físico de eletrodos com o solo, que neste caso, se dá por capacitância elétrica (**Figura 4.6**).



**Figura 4.6.** Modelo conceitual do acoplamento capacitivo do método de resistividade capacitiva (YAMASHITA et al., 2004).

Outra importante diferença que o método capacitivo apresenta sobre o método convencional é o uso da corrente alternada e conseqüentemente, o uso de uma frequência de emissão de corrente, evitando interferências de cabos elétricos, presentes em

subsuperfície, e de correntes de origem telúrica nas medições realizadas pelos dipolos receptores. A não interferência se deve a grande diferença entre a frequência de operação do equipamento capacitivo e as frequências típicas de redes de distribuição elétrica e de ondas telúricas. No caso do equipamento OhmMapper, os receptores do equipamento detectam apenas o sinal proveniente da corrente alternada de frequência de 16500 Hz, eliminando dessa forma grande parte dos possíveis ruídos que possam atrapalhar a aquisição e interpretação de dados (GROOM, 2008).

#### 4.2.2. O Regime Quasi-Estático e a Condição de Baixo Número de Indução

O regime quasi-estático é válido para a maioria das frequências eletromagnéticas utilizadas e assume que o deslocamento de corrente pode ser efetivamente ignorado quando comparado com a condução de corrente. A intensidade do campo magnético ( $\nabla \times H$ ) é descrita como a soma entre a densidade de corrente ( $J$ ) e o deslocamento de corrente no tempo ( $\partial D / \partial t$ ):

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4.10)$$

Sob condições de espaço livre, onde a frequência do campo eletromagnético possui um comprimento de onda consideravelmente maior do que o espaçamento entre o transmissor-receptor, o campo magnético varia tão lentamente que a diferença relativa em resposta ao sinal com o tempo é insignificante e, por isso:

$$J \gg \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4.11)$$

Devido a este fato,  $\partial D / \partial t$  pode ser considerado negligenciável e a intensidade do campo magnético irá depender diretamente e somente da densidade de corrente (ADAMS, 2008), onde:

$$\nabla \times H = J \quad (4.12)$$

Com relação ao número de indução (B), este descreve a natureza da indução eletromagnética em função da geometria do arranjo e das propriedades elétricas. B é definido como a razão entre um comprimento “s” e o *skin depth* calculado para o terreno (MCNEIL, 1980):

$$B = \frac{s}{\delta} = s \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \sigma}{2}} \quad (4.13)$$

Onde,

$\delta$  = Skin depth

$\omega$  = Frequência angular

$\mu_0$  = Permeabilidade Magnética

$\sigma$  = Condutividade elétrica

O comprimento “s” pode ser dado como a distância entre o centro do dipolo transmissor e o centro do dipolo receptor, equivalente à distância entre a bobina transmissora e a bobina receptora no formalismo eletromagnético.

Em termos eletromagnéticos, CALLEGARY et al. (2007) afirmaram que a condição para que equipamentos eletromagnéticos atuem no regime de baixo número de indução é apresentar distância entre o receptor e o transmissor de ondas eletromagnéticas, inferior ao valor de *skin depth* calculado, e que se respeitada esta condição, a sensibilidade vertical e a profundidade real que o equipamento alcança serão independentes dos valores de condutividade/resistividade.

BENDERITTER et al. (1994) propôs que o número de indução “B” elevado ao quadrado deve ser menor que 1, o que reafirma a condição estabelecida por CALLEGARY et al. (2007), para que as condições quasi-estáticas sejam respeitadas. Dentro desta condição, KURAS et al. (2006) propõe a frequência máxima ( $f_U$ ) a ser utilizada para que as equações consideradas pelo regime quasi-estático sejam respeitadas:

$$f = f_U = \frac{\rho}{\pi \mu_0 r^2} \quad (4.14)$$

Onde,

$\rho$  = resistividade (Ohm.m)

$\mu_0$  = permeabilidade magnética (T.m/A)

$r$  = distância entre o transmissor e o receptor (m)

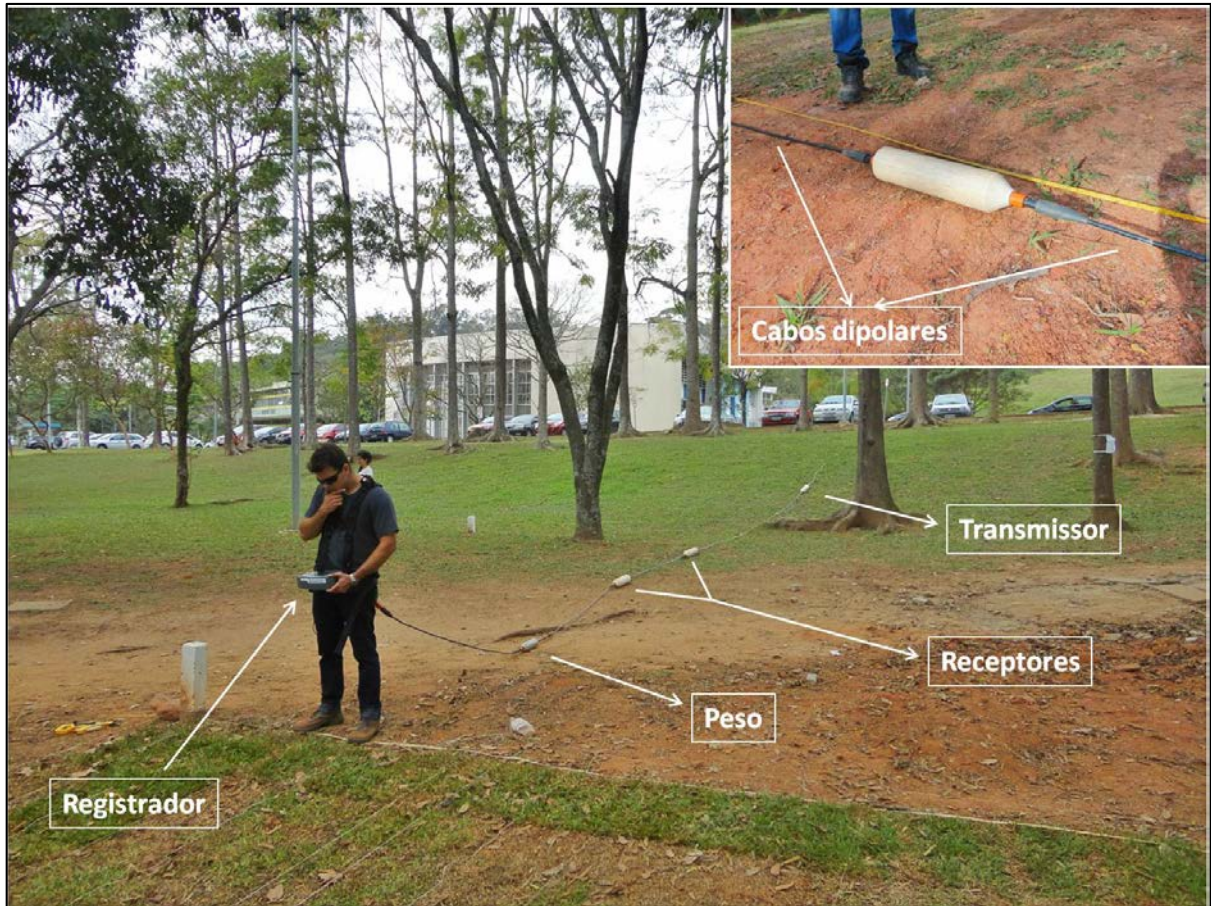
A frequência máxima a ser utilizada é proporcional a resistividade do terreno e inversamente proporcional ao quadrado da distância, isto é, quanto mais resistivo for o material em subsuperfície maior poderá ser a distância entre o receptor e o transmissor.

Como exemplo, se assumirmos um valor de resistividade mínima de 30 Ohm.m (valor mínimo encontrado em sedimentos não saturados) e um espaçamento máximo de 17,75m (maior distância utilizada neste trabalho entre o centro do dipolo transmissor e o centro do dipolo receptor para o arranjo do OhmMapper), obteremos um valor de frequência máxima de aproximadamente 24KHz e comprimento de onda de 12465m. Portanto, a frequência de 16,5 KHz (frequência do OhmMapper) é adequada para a distância máxima utilizada de 17,75m, pois está abaixo do limite de 24 KHz e o comprimento de onda obtido demonstra que as condições quasi-estáticas, bem como o baixo número de indução ( $B^2 = 0,68$  para este caso) foram respeitados.

Em suma, a frequência de operação de um equipamento eletromagnético, bem como a distância entre o transmissor e o receptor de corrente eletromagnética são os parâmetros fundamentais para determinar se os efeitos indutivos são significativos ou se podem ser negligenciados (KURAS et al., 2006).

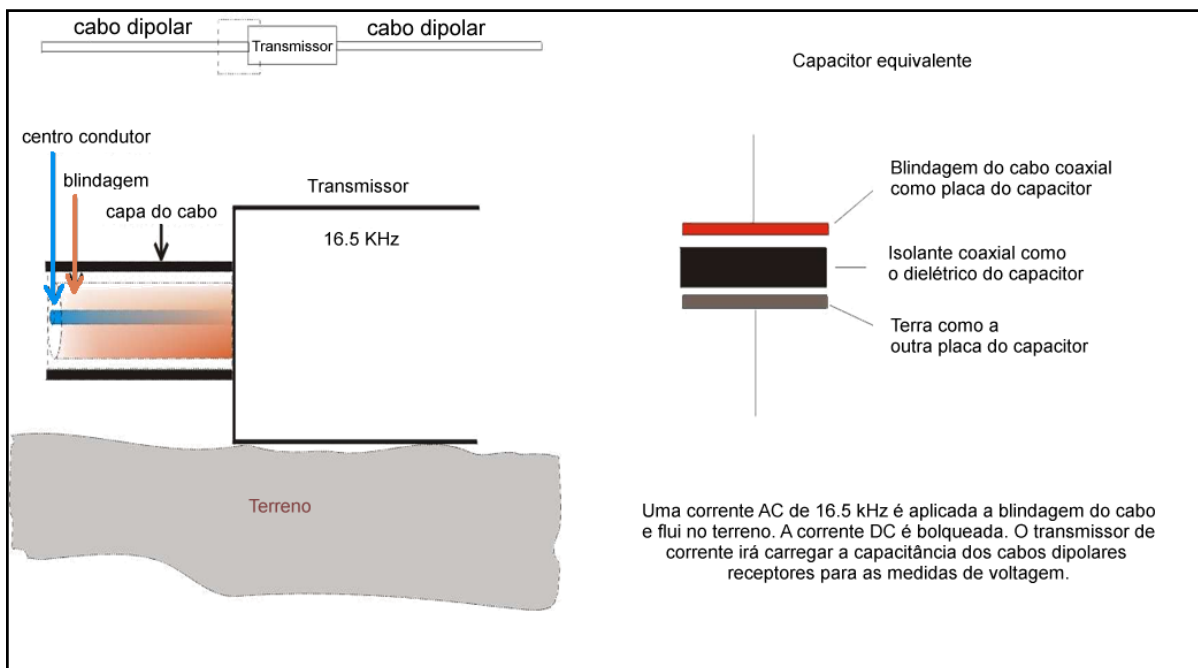
### 4.3. O OhmMapper

Um dos sistemas operantes com a resistividade capacitiva é o OhmMapper, da GEOMETRICS, capaz de realizar até duas medições por segundo com distância entre os dipolos de 1,25m, 2,5m, 5m, 7,5m e 10m. A **Figura 4.7** mostra um exemplo de arranjo do referido sistema. A figura mostra ainda em detalhe os cabos dipolares do sistema – os receptores estão ligados entre si através de cabos dipolares, e o transmissor é ligado ao sistema de recepção por meio de uma corda não condutora. Todo o conjunto é rebocado por um operador ou veículo.



**Figura 4.7.** Componentes que formam o sistema OhmMapper, da GEOMETRICS.

Nesse sistema, os cabos dipolares equivalem aos eletrodos no arranjo convencional. Os eletrodos do dipolo são cabos coaxiais, sendo que a blindagem de cobre do cabo atua como uma placa do capacitor, na qual é estabelecida uma corrente alternada com frequência de 16,5 kHz. O terreno atua como a outra placa. O isolante atua como um dielétrico do capacitor. Dessa forma, o sinal de corrente alternada passa do cabo dipolar para o terreno via capacitância. O sinal de corrente contínua é bloqueado. Na **Figura 4.8** é representado esse sistema e o capacitor equivalente.



**Figura 4.8.** Esquema de como o acoplamento capacitivo do OhmMapper funciona (modificado de YAMASHITA et al., 2004).

KURAS et al. (2006) afirmam que os arranjos dipolo-dipolo são os melhores para levantamentos de resistividade capacitiva. Entretanto, destacam que a construção de estruturas com configurações dipolo-dipolo traz também uma limitação que deve ser considerada. O arranjo sendo fixo, não pode ser alterado durante o levantamento (como, por exemplo, ocorre em levantamentos convencionais em que se variam as distâncias entre os pares de eletrodos), o que exige que o operador defina com cuidado os melhores espaçamentos de acordo com seus objetivos de amostragem e cobertura.

#### 4.3.1. O Cabo Capacitivo e o Cálculo do Fator Geométrico – K

O cabo capacitivo foi criado com o intuito de se aplicar uma corrente ao solo e posteriormente medir o potencial elétrico da superfície sem o contato de eletrodos.

Os cabos capacitivos utilizados pelo equipamento OhmMapper são, externamente, como cabos elétricos convencionais. Internamente os cabos apresentam um par trançado de dois fios de bitola modesta, um preenchimento não condutor para preencher o diâmetro desejado e, em seguida, uma malha de cobre enrolado ao redor do material de enchimento. Sobre esta malha de cobre, um isolante exterior e resistente é colocado (isolante coaxial – dielétrico do capacitor). A trança de cobre do cabo faz o papel de uma placa capacitiva que, isolada pelo dielétrico, gera tensão sobre o solo – o solo faz o papel da outra placa capacitiva (GEOMETRICS, 2001).

As medidas de resistividade obtidas através dos cabos capacitivos não podem ser interpretadas da mesma forma que os dados obtidos pelo caminhamento elétrico convencional, pois o cabo capacitivo não se encontra acoplado ao solo e por isso não possui pontos de medida fixos, mas sim por toda a sua extensão. Devido a essa característica, faz-se necessário alterar o conceito de fator geométrico (K) formulado no item 5.3 para o método da eletrorresistividade capacitiva (KURAS et al., 2006).

Para um arranjo dipolar simétrico (comprimento do dipolo de corrente é igual ao dipolo de potencial) e considerando o comprimento do dipolo como “L” e a separação entre eles como “R”, KURAS (2002) definiu que a expressão do fator geométrico pode ser escrita como:

$$K = \frac{\pi L}{\ln\left(\left(\frac{b^2}{b^2 - 1}\right)^{2b} \left(\frac{b^2 + 2b}{(b + 1)^2}\right)^{b+2} \left(\frac{b^2 - 2b}{(b - 1)^2}\right)^{b-2}\right)}$$

(4.15)

Onde

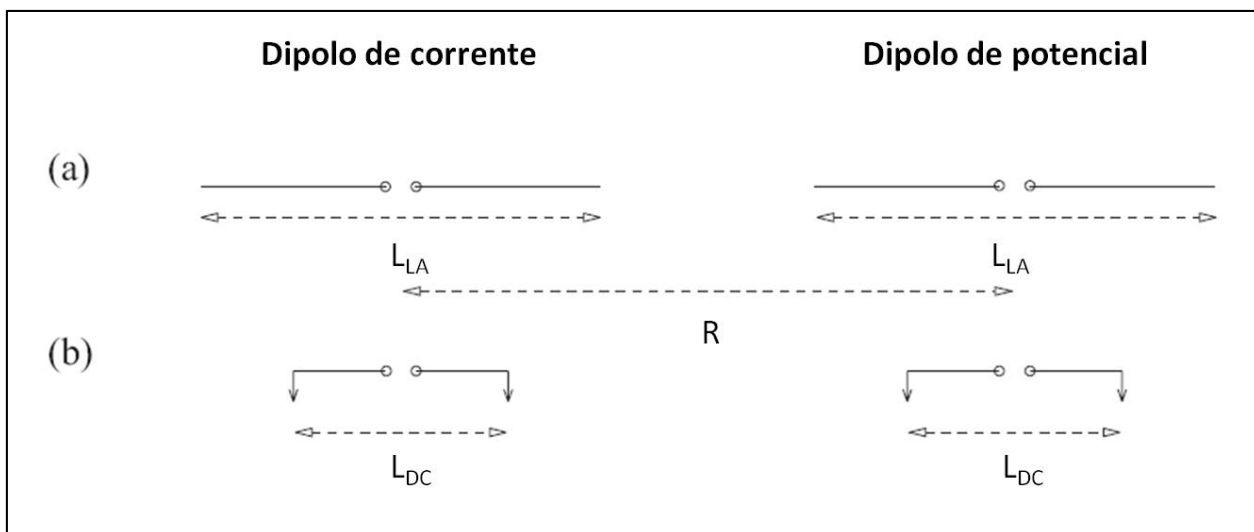
$$b = \frac{2R}{L}$$

Assim como no método tradicional, a resistividade aparente é determinada aplicando-se a equação 4.7, porém utilizando-se o fator geométrico determinado para a resistividade capacitiva.

#### 4.3.2. Conceito de Equivalência com o Método Convencional

Para um meio homogêneo, um arranjo dipolar convencional que mede a mesma transferência de impedância que um arranjo dipolar capacitivo terá uma abertura dipolar diferente da abertura dipolar capacitiva (**Figura 4.9**).





**Figura 4.9.** Conceito de equivalência entre a abertura dipolar  $L_{LA}$  para o método capacitivo (LA – Line Antenna) e  $L_{DC}$  para o método convencional (DC – Direct Current). (Modificado de KURAS et al., 2006).

Como a resistividade aparente em um meio homogêneo independe do arranjo espacial dos eletrodos, o fator geométrico do método convencional em arranjo dipolar será equivalente ao fator geométrico do método capacitivo de arranjo dipolo-dipolo. Conseqüentemente, considerando um espaçamento  $R$  entre o centro de dipolo de corrente e de potencial, o comprimento do dipolo capacitivo será diferente do comprimento do dipolo convencional para que o fator geométrico entre as duas metodologias se equiparem. Essa característica é importante e deve ser considerada quando se utilizam modelos de inversão de dados desenvolvidos para o método convencional no tratamento de dados do método capacitivo (KURAS et al., 2006).

PARASNIS (1997) realizou uma comparação entre o fator geométrico do método convencional e do método capacitivo (equação 4.15) e concluiu que o comprimento do dipolo capacitivo sempre será maior que o comprimento dipolar convencional, considerando-se que  $R > L$ , onde  $R$  é a distância entre os centros dipolares e  $L$  é o comprimento do dipolo. KURAS et al. (2006) estipulou que para  $R \leq 1,5L$  (configuração usual no método capacitivo)  $L_{convencional}/L_{capacitivo} \geq 0,535$ . NEUKIRCH & KLITZSCH (2010) analisaram valores de resistividade aparente e resultados da inversão de dados dos mesmos, considerando as frações de comprimentos dipolares  $L_{convencional}/L_{capacitivo} = 0,5$  e  $0,8$  e concluíram que a abertura de  $0,8 L_{capacitivo}$  para o método convencional é a mais adequada. Esta abertura dipolar de  $0,8$  da abertura dipolar capacitiva também foi utilizada por ONDENBORGER G. A. & LEBLANC A. M. (2013), onde também concluíram ser a distância de maior equivalência entre as duas metodologias.

#### 4.3.3. Profundidade de Investigação

A profundidade máxima no qual o método capacitivo é capaz de medir as variações de resistividade em subsuperfície irá depender dos valores de resistividade/condutividade do meio. Estes valores serão determinantes para se estipular a distância máxima entre o dipolo transmissor e o dipolo receptor, no qual o sinal originado do transmissor será capaz de chegar ao receptor para ser detectado e decodificado (GEOMETRICS, 2001).

O sinal que viaja do transmissor de corrente para os receptores dela será atenuado na ordem de  $1/\text{distância}^3$  aproximadamente. Como exemplo, caso a separação entre o transmissor e o receptor aumente de 10 m para 20 m, o sinal será reduzido para 1/8 do sinal original. Caso a distância dobre novamente o sinal será 1/64 do sinal original (GEOMETRICS, 2001).

Pela Lei de Ohm, sabe-se que a amplitude da voltagem será diretamente proporcional à resistência na qual uma corrente aplicada terá ao fluir em um meio ( $V = I.R$ , onde  $V$  = voltagem,  $I$  = corrente e  $R$  = resistência). Para uma corrente aplicada ao solo, se a resistência ao fluxo de corrente for elevada então a voltagem também apresentará elevados valores, o que irá favorecer a preservação do sinal emitido pelo transmissor por grandes distâncias. Caso a resistência ao fluxo de corrente seja baixa, a corrente irá se deslocar muito rapidamente e o sinal irá desaparecer na mesma proporção. Portanto, a profundidade de investigação pelo método capacitivo será maior em ambientes resistivos do que em ambientes condutivos (GEOMETRICS, 2001).

#### 4.3.4. O Conceito de *Skin Depth* no OhmMapper

A profundidade máxima de investigação está correlacionada diretamente com a distância entre o transmissor e o receptor (GROOM, 2008), e a distância máxima entre os mesmos tem correlação direta com o conceito de *skin depth*, de forma que o valor obtido seja orientador na interpretação e consideração dos dados. Uma vez que o arranjo apresente espaçamentos, entre o transmissor e os receptores, superiores ao *skin depth*, o sinal não será identificado e decodificado pelos receptores ou o mesmo apresentará erros de leitura dos dados eletromagnéticos superiores a 2% e o método será inviabilizado. A utilização do conceito de *skin depth* é especialmente importante para meios condutivos cuja distância máxima entre o receptor/transmissor é consideravelmente menor do que para ambientes resistivos.

O *skin depth*, em metros, pode ser estimado através da **Equação 4.16**:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (4.16)$$

onde,

$\delta$  = skin depth (m)

$\rho$  = resistividade (Ohm.m)

$f$  = frequência (Hz)

$\mu$  = permeabilidade magnética (H/m)

Uma boa aproximação para o cálculo do *skin depth*, em metros, seria (PARASNIS, 1997).

$$\delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (4.17)$$

Como salientado anteriormente, para o método capacitivo do OhmMapper em especial, GROOM (2008) sugeriu que, através de observações práticas da comparação entre o método capacitivo e o método convencional, os dados eletromagnéticos apresentam erros inferiores a 2% quando a distância utilizada entre os centros dipolares de corrente e de potencial for inferior ao valor obtido de *skin depth* para a área estudada. Sendo assim:

$$s < \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \text{ ou } \rho > \pi f \mu s^2 \quad (4.18)$$

Onde “s” é a distância entre o centro do dipolo de corrente com o dipolo de potencial.

Como exemplo, para a frequência de 16,5 KHz (utilizada no OhmMapper) e para o intervalo de resistividade entre 30 – 10000 Ohm.m (característico de sedimentos não saturados, segundo a figura 5.2), o *skin depth* será estimado entre 21,35m e 391,58m. Portanto, a distância máxima entre os centros dos dipolos de corrente e de potencial não deverá exceder 21,35m para que os dados obtidos apresentem boa acurácia.

#### **4.3.5. Distância Aceitável Entre o Cabo Coaxial e o Solo**

Diferentemente do caminhamento elétrico convencional, o método capacitivo sofre a influência da distância entre o cabo coaxial capacitivo e solo, onde conforme há um aumento no distanciamento, há também um aumento progressivo na voltagem necessária para emitir a corrente alternada no solo e realizar as medidas de resistividade.

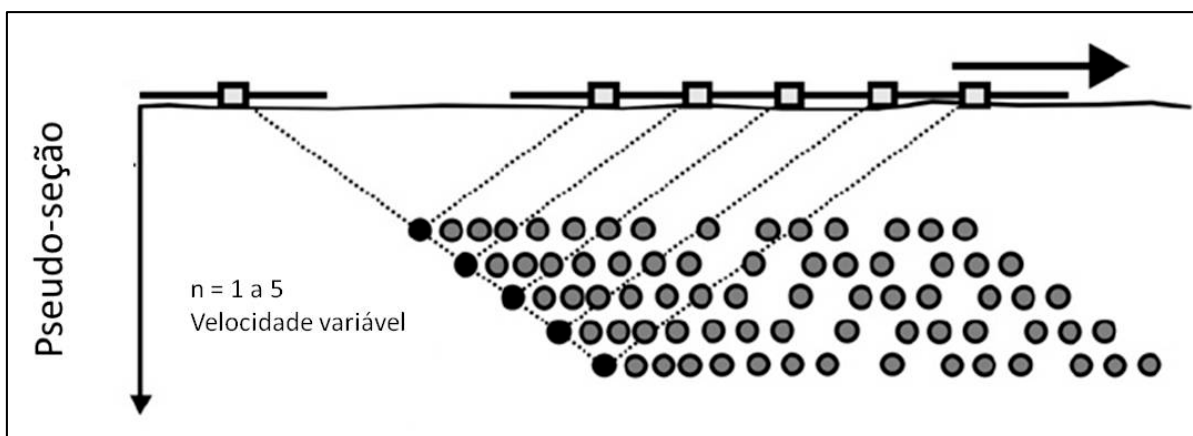
Assim como no método convencional, no qual há a cravação de eletrodos, a magnitude constante da voltagem utilizada é também observada no método capacitivo quando em pequenos distanciamentos entre o cabo coaxial e o solo (entre 1 e 10cm), dependendo apenas dos valores de resistividade do terreno. Esta observação tem grande importância para a aplicabilidade do método em campo, pois pequenas variações do distanciamento entre o cabo coaxial capacitivo e o solo, comum em trabalhos de campo em terrenos irregulares, não irão influenciar significativamente nos resultados obtidos (KURAS, 2006).

## 5. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

### 5.1. Técnicas de Aquisição de Dados do OhmMapper

A aquisição dos dados através da metodologia capacitiva e com o equipamento OhmMapper pode ser realizada de duas maneiras diferentes:

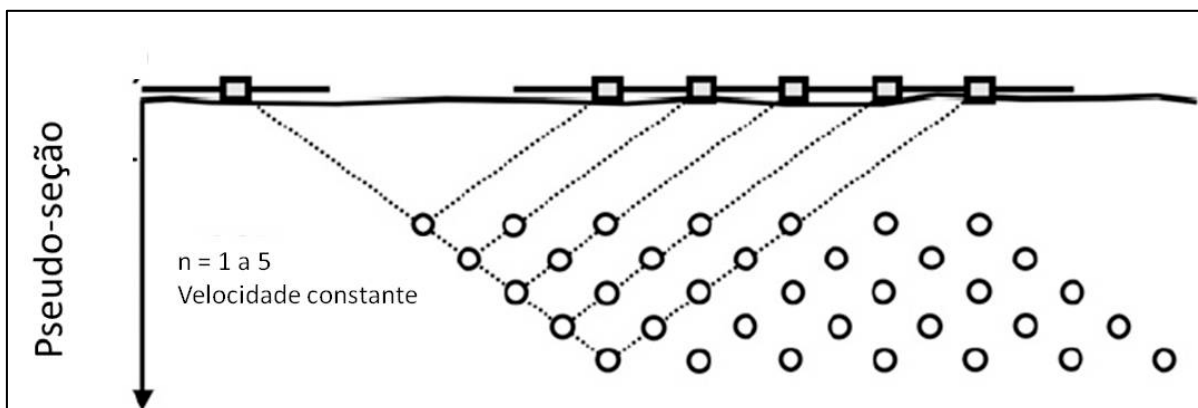
- a) **Aquisição contínua:** Os dados são adquiridos de forma contínua, em intervalos de tempo pré-definidos, onde a densidade de informações dependerá da velocidade com que o operador se locomove na linha de aquisição. Neste caso, devido à variação de velocidade do operador, haverá variação da densidade de medidas realizadas ao longo da linha percorrida (**Figura 5.1**). O equipamento OhmMapper leva em consideração todas as medidas realizadas ao longo de uma linha e então as reorganiza em espaçamentos iguais ao longo de todo o perfil. Para esta técnica de aquisição, o uso de marcadores de posição, utilizados pelo operador do equipamento em intervalos pré-definidos, ajuda o sistema de processamento do equipamento a separar conjuntos de dados de acordo com a posição escolhida, melhorando a qualidade do perfil de resistividade aparente gerado. A aquisição dos dados é feita rapidamente, otimizando o tempo de campo.



**Figura 5.1.** Aquisição contínua de dados com o OhmMapper – Velocidade de aquisição variável (Modificado de ONDENBORG G. A. & LEBLANC A. M. - 2013).

- b) **Aquisição discreta:** Os dados são adquiridos apenas quando o operador determinar. Este tipo de aquisição permite estabelecer a mesma densidade de medidas para todo o perfil (**Figura 5.2**), porém o número de medições realizadas pelo aparelho é inferior ao volume de medidas adquiridas pela técnica contínua. Para esta técnica, o operador determina o espaçamento que julgar mais conveniente, no

qual este deverá ser igual para todos os pontos. O tempo de aquisição dos dados em campo é significativamente maior em relação à técnica contínua.



**Figura 5.2.** Aquisição discreta de dados com o OhmMapper – Velocidade de aquisição constante (Modificado de ONDENBORGER G. A. & LEBLANC A. M. - 2013).

A utilização das duas técnicas distintas se deve ao fato de não existir publicações científicas nacionais e internacionais sobre a melhor forma de aquisição dos dados para o tipo de estudo proposto, o que tornou oportuna a possibilidade de comparação entre diferentes técnicas na atual pesquisa.

Para a definição da melhor técnica de aquisição foram feitas quatro campanhas de aquisição de dados na linha 2 do SCGR-II, nas quais a aquisição foi realizada de quatro formas distintas, alterando-se entre elas a técnica contínua e discreta e também os intervalos de marcadores de posição.

- a) Aquisição contínua, sem marcadores de posição intermediários na linha 2:
- b) Aquisição contínua, com marcadores intermediários a cada 10m na linha 2:
- c) Aquisição discreta, com pontos de medida a cada metro percorrido na linha 2:
- d) Aquisição discreta, com pontos de medida a cada meio metro percorrido na linha 2:

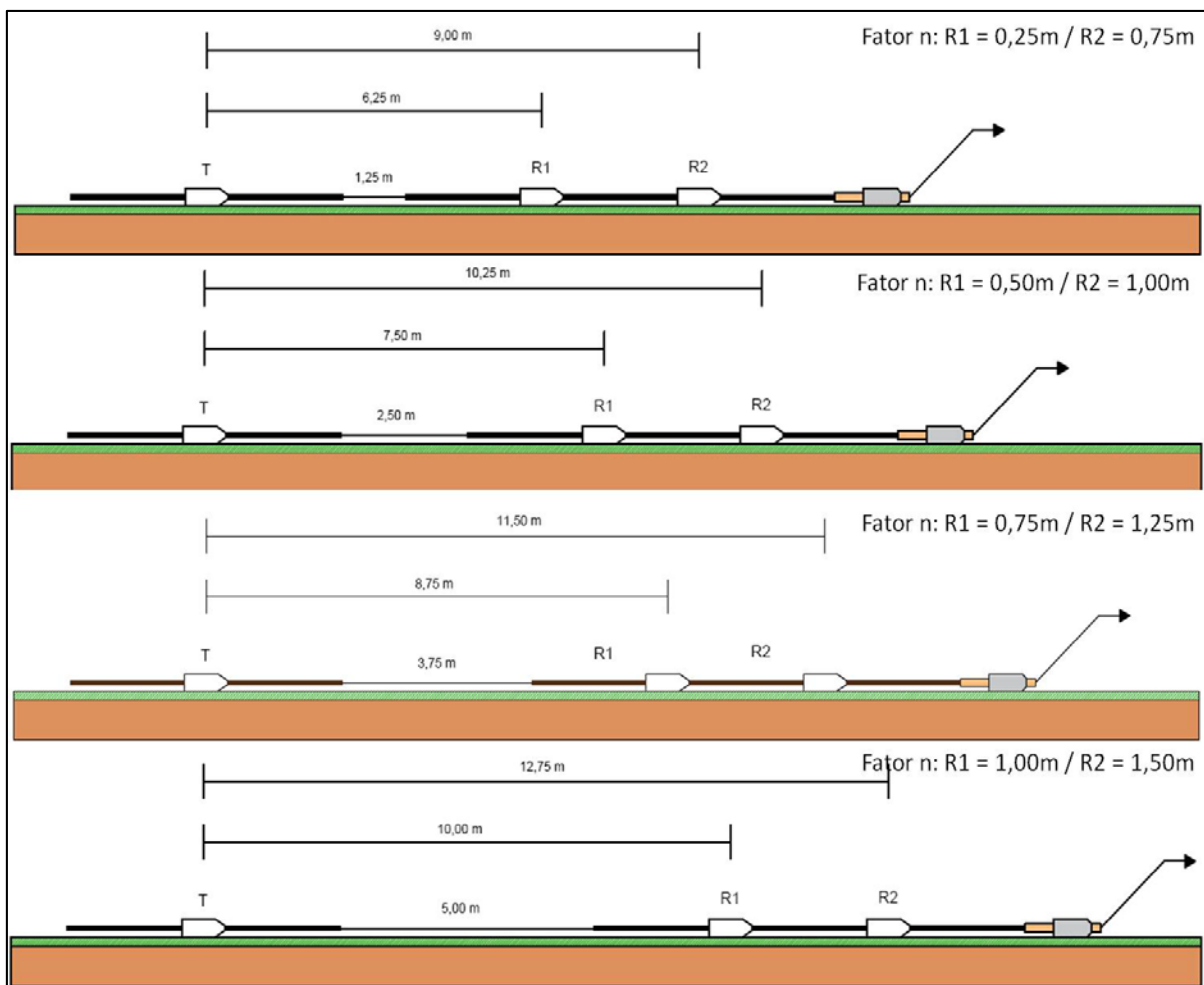
As características de cada campanha de aquisição de dados são expostas no item 5.3 deste texto e os resultados obtidos serão discutidos no item 7.1, com a exposição dos resultados e discussões sobre o tema.

## 5.2. Espaçamentos de Corda Utilizados

Para que a aquisição de dados de resistividade aparente feita em campo seja representativa de todo o pacote de solo de interesse, foram estabelecidas diferentes distâncias entre o dipolo transmissor e os dipolos receptores, de forma que quanto maior o distanciamento – espaçamento de corda – maior a profundidade investigada. Como a profundidade de interesse é de até 2,5m, foram estabelecidos distanciamentos de 1,25m, 2,50m, 3,75m e 5,00m entre o dipolo transmissor e os dipolos receptores, totalizando quatro passadas por linha definida.

O aumento do distanciamento levou em conta a densidade de informações por nível de profundidade e, com o intuito de se manter uma razoável homogeneização na densidade de informações em profundidade, o distanciamento foi aumentado sempre em 1,25m por passada, mantendo boa densidade de informações verticalmente nos perfis produzidos.

Com espaçamentos de corda de até 5,00m é possível obter informações em seis níveis de investigação e perfis de resistividade aparente de aproximadamente 2,50m de profundidade, sendo o suficiente para o objetivo de deste projeto. A **Figura 5.3** é representativa das distâncias utilizadas entre os dipolos de potencial e o dipolo de corrente, variando apenas o espaçamento de corda entre uma passada e outra em cada perfil.



**Figura 5.3.** Arranjo de campo do OhmMapper, com as distâncias de corda utilizadas em cada perfil.

### 5.3. Campanhas de Aquisição e Linhas de Campo Utilizadas

Para o estudo das técnicas de aquisição de dados, bem como para o levantamento geoeletrico do SCGR-II foram realizadas cinco campanhas no total, onde as linhas escolhidas levaram em consideração o objetivo (técnica de aquisição ou levantamento geoeletrico geral do SCGR-II). As características de cada campanha de aquisição de dados são descritas a seguir:

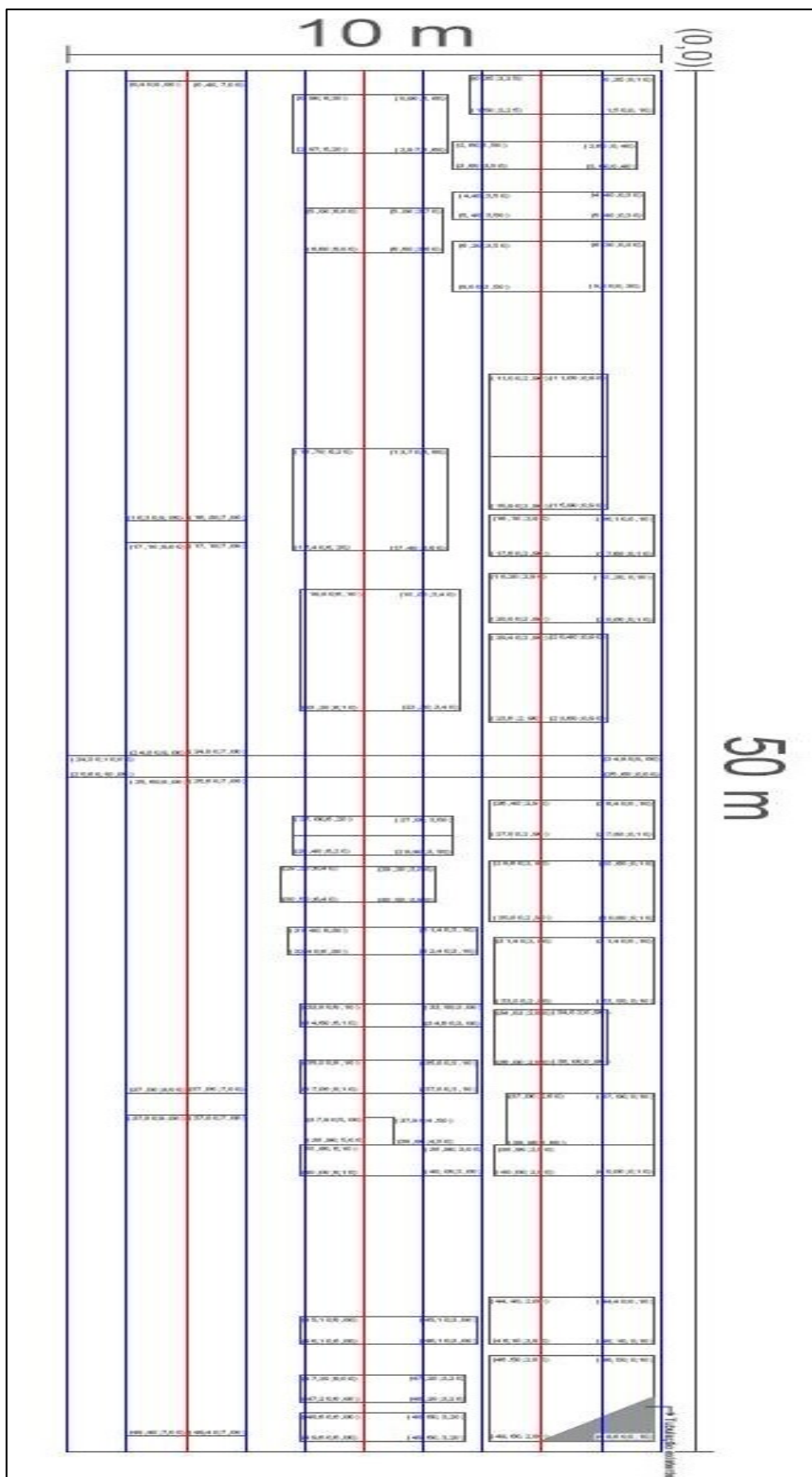
- a) Aquisição de dados – 15/03/16:** Aquisição dos dados de *background*, referentes às três linhas de alvos definidas, realizada anteriormente à abertura das valas e à instalação dos alvos. A aquisição dos dados foi feita através da técnica de aquisição contínua e sem marcação de posição ao longo das linhas. Esta aquisição será utilizada posteriormente na discussão dos resultados apresentados.
- b) Aquisição de dados – 29/08/16:** Campanha de aquisição de dados realizada logo após a conclusão das obras de instalação de alvos no SCGR-II. O campo programado nesta data teve como objetivo realizar o levantamento geoeletrico logo após a conclusão do



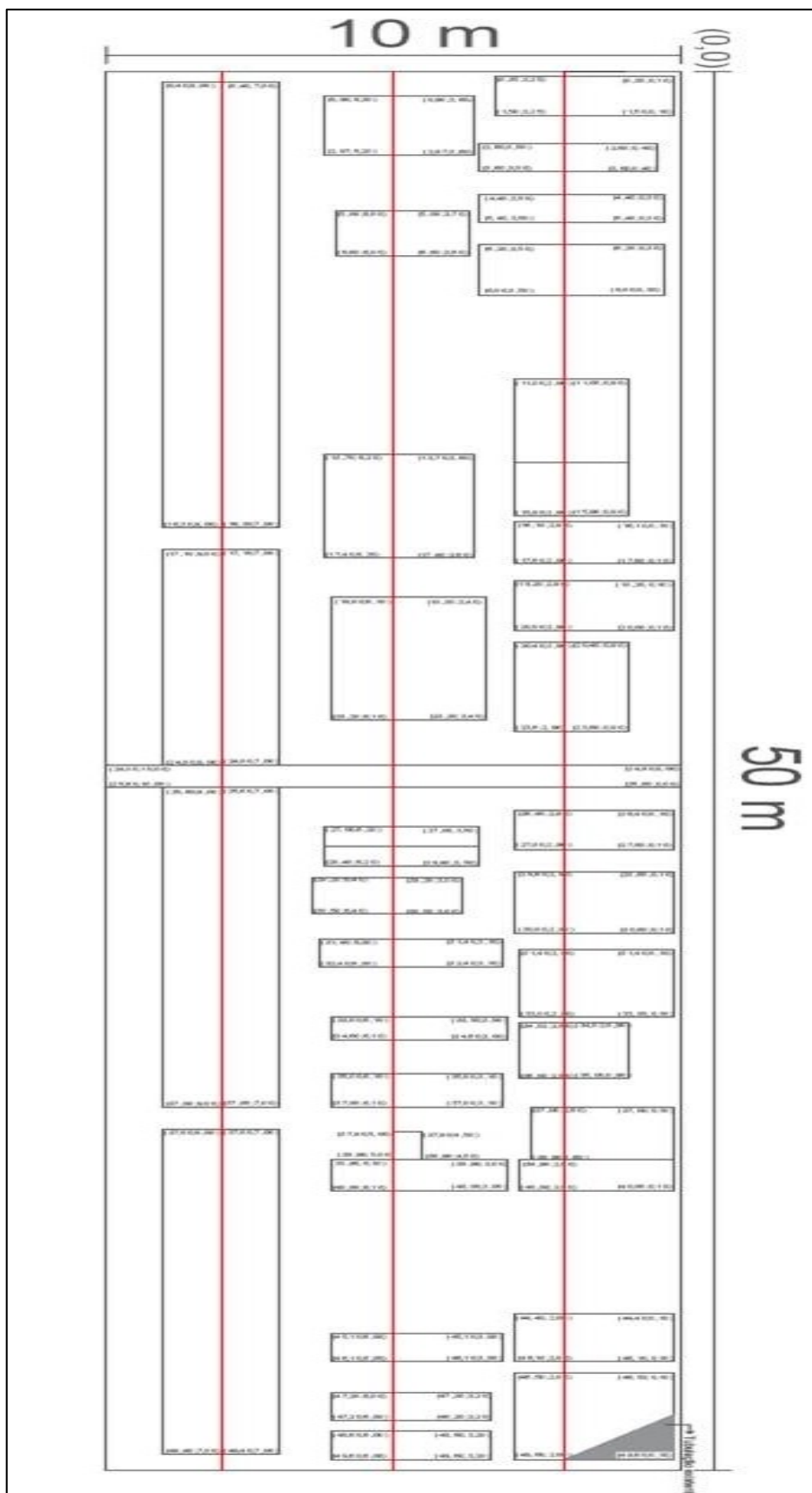
SCGR-II para que as mudanças em relação ao *background* pudessem ser reconhecidas. Nesta ocasião foram definidas linhas espaçadas em um metro uma em relação à outra, iniciando a aquisição na posição 0m e encerrando na posição 10m. Utilizou-se a técnica de aquisição contínua, sem marcadores de localização nas linhas. Os dados levantados nesta campanha serão comparados com os dados da última campanha realizada e descrita no item “d”. A **Figura 5.4** ilustra as linhas de campo definidas para a aquisição de dados. As linhas em vermelho se referem às três principais linhas, onde se encontram o centro dos alvos enterrados, as linhas em azul são as linhas secundárias, onde os alvos não estão precisamente em cima das linhas e as demarcações retangulares são referentes às valas feitas no SCGR-II.

- c) Aquisição de dados – 19/09/2016:** Campanha de aquisição de dados realizada com o objetivo de testar uma técnica de aquisição, na qual esta foi realizada nas três principais linhas do sítio controlado (linhas 1,2 e 3 – em 2m, 5m e 8m respectivamente). Utilizou-se a técnica de aquisição discreta, com uma medida por metro percorrido em cima de cada linha, e também a técnica de aquisição contínua, com marcação de posição a cada dez metros percorridos em cada linha. O resultado obtido será comentado no capítulo sete desta dissertação. A **Figura 5.5** ilustra as linhas de campo definidas para a aquisição de dados. As demarcações retangulares são referentes às valas feitas no SCGR-II.
- d) Aquisição de dados – 05/10/2016:** Esta campanha teve o objetivo de testar uma técnica de aquisição, na qual foi realizada na linha 2 (5m) do SCGR-II. Utilizou-se a técnica de aquisição discreta, com uma medida a cada meio metro percorrido em cima da linha 2. O resultado obtido entrará na discussão do capítulo sete. A **Figura 5.6** ilustra a linha (linha 2 – 5m) de campo definida para a aquisição dos dados. As demarcações retangulares são referentes às valas feitas no SCGR-II.
- e) Aquisição de dados – 15 a 17/02/2017:** Campanha realizada com o objetivo de verificar eventuais diferenças no comportamento geoeletrico levantado em 29/08/16. Nesta ocasião foram definidas linhas espaçadas em meio metro uma em relação à outra, iniciando a aquisição na posição 0 e encerrando na posição 10m. Utilizou-se a técnica de aquisição contínua, com marcação de localização nas linhas a cada 10m. Dobrou-se o grau de detalhamento em relação à primeira campanha de aquisição, melhorando o mapa de anomalias de resistividade do sítio. Os dados levantados nesta campanha serão comparados com os dados da primeira campanha e serão discutidos no capítulo sete. A **Figura 5.7** ilustra as linhas de campo definidas para a aquisição de dados. As linhas em vermelho referem se as três principais linhas, onde se encontram o centro dos alvos enterrados, as linhas em azul são as linhas secundárias, onde os alvos

não estão precisamente em cima das linhas e as demarcações retangulares são referentes às valas feitas no SCGR-II.



**Figura 5.4.** Linhas de campo realizadas na campanha de aquisição de 29 de agosto de 2016. Linhas em vermelho se referem às três principais linhas, onde se encontram o centro dos alvos enterrados.



**Figura 5.5.** Linha de campo (linha 2 – 5m) realizada na campanha de aquisição de 19 de setembro de 2016.

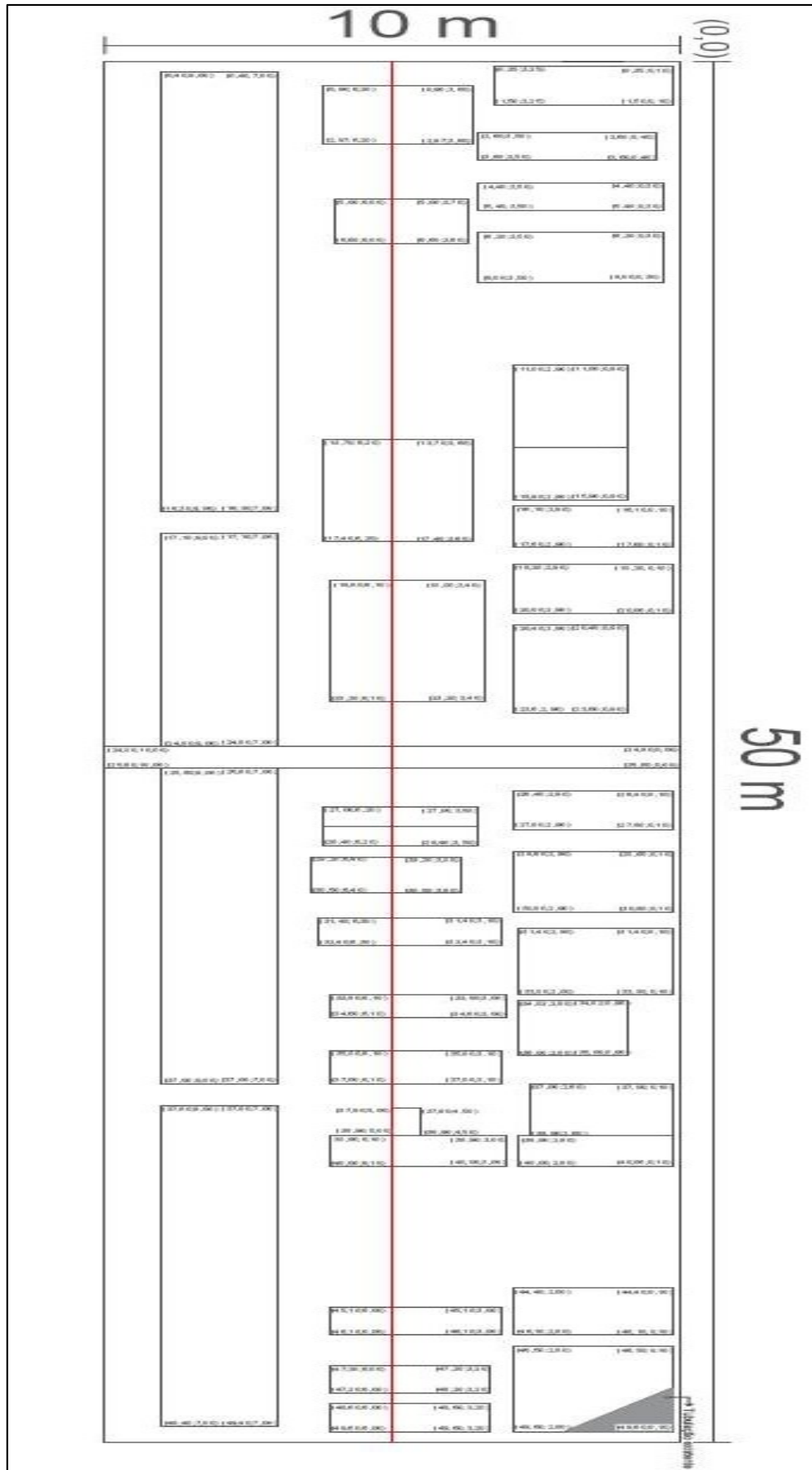
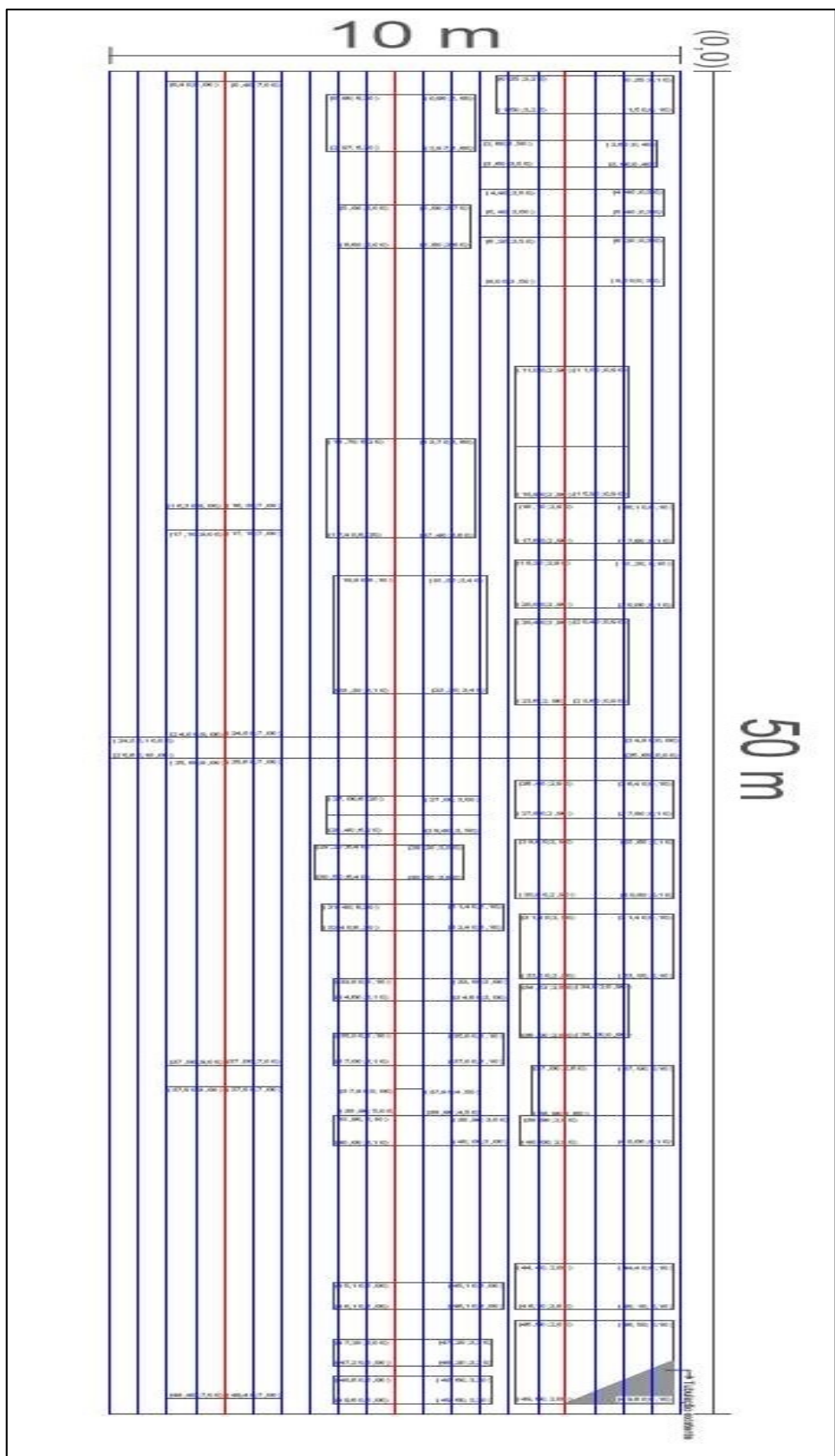


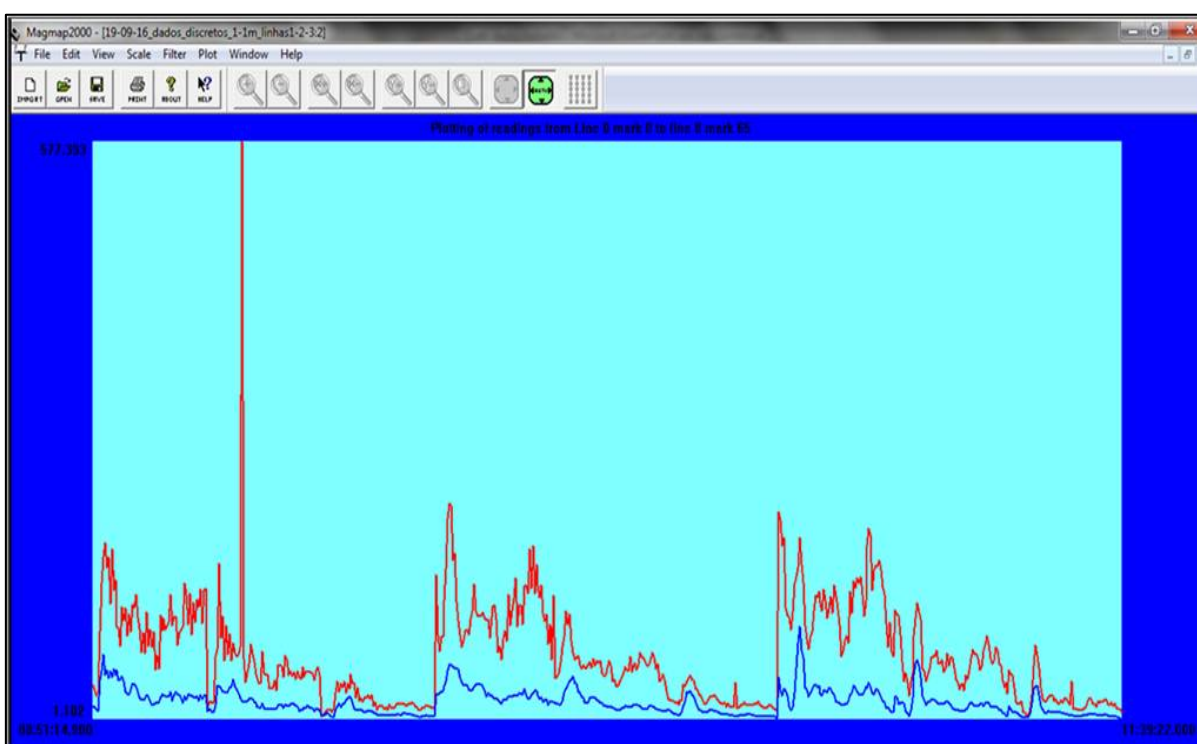
Figura 5.6. Linha de campo realizada na campanha de aquisição de 05 de outubro de 2016.



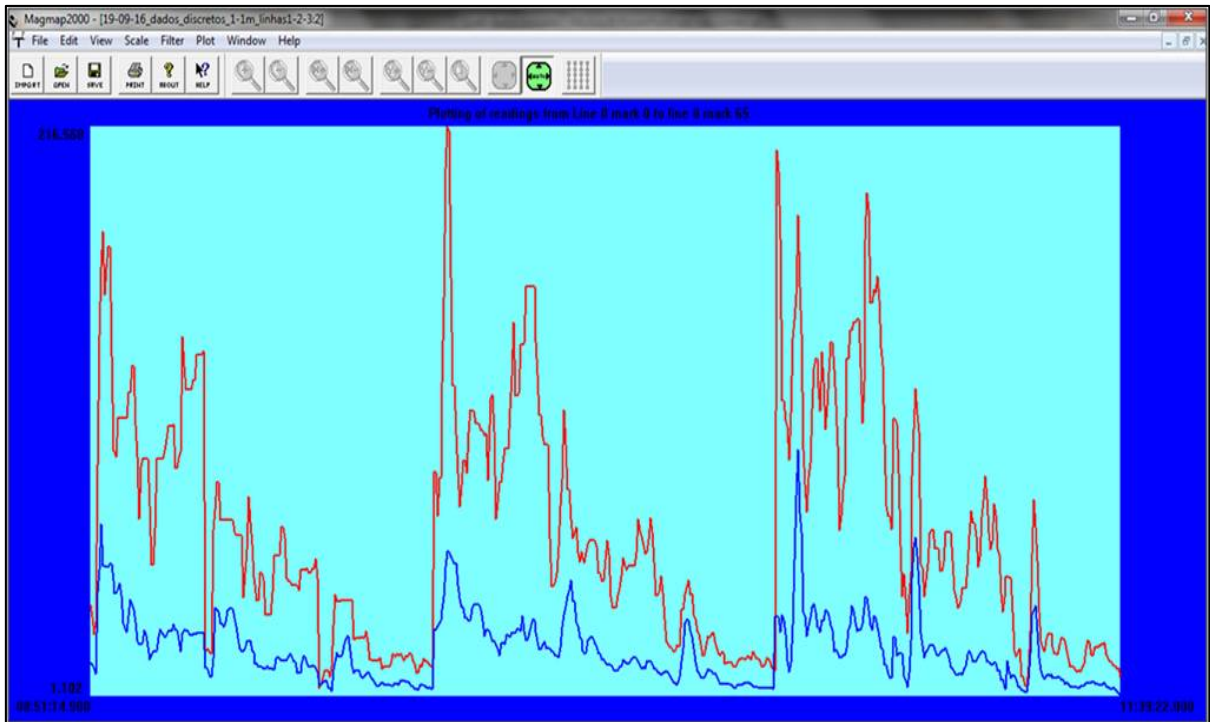
**Figura 5.7.** Linhas de campo realizadas na campanha de aquisição entre os dias 15 a 17 de fevereiro de 2017. Linhas em vermelho se referem às três principais linhas, onde se encontram o centro dos alvos enterrados.

#### 5.4. Tratamento dos Dados de Campo

Após a aquisição das medidas de resistividade aparente em campo é necessário realizar um tratamento inicial dos dados para que os sinais mais ruidosos sejam eliminados e não interfiram na interpolação das demais medidas. Primeiramente, as informações coletas em campo devem ser baixadas para um computador e então trabalhadas com a utilização do programa MagMap2000, desenvolvido pela GEOMETRICS INC. e fornecido pelo fabricante do equipamento. Após abrir o programa, os dados deverão passar por uma filtragem preliminar de ruídos para a retirada de “spikes”. As **Figuras 5.8 e 5.9** sumarizam o processo de filtragem realizada pelo MagMap2000.

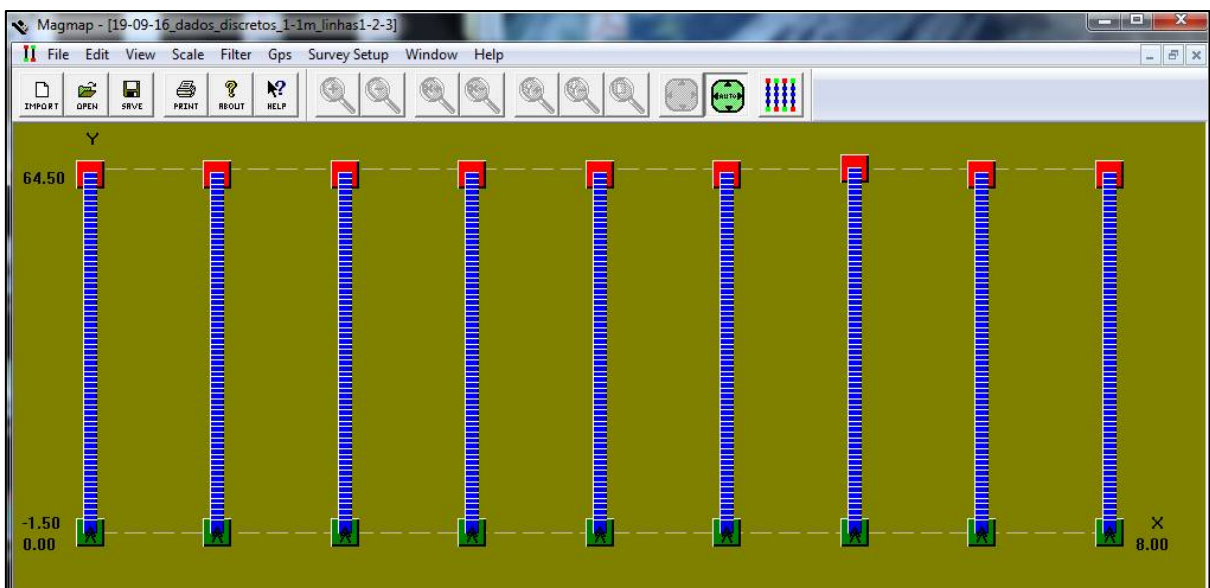


**Figura 5.8.** Dados visualizados no programa MagMap2000, com a ocorrência de medições anômalas, anteriormente à filtragem dos dados (GEOMETRICS, 2001).



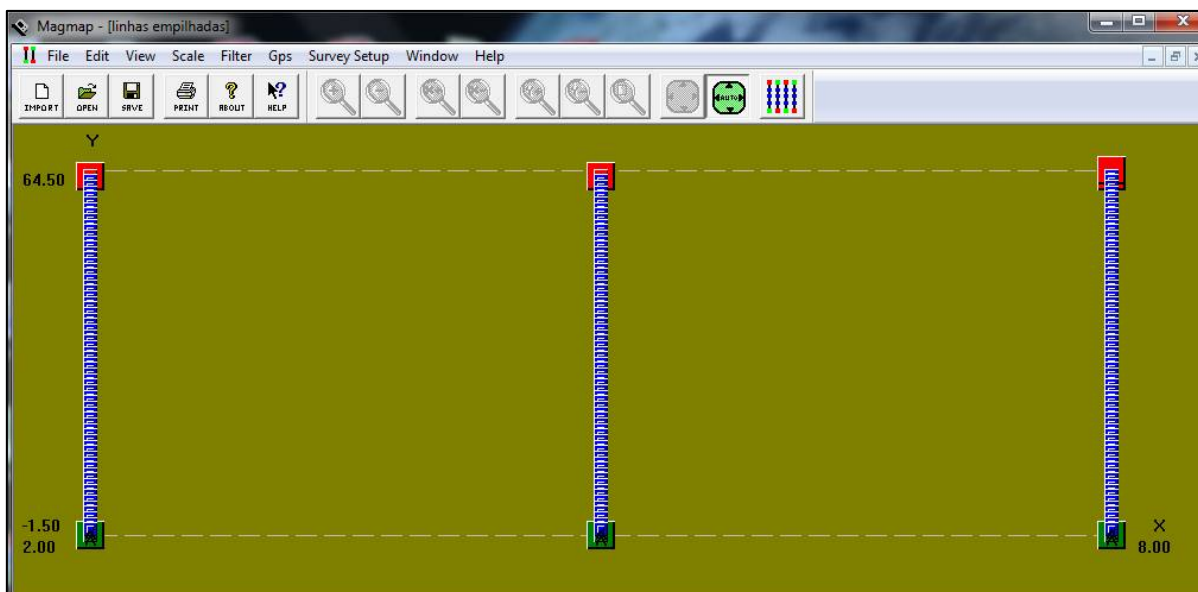
**Figura 5.9.** Dados visualizados no programa MagMap2000, sem a ocorrência de medições anômalas, após a filtragem dos dados (GEOMETRICS, 2001).

Após a retirada das informações discrepantes, deve-se empilhar as linhas adquiridas em campo para que o processamento reconheça a exata localização de cada linha de campo. Este procedimento também é realizado através do programa MagMap2000. As **Figuras 5.10 e 5.11** mostram esta etapa de processamento dos dados.



**Figura 5.10.** Linhas de campo antes do empilhamento nas posições reais de campo (GEOMETRICS, 2001).

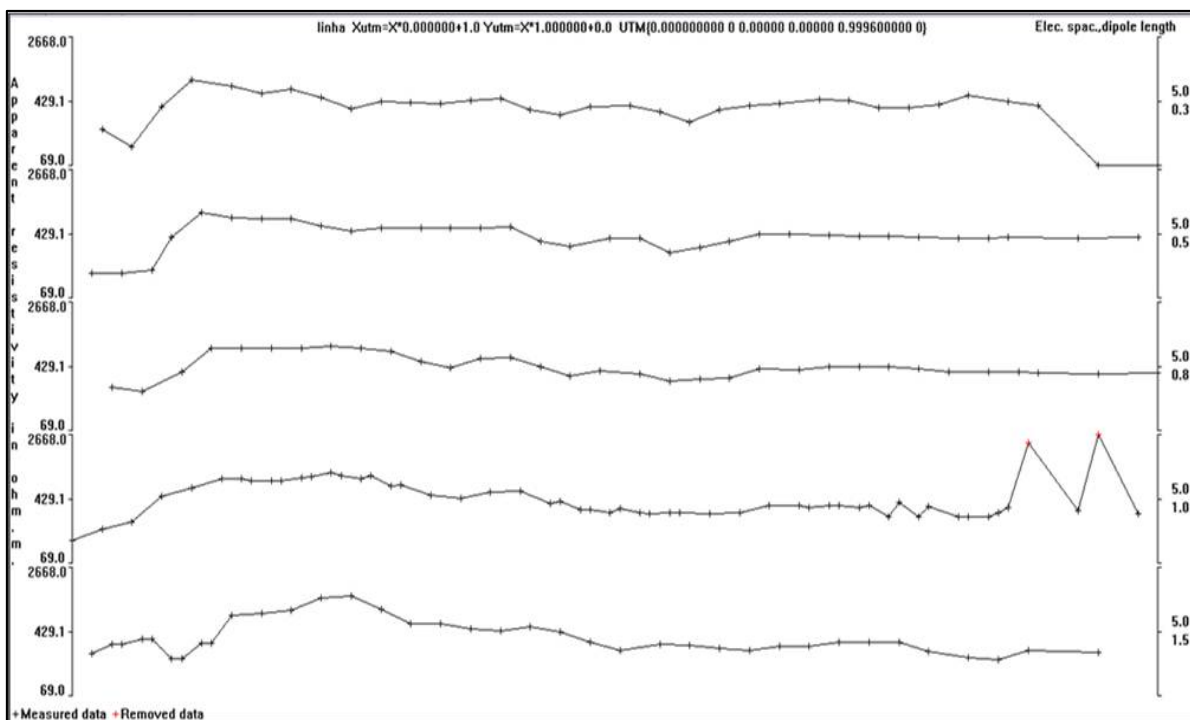




**Figura 5.11.** Linhas de campo após o empilhamento nas posições reais de campo (GEOMETRICS, 2001).

Com as linhas empilhadas de acordo com as posições reais de campo são criados arquivos DAT para cada perfil de interesse. Esse formato de arquivo é reconhecido pelos programas Res2DInv e Res3DInv.

O uso destes programas, desenvolvidos por GEOTOMO SOFTWARE (2003), tem como proposta a utilização das informações de resistividade aparente levantadas em campo para a realização do processo de inversão de dados, no qual permite a produção de um modelo de resistividade real para cada linha de campo. Porém, anteriormente à inversão dos dados, retiram-se eventuais dados discrepantes que persistiram à filtragem de dados do MagMap2000. Para a retirada destes pontos anômalos é necessário utilizar a opção de edição de dados do programa Res2DInv e retirá-los manualmente. A **Figura 5.12** sumariza o processo de retirada.

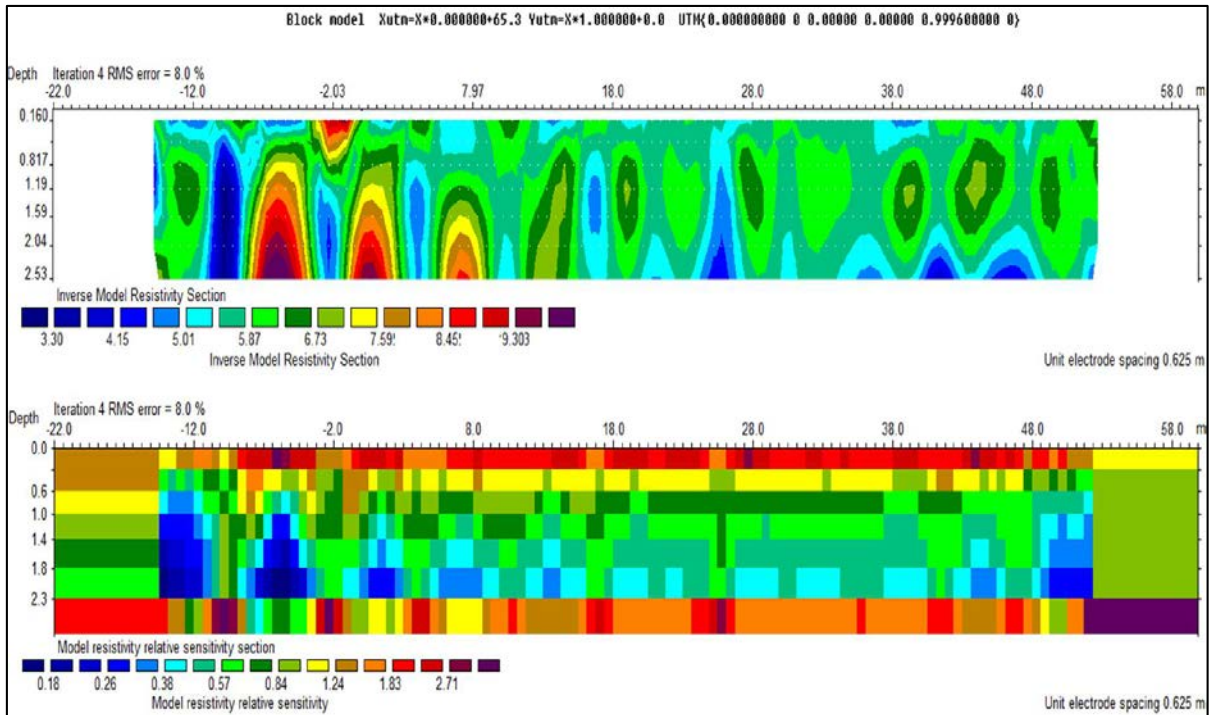


**Figura 5.12.** Retirada de pontos discrepantes remanescentes através do programa Res2DInv. Os pontos em vermelho são as informações anômalas que serão excluídas do corpo de dados (GEOTOMO SOFTWARE, 2003).

## 5.5. Inversão de Dados

Através do uso do programa Res2DInv (GEOTOMO, 2003), realizou-se o a inversão dos dados obtidos em cada linha do SCGR-II. O processo de inversão foi feito através do método de contraste de suavização por mínimos quadrados.

O método matemático de mínimos quadrados se utiliza da técnica de inversão baseada em células, onde o conjunto de dados é dividido espacialmente em células, reconhecendo cada célula como um bloco retangular (*grid*), no qual os parâmetros investigados possuem valores constantes. O arranjo dos blocos retangulares depende do número de informações, baseando-se na resistividade elétrica aparente, na posição espacial e na profundidade teórica de cada medida feita pelo equipamento de campo. O software Res2DInv calcula a profundidade de investigação baseado nos conceitos expostos por EDWARDS (1977). A **Figura 5.13** ilustra a malha retangular de blocos utilizada pelo programa. Para o cálculo da matriz jacobiana, necessário para a definição dos valores de resistividade espacialmente, o mesmo programa utiliza o método de otimização Gauss-Newton.



**Figura 5.13.** Malha retangular de blocos com valores de resistividade utilizados para o cálculo da matriz jacobiana através da metodologia Gauss-Newton. Esta figura é uma interface do programa Res2DInv (GEOTOMO SOFTWARE, 2003).

O método Gauss-Newton determina os valores de resistividade elétrica de cada bloco retangular e minimiza a diferença entre os valores de resistividade elétrica medida em campo e os valores de resistividade elétrica calculados pelas iterações, no qual são recalculadas as derivadas parciais da matriz jacobiana para todas as iterações matemáticas realizadas (LOKE & BARKER, 1996). Essa diferença entre os valores medidos em campo e os valores sintéticos é conhecida como o erro médio quadrático (Root Mean Square – RMS), no qual quanto menor o erro RMS de um perfil de inversão, maior será a semelhança entre os dados medidos em campo com os dados sintéticos produzidos pelo programa. Esse método aumenta o tempo de processamento dos dados pelo programa, porém apresenta bons resultados para grandes contrastes de resistividade, sendo eficiente para a detecção de alvos pontuais (LOKE & DAHLIN, 2002).

BORGES (2007) realizou uma análise entre o erro médio quadrático – RMS – e o modelo obtido com o objetivo de definir o número ideal de iterações necessárias para cada perfil de resistividade e concluiu que sete iterações matemáticas são suficientes, pois acima de três iterações, não são observadas mudanças significativas dos erros RMS e, portanto, não alteram significativamente a qualidade dos perfis de resistividade produzidos.

## 5.6. Análise 3D dos Dados de Campo

A análise 3D das informações de resistividade real levantadas em campo tem como objetivo auxiliar na interpretação 2D do conjunto de dados, permitindo a melhor visualização das anomalias em escala real de campo.

Para a análise do conjunto de dados em três dimensões foram utilizados os programas Res3DInv (GEOTOMO SOFTWARE, 2003) e Voxler (GOLDEN SOFTWARE, 2012).

Através do programa Res3DInv, realizou-se o processo de inversão, feita de forma semelhante ao programa Res2DInv, porém com todo o conjunto de dados levantados na campanha de 15 a 17/02/2017 (ver item 5.3). Após a inversão dos dados de campo, foi realizada a exportação do conjunto de dados invertidos para o programa Voxler, transformando o arquivo .INV gerado pelo Res3DInv em um arquivo .XYZ.

No programa Voxler, os dados de campo foram dispostos em três dimensões, com a criação de curvas de isovalores e de secções de resistividade real dispostas de acordo com o trecho analisado. Os resultados da análise 3D serão expostos e discutidos no capítulo 7 desta dissertação.

## 6. MODELAGEM

### 6.1. Aplicações da Modelagem

Modelos fundamentados por princípios matemáticos têm como objetivo facilitar a compreensão das respostas obtidas em aquisições de campo. Através da modelagem de dados matemáticos é possível aumentar o entendimento e prever o comportamento de um determinado fenômeno e de suas tendências temporais. Devido a esta característica dos modelos matemáticos, podem-se prevenir acontecimentos e comportamentos indesejáveis de um determinado fenômeno, fazendo-se possível analisar e formular tendências, o que sem sombra de dúvidas a torna uma ferramenta muito importante para o planejamento futuro (VOGT, 2002).

### 6.2. Simulações com o Programa ResIX IP2Di

Foram construídos modelos sintéticos das três linhas do SCGR-II com o intuito de se conhecer o comportamento geoeletrico esperado dos diversos alvos presentes neste local. Para tanto, utilizou-se o programa ResIX IP2Di v3 (INTERPEX, 1996), que realiza o cálculo teórico de modelos geoeletricos através do método dos “Elementos Finitos” (RIJO, 1977). Após este cálculo teórico ser realizado, o programa gera um arquivo de formato compatível ao Res2DInv no qual é realizada a inversão 2D dos dados através do método matemático dos “Mínimos Quadrados” (INMAN, 1975). Informações mais detalhadas sobre os métodos matemáticos utilizados no tratamento dos dados desta pesquisa podem ser consultadas em FINK et al. (1990).

O modelo sintético utilizado é constituído de uma malha retangular, na qual se estende lateralmente do primeiro eletrodo de emissão de corrente ao último eletrodo de medição de potencial. Cada célula da malha é dividida em quatro triângulos para gerar a malha do elemento finito, na qual é possível a construção de polígonos que atribuem valores de resistividade e dimensões distintas aos corpos (representados pelos polígonos formados). A profundidade teórica do modelo gerado irá depender do arranjo de eletrodos utilizado e do distanciamento total entre o primeiro e o último eletrodo.

Os polígonos representados no modelo são gerados pelo intérprete, que seleciona o número de vértices e a posição em “x” e “z” de cada vértice no modelo criado. Dessa forma, na modelagem poligonal o intérprete define um valor de resistividade de fundo (“background”), resistividade das valas e os valores de resistividade aproximados de cada polígono (alvos enterrados).

É possível definir um valor distinto de resistividade entre o interior de um alvo e sua superfície, como no caso de um tambor metálico vazio, onde em seu interior há somente a presença de ar (altamente resistivo) e sua superfície é composta por liga metálica (altamente condutivo). Dessa forma, é possível prever qual será o material mais representativo eletricamente para alvos de diferentes tamanhos e formas, porém com a limitação de duas dimensões.

O intérprete do modelo fornece ao programa as informações de declividade, arranjo de eletrodos, distância entre eletrodos em escala de campo e número de eletrodos utilizados, de forma que o resultado final represente a resistividade aparente dos alvos (polígonos) em contraste com o “*background*” em uma pseudo-seção.

As pseudo-seções geradas pelo programa serão posteriormente trabalhadas no programa Res2DInv, para que os resultados obtidos possam passar pelo processo de inversão de dados e geração dos perfis de resistividade real.

Uma vez entendido o processo de geração de resultados através da modelagem de dados, foi executada a etapa de construção dos modelos, definindo-se as características utilizadas. Sendo assim, utilizou-se declividade neutra, arranjo de eletrodos dipolo-dipolo, distância entre eletrodos de 0,5 metros e 20 eletrodos por modelo, gerando perfis com 10 m de extensão no eixo “x” e 1,35 metros de profundidade. Os polígonos (delimitação espacial dos alvos) foram posicionados de acordo com o posicionamento real no SCGR-II e seus valores de resistividade foram definidos de acordo com a composição do material utilizado e com o conteúdo interno presente em cada alvo. Os tipos de materiais utilizados bem como a localização dos mesmos podem ser consultados no capítulo 3 desta dissertação.

Apesar da não existência de programas de modelagem voltados especificamente para o caminhamento elétrico capacitivo, as características escolhidas para a modelagem de dados desta pesquisa foram assim definidas com o intuito de mais se aproximar das características de campo do equipamento OhmMapper. Porém mesmo com a escolha do menor distanciamento de eletrodos disponível no programa utilizado, o que aumenta a resolução em troca da perda de profundidade de alcance, os resultados produzidos podem apresentar divergências significativas dos resultados reais devido às características de aquisição distintas entre o caminhamento elétrico capacitivo e o convencional (com estaqueamento de eletrodos).

### 6.2.1 Valores de Resistividade Utilizados para a Modelagem de Dados no ResIXIP2Di.

Durante a instalação do SCGR-II, foram feitas valas em meio ao solo natural do sítio controlado (*background*) para a colocação dos alvos de estudo, e após o fechamento das mesmas gerou-se no terreno uma mudança de compactação do solo entre a região das valas e a região não alterada. Devido ao aumento da quantidade de vazios no solo na região das valas (solo menos compactado), ocorreram alterações dos valores de resistividade, causando o aumento do valor de resistividade média das linhas do SCGR-II. Para que a modelagem realizada atingisse um elevado nível de representatividade da situação real, os modelos criados levaram em conta o valor médio de resistividade do solo antes e depois da colocação das valas, sendo possível determinar a resistividade média das valas e do solo não revirado. Dessa forma, tornou-se possível a criação de modelos que consideram o solo original ("*background*"), o solo revirado (valas feitas para a colocação dos alvos) e os alvos de estudo. O valor médio de resistividade do solo natural para as 3 linhas do SCGR-II foi obtido através da média dos resultados coletados, para cada linha, durante os trabalhos de campo do dia 27 de março de 2016. Após a instalação do SCGR-II, realizou outra campanha de aquisição de dados no dia 29 de agosto de 2016 e os valores de resistividade adquiridos foram utilizados para o cálculo da resistividade média de cada linha. Os valores de resistividade média do interior das valas foram calculados utilizando-se os valores considerados das aquisições de *background* (aquisição feita em 27 de março de 2016) e após a instalação dos alvos (aquisição feita em 29 de agosto de 2016).

Após a análise de dados de resistividade das três linhas do SCGR-II levantados em campo antes e depois da colocação dos alvos, se estabeleceu os valores de resistividade média utilizados para cada linha, de acordo com a **Tabela 6.1** abaixo:

**Tabela 6.1.** Valores de resistividade utilizados para a modelagem de dados, de acordo com a porção de solo considerada.

	Resistividade média (Ohm.m) - linha 1	Resistividade média (Ohm.m) - linha 2	Resistividade média (Ohm.m)- linha 3
Solo original	349,95	361,56	293,56
Solo com valas	422,72	454,03	464,02
Apenas as valas	1409,08	2494,68	1013,37

Os valores de resistividade utilizados para cada alvo (polígonos) foram definidos de acordo com o valor especificado para cada tipo de material com que os alvos foram fabricados e se encontram na **Tabela 6.2** abaixo.

**Tabela 6.2.** Valores de resistividade utilizados para a modelagem de dados, de acordo com a composição química dos alvos enterrados (BRAGA, 2006; BROOMFIELD, J. 2002; CHAVERINI, V. 1977; MOULSON, A.J. 2003).

Material	Resistividade (Ohm.m)
PVC	$1 \times 10^{14}$
PEAD	$1 \times 10^{14}$
Concreto	5 a $10 \times 10^5$
Aço	$1,6 \times 10^{-7}$
Alumínio	$2,84 \times 10^{-8}$
Ferro puro	$9,2 \times 10^{-7}$
Compostos cerâmicos	10 a 20



## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

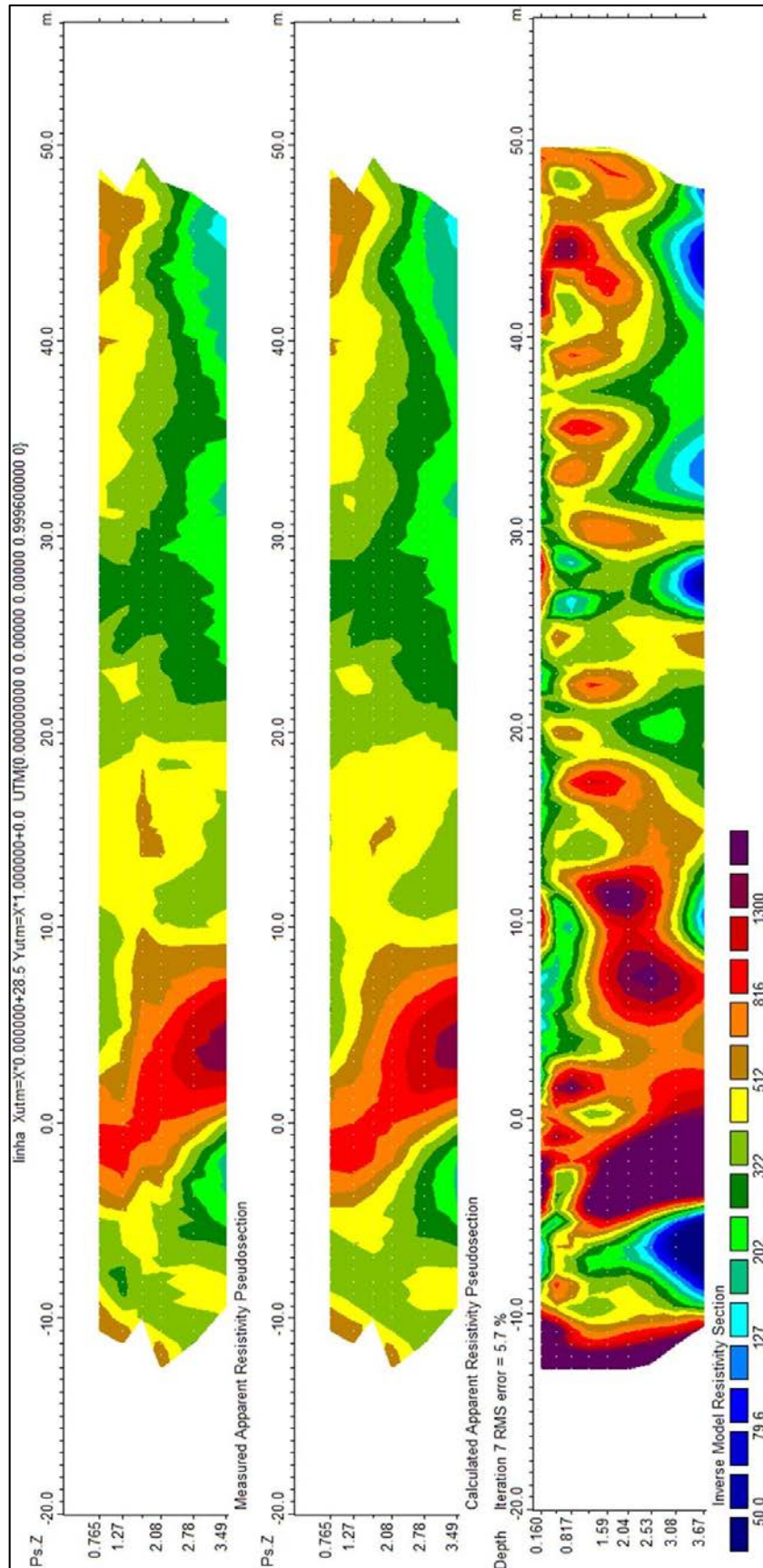
### 7.1. Definição da Melhor Técnica de Aquisição de Dados

Para a definição da melhor técnica de aquisição de dados de campo para o equipamento OhmMapper, foram utilizadas as informações coletadas nas quatro primeiras campanhas após a instalação dos alvos, descritas no item 5.3 desta dissertação. Utilizou-se a linha 2 (5m) do SCGR-II para a comparação entre as técnicas citadas, e posteriormente se aplicou a técnica escolhida na última campanha de aquisição realizada em entre os dias 15 e 17 de fevereiro de 2017.

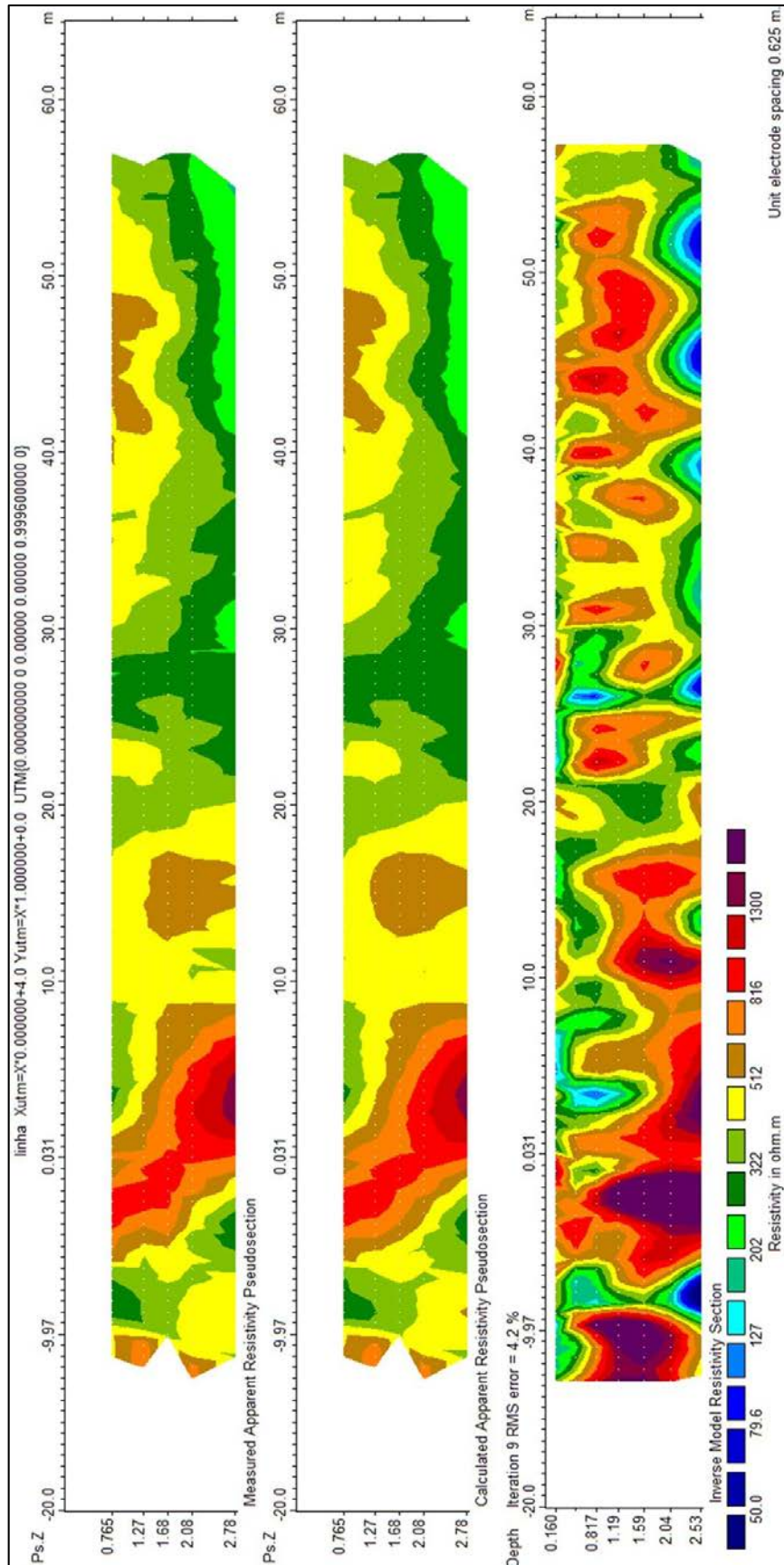
A escolha da técnica mais conveniente para a caracterização de alvos pontuais em subsuperfície, com a utilização do equipamento OhmMapper, levou em consideração os seguintes fatores:

- Qualidade do perfil geoeétrico produzido.
- Tempo necessário para a aquisição de dados em campo.
- Desgaste do equipamento.

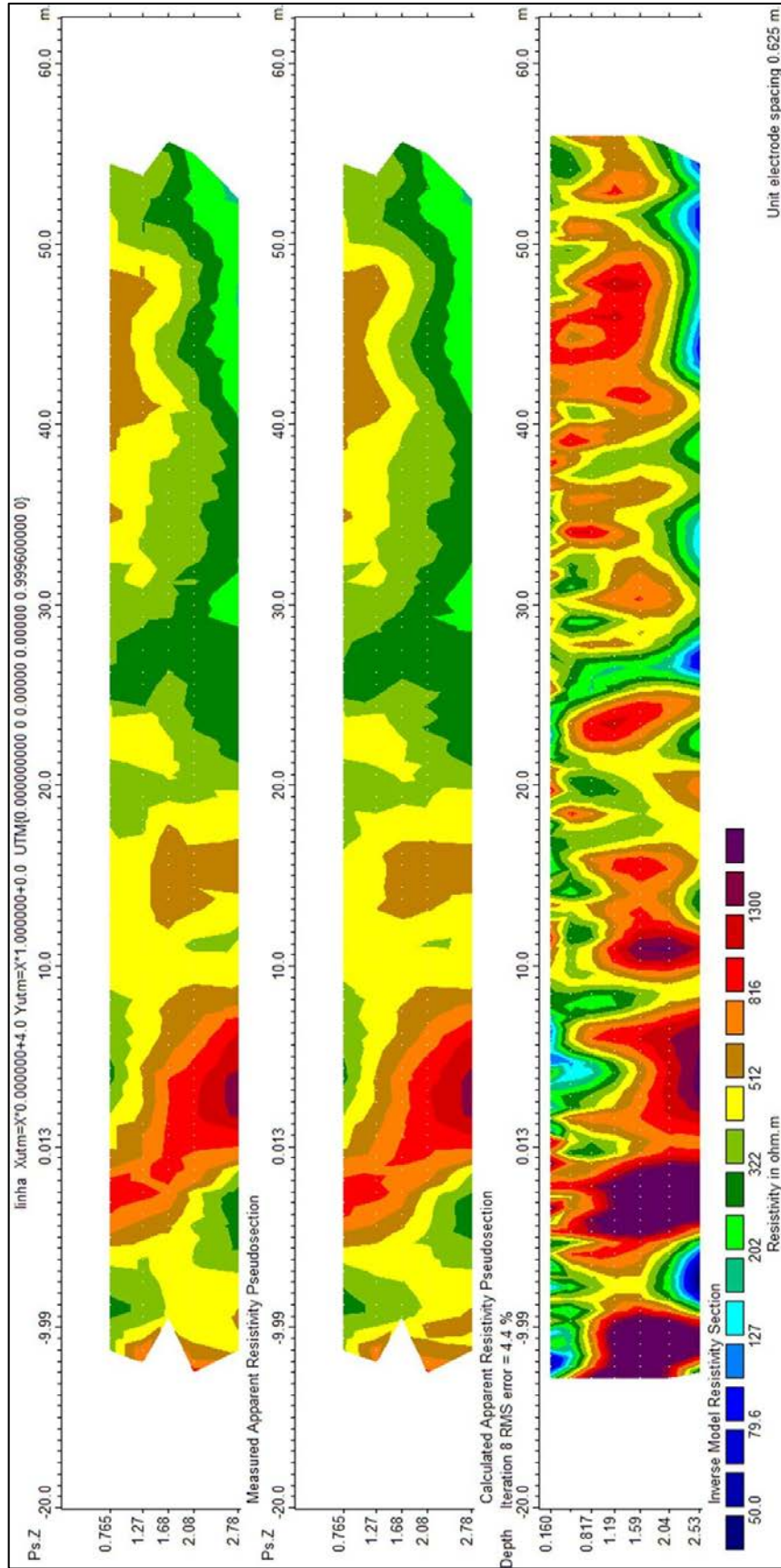
Quanto à qualidade dos perfis de resistividade produzidos, foram analisados os dados levantados nas três primeiras campanhas de aquisição. As duas técnicas de aquisição apresentaram boa qualidade dos perfis de resistividade, com boa semelhança entre os perfis de resistividade aparente medidos e também entre os perfis de resistividade real, após a inversão. O perfil gerado pela técnica de aquisição contínua e marcação de posição a cada 10m (**Figura 7.2**) apresenta ligeira superioridade na demarcação do tubo metálico guia, na posição de 25m e a 0,5m de profundidade, em relação ao perfil de aquisição contínua da primeira campanha (**Figura 7.1**) e aos perfis de aquisição discreta (**Figuras 7.3 e 7.4**). Analisando-se somente os perfis de aquisição contínua (Figuras 7.1 e 7.2) nota-se que os contrastes de resistividades são mais bem definidos com a marcação de posição a cada 10m percorridos sobre a linha (Figura 7.2), principalmente em profundidades menores de até um metro, como por exemplo nos trechos entre 0 e 10m, em 25m, 40m e 45m.



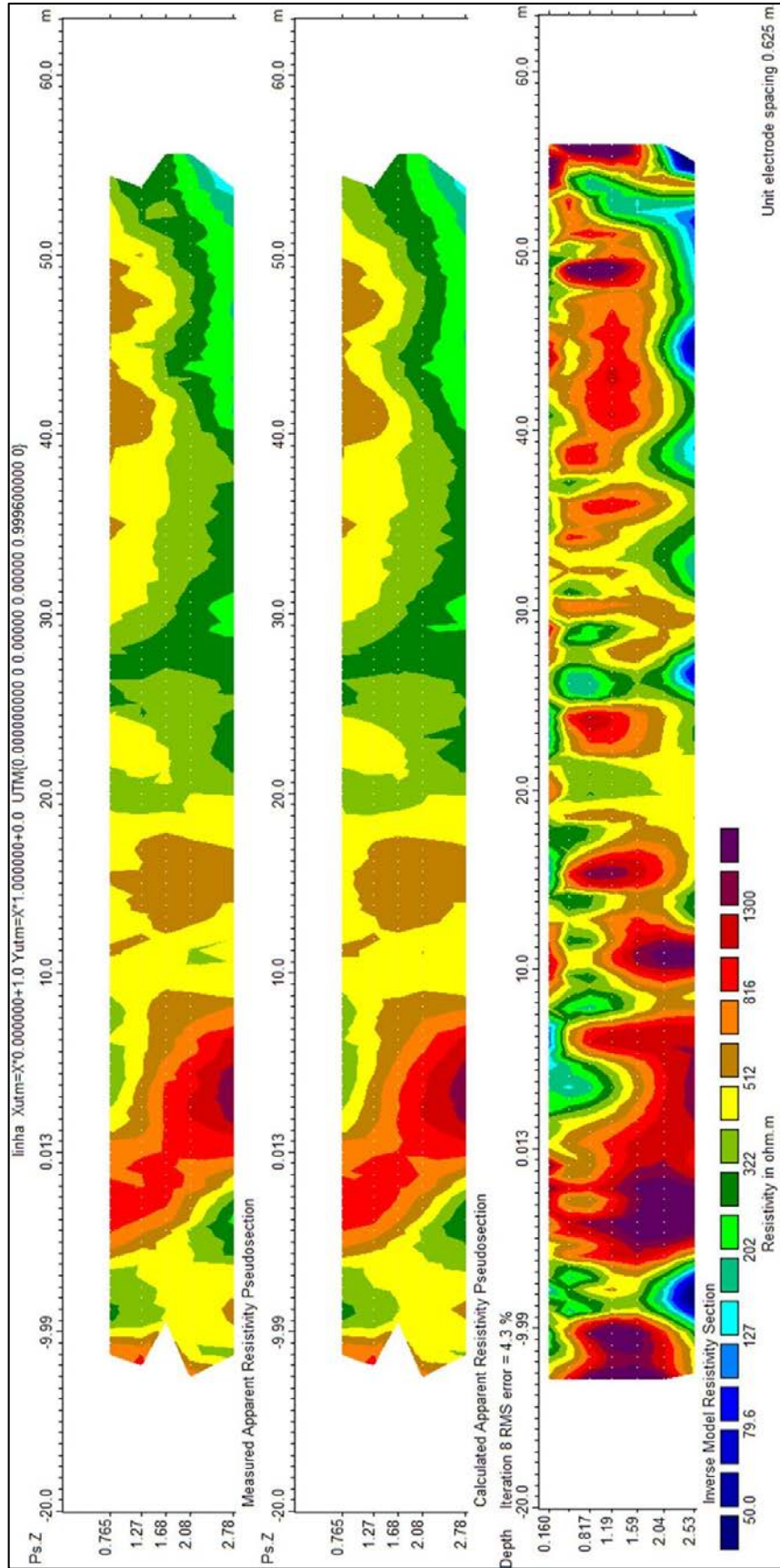
**Figura 7.1.** Perfil de resistividade da linha 2 (5m), realizado em 29/08/16, através da técnica de aquisição contínua e sem marcação de posição ao longo da linha.



**Figura 7.2.** Perfil de resistividade da linha 2 (5m), realizado em 19/09/16, através da técnica de aquisição contínua, com marcação de posição a cada 10m percorridos ao longo da linha.



**Figura 7.3.** Perfil de resistividade da linha 2 (5m), realizado em 19/09/16, através da técnica de aquisição discreta, com medidas a cada metro percorrido ao longo da linha.



**Figura 7.4.** Perfil de resistividade da linha 2 (5m), realizado em 05/10/16, através da técnica de aquisição discreta, com medidas a cada meio metro percorrido ao longo da linha.

Portanto, em termos de qualidade, ambas as técnicas utilizadas apresentam bons resultados, porém a técnica de aquisição contínua, com marcação de posição a cada 10m percorridos apresentou ligeira superioridade na definição dos contrastes em menores profundidades (até um metro). Esse comportamento talvez se deva ao maior número de medidas feitas pelo equipamento em modo de aquisição contínua, onde são feitas 2 medições por segundo. Como exemplo, podemos considerar que o operador de campo ande à velocidade média de 3km/h durante a aquisição contínua de dados em uma linha do SCGR-II, o que levaria 1min para completar os 50m de extensão e, portanto o equipamento registraria 120 medidas ao final do trecho; em uma aquisição discreta, com uma medida a cada 0,5m, teríamos um total de 100 medidas ao término da linha.

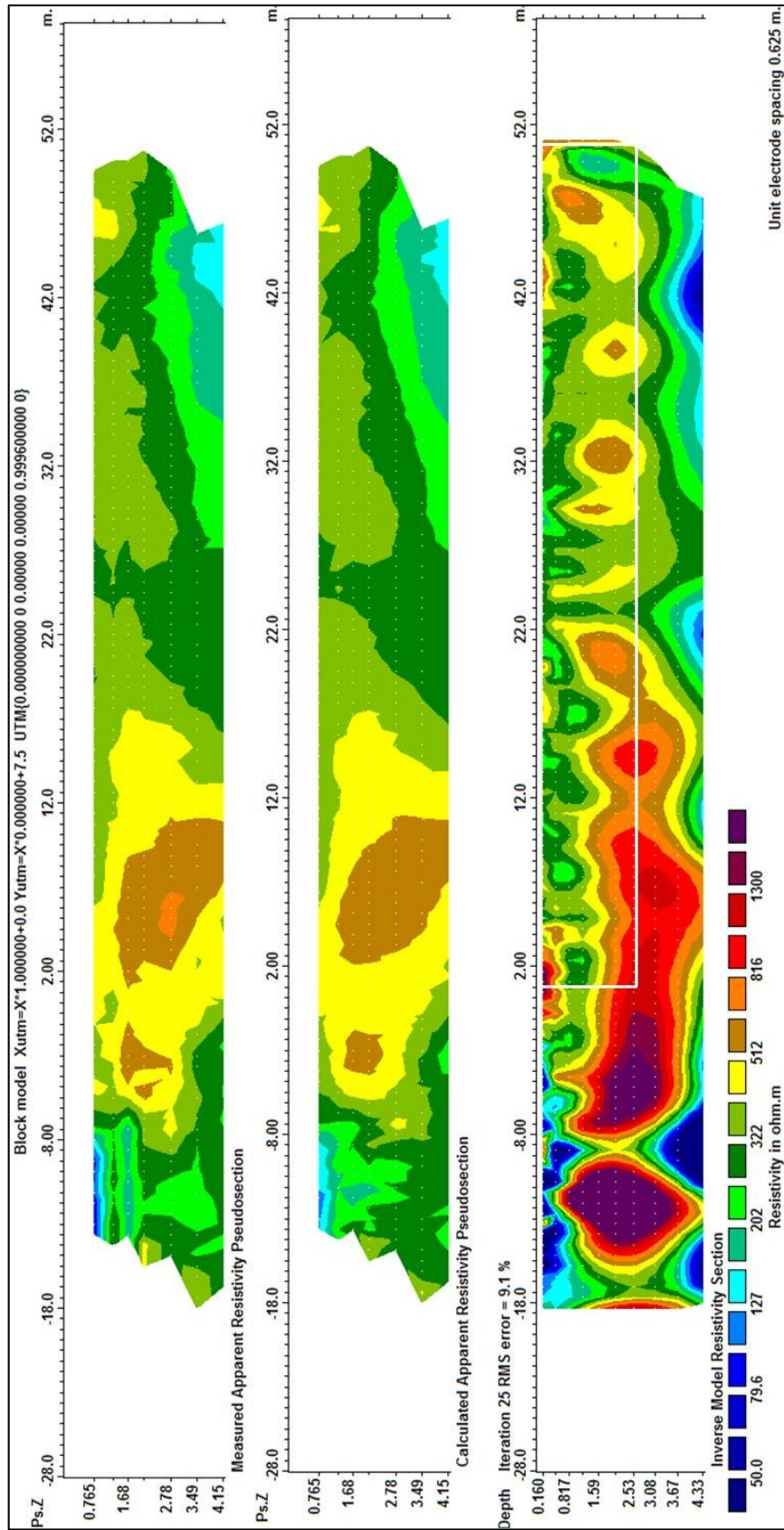
Outro fator que deve ser considerado na escolha da técnica de aquisição de dados é o tempo necessário para a aquisição total das linhas. Este fator não é determinante na escolha da técnica, mas se torna bem relevante em maiores escalas de aquisição. Na última campanha de campo realizada entre os dias 15 e 17 de fevereiro de 2017, foram definidas 21 linhas de aquisição, onde se utilizou a aquisição contínua. Caso este campo tivesse sido realizado através da técnica discreta, a aquisição total dos dados demoraria muito mais tempo; os dados de OhmMapper devem ser adquiridos no menor espaço de tempo possível devido à grande sensibilidade do equipamento com mudanças de umidade no solo (NIU Q. et al., 2014). Portanto, a técnica de aquisição contínua apresenta grande vantagem em relação à aquisição discreta, quando considerado o tempo total necessário para a aquisição dos dados.  $Fat_c > Fat_d$

A preservação física do equipamento também foi levada em consideração no desenvolvimento desta pesquisa. Após a realização das campanhas de campo de 19/09/16 e 05/10/16, onde foi utilizada a técnica de aquisição discreta, o equipamento apresentou problemas em seus conectores, tendo sido necessário realizar reparos para que o mesmo pudesse ser utilizado na última campanha de campo. Acredita-se que a maior força aplicada aos conectores entre as paradas para as medições tenha contribuído para a avaria no equipamento. Devido a esse fator, a aquisição contínua causou menor impacto ao equipamento e, portanto, é o mais adequado para o objetivo proposto.

Levando os três fatores expostos acima, a técnica de aquisição contínua, com a marcação de posição a cada 10m, se mostrou a técnica mais apropriada para o desenvolvimento deste projeto. Devido a isso, os dados da última campanha de campo, realizada em fevereiro de 2017, foram adquiridos dessa forma.

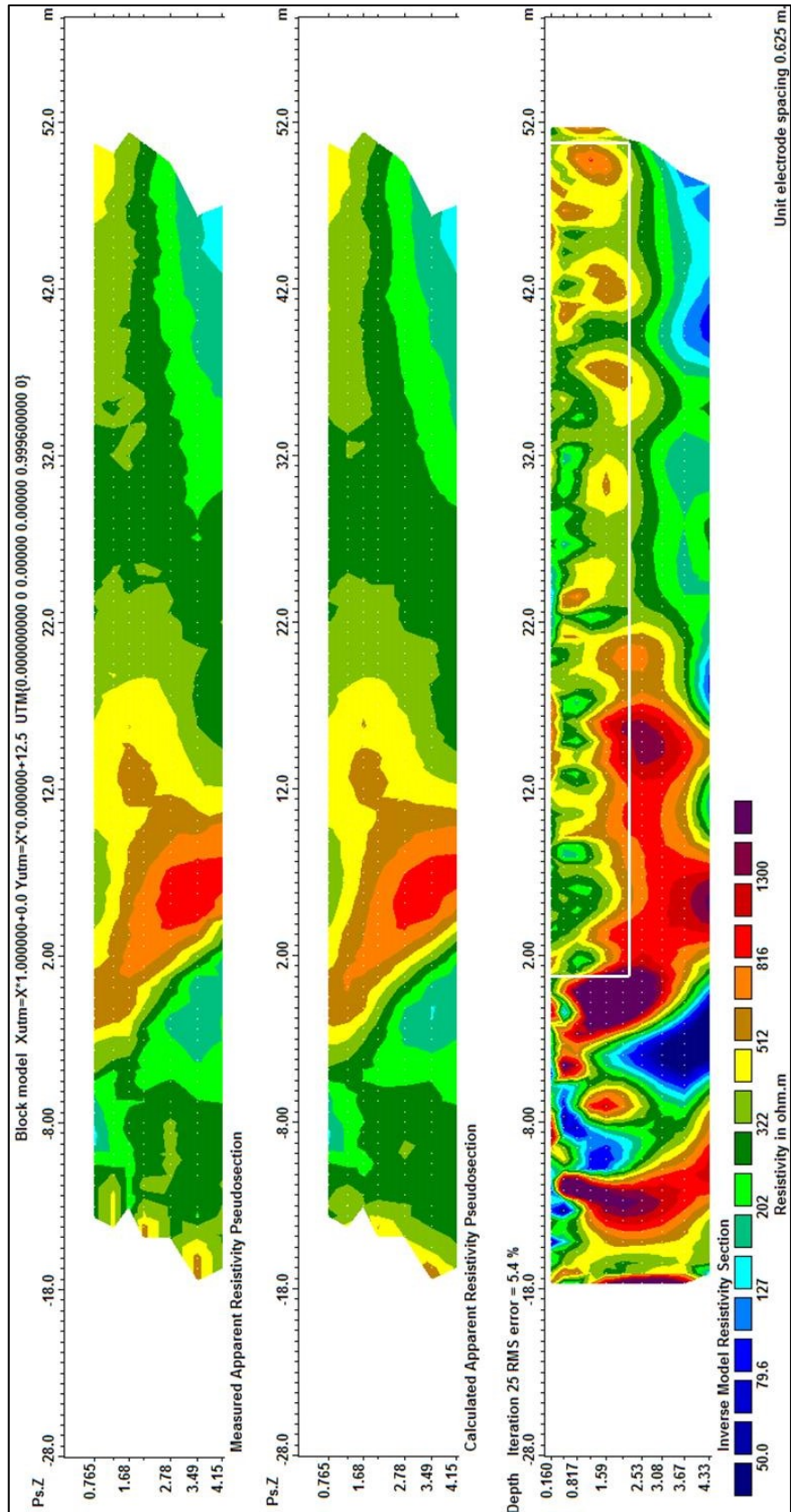
## **7.2. Perfis de *Background* do SCGR-II**

O objetivo da aquisição de dados anteriormente à colocação dos alvos foi compreender o padrão natural das anomalias de resistividade presentes no local de estudos e auxiliar a interpretação das anomalias dos alvos instalados no SCGR-II. As **Figuras 7.5, 7.6 e 7.7** são referentes aos perfis de resistividade das linhas 1, 2 e 3 anteriormente à instalação do SCGR-II.

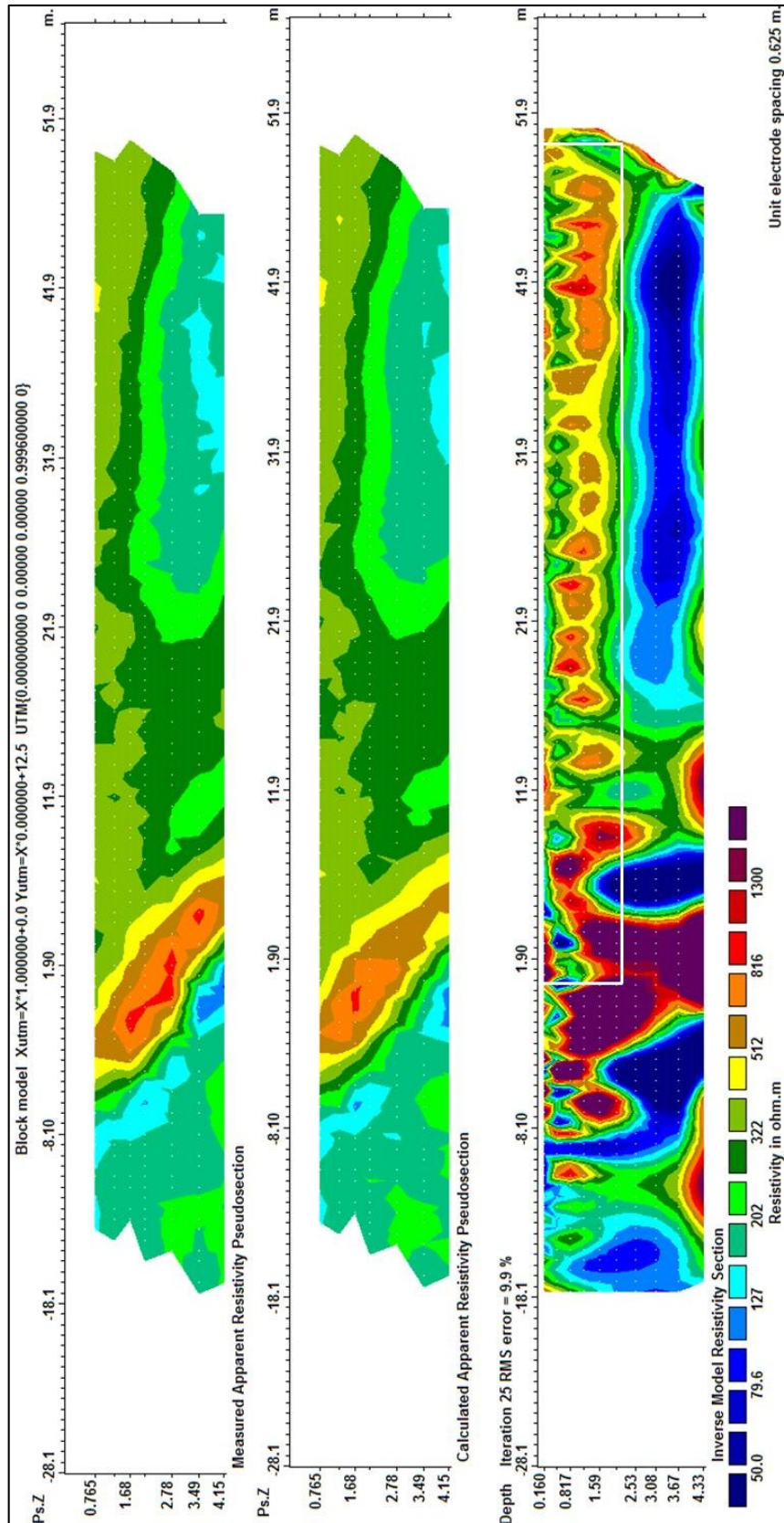


**Figura 7.5.** Dados de *background* da linha 01 - De cima para baixo: Pseudosseção da resistividade aparente medida em campo, pseudosseção da resistividade aparente calculada pelo programa e modelo de inversão dos valores de resistividade.





**Figura 7.6.** Dados de *background* da linha 02 - De cima para baixo: Pseudosseção da resistividade aparente medida em campo, pseudosseção da resistividade aparente calculada pelo programa e modelo de inversão dos valores de resistividade.



**Figura 7.7.** Dados de *background* da linha 03 - De cima para baixo: Pseudosseção da resistividade aparente medida em campo, pseudosseção da resistividade aparente calculada pelo programa e modelo de inversão dos valores de resistividade.

De acordo com as figuras 7.5, 7.6 e 7.7 acima, as três linhas apresentam regiões de alto contraste de resistividade (contraste de até 800 ohm.m em alguns casos), onde são observados “bolsões” mais resistivos, o que podem representar regiões de menor compactação do solo e, conseqüentemente, de maior quantidade de espaços vazios em meio ao material geológico. Esta concentração de espaços vazios em algumas áreas pode ter sido causada por má compactação do aterro do solo presente na área ou também pode representar regiões em subsuperfície com grande número de raízes, uma vez que durante as escavações foram observados diversos trechos com grande concentração de raízes das árvores vizinhas às valas.

De forma geral, as três linhas apresentam valores de resistividade mais baixos em até meio metro de profundidade, e a partir desta profundidade os valores de resistividade aumentam consideravelmente. Este comportamento ocorre possivelmente devido à vegetação superficial, que retém maior umidade no solo nas regiões mais próximas à superfície.

No canto inferior direito dos perfis de inversão (perfis inferiores), em especial na figura 7.7, há um grande contraste horizontal entre a região do SCGR-II e a sua base inferior. Este contraste é devido ao nível aquífero presente na região; a boa definição da presença de água se deve à boa sensibilidade do equipamento na identificação de variações de umidade.

Portanto, notam-se regiões de anomalia de resistividade nas três linhas definidas do SCGR-II. Estas anomalias serão eventualmente úteis para a caracterização dos contrastes de resistividade causados pelas aberturas das valas e colocação dos alvos, ajudando dessa forma na melhor interpretação dos dados de campo. Para que os dados sejam melhor interpretados, serão feitas secções dos perfis totais das linhas de *background* e estas serão comparadas com os trechos respectivos de cada linha após a aquisição dos dados.

### **7.3. Modelagem de Dados**

A simulação geoeétrica produzida para os alvos enterrados no SCGR-II teve como objetivo auxiliar na interpretação dos perfis de resistividade elaborados com os dados reais de campo.

Com o intuito de correlacionar as anomalias de resistividade provenientes dos dados de campo com as anomalias criadas sinteticamente, foram analisados os principais contrastes de resistividade nos perfis sintéticos. Dessa forma, foi possível definir quais são os alvos que obtiveram boa resposta e quais são os alvos não detectados pela modelagem.

Nas figuras dos perfis produzidos, foram delimitadas as valas, representadas por traços em branco, e os alvos, definidos por círculos e retas pretas, para que a localização dos mesmos e a correlação com as anomalias produzidas sejam facilitadas. As escalas de cores de cada perfil são distintas, pois prezou-se pelo melhor contraste resistivo em cada trecho e diferentes trechos não serão comparados entre si. A seguir, serão interpretadas as anomalias produzidas pelos alvos de acordo com o trecho considerado:

### **7.3.1. Análise dos Perfis de Resistividade Sintéticos – Linha 1**

A **Figura 7.8** apresenta os perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, para os trechos de 0-10m (superior), 10-20m e 20-30m (inferior) referentes à linha 1 do SCGR-II. A **Figura 7.9** apresenta os perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, para os trechos de 30-40m (superior) e 40-50m (inferior) referentes à linha 1 do SCGR-II.

A anomalia gerada no primeiro alvo (posição em 1m) apresentou forte contraste resistivo com o seu entorno, contraste este esperado, pois o primeiro alvo trata-se de um tambor plástico vazio, altamente resistivo devido ao seu material de fabricação e ao vazio interno. O segundo alvo (3m) analisado apresentou maior predominância de baixas resistividades, sendo este resultado o esperado em campo devido às características do alvo (tambor plástico cheio de água salgada). O terceiro alvo (5m) não apresentou bom contraste com o entorno, porém o esperado era a diminuição da resistividade na região, devido ao conteúdo do alvo – barril de plástico preenchido com água. O quarto alvo apresentou forte contraste, com valores de resistividade muito acima do entorno.

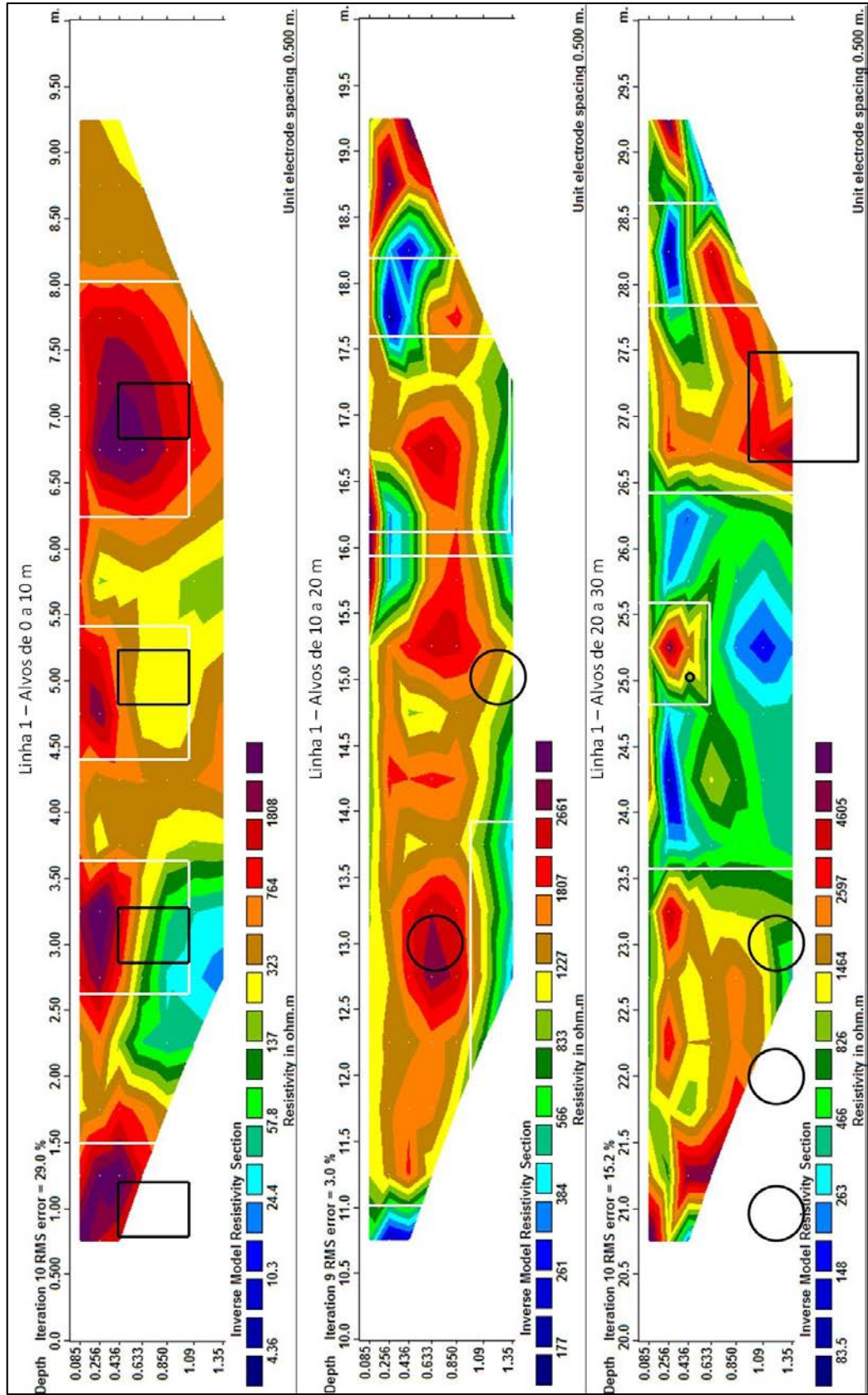
No segundo perfil – trecho entre 10-20m – é possível visualizar o contorno de dois alvos, que representam barris de aço vazios. O alvo presente em 13 metros apresentou grande contraste de resistividade com seu entorno, onde na região do alvo se observam altos valores de resistividade; este comportamento era esperado devido ao grande volume vazio do alvo. O barril enterrado na posição de 15m apresentou anomalia resistiva mais discreta e um pouco descentralizada com o alvo, demonstrando a perda de resolução do método com o aumento da profundidade. Os alvos enterrados em 17 e 19m não aparecem no perfil sintético, pois estão 1,5 e 2,0m de profundidade respectivamente.

Os alvos em 21, 22 e 23 metros apresentam um considerável contraste de resistividade em relação ao entorno; a vala escavada para os três alvos mencionados também apresenta contraste significativo em relação às áreas não escavadas, demonstrando que o modelo sintético é sensível às mudanças de resistividade causadas pela abertura das valas. O cano guia – 20m – apresentou maior resistividade em relação ao

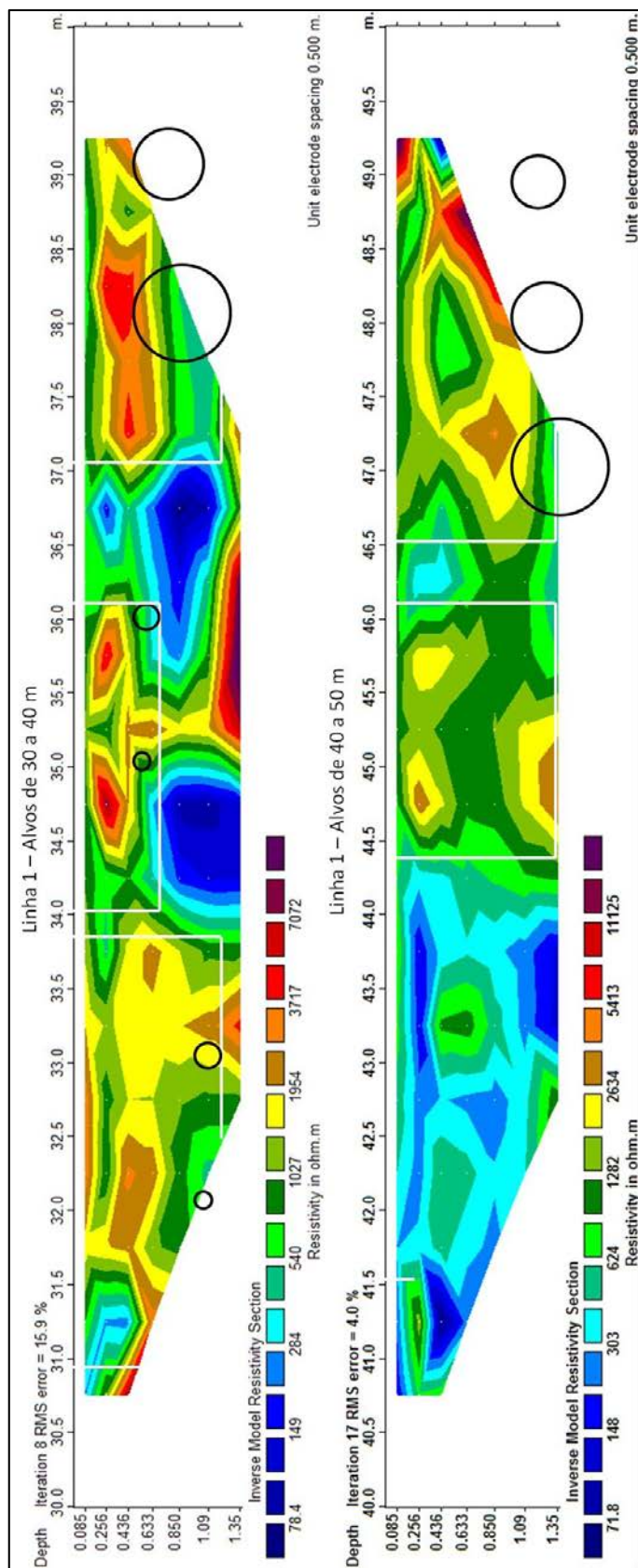
entorno, o que não era esperado, pois a corrente emitida tende a percorrer a extensão do cano, feito de material condutor e com apenas 3,8 cm de diâmetro. É provável que a modelagem tenha considerado predominantemente a área da vala, que apresenta maior resistividade que o entorno, e subestimado a condução preferencial de corrente em um material condutor muito próximo à superfície (0,5m). O alvo entre 26,5 e 27,5m apresentou baixo contraste resistivo em relação ao restante da vala, sendo apenas diferenciável a região de escavação da vala de seu entorno; o esperado era um grande contraste entre o alvo que apresenta um grande volume vazio e o seu entorno; este comportamento se deve provavelmente à profundidade do alvo e à falta de resolução do método aplicado para essa profundidade.

No trecho de 30-40m (figura 7.9) os alvos presentes nas posições 32 e 33m não apresentam bom contraste em relação ao entorno, o que era esperado pela profundidade dos alvos e pelo diâmetro de 10 e 20cm dos tubos. Os alvos em 35 e 36m podem estar correlacionados com as duas anomalias resistivas um pouco acima da localização dos mesmos; apesar dos alvos serem feitos de material condutivo (tubos de ferro), para este caso, anomalias resistivas eram mesmo esperadas devido à baixa profundidade na qual os alvos se encontram e devido ao volume vazio dos mesmos ser bem superior ao volume de material condutivo. Os alvos em 38, 39, 47, 48 e 49m também apresentaram forte contraste geoeletrico em relação ao entorno, com altos valores de resistividade; este comportamento era o esperado devido ao grande volume de vazio dos alvos e ao material no qual os alvos foram feitos (manilhas de concreto).

Os demais alvos presentes na linha 1 e que não foram comentados não apareceram nos perfis sintéticos produzidos devido à baixa profundidade estimada pelo método utilizado. De forma geral, as anomalias de resistividade observadas nos modelos sintéticos da linha 1 são condizentes com as características dos alvos, com exceção do cano metálico guia em 25m, que apresentou anomalia resistiva não esperada.



**Figura 7.8.** Perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, dos trechos de 0-10m (superior), 10-20m e 20-30m (inferior) da linha 1 do SCGR-II. As posições das valas aparecem delimitadas por linhas brancas e os alvos estão demarcados com linhas e círculos pretos.



**Figura 7.9.** Perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, dos trechos de 30-40m (superior) e 40-50m (inferior) da linha 1 do SCGR-II. As posições das valas aparecem delimitadas por linhas brancas e os alvos estão demarcados com linhas e círculos pretos.

### 7.3.2. Análise dos Perfis de Resistividade Sintéticos – Linha 2

A **Figura 7.10** apresenta os perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, para os trechos de 0-10m (superior), 10-20m e 20-30m (inferior) referentes à linha 2 do SCGR-II. A **Figura 7.11** apresenta os perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, para os trechos de 30-40m (superior) e 40-50m (inferior) referentes à linha 2 do SCGR-II.

No primeiro alvo localizado entre 1 e 3m, nota-se evidente contraste resistivo entre a região escavada e o entorno da vala, onde o interior da vala apresenta-se mais resistivo em relação ao seu entorno e os valores de resistividade observados são coerentes com os valores médios utilizados; a região entre 2,5 e 3,0m, até 0,5m de profundidade apresenta maior resistividade que o restante da vala, destoando dos valores esperados para o tipo de alvo presente (muro de tijolos de argila). Assim como no primeiro alvo, o alvo localizado entre 5,0 e 6,5m também apresentou bom contraste entre a região escavada e o seu entorno, além de apresentar maior resistividade entre 5,0 e 5,5m, destoando dos valores observados em outras áreas; a presença de valores de resistividade próximos aos valores da região escavada era esperada devido à presença de água dentro do alvo (tubulação com água) apesar do mesmo ser composto de PVC, altamente resistivo – isso se deve ao maior volume de água em relação ao material de PVC, uma vez que a corrente sofrerá a influência do alvo como um todo.

A região escavada onde se encontram os alvos entre 14 e 17m – cabos elétricos – apresentou bom contraste de resistividade com o entorno, não sendo possível identificar a localização exata dos alvos; esperava-se que as anomalias referentes a estes alvos fossem mais condutivas do que o entorno, porém a maior resistividade observada pode estar vinculada às pequenas dimensões destes alvos, uma vez que o volume total dos alvos é muito inferior ao volume total da vala; devido ao resultado obtido para os alvos entre 14 e 17m, espera-se que os perfis de campo não sejam capazes de identificar alvos tão pequenos quanto os observados neste trecho.

Os alvos localizados entre 19 e 23m – conduítes de PVC – não apresentaram contraste de resistividade em relação ao seu entorno, porém a região de solo remexido onde se encontram estes alvos apresenta leve contraste em relação ao solo não modificado; a não diferenciação dos conduítes de PVC se deve possivelmente ao pequeno diâmetro dos conduítes e ao pequeno volume em relação ao volume total de solo revirado, demonstrando desta maneira, a falta de resolução do método utilizado na modelagem de dados para a caracterização deste tipo de alvo. Em 25m, assim como na linha 1, ocorre forte anomalia resistiva em toda a extensão da vala, onde se encontra o cano metálico guia; analogamente



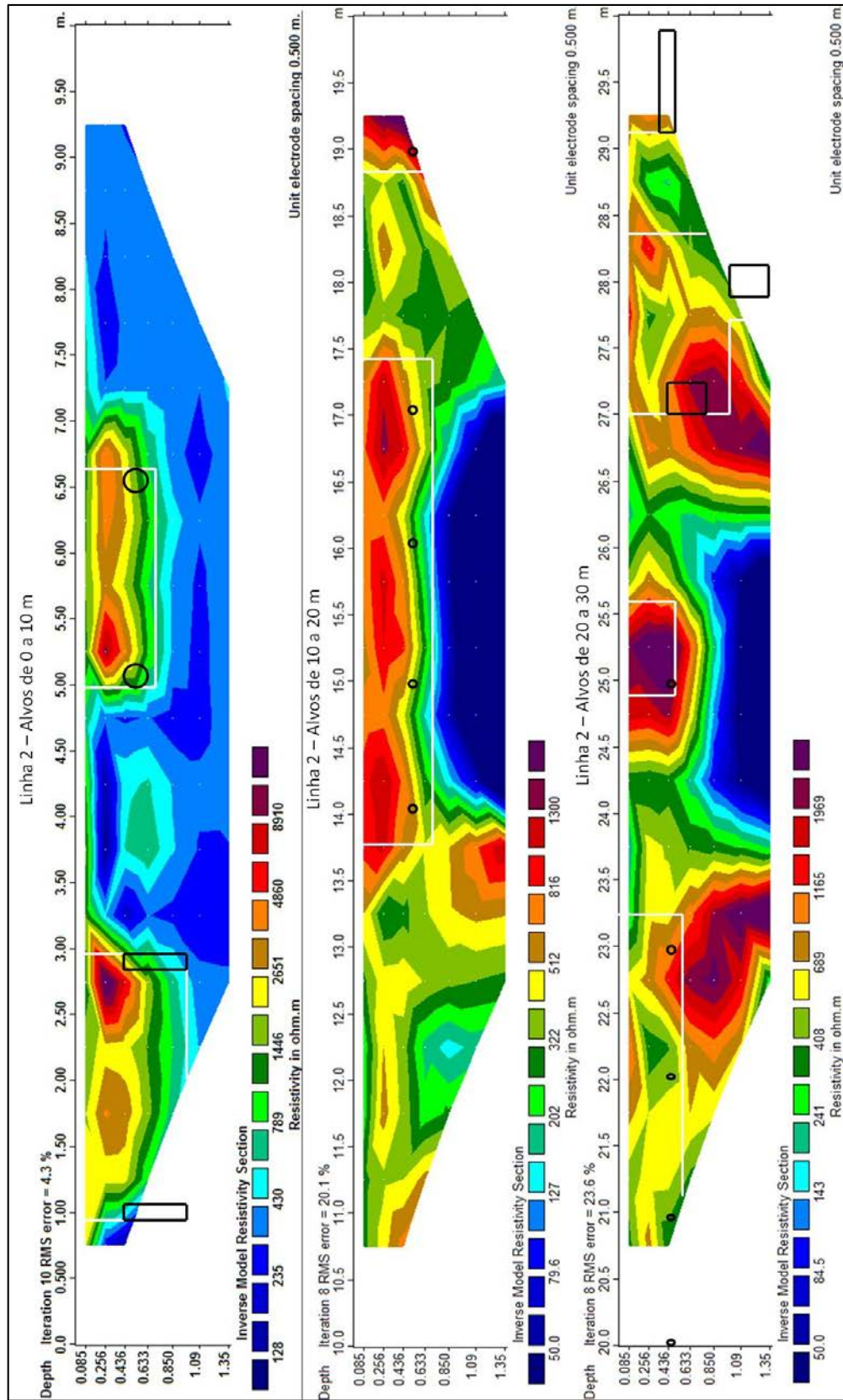
à linha 1, este comportamento não era esperado devido à baixa profundidade do cano metálico (0,5m) e à propriedade condutiva que esse material possui, sendo a possível explicação para o ocorrido semelhante ao exposto no item anterior. Em 27m – vaso de cerâmica vazio – foi constatada forte anomalia resistiva na região em que se encontra o alvo; este resultado era esperado devido à grande resistividade de um alvo com volume considerável de espaço vazio, demonstrando a eficiência do modelo sintético escolhido na caracterização deste tipo de alvo. O alvo em 28m, também composto por vaso cerâmico vazio, não acusou contraste, porém esse comportamento se deve possivelmente a maior profundidade do alvo (topo do alvo se encontra em 1,0m).

O alvo localizado entre 31,5 e 32,5m – caixa com ladrilhos cerâmicos não apresentou bom contraste de resistividade com a vala em que se encontra, não determinando com bom grau de exatidão os contornos do alvo e da vala; por outro lado, a região de solo escavado apresenta forte contraste com o solo inalterado, porém há algumas porções externas à vala que apresentam valores altos de resistividade (de 0,5 a 0,8m de profundidade e entre 32,5 e 33m). O baixo contraste observado para a caracterização deste alvo pode estar associado ao erro quadrático da inversão ou à proximidade entre a resistividade dos sedimentos argilosos do entorno, predominantes no SCGR-II, e a resistividade dos ladrilhos de cerâmica. O resultado obtido para este alvo não era o esperado, uma vez que a caixa com ladrilhos de cerâmica apresenta maior índice de vazios em relação ao seu entorno. A divergência entre o esperado e o obtido pode estar associada ao erro quadrático ou à limitação do método sintético utilizado. O alvo localizado em 34m (tubos de ferro de 20cm de diâmetro e vazios, com o topo do alvo em 0,5m e em 1,0m) apresentou forte contraste de resistividade para o alvo mais superficial – 0,5m, onde a região do alvo é fortemente resistiva em relação ao seu entorno. Já para o alvo mais profundo, não foi observado bom contraste; a forte anomalia resistiva no alvo mais raso era esperada devido ao grande volume de espaço vazio do alvo, apesar do mesmo ser composto por ferro puro. Portanto, a anomalia observada demonstra que a corrente emitida é influenciada por todo o volume do alvo, e não apenas pela superfície do mesmo. O alvo mais profundo não apresentou comportamento semelhante muito possivelmente devido à sua profundidade, como constatado em outros alvos presentes na mesma profundidade. O alvo localizado entre 36 e 37m – caixa com brita de granito – apresentou forte contraste em relação ao seu entorno, sendo observada forte anomalia resistiva até 0,8m. Este comportamento era o esperado devido ao maior índice de vazios do alvo em questão em relação ao solo que o circunda e também devido a perda de resolução do método sintético com a profundidade. O alvo localizado entre 38 e 40m – tubo de PVC de 10cm de diâmetro e caixa com areia – também apresentou forte anomalia resistiva a até 0,8m na região do tubo de PVC. Este

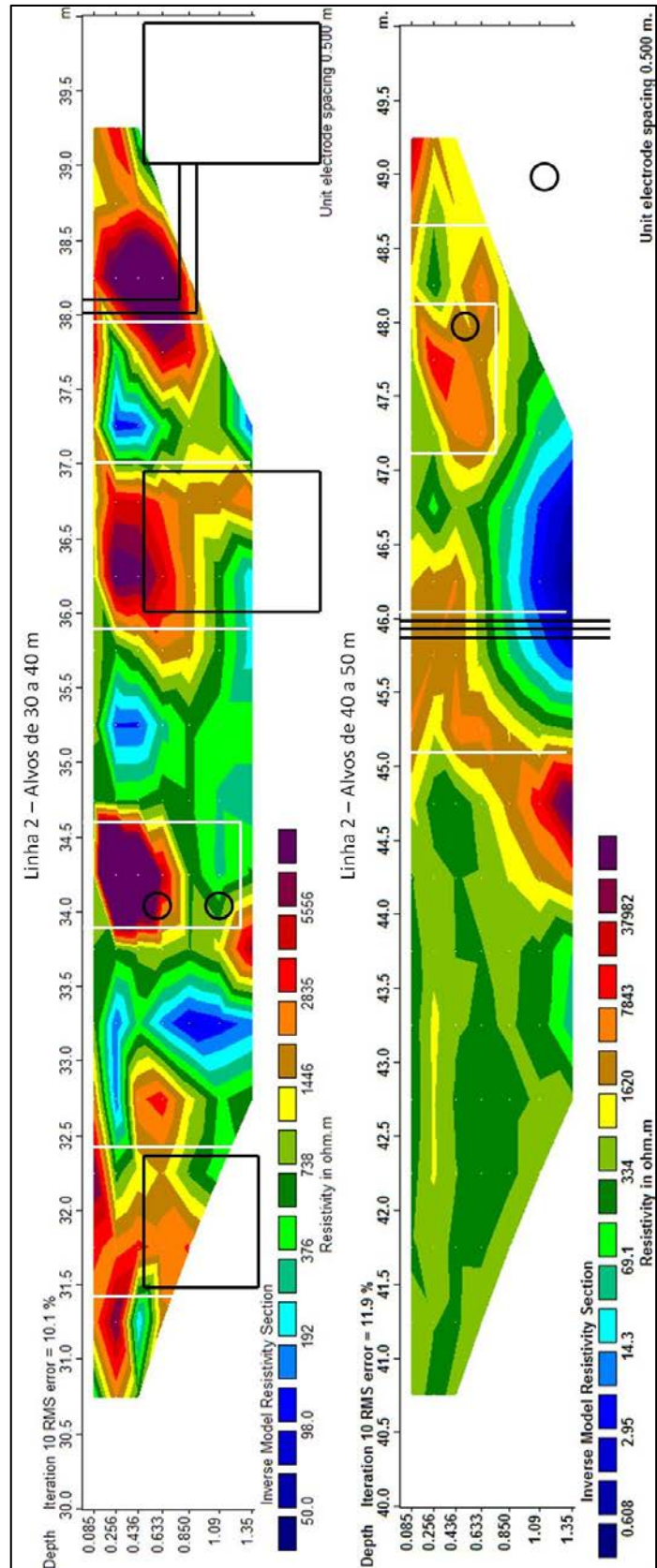
comportamento condiz com o esperado devido ao grande volume de vazios e ao material do tubo. Portanto, o resultado obtido reforça a capacidade do método sintético em caracterizar alvos de baixa profundidade e com grande volume de espaços vazios.

O alvo localizado em 46m – chapas de alumínio – não apresentou contraste com a vala em que se encontra, porém esta apresentou bom contraste com o solo inalterado. Este comportamento não era esperado devido à grande condutividade do material enterrado. O resultado obtido pode estar associado à geometria do alvo, havendo pouca variação lateral e, portanto, não sendo a geometria mais indicada para o método de caminhamento elétrico. O alvo em 48m – tubo de PEAD de 20cm de diâmetro – apresentou forte anomalia resistiva em relação ao seu entorno, assim como a vala em que se encontra em relação ao solo inalterado. Este comportamento era o esperado devido à baixa profundidade do material, ao grande volume de espaços vazios e à composição resistiva do mesmo. O resultado obtido reforça novamente a capacidade que o método sintético escolhido tem em caracterizar alvos mais rasos (até 0,8m de profundidade) e com grande volume de vazios em relação ao volume total do objeto.

Os demais alvos presentes na linha 2 e que não foram comentados não apareceram nos perfis sintéticos produzidos devido à baixa profundidade estimada pelo método utilizado. De forma geral, as anomalias de resistividade observadas nos modelos sintéticos da linha 1 são condizentes com as características dos alvos, com exceção do cano metálico guia em 25m, que apresentou anomalia resistiva não esperada, e da caixa de ladrilhos de cerâmica entre 31,5 e 32,5m, que não apresentou bom contraste com o solo que o circunda.



**Figura 7.10.** Perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, dos trechos de 0-10m (superior), 10-20m e 20-30m (inferior) da linha 2 do SCGR-II. As posições das valas aparecem delimitadas por linhas brancas e os alvos estão demarcados com linhas e círculos pretos.



**Figura 7.11.** Perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, dos trechos de 30-40m (superior) e 40-50m (inferior) da linha 2 do SCGR-II. As posições das valas aparecem delimitadas por linhas brancas e os alvos estão demarcados com linhas e círculos pretos.

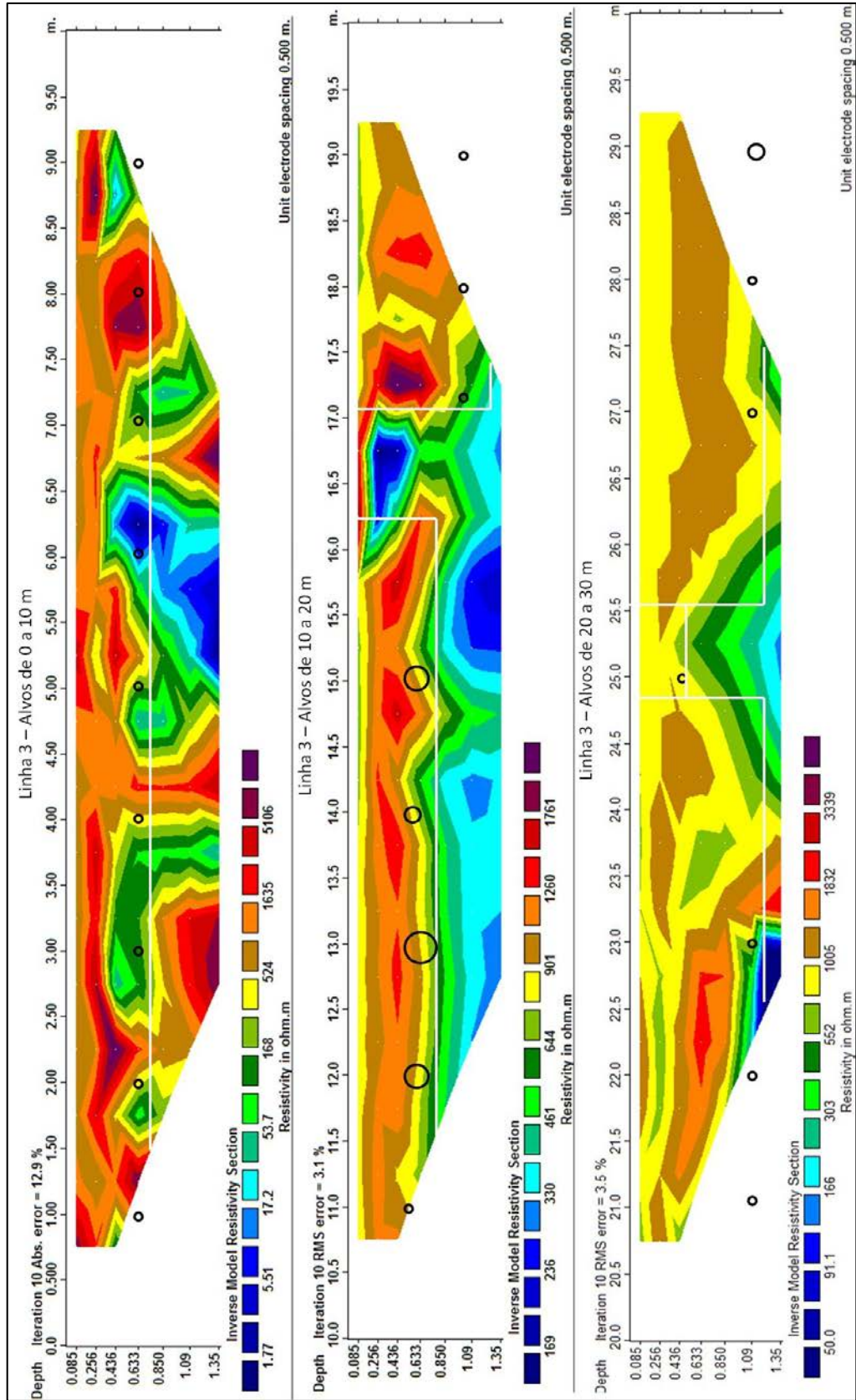
### 7.3.3. Análise dos Perfis de Resistividade Sintéticos – Linha 3

A **Figura 7.12** apresenta os perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, para os trechos de 0-10m (superior), 10-20m e 20-30m (inferior) referentes à linha 3 do SCGR-II. A **Figura 7.13** apresenta os perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, para os trechos de 30-40m (superior) e 40-50m (inferior) referentes à linha 3 do SCGR-II.

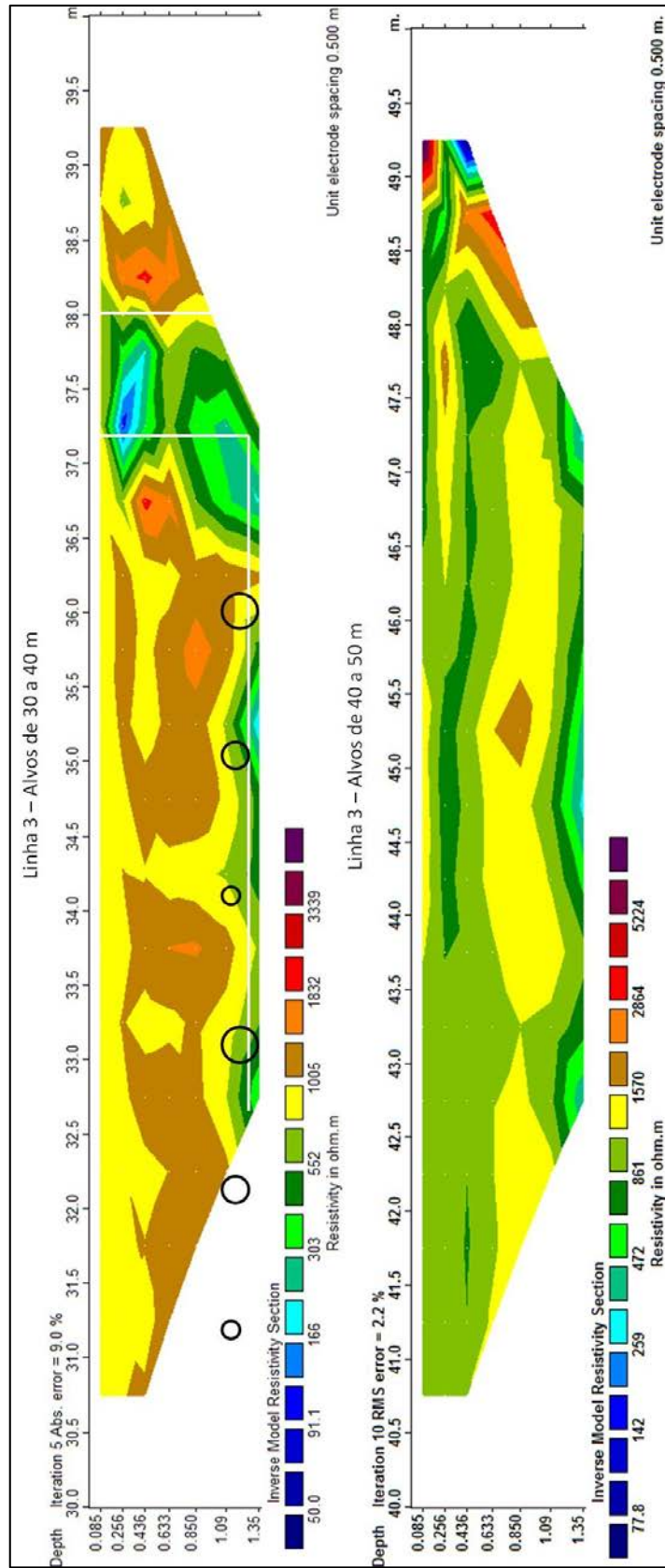
Os alvos localizados no perfil sintético referentes aos primeiros 10m – tubos de polietileno, PVC e ferro com diâmetro de até 10cm – da linha 3 não apresentaram bom contraste em relação à vala e ao solo não alterado, pois há contrastes de resistividade muito irregulares aos contornos dos alvos e também ao contorno da vala escavada, não sendo possível relacionar as anomalias de resistividade encontradas aos alvos. O resultado obtido era esperado devido ao pequeno diâmetro dos tubos enterrados, demonstrando a falta de resolução do método sintético escolhido na determinação deste tipo de alvo.

Os alvos enterrados entre 11 e 15m – manilhas de cerâmica e tubos de PVC parcialmente preenchidos com água doce – apresentam maior diâmetro e espaços vazios em relação aos alvos caracterizados anteriormente no perfil de 0-10m; o perfil sintético entre 10-20m apresenta bom contraste de resistividade entre o solo escavado e o solo inalterado e também é possível observar regiões mais resistivas dentro das delimitações da primeira vala; estas regiões mais resistivas estão provavelmente correlacionadas com os alvos enterrados, que neste caso apresentam grande volume de vazios em relação ao volume total do alvo e estão à profundidade inferior à 0,8m – limite de resolução vertical demonstrada pelo método sintético nas duas linhas anteriores; os tubos de PVC, localizados em 14 e 15m apresentam maior contraste em relação às manilhas de cerâmica localizadas em 11, 12 e 13m; o resultado obtido para os alvos entre 11 e 15m era o esperado, devido ao diâmetro dos mesmos, ao volume de espaço vazio, à profundidade em que se encontram e ao tipo de material que foram fabricados. Os alvos localizados entre 17 e 19m não apresentam contraste confiável devido à sua maior profundidade e menor diâmetro, porém a vala em que se encontram apresenta bom contraste em relação à região não escavada.

Os demais alvos simulados nos perfis sintéticos do restante da linha não apresentaram bons contrastes de resistividade em relação ao entorno, sendo possível apenas diferenciar as regiões escavadas das demais; este comportamento era o esperado devido à profundidade superior a 0,8m dos alvos e ao seu pequeno diâmetro em relação a profundidade de investigação.



**Figura 7.12.** Perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, dos trechos de 0-10m (superior), 10-20m e 20-30m (inferior) da linha 3 do SCGR-II. As posições das valas aparecem delimitadas por linhas brancas e os alvos estão demarcados com linhas e círculos pretos.



**Figura 7.13.** Perfis sintéticos de resistividade real, após a inversão dos dados, dos trechos de 30-40m (superior) e 40-50m (inferior) da linha 3 do SCGR-II. As posições das valas aparecem delimitadas por linhas brancas e os alvos estão demarcados com linhas e círculos pretos.

De forma geral, a modelagem realizada para os alvos enterrados nas três linhas do SCGR-II apresentou bons resultados e que ajudam a definir um comportamento esperado para os dados reais de campo. Os resultados obtidos demonstram que o método sintético utilizado (descrito no item 6.2) é capaz de definir contrastes de resistividade em profundidades inferiores a 0,8m e em alvos que apresentem dimensões de no mínimo 10 cm, como em tubos de PVC, PEAD e de ferro com diâmetros superiores a 10cm. O modelo escolhido também demonstrou que a composição do material é secundária em relação ao seu volume de espaços vazios onde, como exemplo, podem ser citadas as intensas anomalias resistivas presentes em tubos de aço, concreto, cerâmica, ferro ou PVC com diâmetro de no mínimo 10cm, materiais estes com valores de resistividade distintos – tambor de aço vazio em 7m e 13m da linha 1, manilha de concreto vazia em 38m da linha 1, vaso de cerâmica em 27m da linha 2, tubo de ferro em 34m da linha 2 e tubo de PVC em 38m da linha 2.

O método sintético utilizado, bem como o arranjo de campo definido para esta modelagem, não são análogos ao método e arranjo utilizado pelo OhmMapper, porém é o que mais se aproxima do mesmo. Sendo assim, é improvável que os resultados obtidos com esta modelagem se equiparem em sua totalidade aos resultados obtidos com os dados de campo, podendo haver divergências na interpretação das anomalias observadas. Entretanto, é esperado que grande parte dos dados se comportem como observado no modelo sintético apresentado. A modelagem apresentada, portanto, tem caráter auxiliador na interpretação dos dados reais adquiridos com o equipamento OhmMapper no SCGR-II.

#### **7.4. Dados de Campo**

Neste item serão apresentados os perfis de resistividade real das linhas 1, 2 e 3 do SCGR-II. Para a melhor análise e caracterização das anomalias de resistividade em cada uma das 3 linhas, além da seção adquirida em cada linha, foram utilizadas outras duas seções auxiliares para cada linha, sendo estas linhas espaçadas no eixo X em 0,5m a mais ou a menos da linha central. Dessa forma, as anomalias de resistividade real referentes à linha 1 foram caracterizadas através das aquisições realizadas em 1,5, 2,0 e 2,5m no eixo x. Para a linha 2, utilizou-se as aquisições realizadas em 4,5, 5,0 e 5,5m e para a linha 3, utilizou-se as seções adquiridas em 7,5, 8,0 e 8,5m no eixo x.

Além da utilização de um conjunto de linhas adquiridas para a análise da resistividade real, os dados de cada linha foram separados em partes, dependendo do conjunto de alvos analisados. Esta separação foi realizada para que a visualização das



anomalias fosse apresentada em escala compatível com o interesse da pesquisa, de forma a facilitar e a expor mais claramente as anomalias geradas em cada trecho.

As informações de *background* (seções de resistividade real, adquiridas anteriormente à instalação dos alvos) também estão presentes nas figuras apresentadas. Dessa maneira, as seções de resistividade das linhas do SCGR-II puderam ser comparadas com o perfil de resistividade adquirido sem a influência dos alvos.

Com o intuito de se correlacionar as informações geoeletricas obtidas com a localização real de cada alvo, foi incorporado aos perfis de resistividade, o contorno dos alvos (em preto) e das valas (em branco), bem como a seção esquemática de localização dos alvos enterrados. Dessa forma, as figuras apresentadas neste item seguem este padrão.

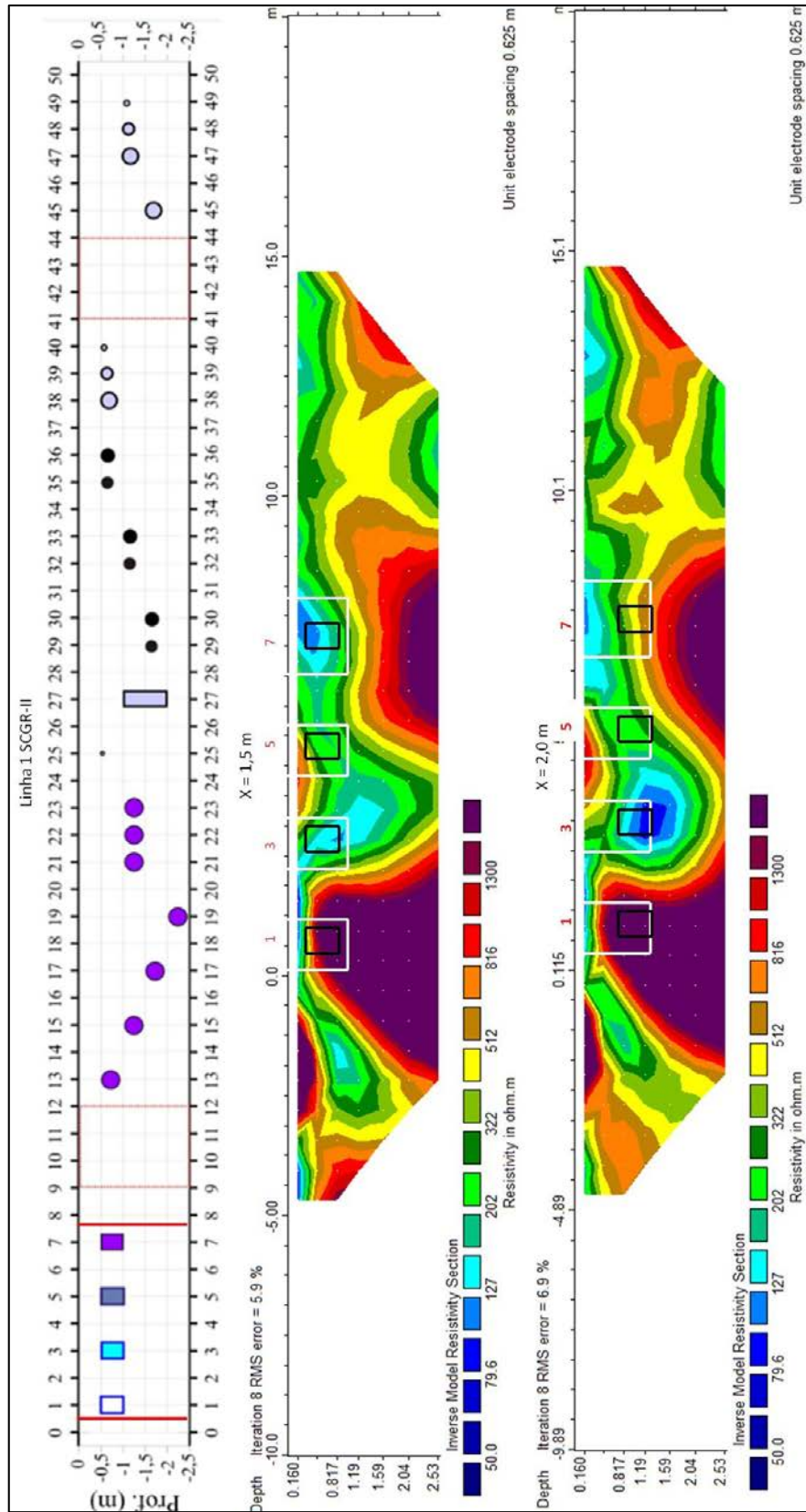
#### **7.4.1. Análise dos Perfis de Resistividade – Linha 1**

As **Figuras 7.14 e 7.15** apresentam as seções de resistividade real em  $X=1,5\text{m}$ ,  $2,0\text{m}$  e  $2,5\text{m}$  do trecho entre  $Y= -5$  e  $15\text{m}$  referentes à linha 1 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.15 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

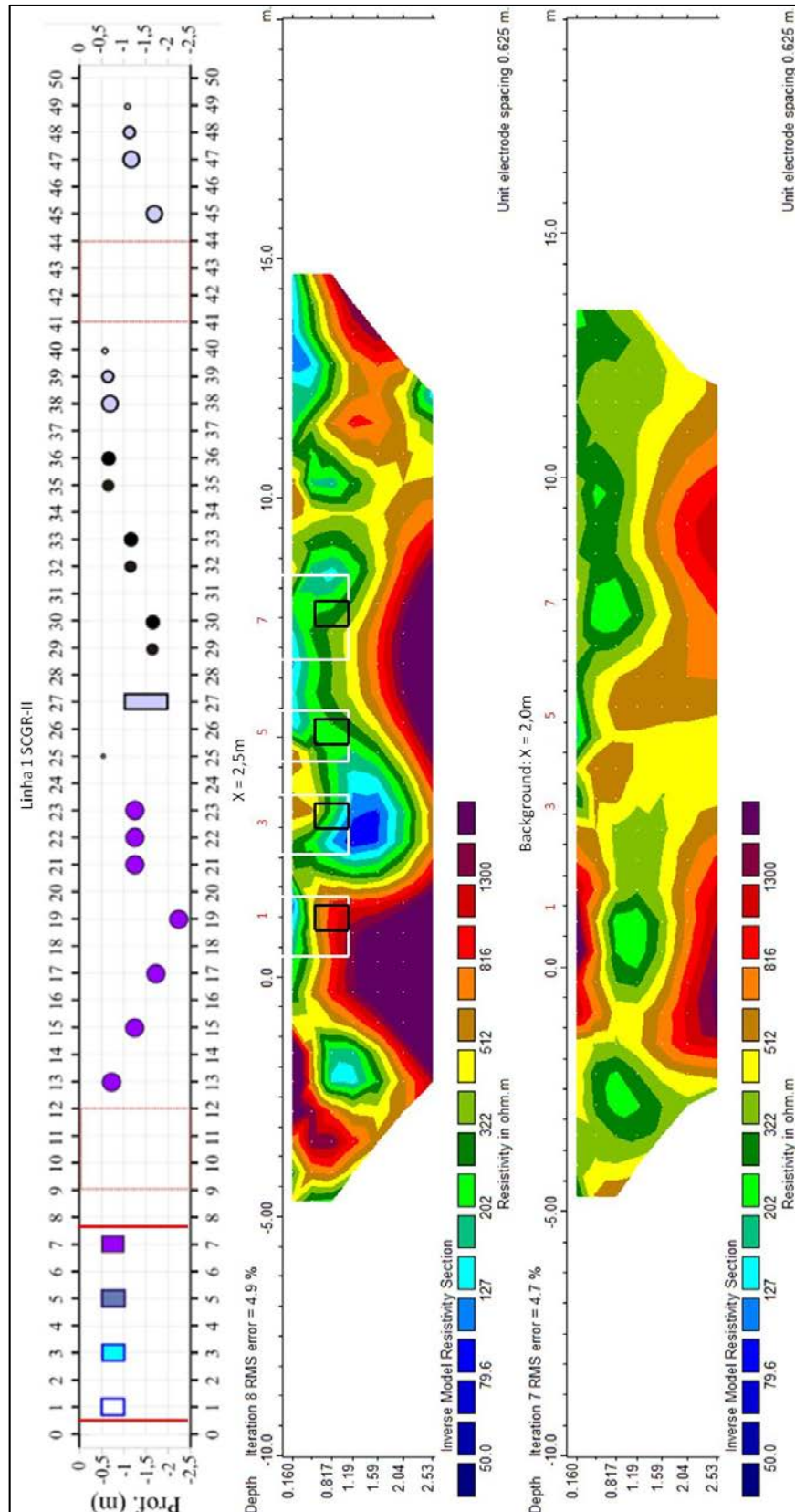
Este trecho refere-se aos alvos localizados entre  $Y=1$  e  $7\text{m}$ . O alvo presente em  $1\text{m}$  (tambor de plástico vertical vazio) apresentou forte anomalia resistiva, resultado este esperado devido ao grande volume vazio no interior do alvo. Em  $2\text{m}$  (tambor de plástico com o seu interior preenchido por água salgada) apresentou um forte contraste de resistividade em relação ao alvo anterior, sendo observada uma anomalia condutiva; este resultado condiz com as propriedades físicas do material enterrado, no qual seu maior volume é preenchido por água salgada (condutiva). O alvo em  $3\text{m}$  (tambor de plástico preenchido com água doce) apresentou baixo valor de resistividade, resultado este esperado devido ao grande volume de água doce (condutiva) presente no interior do alvo. Em  $4\text{m}$  (tambor metálico vazio) se observam menores valores de resistividade, mais condizentes com materiais condutivos. Este resultado demonstra a grande influência do material metálico, sendo capaz de gerar anomalias condutivas, mesmo em um alvo com grande volume de vazios em seu interior. Para este trecho, os valores de resistividade observados nas seções apresentadas divergem significativamente dos valores observados na seção de *background*, demonstrando que as seções de resistividade real, após a instalação dos alvos, sofrem a influência dos mesmos.

Comparando as anomalias de resistividade real deste trecho com as anomalias geradas pelo modelo sintético criado (figura 7.8), observa-se boa correlação entre os dados

de campo e o modelo sintético para os três primeiros alvos, localizados em 1, 3 e 5m. Para o alvo em 7m, nota-se uma anomalia condutiva nas seções com os dados de campo e uma anomalia resistiva para os dados sintéticos; este comportamento demonstra que para a metodologia da eletrorresistividade (caminhamento elétrico convencional) é esperado uma forte anomalia resistiva para um alvo com grande volume de vazios em seu interior, porém com o uso do OhmMapper, houve a prevalência do material condutivo (tambor de aço) sobre o volume vazio interno, podendo ser um indicativo de que o método capacitivo utilizado não se comporta puramente como um método eletrorresistivo, podendo se comportar, de acordo com o material, como um método eletromagnético indutivo, induzindo uma corrente elétrica secundária significativa na superfície de materiais metálicos.



**Figura 7.14.** Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= -5 e 15m e em X=1,5m e 2,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (linhas em preto).



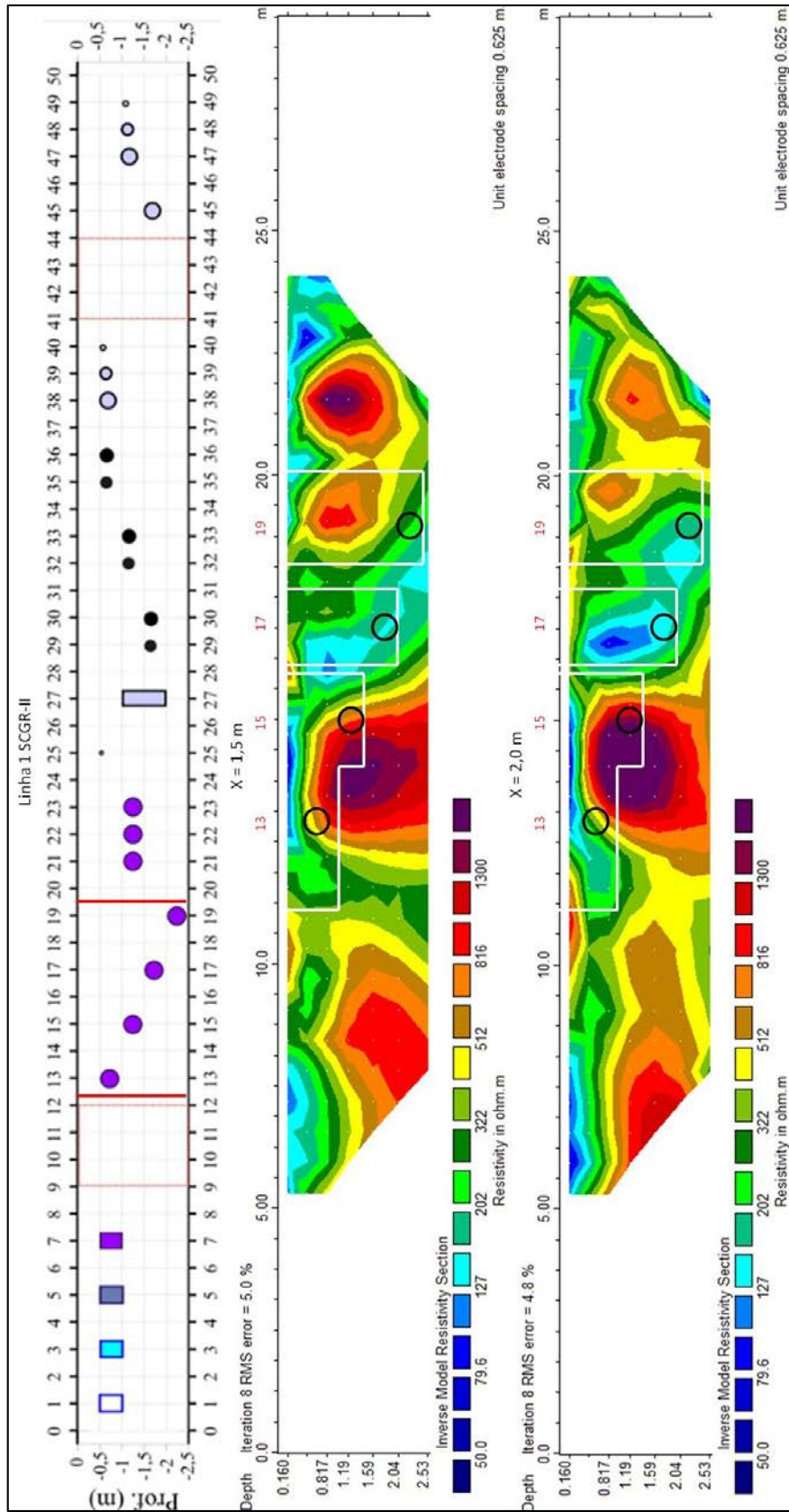
**Figura 7.15.** Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= -5 e 15m para X=2,5m, *background* em X= 2,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (linhas em preto).

As **Figuras 7.16 e 7.17** apresentam as seções de resistividade real em  $X=1,5\text{m}$ ,  $2,0\text{m}$  e  $2,5\text{m}$  do trecho entre  $Y= 5$  e  $25\text{m}$  referentes à linha 1 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.17 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

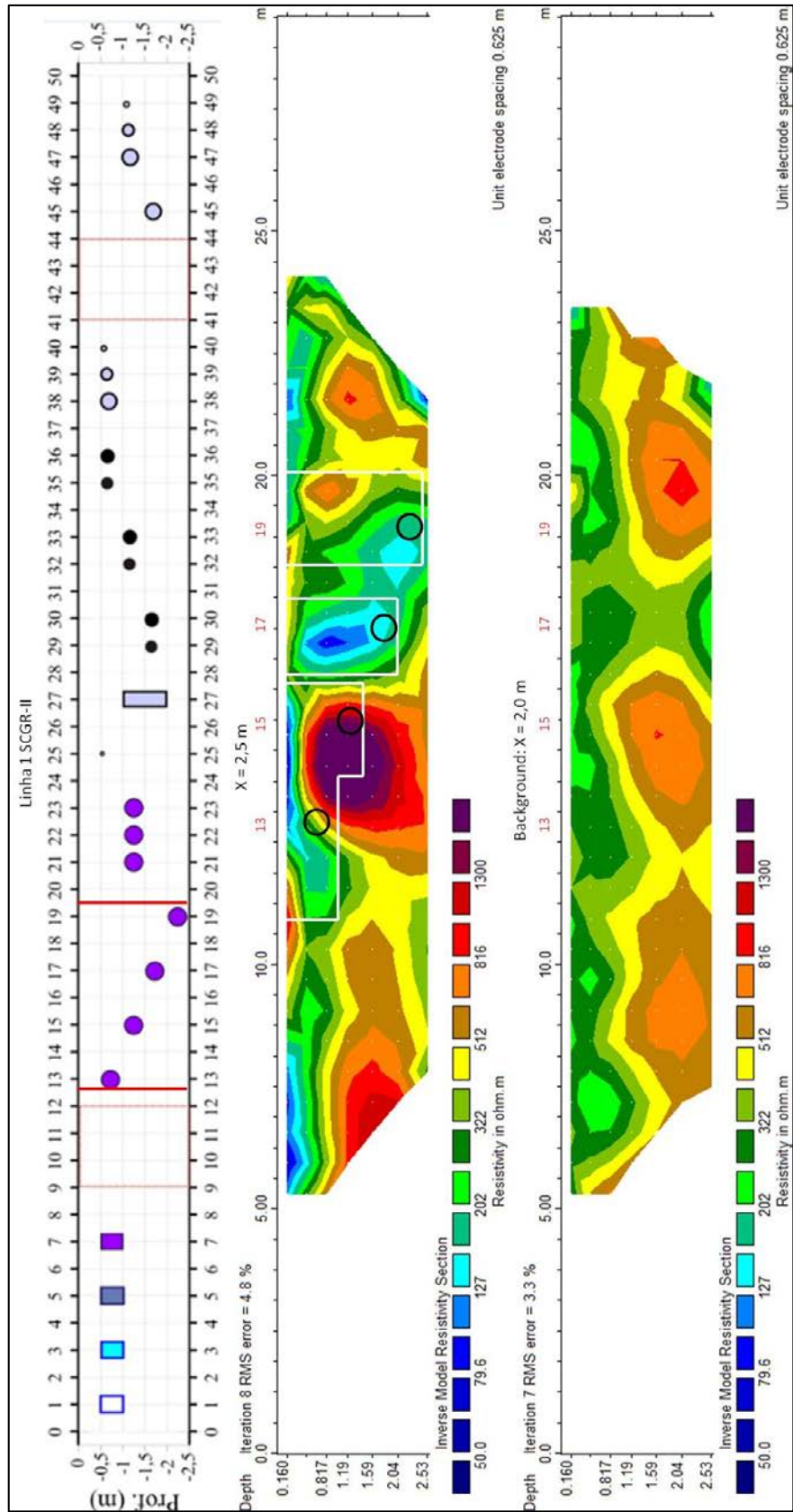
Este trecho refere-se aos alvos localizados entre  $Y=13$  e  $19\text{m}$ , totalizando quatro alvos compostos pelo mesmo material (tambor de aço com interior vazio e posicionado horizontalmente, com seu maior comprimento no eixo  $X$ ). Os quatro tambores de aço enterrados neste trecho formam uma extensão condutiva nas seções de resistividade real produzidas, sendo esta extensão concordante com o posicionamento dos alvos. Assim como no trecho analisado anteriormente, apesar do grande volume vazio no interior dos tambores de aço, houve a prevalência do material metálico nas seções de resistividade produzidas.

As três seções analisadas neste trecho ( $X = 1,5\text{m}$ ,  $2,0\text{m}$  e  $2,5\text{m}$ ) apresentaram significativa divergência de valores de resistividade real em relação à seção de *background* produzida anteriormente a colocação dos alvos, constatando dessa maneira, a influência dos alvos nas seções de resistividade real.

A seção sintética produzida para este trecho (figura 7.8) expõe a ocorrência de anomalias resistivas para estes alvos, assim como o observado no último alvo do trecho anterior. De forma análoga ao trecho anterior, acredita-se que as anomalias condutivas observadas para os tambores de aço nas seções de resistividade real sejam causadas devido ao comportamento divergente do OhmMapper em relação aos equipamentos convencionais de caminhamento elétrico (com contato galvânicos de eletrodos), para este tipo de alvo, aproximando-se de um método eletromagnético nesta situação.



**Figura 7.16.** Seções de resistividade real da linha 1 entre Y = 5 e 25m e em X=1,5m e 2,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).



**Figura 7.17.** Seções de resistividade real da linha 1 entre Y = 5 e 25m para X=2,5m, *background* em X= 2,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).

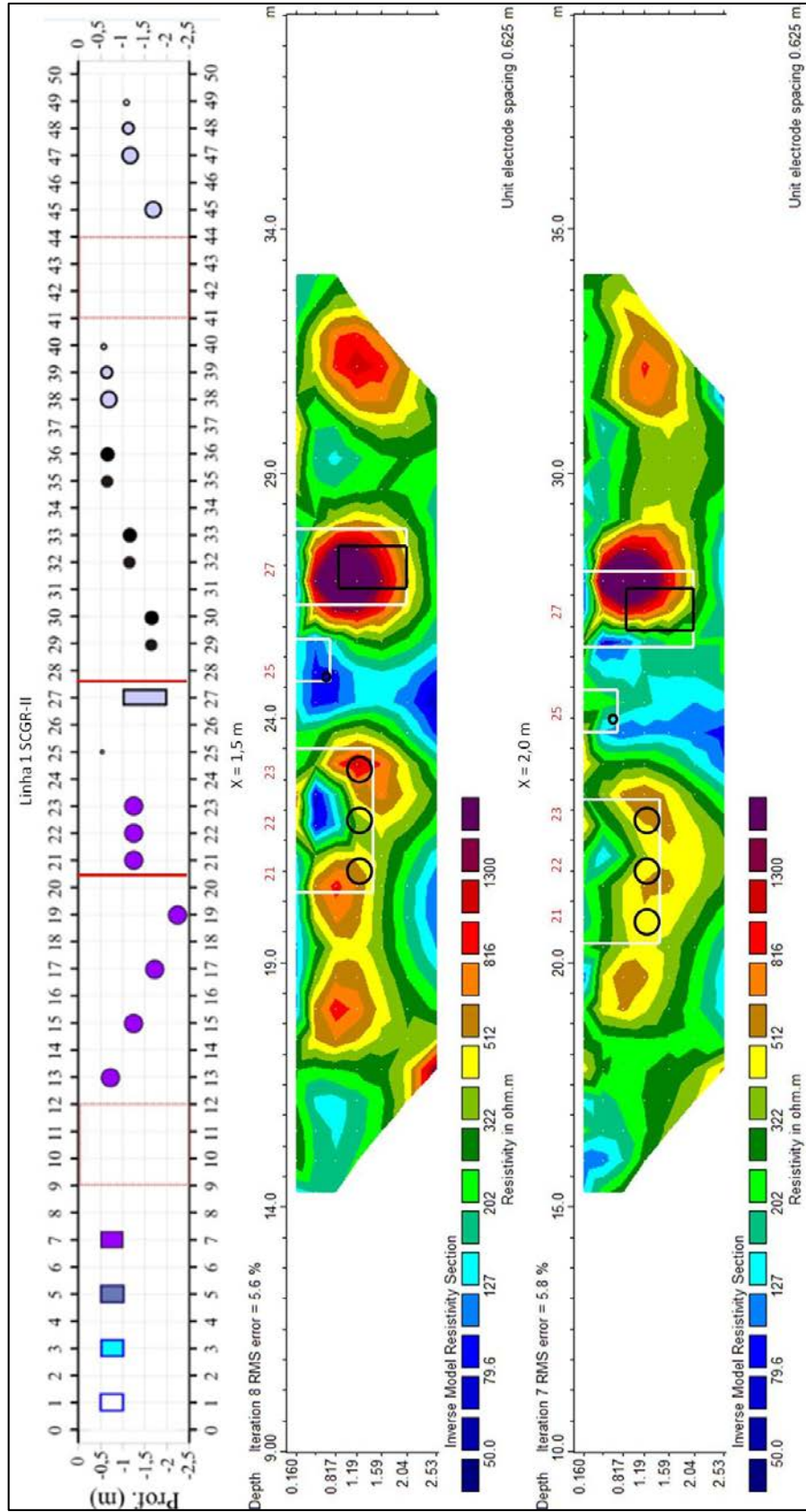
As **figuras 7.18 e 7.19** apresentam as seções de resistividade real em  $X=1,5\text{m}$ ,  $2,0\text{m}$  e  $2,5\text{m}$  do trecho entre  $Y= 14\text{m}$  e  $34\text{m}$  referentes à linha 1 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.19 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

Este trecho refere-se aos alvos localizados entre  $Y=21$  e  $27\text{m}$ . Os alvos presentes em  $21$ ,  $22$  e  $23\text{m}$  (tambor de aço com interior vazio e posicionado horizontalmente, com seu maior comprimento no eixo  $X$ ) e  $25\text{m}$  (cano metálico guia) apresentaram forte significativa anomalia condutiva. O alvo localizado em  $27\text{m}$  (manilha de concreto vertical, vazia, com  $80\text{cm}$  de diâmetro) apresentou forte anomalia resistiva.

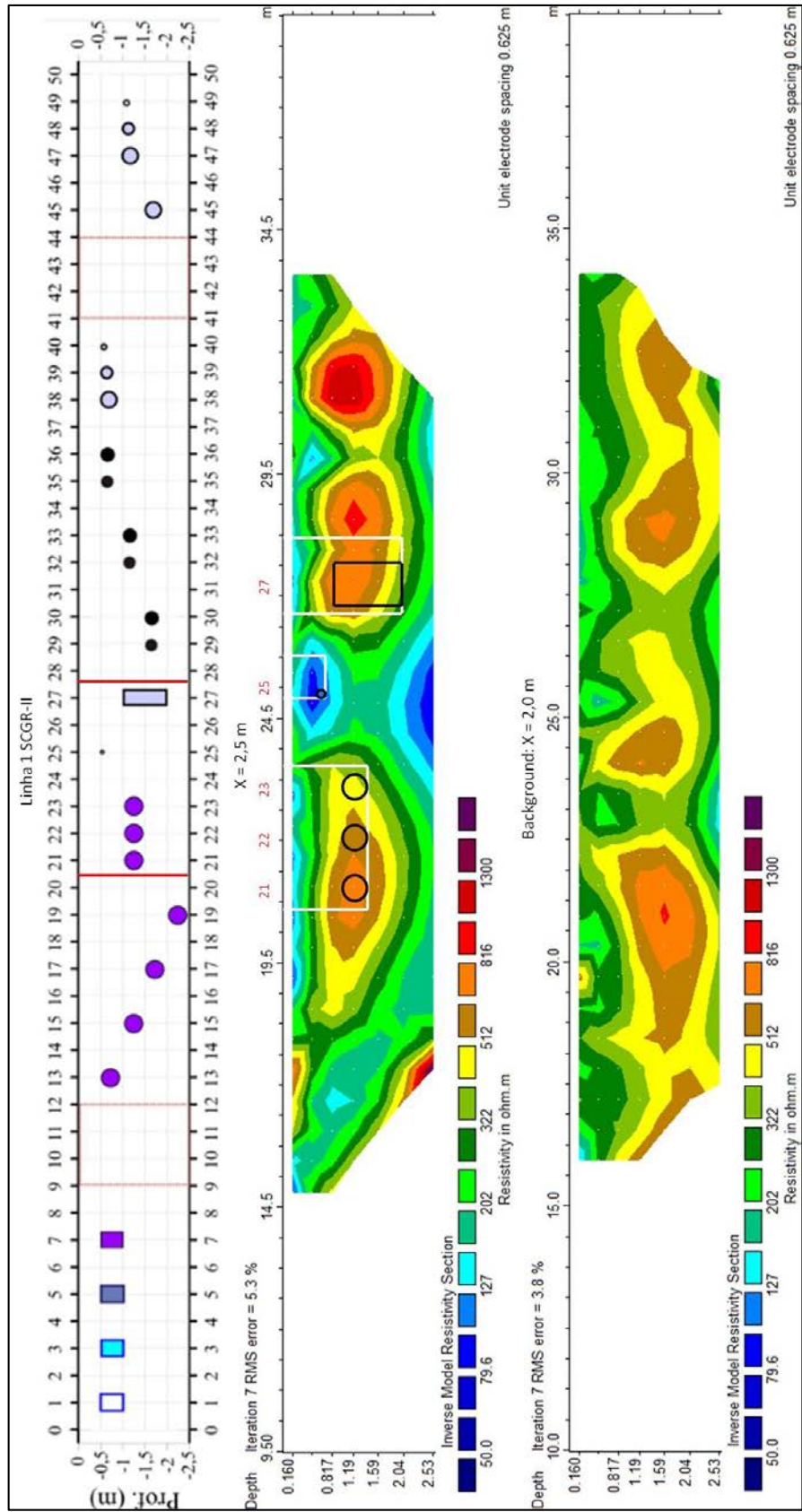
A seção de resistividade real anterior à instalação dos alvos (*background*) não apresentou as anomalias condutivas e resistivas observadas nas seções após a colocação dos alvos, demonstrando a sensibilidade do método na identificação de alvos enterrados, para os alvos deste trecho.

Os dados sintéticos produzidos para este trecho (figura 7.8) expõem significativas anomalias resistivas para todos os cinco alvos do trecho, o que demonstra a prevalência dos espaços vazios (altamente resistivos) em relação ao tipo de material dos alvos e, portanto, demonstra o comportamento esperado para um equipamento de caminhamento elétrico convencional (com contato galvânico de eletrodos). Contrastando com a seção sintética, as seções de resistividade real apresentaram anomalias condutivas para os tambores de aço e para o cano metálico guia, comportando-se como os alvos metálicos anteriormente descritos; para a manilha vertical de concreto, observou-se um comportamento análogo à seção sintética, demonstrando que o método capacitivo utilizado comporta-se de maneira parecida ao método convencional para este tipo de alvo.





**Figura 7.18.** Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 14 e 34m e em X=1,5m e 2,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (linhas e círculos em preto).



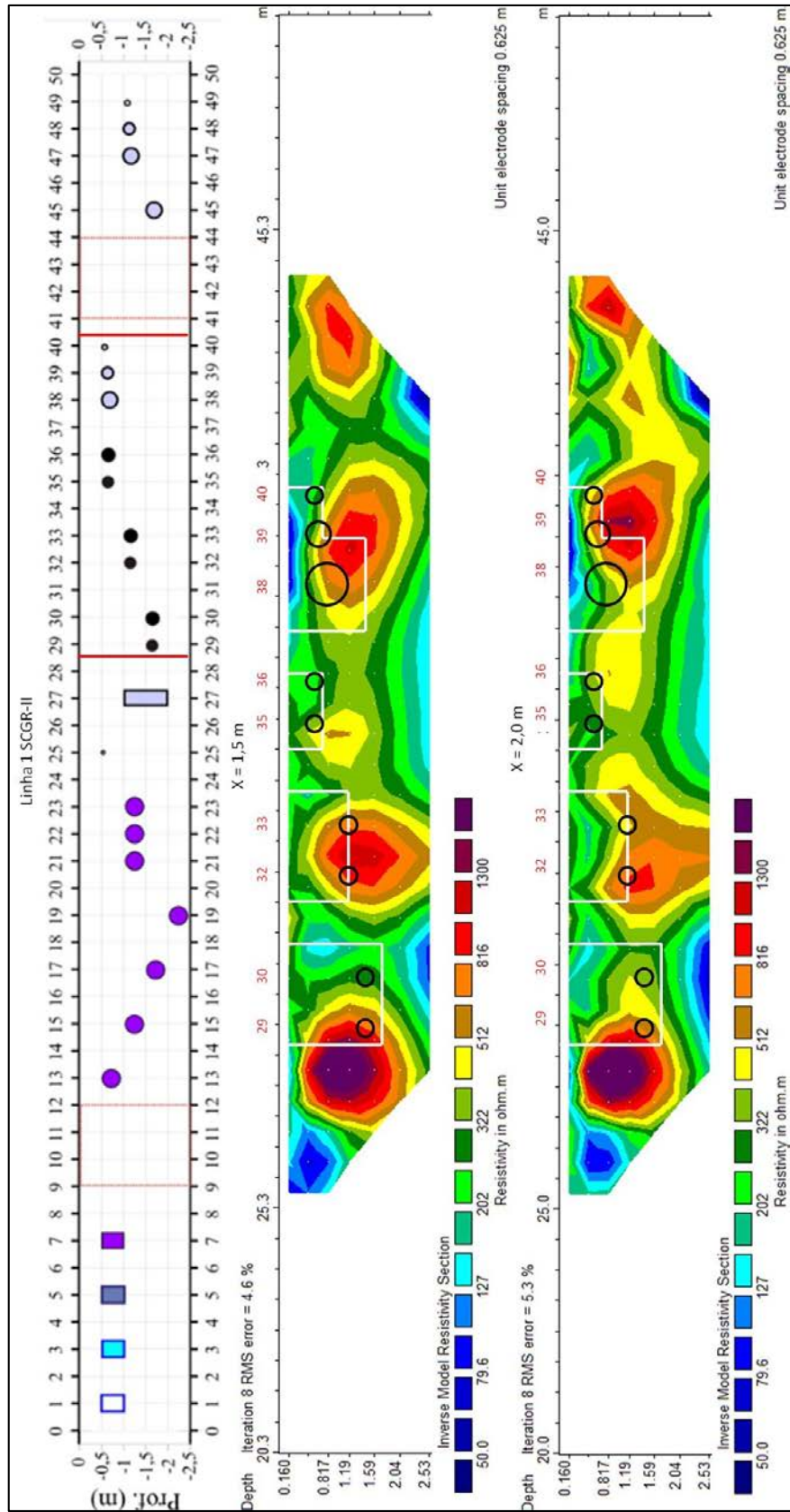
**Figura 7.19.** Seções de resistividade real da linha 1 entre Y = 5 e 25m para X=2,5m, *background* em X= 2,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (linhas e círculos em preto).

As **Figuras 7.20 e 7.21** apresentam as seções de resistividade real em  $X=1,5m$ ,  $2,0m$  e  $2,5m$  do trecho entre  $Y= 25m$  e  $45m$  referentes à linha 1 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.21 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

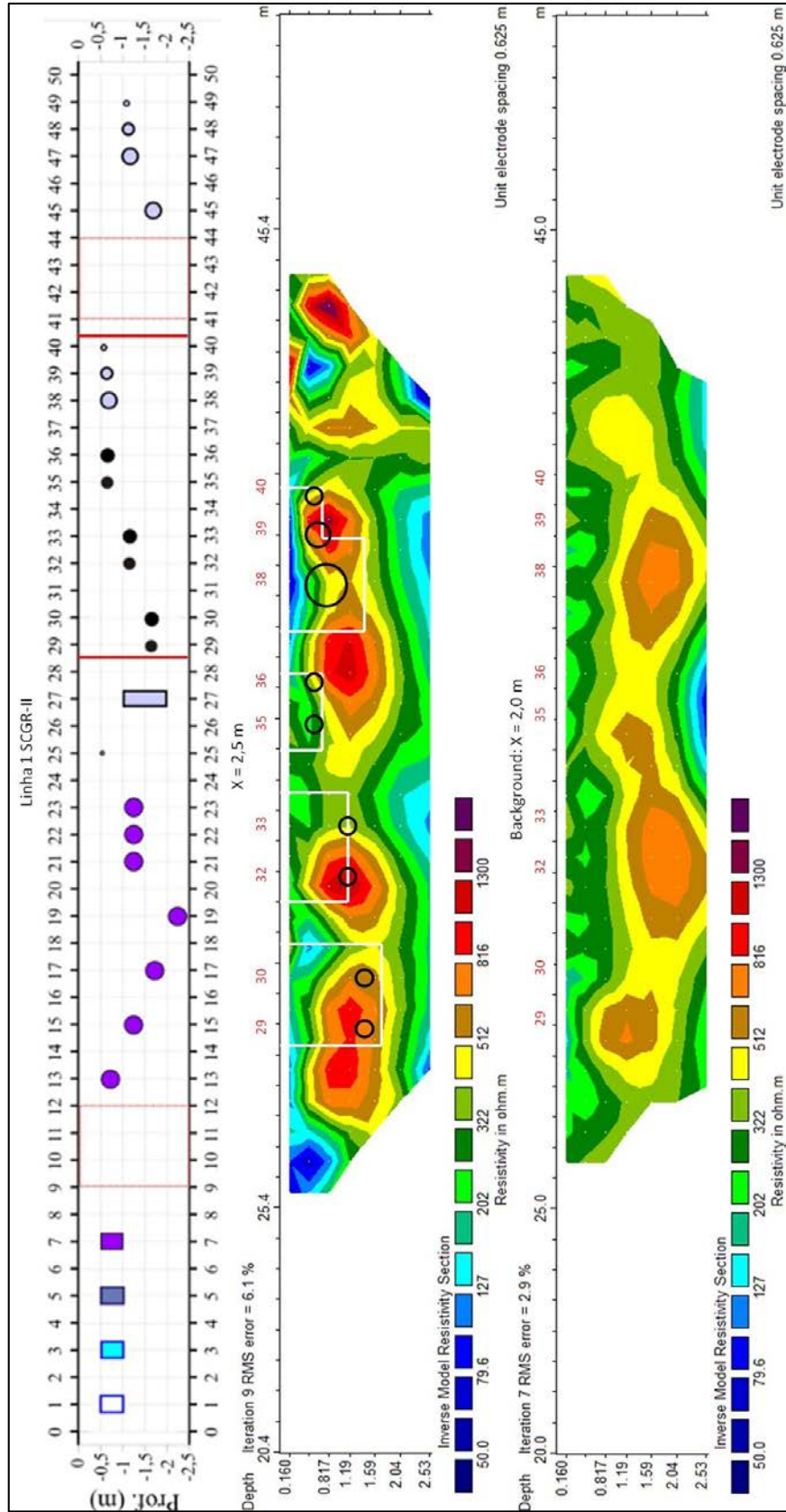
Este trecho refere-se aos alvos localizados entre  $Y=29$  e  $40m$ . Os alvos localizados em  $32$  e  $33m$  (tubo de ferro vazio de diâmetro de  $10$  e  $20cm$ , com seu maior comprimento no eixo  $X$ ) apresentaram anomalia levemente resistiva bem definida em relação ao entorno, porém o mesmo comportamento não foi observado nos alvos presentes nos trechos de  $29$  e  $30m$  e  $35$  e  $36m$ , sendo estes alvos compostos por tubos de ferro assim como os descritos em  $32$  e  $33m$ . Este comportamento divergente demonstra que o método capacitivo utilizado não apresenta resolução suficiente para detectar com boa acurácia a localização do alvo descrito, podendo esta falta de resolução estar associada ao pequeno diâmetro do material ( $10$  e  $20cm$ ) ou a uma combinação entre o diâmetro, o material utilizado (ferro), o volume de vazios no interior do alvo e a resistividade do entorno, camuflando assim a delimitação geoeletrica do alvo em questão. O conjunto de alvos localizados em  $38$ ,  $39$  e  $40m$  (manilha de concreto, com seu maior comprimento no eixo  $X$ , vazia, com  $80$ ,  $50$  e  $30cm$  de diâmetro, respectivamente) apresentou uma anomalia resistiva bem definida e razoavelmente bem centralizada na região dos alvos; assim como no alvo em  $27m$ , o método capacitivo apresentou anomalia resistiva para este tipo de alvo, resultado este coerente com o esperado.

A seção de resistividade real anterior à instalação dos alvos (*background*) apresentou disparidade com as anomalias resistivas observadas nas seções após a colocação dos alvos, demonstrando que os objetos enterrados influenciam as seções geoeletricas produzidas, para os alvos deste trecho.

Os dados sintéticos produzidos para este trecho (figura 7.9) demonstram que o método convencional simulado não apresenta resolução para a detecção dos tubos de ferro com diâmetros de  $10$  e  $20cm$  localizados em  $32$  e  $33m$  (topo em  $1,0m$  de profundidade), mas apresentou duas regiões resistivas para os alvos em  $35$  e  $36m$ , divergindo-se dos dados reais de campo; esta divergência possivelmente está associada ao erro RMS elevado da seção sintética produzida. Para os alvos presentes no trecho entre  $38$  e  $40m$ , a seção sintética apresentou, assim como os dados reais, anomalia resistiva na região dos alvos, demonstrando comportamento similar entre o método convencional e o capacitivo para este tipo de alvo (manilha de concreto com interior vazio).



**Figura 7.20.** Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 25,0m e 45,0m e em X=1,5m e 2,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).



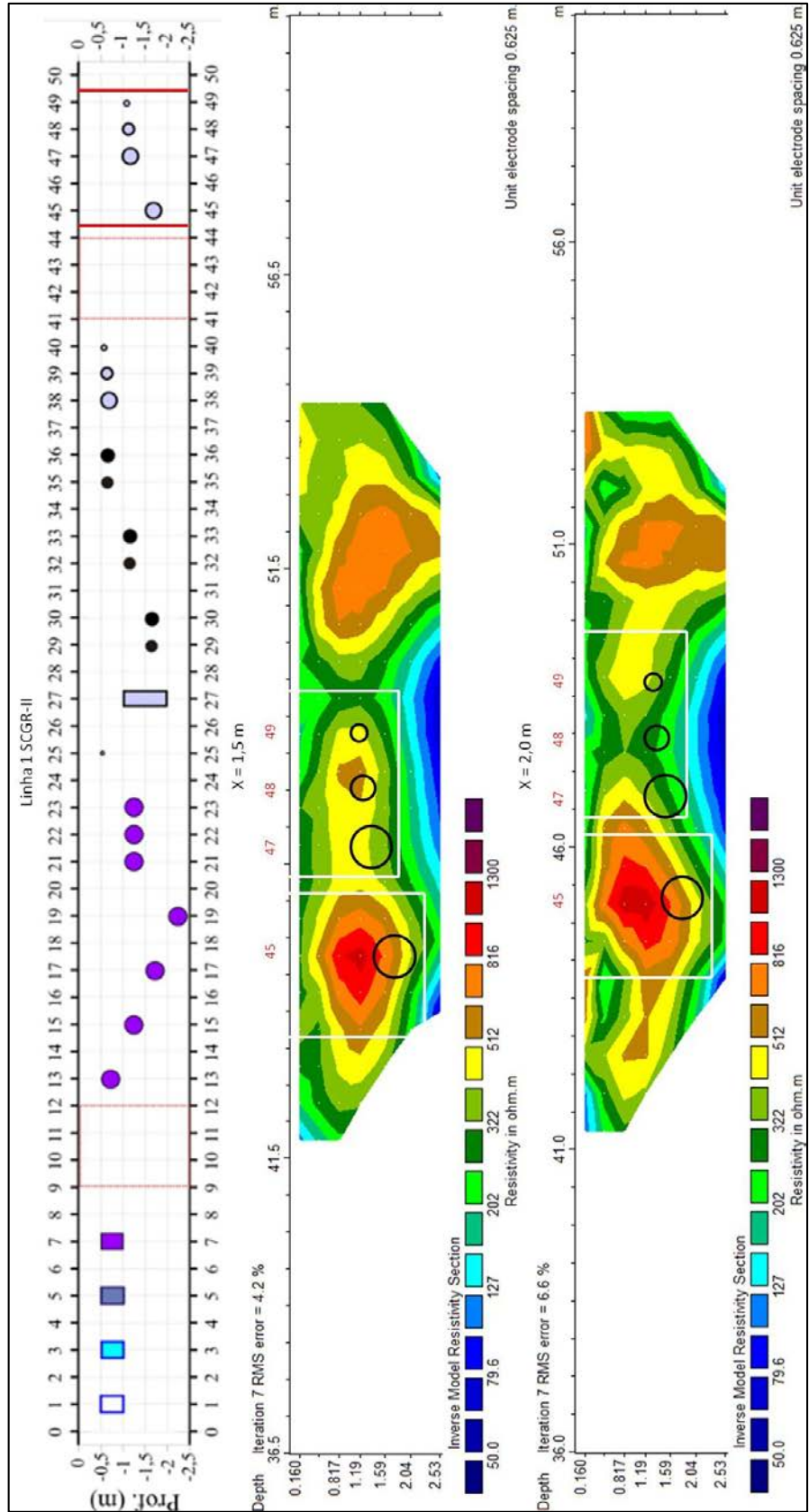
**Figura 7.21.** Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 25,0m e 45,0m para X=2,5m, *background* em X= 2,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).

As **Figuras 7.22 e 7.23** apresentam as seções de resistividade real em  $X=1,5m$ ,  $2,0m$  e  $2,5m$  do trecho entre  $Y= 42$  e  $54m$  referentes à linha 1 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.23 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

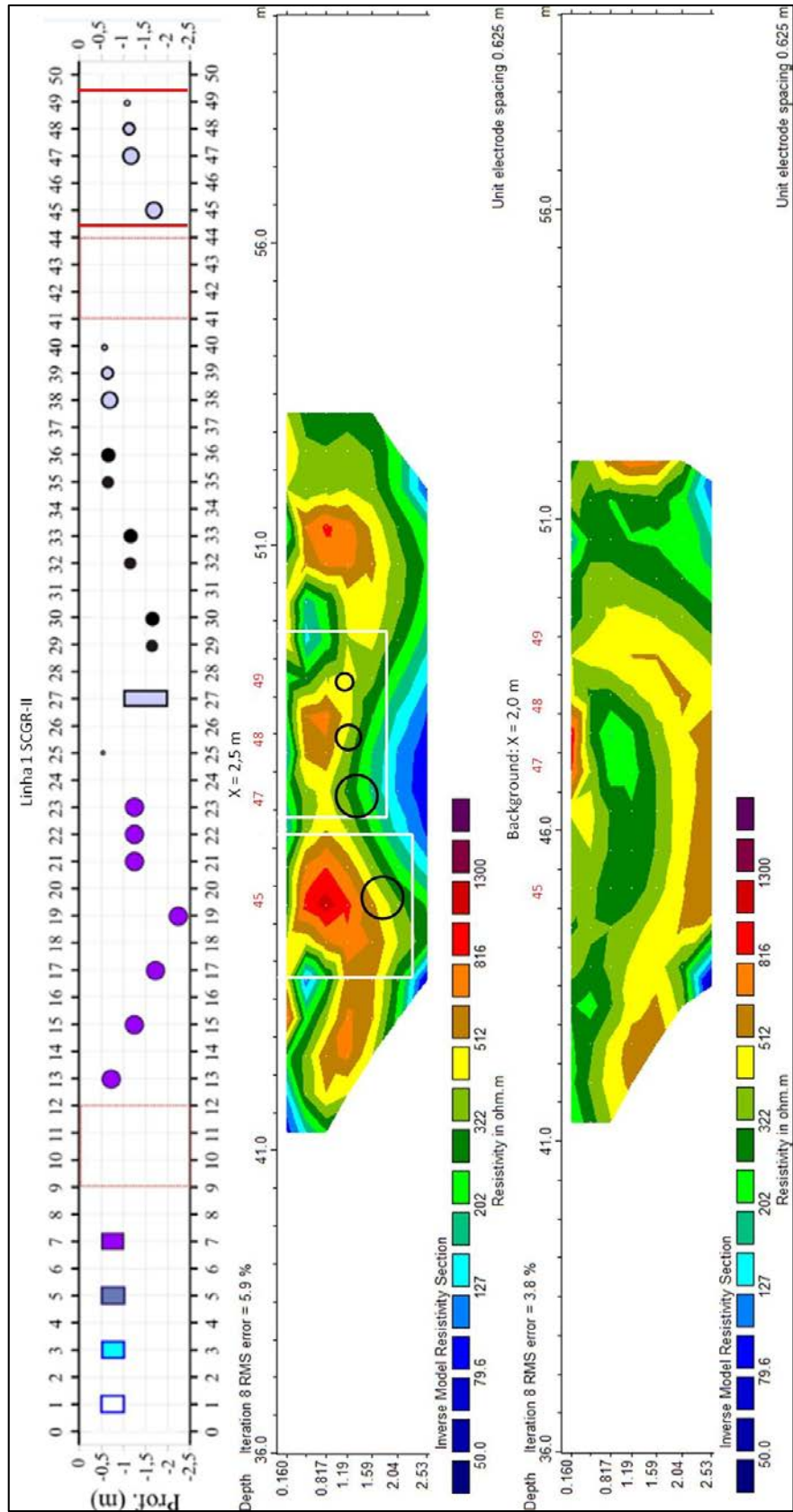
Este trecho refere-se aos alvos localizados entre  $Y=45$  e  $49m$ . Os alvos presentes neste trecho (manilha de concreto, com seu maior comprimento no eixo X, vazia, com  $80$ ,  $50$  e  $30cm$  de diâmetro) apresentou anomalia resistiva bem definida e razoavelmente bem centralizada no alvo em  $Y=45m$  (manilha de  $80cm$  de diâmetro). Para as manilhas em  $Y=47,48$  e  $49m$ , nota-se uma anomalia resistiva, englobando os três alvos, porém menos acentuada que a anomalia observada em  $45m$ .

A seção de resistividade real anterior à instalação dos alvos (*background*) apresentou disparidade com as anomalias resistivas observadas nas seções após a colocação dos alvos, demonstrando que os objetos enterrados influenciam as seções geoeletricas produzidas, para os alvos deste trecho.

Os dados sintéticos produzidos para este trecho (figura 7.9) não apresentaram boa resposta para os alvos deste trecho devido à falta de resolução do método convencional simulado para a profundidade dos alvos deste setor. Porém, como demonstrado em trechos anteriores, o método convencional simulado e o método capacitivo utilizado delimitam contornos resistivos para este tipo de alvo (manilhas de concreto).



**Figura 7.22.** Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 42 e 54m e em X=1,5m e 2,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).



**Figura 7.23.** Seções de resistividade real da linha 1 entre Y= 42 e 54m para X=2,5m, *background* em X= 2,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).



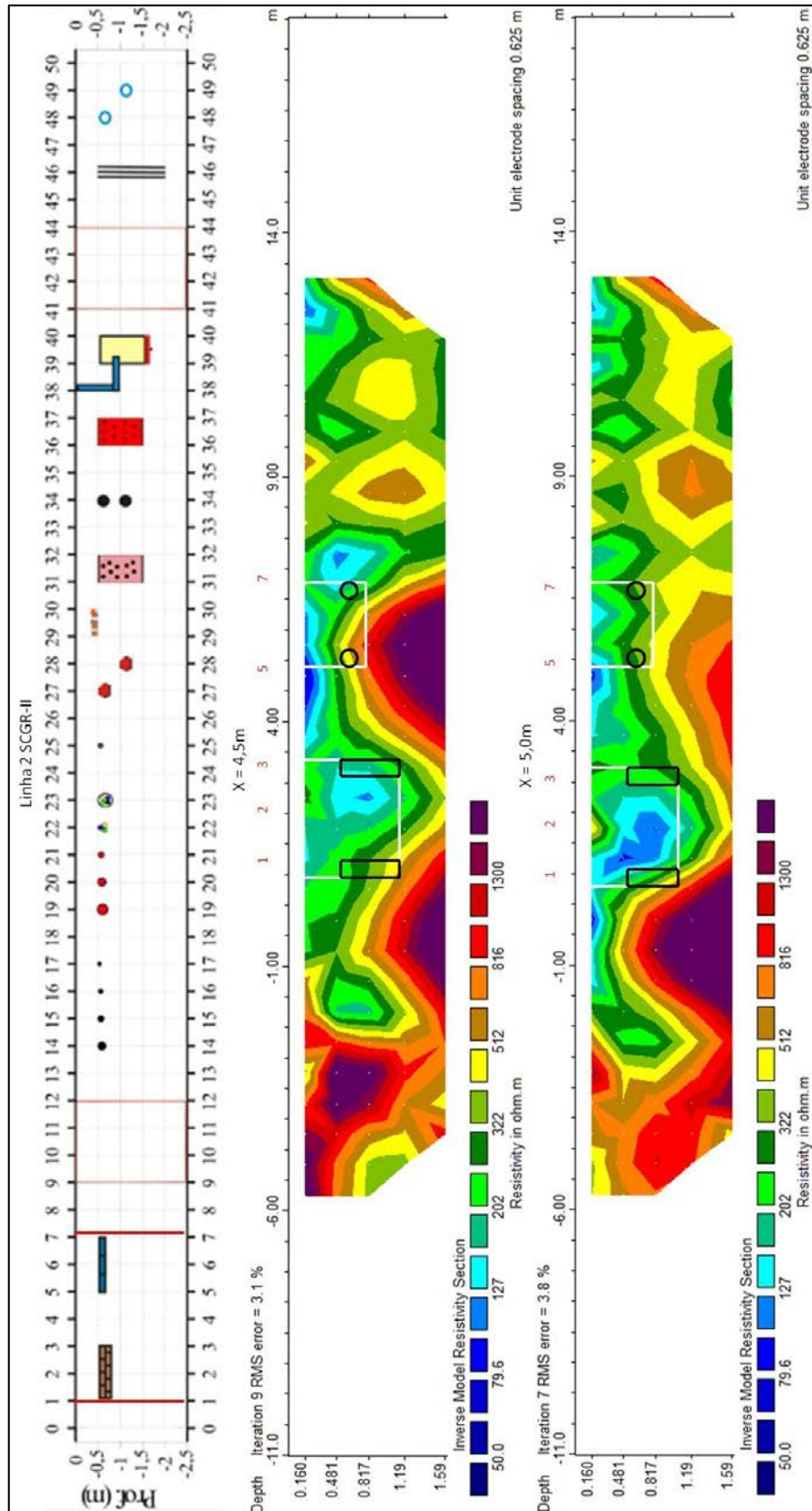
#### 7.4.2. Análise dos Perfis de Resistividade – Linha 2

As **Figuras 7.24 e 7.25** apresentam as seções de resistividade real em  $X=4,5\text{m}$ ,  $5,0\text{m}$  e  $5,5\text{m}$  do trecho entre  $Y= -5$  e  $14\text{m}$  referentes à linha 2 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.25 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

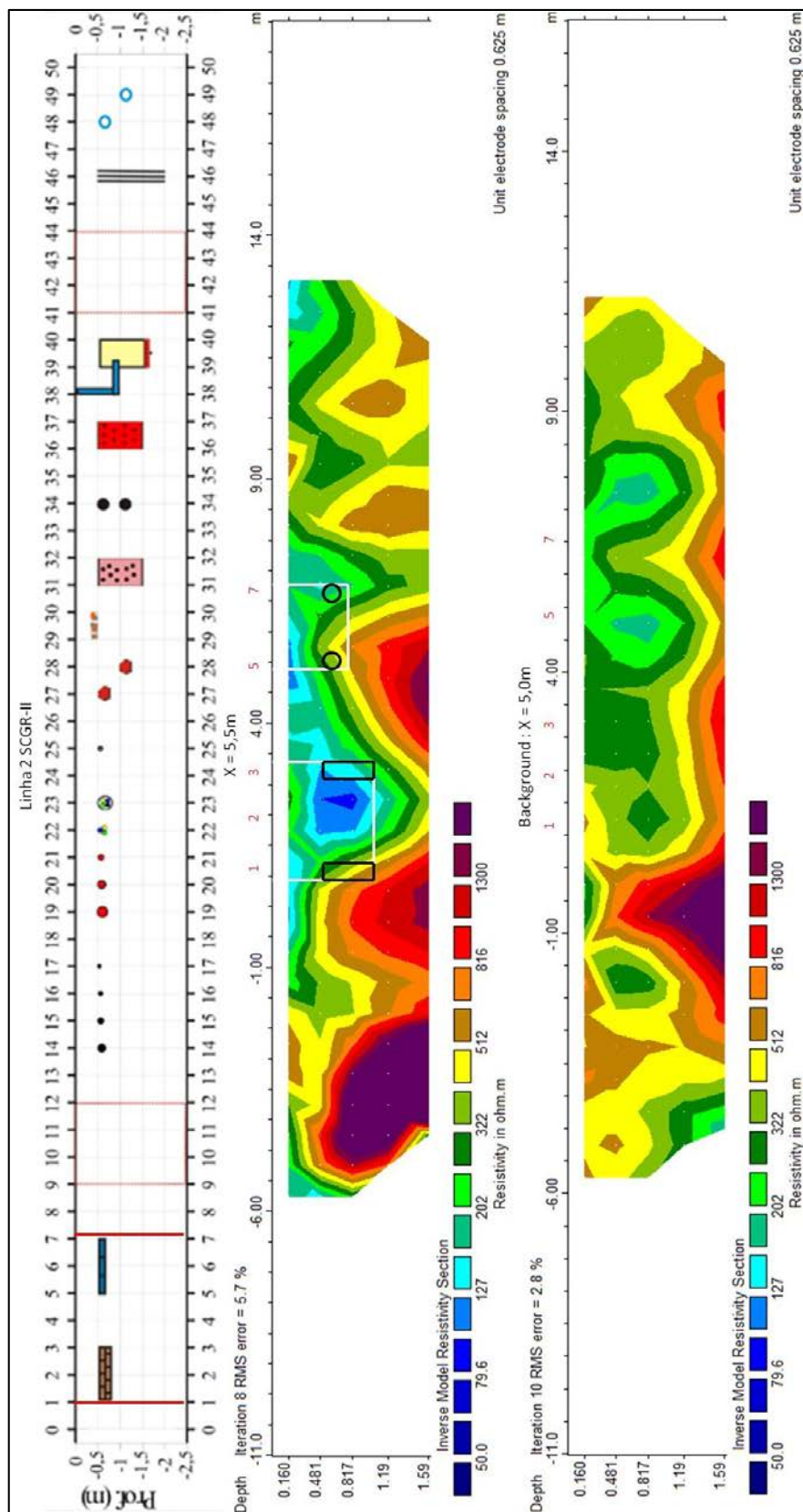
Este trecho refere-se aos alvos localizados entre  $Y=1$  e  $7\text{m}$ . O alvo localizado entre  $Y=1$  e  $3\text{m}$  (muro circular de tijolos) apresentou anomalia condutiva em relação ao entorno enquanto que para o alvo presente entre  $Y=5$  e  $7\text{m}$  (tubulação de PVC de  $20\text{cm}$  de diâmetro, em forma de U, cheia de água doce, com seu eixo alinhado em X) não foi observado bom contraste de resistividade com o entorno. Possivelmente, a anomalia condutiva do primeiro alvo seja devido ao seu material de fabricação (tijolos de argila), que apresentam resistividade entre  $10$  a  $20\text{ Ohm.m}$  e possuem menor resistividade em relação aos valores médios registrados na linha 2 antes da instalação dos alvos (resistividade média de  $361,56\text{ Ohm.m}$  – ver tabela 6.1). Para o segundo alvo, a não ocorrência de contraste resistivo deve-se possivelmente ao pequeno diâmetro do alvo ( $20\text{cm}$ ).

A seção de resistividade real anterior à instalação dos alvos (*background*) apresentou disparidade com as anomalias resistivas observadas nas seções após a colocação dos alvos, demonstrando que os objetos enterrados influenciam as seções geoeletricas produzidas, para os alvos deste trecho.

Os dados sintéticos produzidos para este trecho (figura 7.10) apresentam boa delimitação da região das valas para os dois alvos, porém não são capazes de delimitar a localização dos mesmos. Analisando-se os dados reais de campo com a seção sintética, nota-se maior tendência do método capacitivo em delimitar a localização do primeiro alvo – anomalia condutiva em relação ao entorno – enquanto que a simulação sintética apresentou boa delimitação da área escavada, sem gerar bom contraste dos alvos. Portanto, o equipamento capacitivo utilizado se mostrou eficiente apenas para o primeiro alvo deste trecho, superando as expectativas em relação aos dados sintéticos.



**Figura 7.24.** Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= -5 e 14m e em X=4,5m e 5,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).



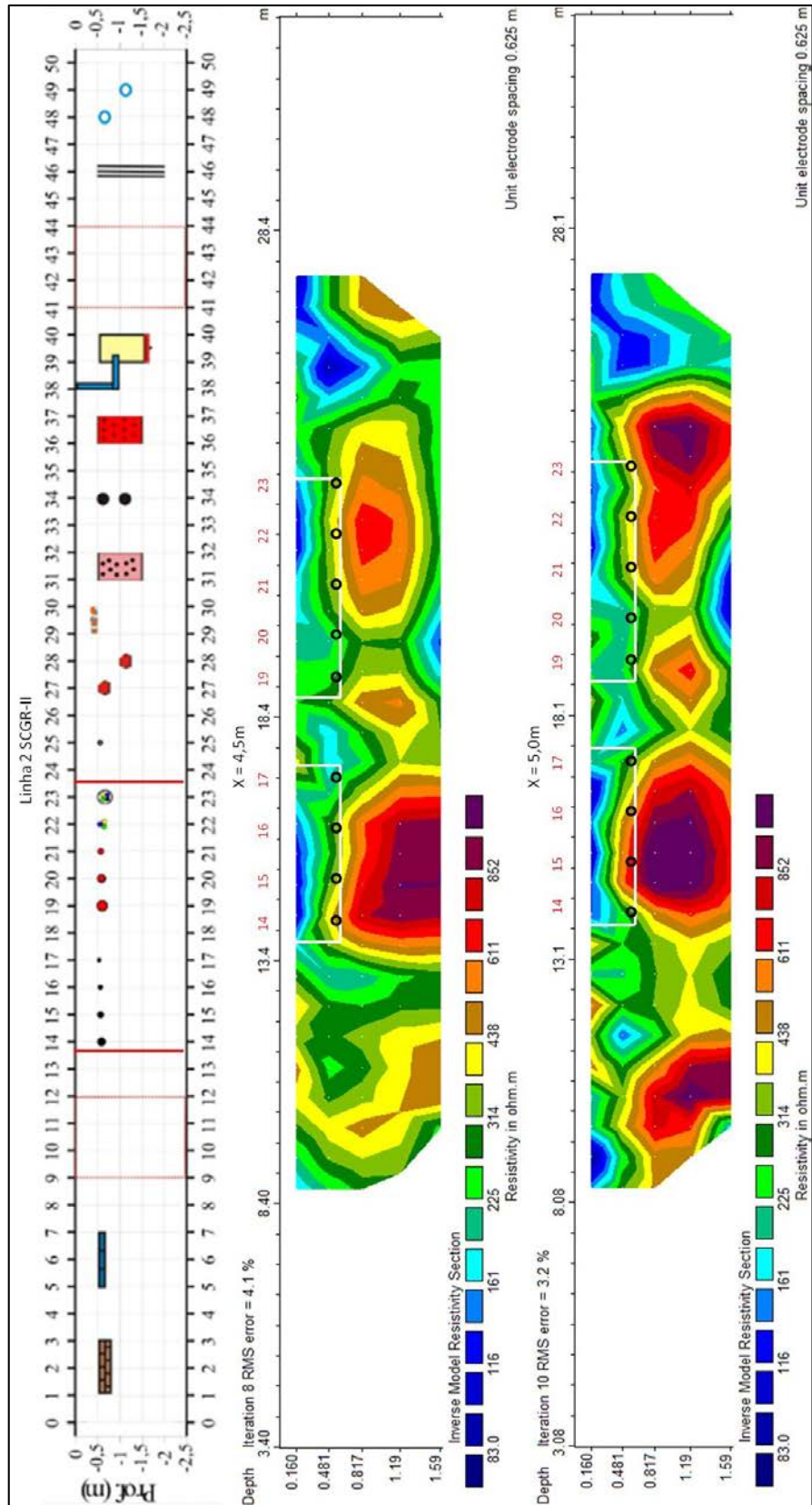
**Figura 7.25.** Seções de resistividade real da linha 2 entre Y = -5 e 14m para X=5,5m, *background* em X= 5,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).

As **Figuras 7.26 e 7.27** apresentam as seções de resistividade real em  $X=4,5\text{m}$ ,  $5,0\text{m}$  e  $5,5\text{m}$  do trecho entre  $Y= 8$  e  $28\text{m}$  referentes à linha 2 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.27 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

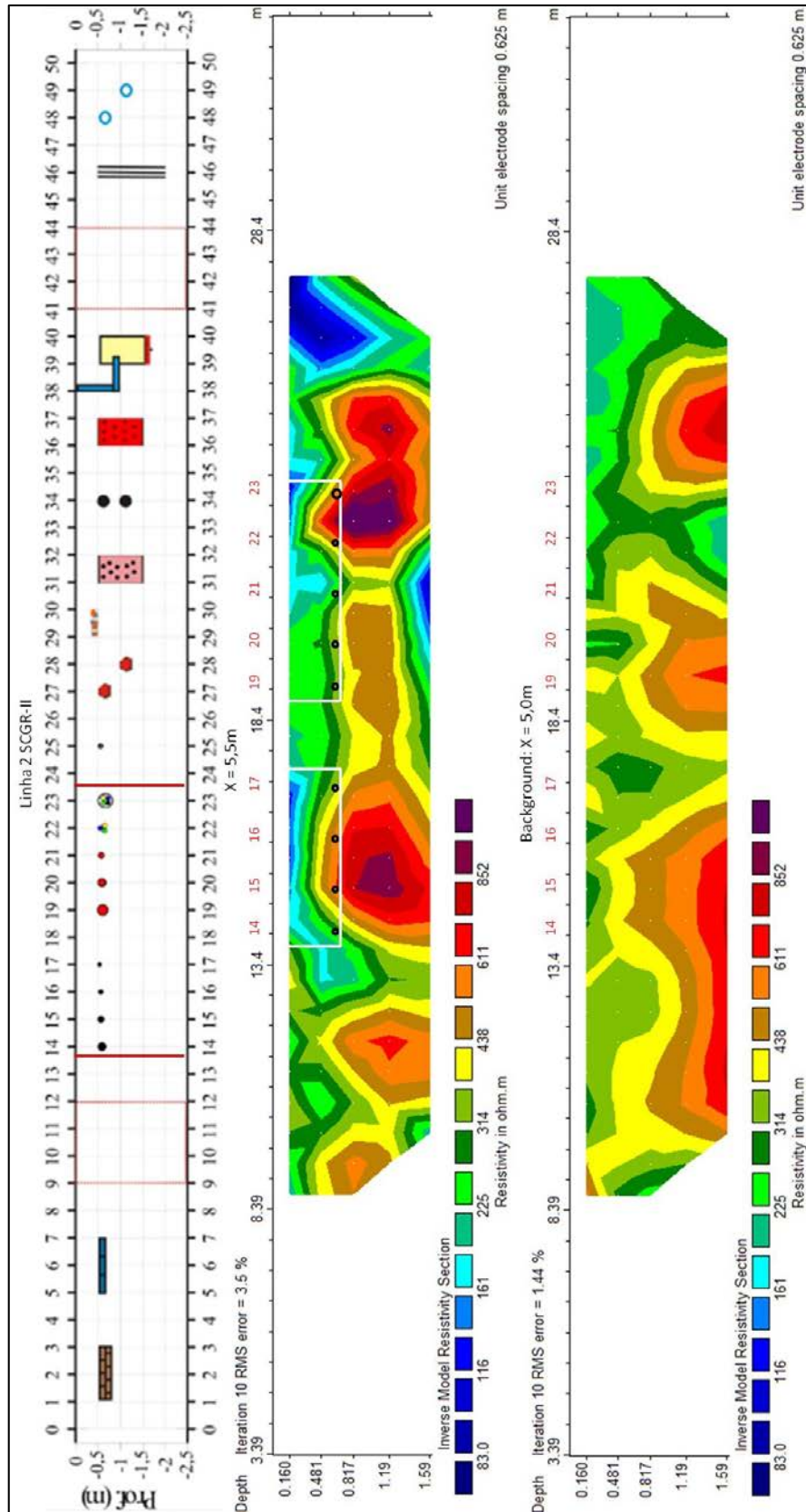
Este trecho refere-se aos alvos localizados entre  $Y=14$  e  $23\text{m}$ . Os alvos em questão (cabos elétricos de baixa e média tensão e conduítes de PVC para cabos de fibra ótica) não apresentaram bom contraste de resistividade em relação ao entorno. Este comportamento se deve possivelmente ao pequeno diâmetro dos alvos, inviabilizando a detecção e delimitação dos mesmos.

A seção de resistividade real anterior à instalação dos alvos (*background*) não apresentou grandes mudanças em relação às seções produzidas após a instalação dos alvos, demonstrando que o equipamento capacitivo utilizado não possui resolução para a detecção de determinado tipo de alvo.

Os dados sintéticos produzidos para este trecho (figura 7.10) apresentam boa delimitação da região das valas para os dois alvos, porém não são capazes de delimitar a localização dos mesmos. Portanto, assim como a seção sintética, as seções de dados reais não demonstraram resolução para a detecção deste tipo de alvo.



**Figura 7.26.** Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 8 e 28m e em X=4,5m e 5,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).



**Figura 7.27.** Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 8 e 28m para X=5,5m, *background* em X= 5,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).

As **Figuras 7.28 e 7.29** apresentam as seções de resistividade real em X=4,5m, 5,0m e 5,5m do trecho entre Y= 21 e 38m referentes à linha 2 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.29 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

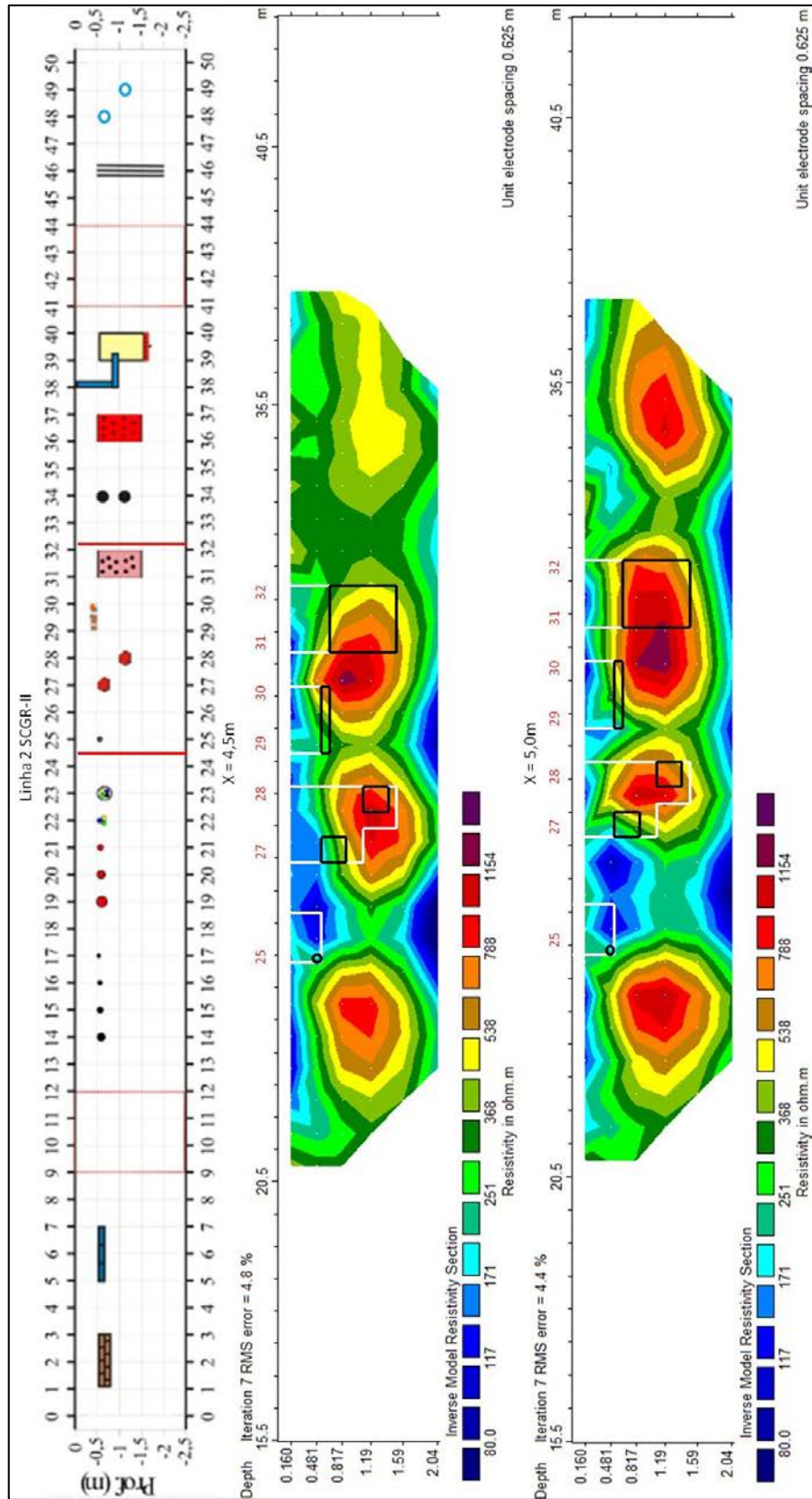
Este trecho refere-se aos alvos localizados entre Y=25 e 32m. O alvo localizado em Y=25m (cano metálico guia) apresentou forte anomalia condutiva, assim como em Y=25m da linha 1. Em Y=27 e 28m (vasos de cerâmica vazios), observa-se anomalia resistiva bem delimitada na região dos alvos; este comportamento se deve possivelmente ao volume de vazios presente no interior dos vasos de cerâmica. Na região do quarto alvo do trecho em análise (fina camada de seixos de quartzo, com menos de 10cm de espessura), entre Y=29 e 30m, observa-se uma anomalia resistiva que extrapola os limites geométricos do alvo e que não se encontra em cima do mesmo, mas abaixo deste; devido a presença de uma anomalia descentralizada e também a pequena espessura da camada de quartzo, é possível que o contraste resistivo observado tenha tido a influência dos alvos que o circundam – vasos de cerâmica vazios e caixa de material cerâmico – não sendo possível afirmar com boa acurácia a capacidade do método capacitivo na identificação de finas camadas quartzosas como esta. O quinto alvo analisado (caixa de 1m<sup>3</sup>, preenchida com material cerâmico), apresenta uma anomalia resistiva e bem definida em relação ao seu entorno; este comportamento é observado possivelmente devido ao elevado volume de vazios no interior deste alvo, por se tratar de material britado e que apresenta grandes poros em relação ao solo do entorno.

A seção de resistividade real anterior à instalação dos alvos (*background*) apresentou disparidade com as anomalias resistivas observadas nas seções após a colocação dos alvos, demonstrando que os objetos enterrados influenciam as seções geoeletricas produzidas, para os alvos deste trecho.

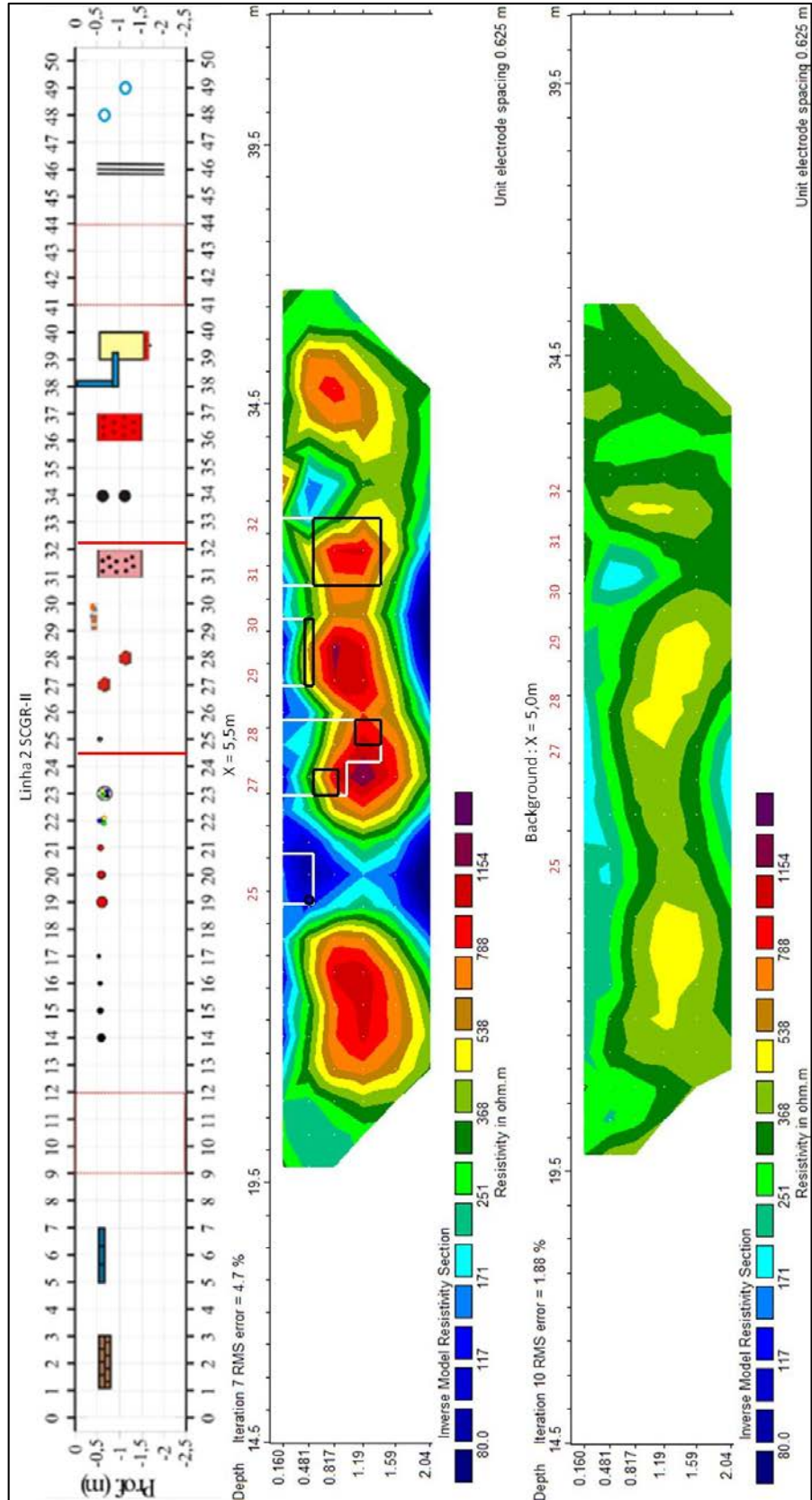
Para o cano metálico guia localizado em Y=25m, a seção sintética (figura 7.10) apresentou forte anomalia resistiva, divergindo dos resultados reais; este comportamento também é observado na linha 1 e pode ser explicado de forma análoga. A seção sintética delimita uma forte anomalia resistiva para o vaso de cerâmica mais raso – o vaso profundo não é detectado devido à falta de resolução do modelo sintético escolhido – convergindo com as seções produzidas com os dados reais. O modelo sintético também demonstra a tendência em se encontrar anomalias resistivas para o último alvo analisado neste trecho (figura 7.11) – caixa com materiais cerâmicos – apesar da baixa resolução do modelo sintético para a profundidade deste alvo; este comportamento converge com o observado nas seções reais. Portanto, é possível afirmar que o método capacitivo utilizado apresenta

razoável sensibilidade na detecção dos alvos deste trecho, com ressalvas à camada de quartzo presente entre Y=29 e 30m.





**Figura 7.28.** Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 21 e 38m e em X=4,5m e 5,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).



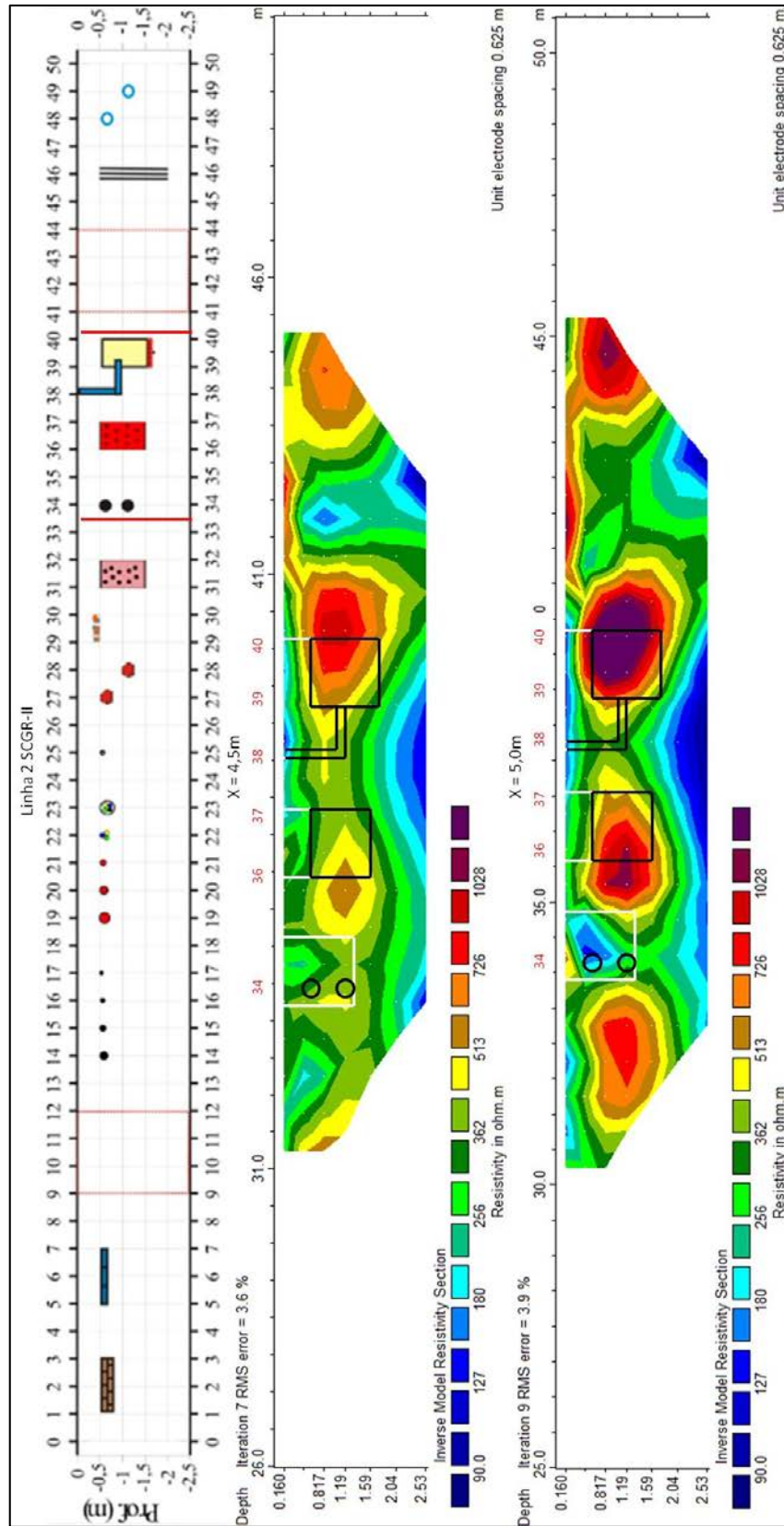
**Figura 7.29.** Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 21 e 38m para X=5,5m, *background* em X= 5,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).

As **Figuras 7.30 e 7.31** apresentam as seções de resistividade real em  $X=4,5\text{m}$ ,  $5,0\text{m}$  e  $5,5\text{m}$  do trecho entre  $Y=31$  e  $45\text{m}$  referentes à linha 2 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.31 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

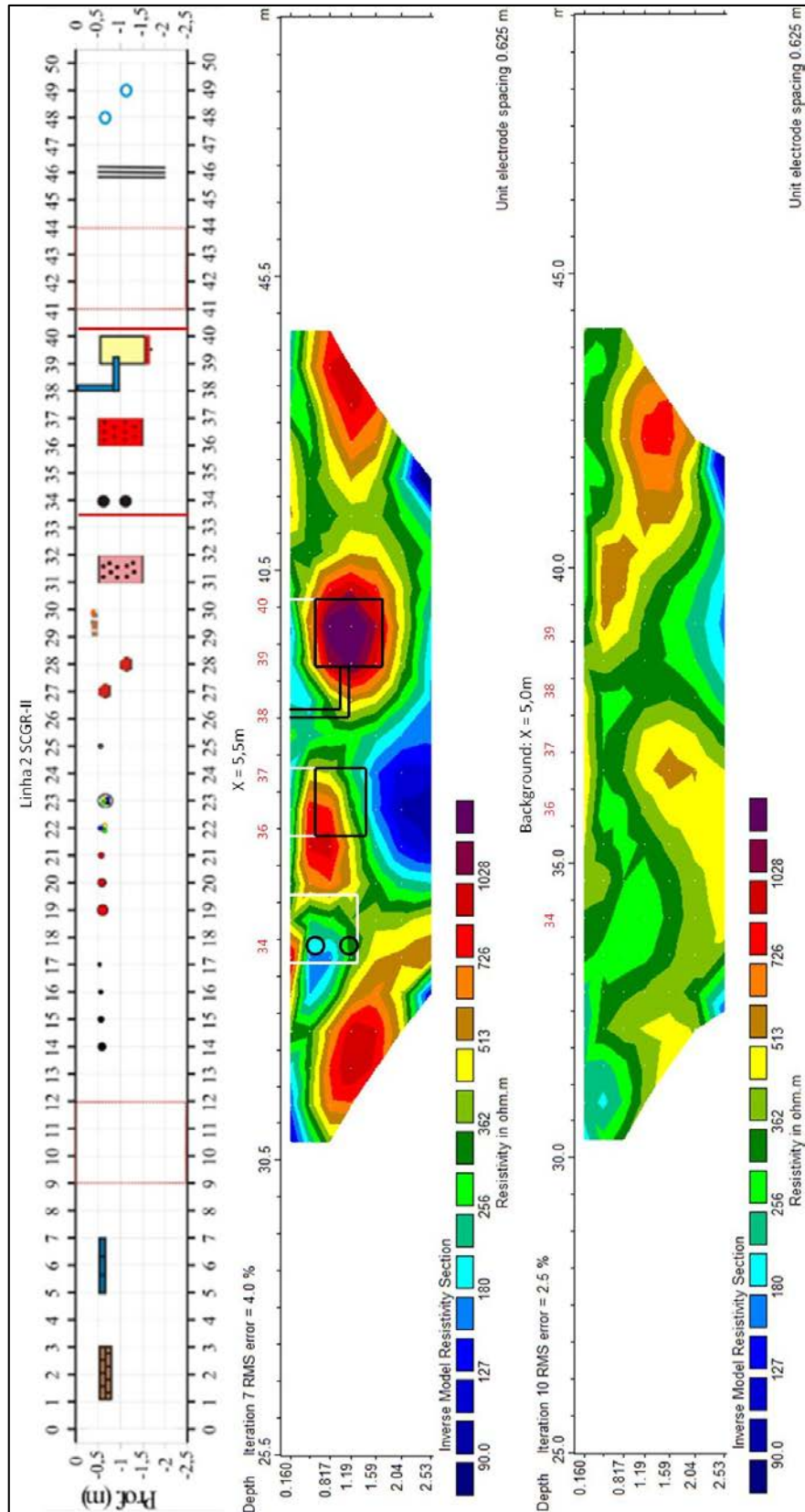
Este trecho refere-se aos alvos localizados entre  $Y=34$  e  $40\text{m}$ . O alvo localizado em  $Y=34\text{m}$  (tubos de ferro, vazios, com  $20\text{cm}$  de diâmetro, empilhados, com topo em  $0,5$  e  $1\text{m}$  de profundidade) apresentou anomalia condutiva de considerável intensidade e bem delimitada em relação ao entorno; este comportamento para os tubos de ferro não foi observado na linha 1, o que levanta a hipótese do método ter maior acurácia para estruturas verticalizadas ou de maior diâmetro de forma geral, uma vez que os tubos de ferro da linha 1 não foram empilhados, mas sim postados lado a lado. O alvo localizado entre  $Y=36$  e  $37\text{m}$  (caixa de  $1\text{m}^3$ , preenchida com brita de granito) apresentou anomalia resistiva bem definida em relação ao entorno; este comportamento deve-se possivelmente ao grande volume de espaços vazios no interior do alvo em relação ao solo circundante, gerando dessa forma, uma região de maior resistividade elétrica. Para o alvo localizado entre  $Y=38$  e  $40\text{m}$  (caixa de  $1\text{m}^3$ , preenchida com areia, com  $10\text{cm}$  de brita de granito na base e um tubo metálico de  $5\text{cm}$  de diâmetro abaixo da brita. Tubo de PVC de  $10\text{cm}$  de diâmetro em formato de L, da superfície ao topo da caixa), observa-se uma forte anomalia resistiva bem definida; este comportamento ocorre possivelmente devido ao fato de a areia apresentar maior resistividade em relação ao solo circundante. Para este alvo, não houve a identificação do tubo metálico em sua base, muito provavelmente devido ao seu pequeno diâmetro e à sua profundidade –  $1,5\text{m}$ .

A seção de resistividade real anterior à instalação dos alvos (*background*) apresentou disparidade com as anomalias resistivas observadas nas seções após a colocação dos alvos, demonstrando que os objetos enterrados influenciam as seções geoeletricas produzidas, para os alvos deste trecho.

A seção sintética produzida (figura 7.11) apresentou forte anomalia de resistividade para o tubo de ferro localizado em  $34\text{m}$ ; este comportamento difere do resultado observado nas seções reais e tem explicação análoga às disparidades observadas entre o método sintético utilizado e o método capacitivo, para o cano metálico guia e com os tambores de aço da linha 1. Os dados sintéticos demonstram anomalias resistivas para os demais alvos deste trecho, demonstrando comportamento semelhante ao observado nas seções reais de resistividade. Portanto, o método capacitivo demonstrou sensibilidade para a detecção dos alvos presentes neste trecho, com ressalvas para o par de tubos de ferro empilhados em  $Y=34\text{m}$ , que não foram identificados na linha 1, quando dispostos lado a lado.



**Figura 7.30.** Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 31 e 45m e em X=4,5m e 5,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).



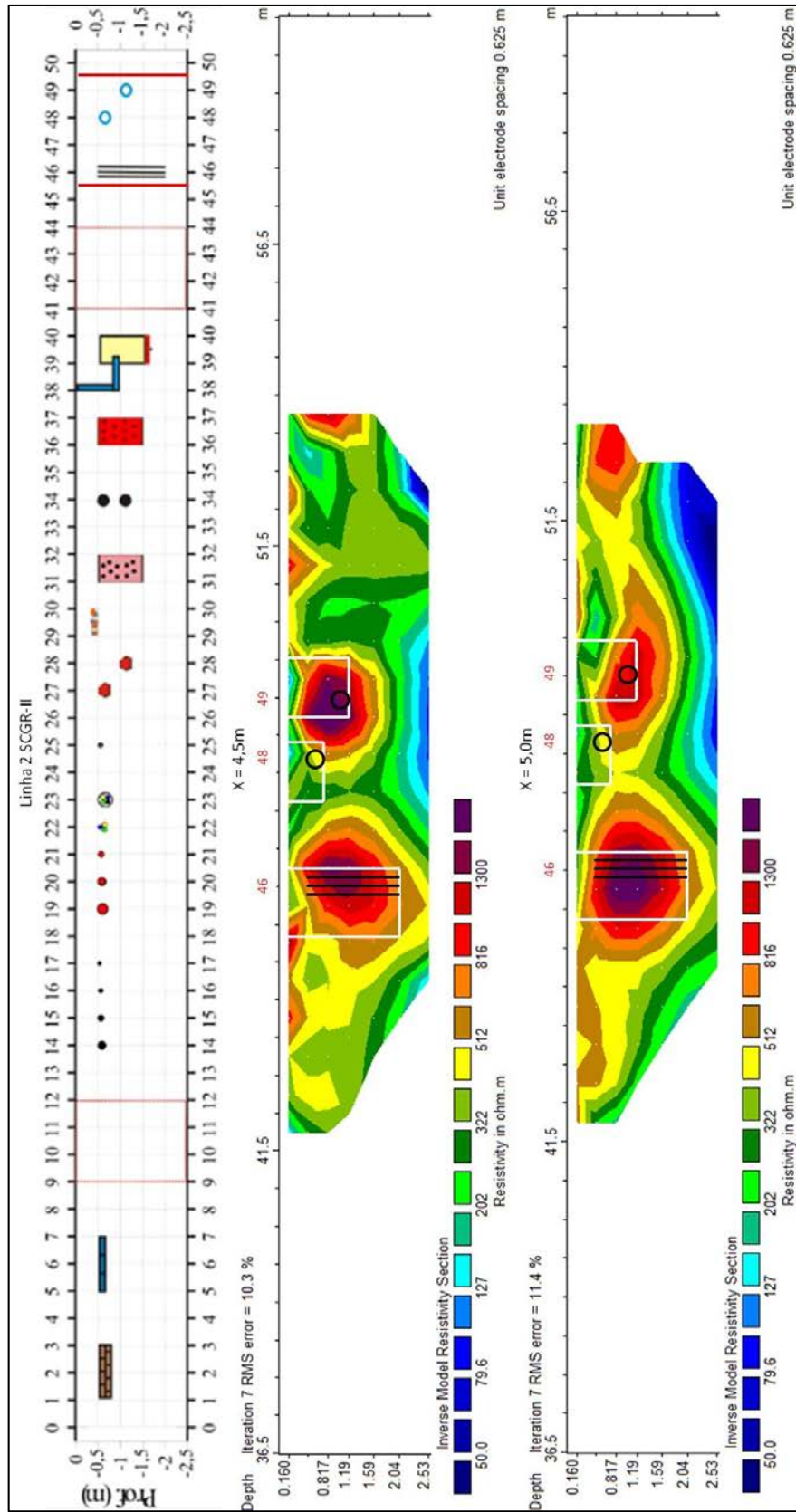
**Figura 7.31.** Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 31 e 45m para X=5,5m, *background* em X= 5,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).

As **Figuras 7.32 e 7.33** apresentam as seções de resistividade real em  $X=4,5m$ ,  $5,0m$  e  $5,5m$  do trecho entre  $Y= 41$  e  $54m$  referentes à linha 2 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.33 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

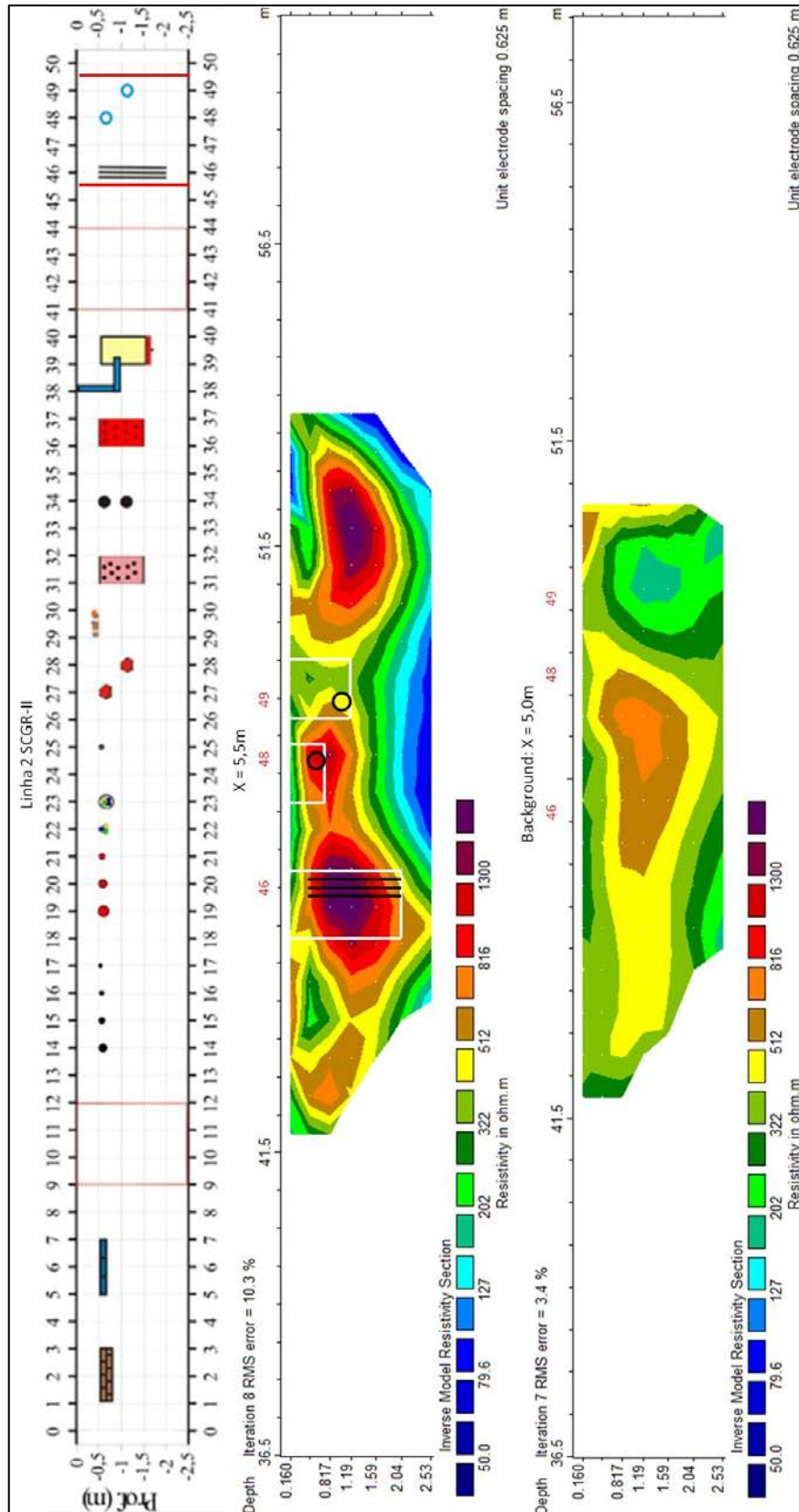
Este trecho refere-se aos alvos localizados entre  $Y=46$  e  $49m$ . O alvo localizado em  $Y=46m$  (3 chapas de alumínio dispostas verticalmente e equidistantes) apresentou forte anomalia resistiva e bem definida, contrastando com os valores registrados no entorno; este comportamento não era o esperado, uma vez que o material de fabricação do alvo – alumínio – apresenta alta condutividade elétrica, porém, é possível que entre as chapas de alumínio haja um grande volume de vazios, aumentando a resistividade do alvo como um todo. Os alvos localizados em  $Y=48$  e  $49m$  (Tubos de PEAD, de  $20cm$  de diâmetro, vazio, com seu maior comprimento paralelo ao eixo  $X$ ) apresentam anomalia resistiva bem delimitada na região dos alvos; este comportamento era o esperado devido ao volume de vazios em seus interiores e devido ao material – PEAD – altamente resistivo.

A seção de resistividade real anterior à instalação dos alvos (*background*) apresentou disparidade com as anomalias resistivas observadas nas seções após a colocação dos alvos, demonstrando que os objetos enterrados influenciam as seções geoeletricas produzidas, para os alvos deste trecho.

A seção sintética produzida (figura 7.11) não apresentou bom contraste de resistividade em  $Y=46m$ , não sendo possível determinar com boa precisão a ocorrência do alvo; este comportamento diverge do resultado obtido com os dados reais de campo, o que reforça a hipótese da ocorrência de grande volume de vazios entre as chapas de alumínio que compõem o alvo. O tubo de PEAD em  $48m$  – com topo em  $0,5m$  – apresentou anomalia resistiva no modelo sintético criado e o mesmo comportamento foi observado com os dados reais de campo, demonstrando a similaridade entre o modelo sintético e o modelo real. Portanto, o método capacitivo identificou significativos contrastes de resistividade para os alvos presentes neste trecho, demonstrando sensibilidade para a identificação dos mesmos.



**Figura 7.32.** Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 41 e 54m e em X=4,5m e 5,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).



**Figura 7.33.** Seções de resistividade real da linha 2 entre Y= 41 e 54m para X=5,5m, *background* em X= 5,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (retas e círculos em preto).



### 7.4.3. Análise dos Perfis de Resistividade – Linha 3

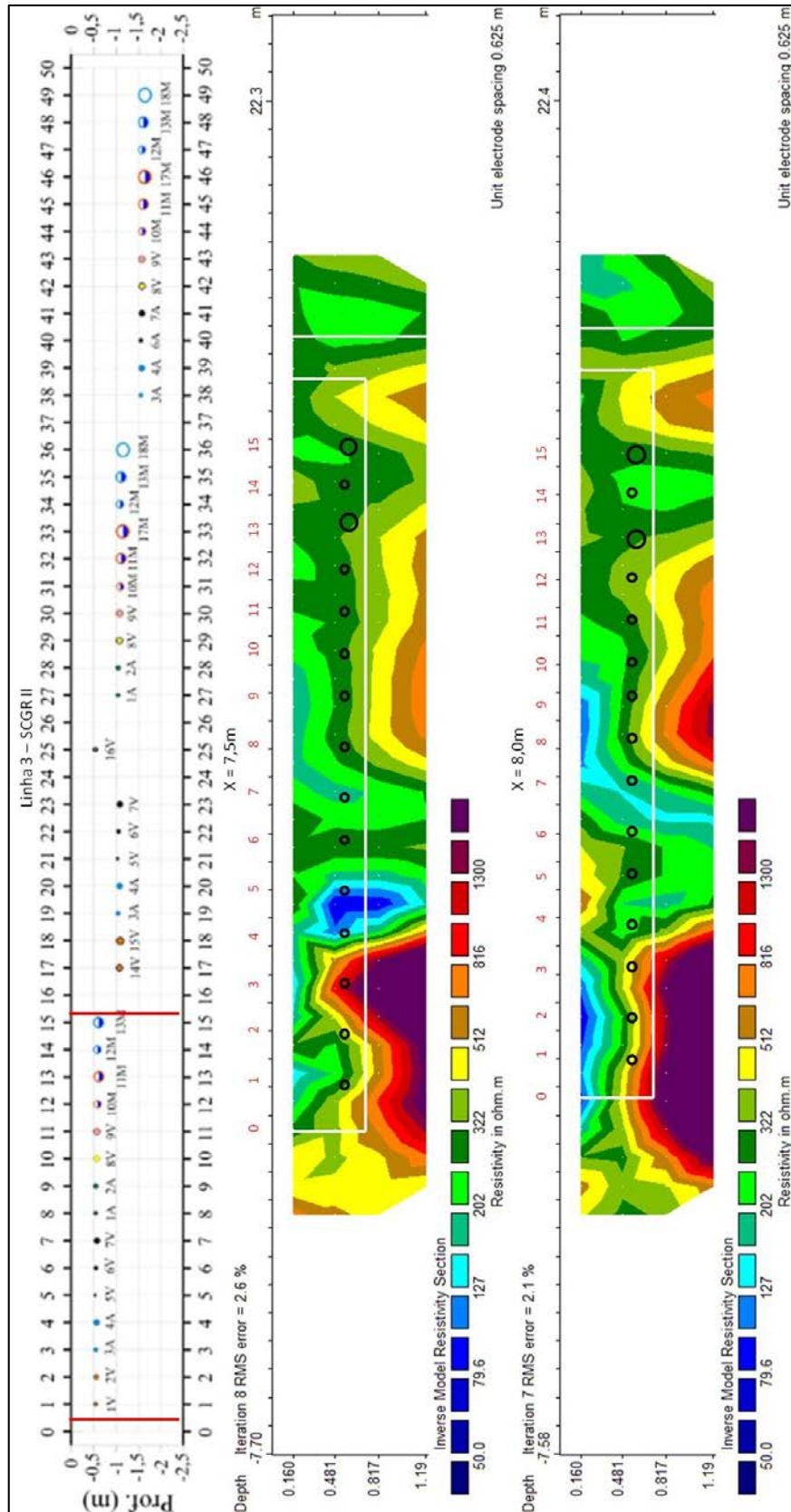
As Figuras 7.34 e 7.35 apresentam as seções de resistividade real em  $X=7,5\text{m}$ ,  $8,0\text{m}$  e  $8,5\text{m}$  do trecho entre  $Y= -3$  e  $20\text{m}$  referentes à linha 3 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.35 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

Este trecho refere-se aos alvos localizados entre  $Y=1$  e  $15\text{m}$ . O conjunto de alvos localizados entre  $Y=1$  e  $4\text{m}$  (tubos de polietileno em  $Y=1$  e  $2\text{m}$  e tubos de PVC em  $Y= 3$  e  $4\text{m}$ , com diâmetros de  $7,5$  e  $10\text{cm}$  respectivamente, cheios de água) apresentam anomalia resistiva, não definida em sua base; este comportamento poderia ser explicado pela grande resistividade do polietileno e do PVC. Quanto à anomalia não delimitar os alvos e ser aberta em profundidade, é possível que devido ao baixo diâmetro dos alvos o método capacitivo não possua a resolução necessária para a caracterização individual dos mesmos, sendo necessário correlacionar os dados com outros métodos e técnicas geofísicas. O conjunto de alvos localizados em  $Y=5, 6$  e  $7\text{m}$  (tubos de ferro de  $5, 7,5$  e  $10\text{cm}$  de diâmetro) apresentam contraste condutivo em relação ao entorno; este comportamento pode ter sido causado pelo mesmo motivo observado nos tambores de aço da linha 1, nos tubos de ferro da linha 2 e no cano guia que atravessa as três linhas do SCGR-II, ou seja, pelo comportamento particular do OhmMapper com alvos metálicos. Os alvos de 8 a 11 (tubos de polietileno, PVC e cerâmica de baixo diâmetro) apresentam tendência resistiva em relação ao entorno, porém esta ocorre de forma menos intensa quando comparada aos alvos de  $Y=1$  a  $4\text{m}$ , não sendo o método capaz de caracterizar individualmente os alvos resistivos de pequeno diâmetro, porém demonstrando sofrer a influência dos materiais resistivos dos alvos. Os alvos localizados em  $Y=12, 13, 14$  e  $15$  (tubos de cerâmica e de PVC, de  $20$  e  $30\text{cm}$  de diâmetro, com água até a metade em seu interior) aparentam gerar anomalia levemente condutiva em relação ao entorno; este comportamento pode ser explicado pelo volume de material condutivo – água – no interior dos alvos, o que demonstra a influência dos tubos de cerâmica e PVC preenchidos com água, e em  $0,5\text{m}$  de profundidade, nas seções geoeletricas produzidas.

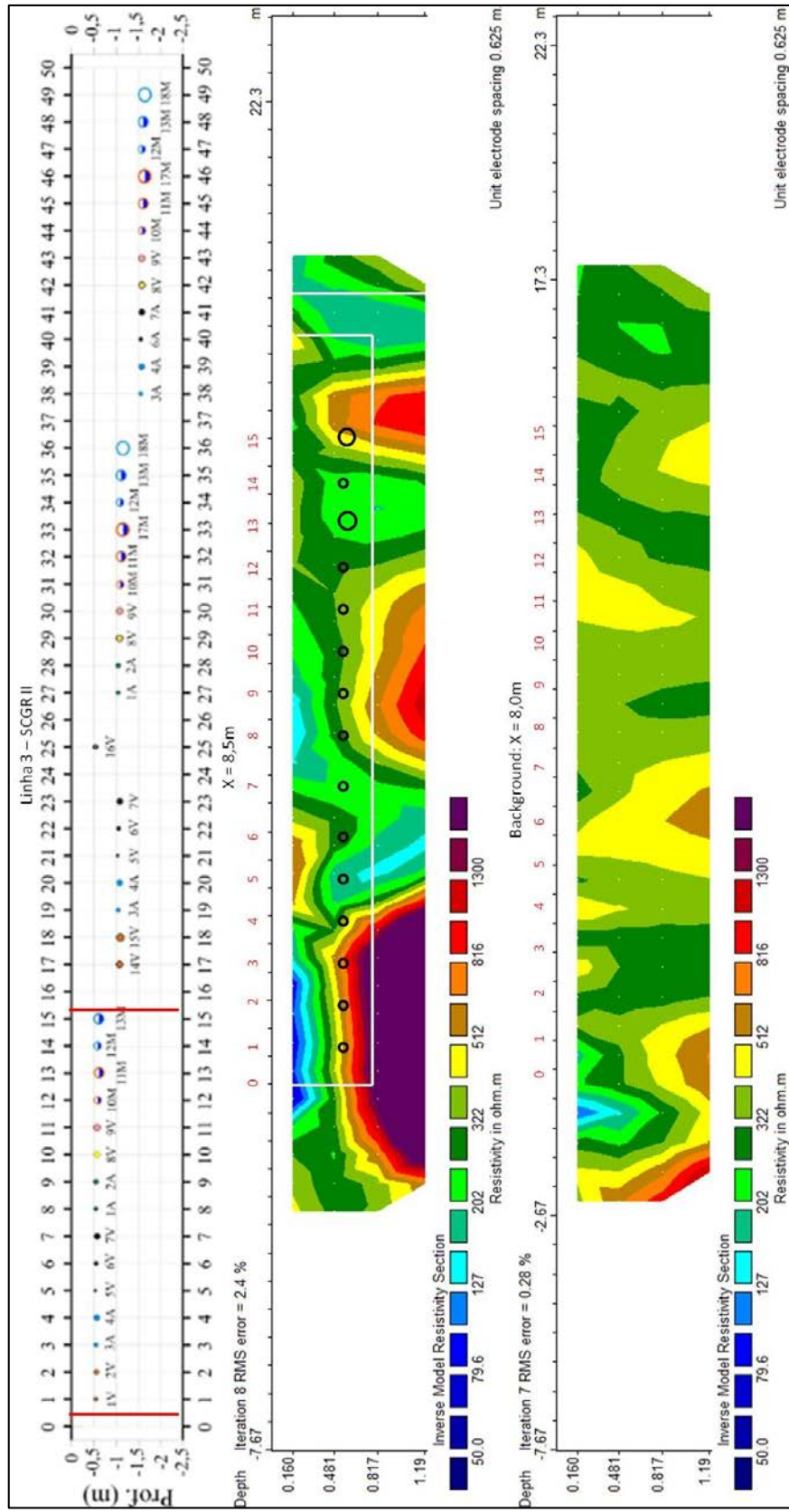
A seção de resistividade real anterior à instalação dos alvos (*background*) apresentou disparidade com as anomalias resistivas observadas nas seções após a colocação dos alvos, demonstrando que os objetos enterrados influenciam as seções geoeletricas produzidas, para os alvos deste trecho.

A seção sintética produzida (figura 7.12) não apresentou bom contraste de resistividade com os alvos deste trecho, apresentando porções condutivas em regiões de alvos resistivos e vice-versa; este comportamento demonstra a falta de resolução do método

sintético produzido para a caracterização dos alvos presentes e reforça a necessidade do uso de outras técnicas e métodos geelétricos em conjunto com a resistividade capacitiva para a delimitação dos referidos alvos.



**Figura 7.34.** Seções de resistividade real da linha 3 entre  $Y = -3$  e  $20$  m e em  $X = 7,5$  m e  $8,0$  m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).

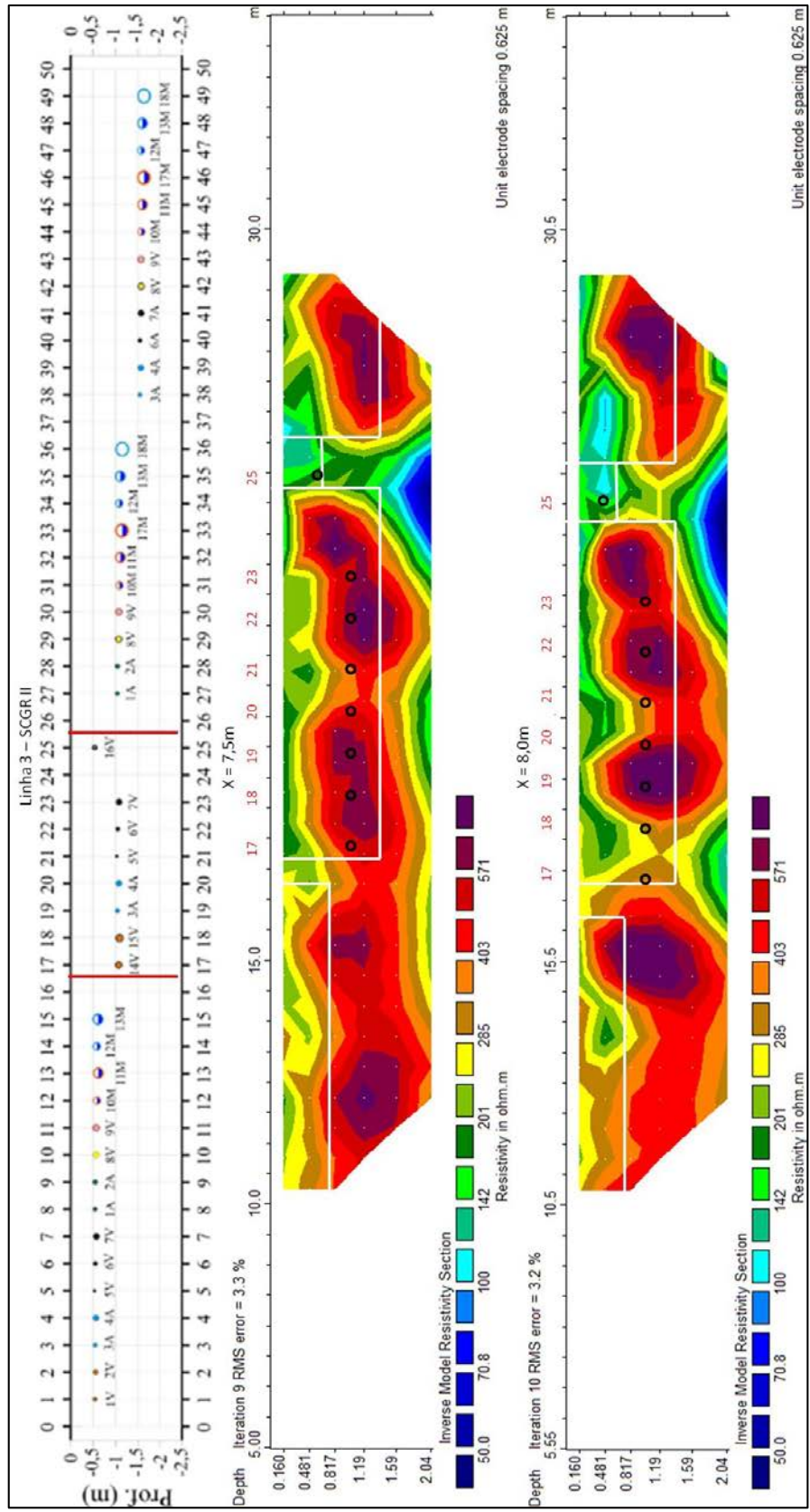


**Figura 7.35.** Seções de resistividade real da linha 3 entre  $Y = -3$  e  $20\text{m}$ , para  $X = 8,5\text{m}$ , *background* em  $X = 8,0\text{m}$  (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).

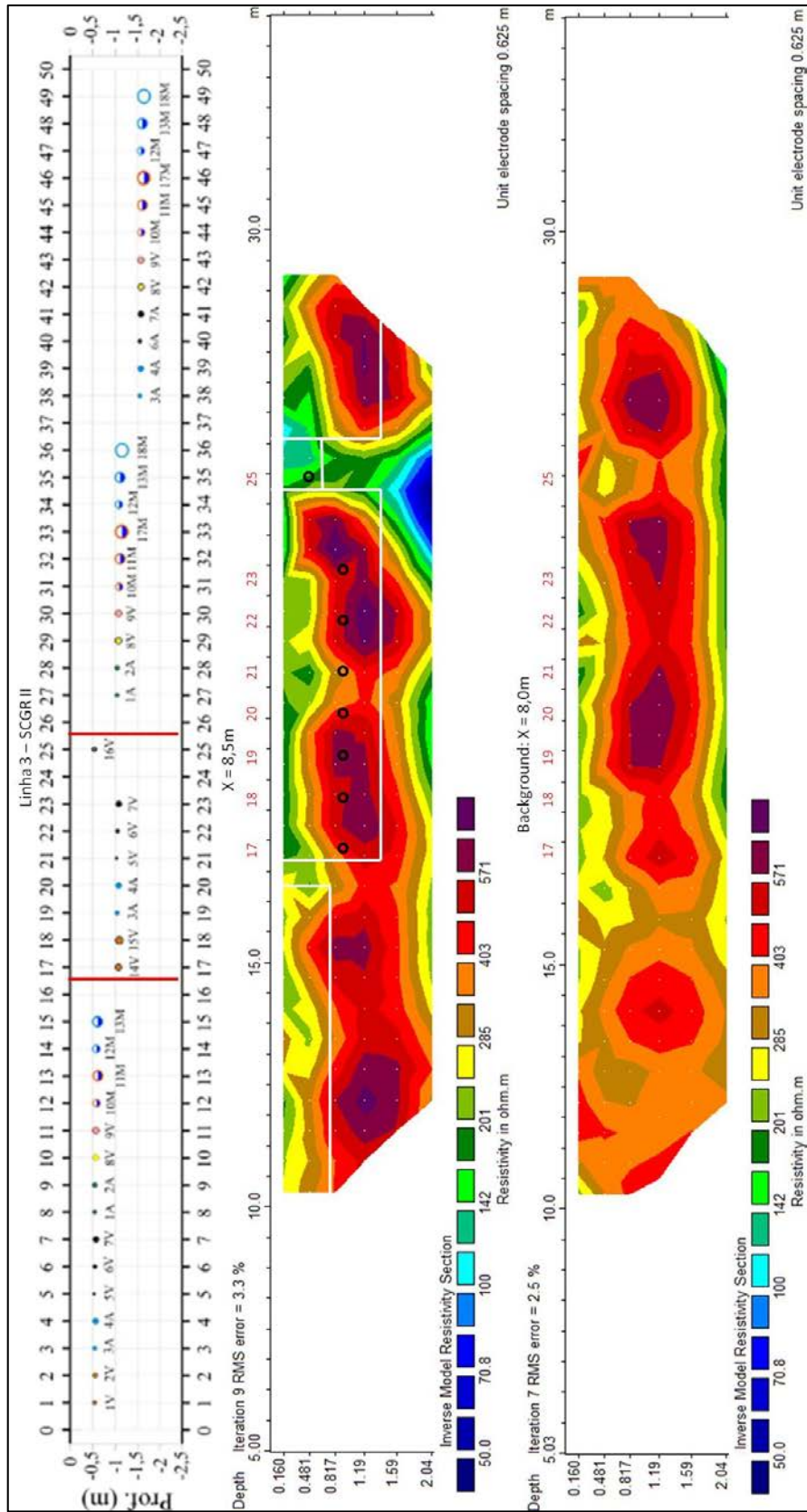
As **Figuras 7.36 e 7.37** apresentam as seções de resistividade real em  $X=7,5\text{m}$ ,  $8,0\text{m}$  e  $8,5\text{m}$  do trecho entre  $Y= 10$  e  $30\text{m}$  referentes à linha 3 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.37 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

Os alvos localizados entre  $Y=17$  e  $23\text{m}$  (tubos de polietileno, PVC e ferro fundido de diâmetros inferiores a  $10\text{cm}$ ) não apresentaram anomalia elétrica característica, aonde o contraste resistivo observado apresenta grande similaridade com os contrastes observados na seção de *background* deste trecho. Este comportamento evidencia a ineficiência do método capacitivo escolhido para a caracterização de alvos de pequeno diâmetro e presentes nesta ou em maiores profundidades. O alvo em  $Y=25\text{m}$  (tubo metálico guia) apresentou contraste condutivo, assim como nas demais linhas analisadas, demonstrando novamente a eficiência do método na caracterização de materiais metálicos na profundidade e dimensão deste alvo.

A seção sintética produzida (figura 7.12) não apresentou bom contraste de resistividade com os alvos deste trecho, evidenciando a falta de resolução do método sintético utilizado na detecção dos alvos com as características e em profundidades similares aos alvos do referido trecho. Portanto, o método capacitivo utilizado convergiu com a simulação realizada, sendo observada a não eficiência do método aplicado para a caracterização dos alvos nesta porção, com exceção do cano metálico guia.



**Figura 7.36.** Seções de resistividade real da linha 3 entre Y= 10 e 30m e em X=7,5m e 8,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).



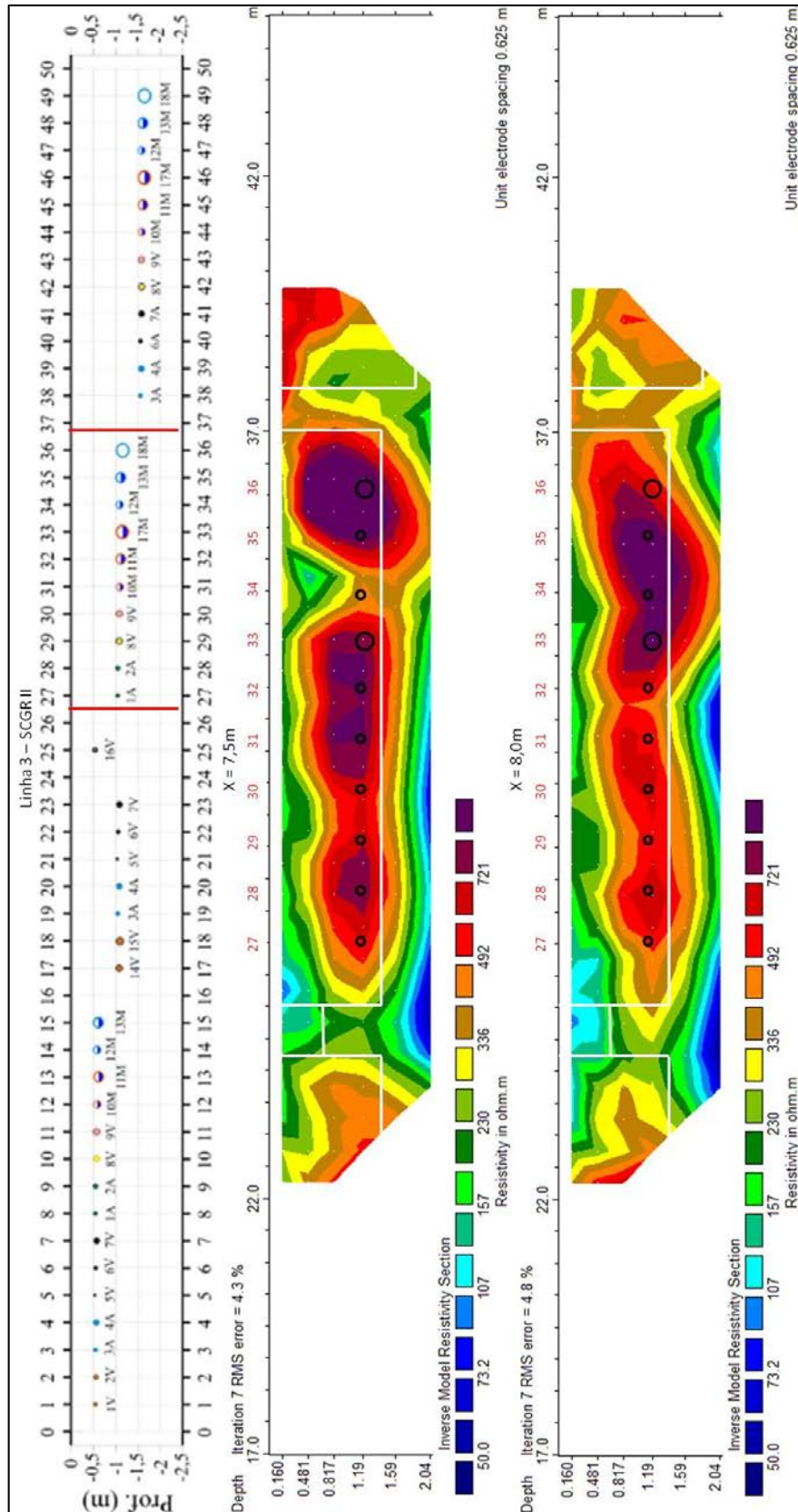
**Figura 7.37.** Seções de resistividade real da linha 3 entre Y= 10 e 30m, para X=8,5m, *background* em X= 8,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).

As **Figuras 7.38 e 7.39** apresentam as seções de resistividade real em  $X=7,5m$ ,  $8,0m$  e  $8,5m$  do trecho entre  $Y= 22$  e  $40m$  referentes à linha 3 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.39 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

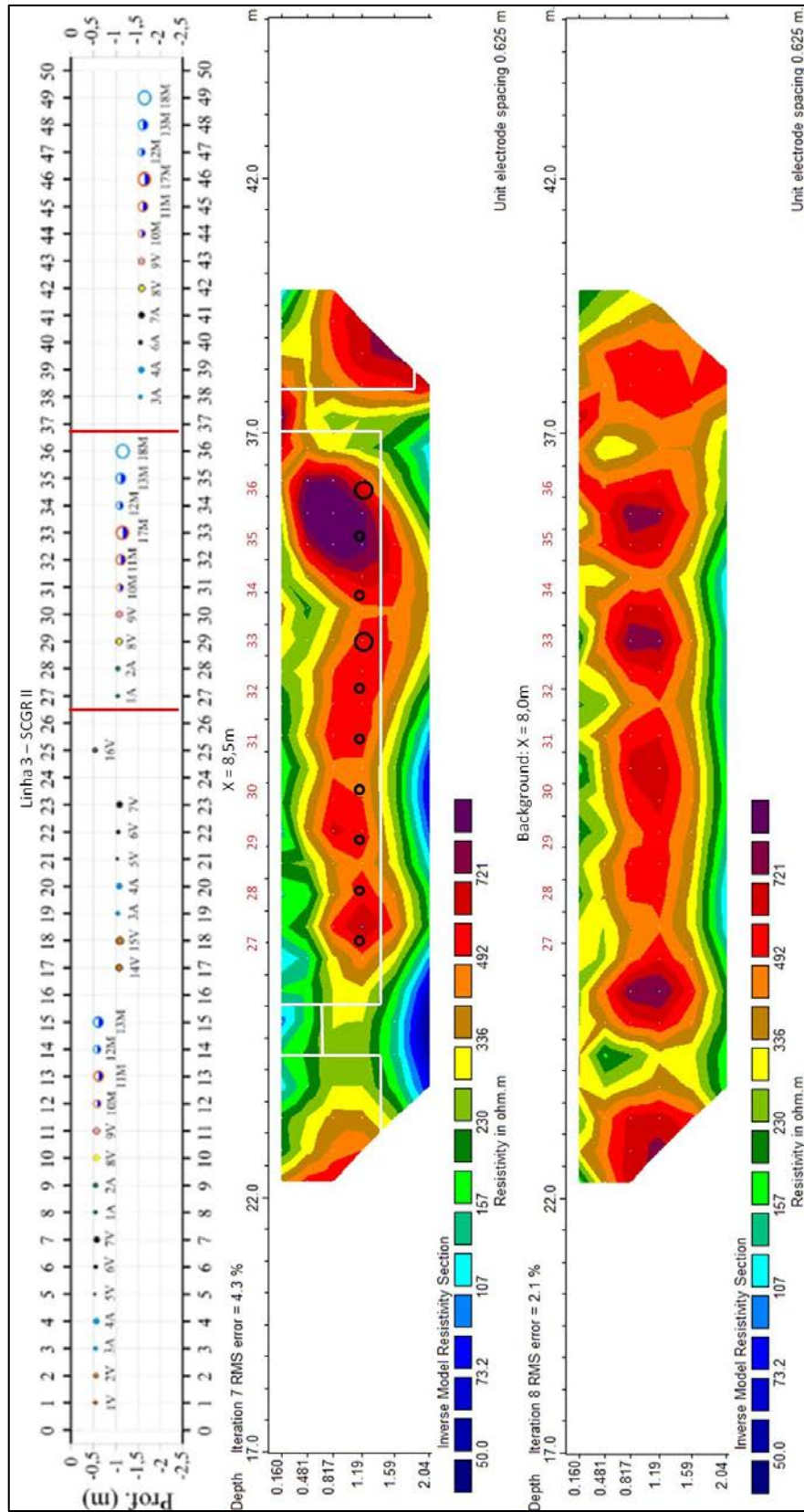
As seções de resistividade real demonstraram um forte contraste nas regiões dos alvos em  $Y=33$  (tubo de cerâmica de  $30cm$  de diâmetro e preenchido pela metade com água) e  $Y=36m$  (tubo de PVC de  $30cm$  de diâmetro e vazio) deste trecho, apresentando intensidade um pouco maior do que os contrastes observados na seção de *background* deste trecho. Este comportamento pode ter sido gerado pelos espaços vazios presentes nestes alvos (o ar apresenta alta resistividade), aliados com o maior diâmetro destes em relação aos demais alvos do trecho, porém, devido às dimensões e à profundidade em que se encontram, a constatação e a delimitação dos alvos pelo método capacitivo pode ser controversa e inconclusiva, sendo necessário o uso de outras técnicas mutuamente ao método capacitivo para a melhor avaliação das anomalias observadas. Os demais alvos do trecho – com diâmetros inferiores a  $30cm$  – apresentaram contraste resistivo similar aos observados na seção de *background*.

As seções sintéticas produzidas (figuras 7.12 e 7.13) não apresentaram bom contraste de resistividade com os alvos deste trecho, evidenciando a falta de resolução do método sintético utilizado na detecção dos alvos com as características e em profundidades similares aos alvos do referido trecho. Portanto, o método capacitivo deve ser utilizado em parceria com outros métodos geofísicos para a detecção de alvos com as características e dimensões observadas neste trecho – em especial para os alvos em  $Y=33$  e  $36m$ , que possuem maior diâmetro em relação aos demais.





**Figura 7.38.** Seções de resistividade real da linha 3 entre Y= 22 e 40m e em X=7,5m e 8,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).

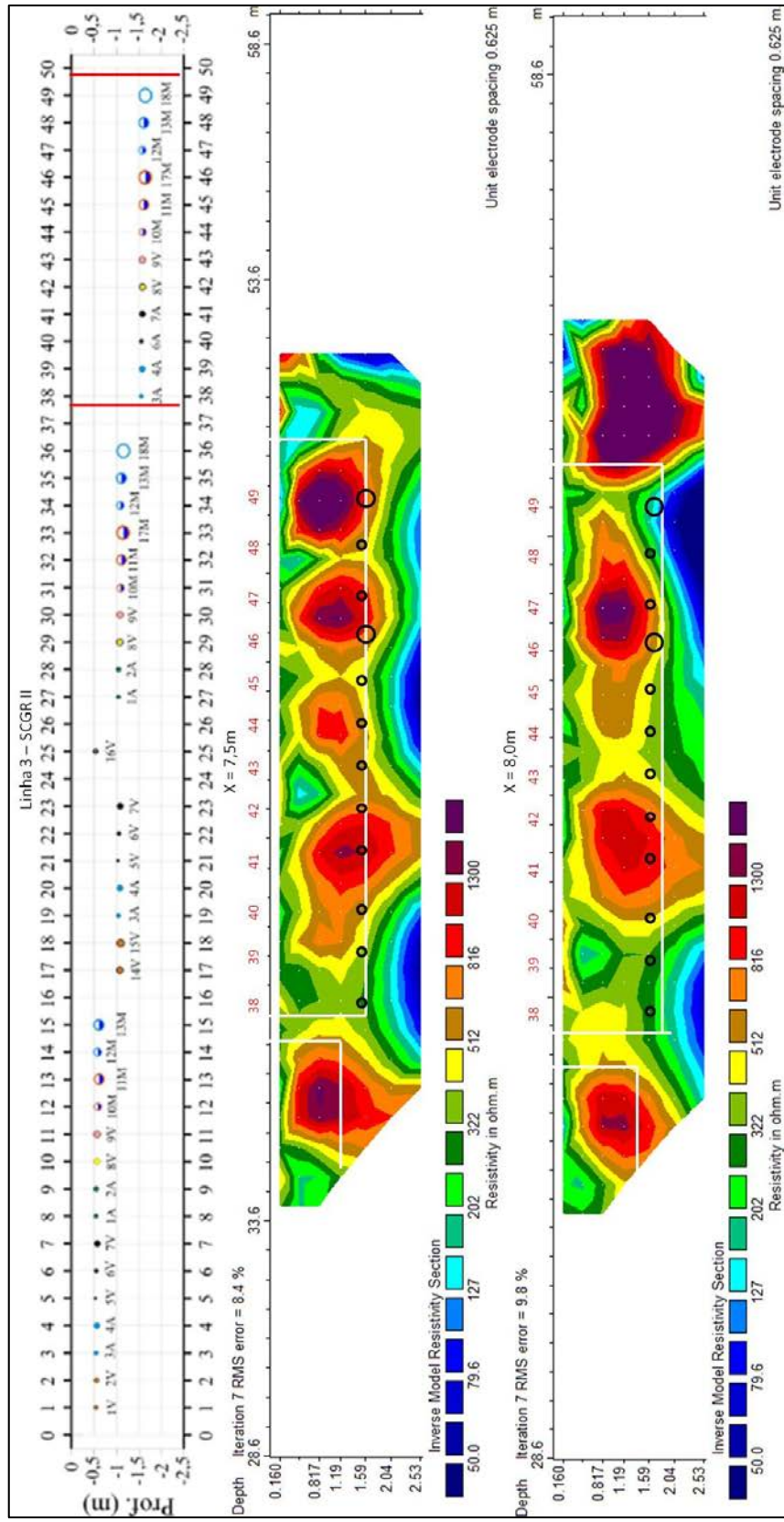


**Figura 7.39.** Seções de resistividade real da linha 3 entre Y= 22 e 40m, para X=8,5m, *background* em X= 8,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).

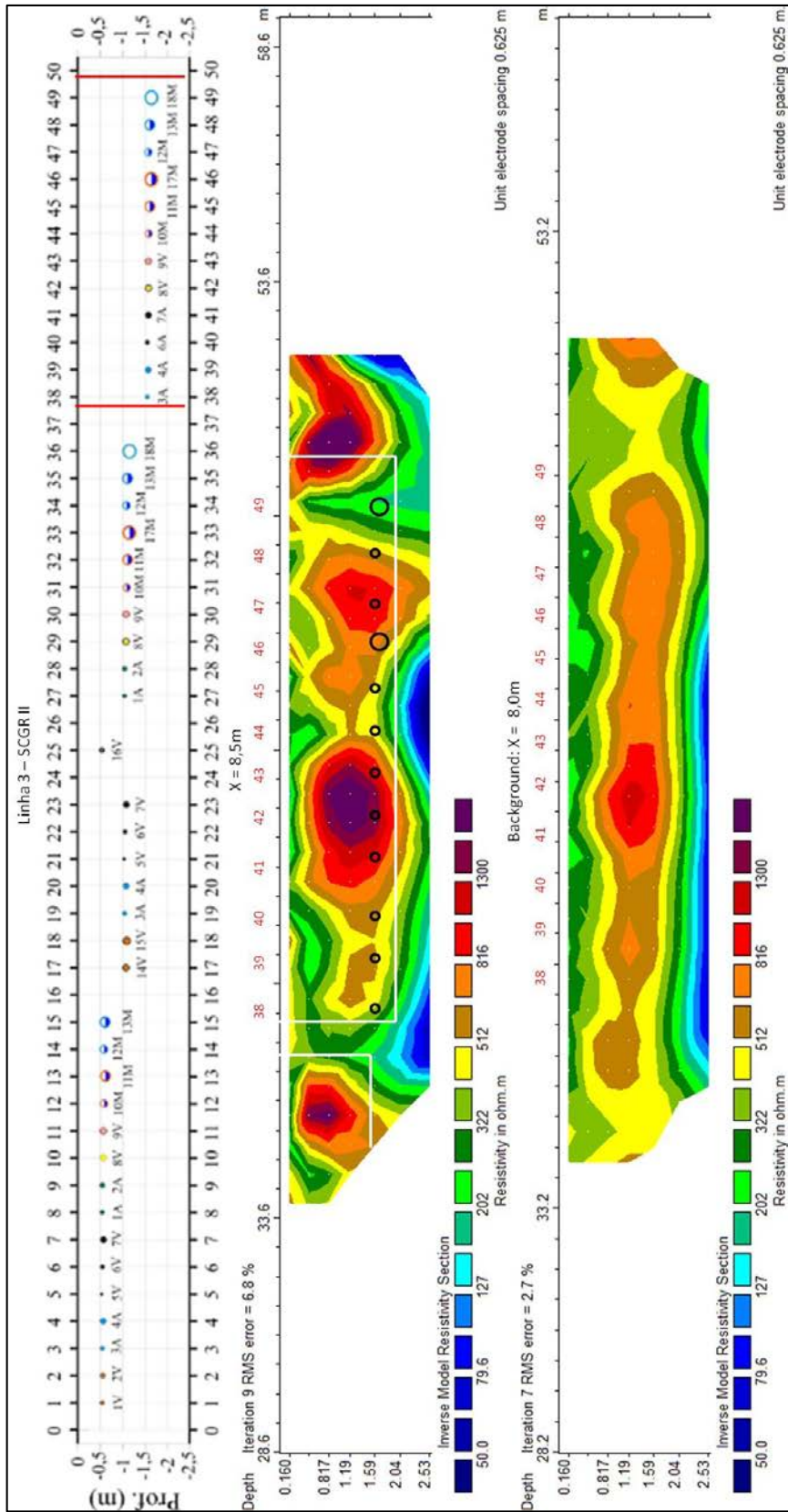
As **Figuras 7.40 e 7.41** apresentam as seções de resistividade real em  $X=7,5m$ ,  $8,0m$  e  $8,5m$  do trecho entre  $Y= 34$  e  $52m$  referentes à linha 3 do SCGR-II. Juntamente com os perfis geoeletricos, a parte inferior da figura 7.41 expõe os dados de *background*, adquiridos anteriormente a instalação dos alvos.

As seções de resistividade real demonstraram um forte contraste nas regiões dos alvos em  $Y=46$  (tubo de cerâmica de  $30cm$  de diâmetro e preenchido pela metade com água) e  $Y=49m$  (tubo de PVC de  $30cm$  de diâmetro e vazio) deste trecho, apresentando intensidade um pouco maior do que os contrastes observados na seção de *background* deste trecho. Este comportamento pode ter sido gerado pelos espaços vazios presentes nestes alvos (o ar apresenta alta resistividade), aliados com o maior diâmetro destes em relação aos demais alvos do trecho, porém, devido às dimensões e à profundidade em que se encontram, a constatação e a delimitação dos alvos pelo método capacitivo pode ser controversa e inconclusiva, sendo necessário o uso de outras técnicas mutuamente ao método capacitivo para a melhor avaliação das anomalias observadas. Os demais alvos do trecho – com diâmetros inferiores a  $30cm$  – apresentaram contraste resistivo similar aos observados na seção de *background*.

Assim como nos demais trechos da linha 3, a seção sintética produzida (figura 7.13) não apresentou bom contraste de resistividade com os alvos deste trecho, evidenciando a falta de resolução do método sintético utilizado na detecção dos alvos com as características e em profundidades similares aos alvos do referido trecho. Portanto, o método capacitivo deve ser utilizado em parceria com outros métodos geofísicos para a detecção de alvos com as características e dimensões observadas neste trecho – em especial para os alvos em  $Y=46$  e  $49m$ , que possuem maior diâmetro em relação aos demais.



**Figura 7.40.** Seções de resistividade real da linha 3 entre Y= 34 e 52m e em X=7,5m e 8,0m e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).



**Figura 7.41.** Seções de resistividade real da linha 3 entre Y= 34 e 52m, para X=8,5m, *background* em X= 8,0m (inferior) e croqui de localização dos alvos em campo (superior), com demarcação das valas (linhas em branco) e dos alvos (círculos em preto).

#### 7.4.4. Análise 3D dos Perfis de Resistividade do SCGR-II

A análise em três dimensões dos dados de resistividade levantados em campo teve como objetivo auxiliar a interpretação geométrica dos contrastes geoeletricos, permitindo a melhor visualização das anomalias em escala real de campo.

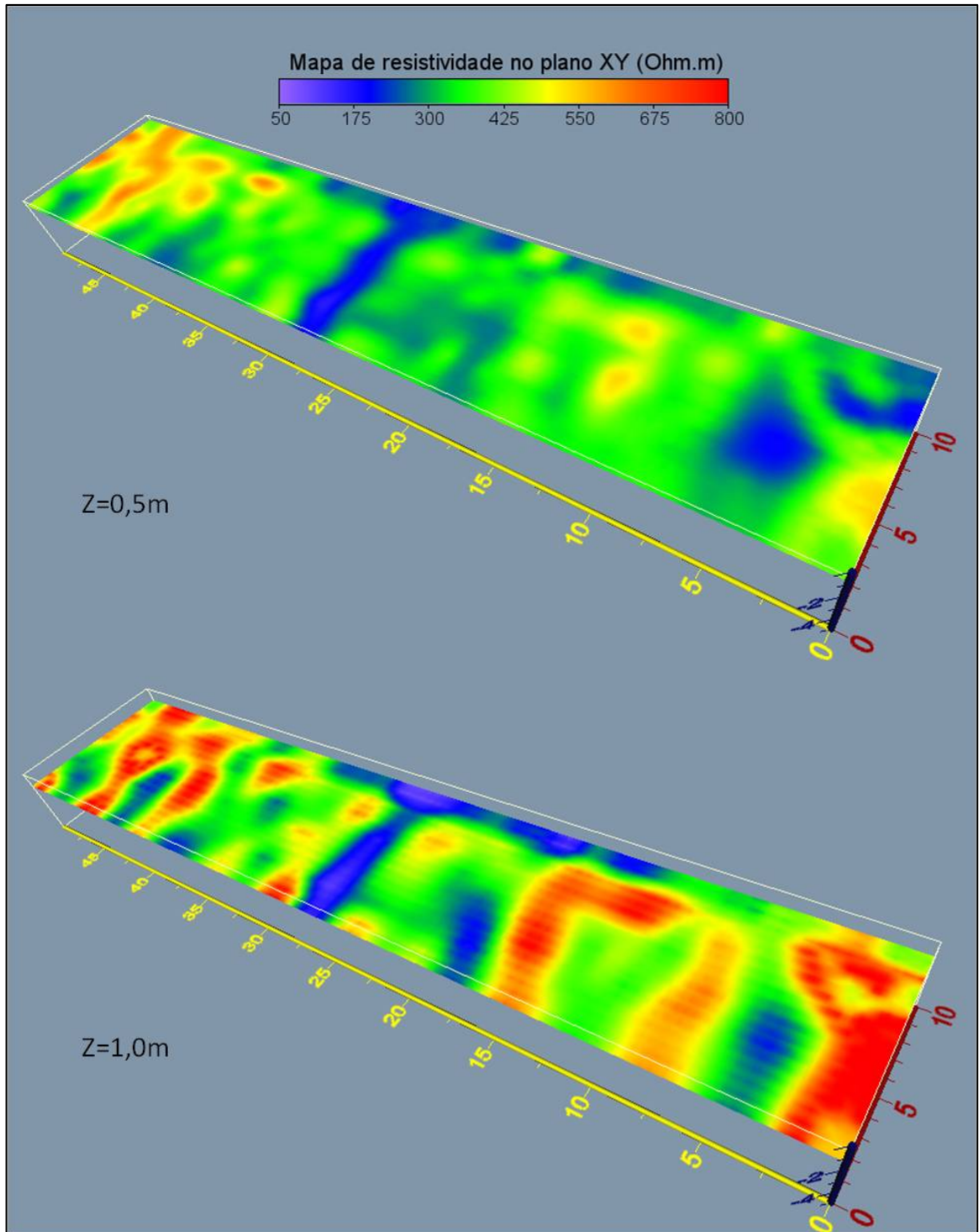
Através do programa Voxler (GOLDEN SOFTWARE, 2012), foram produzidas seções de resistividade real no plano XY e nas profundidades de  $Z=0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5$  e  $3,0\text{m}$ ; estas seções auxiliam na interpretação da resistividade do SCGR-II com a mudança de profundidade. Foram produzidas também, seções combinadas entre os perfis 2D das três linhas e as curvas de isovalores mais condutivas e resistivas observadas, permitindo a melhor visualização dos trechos de maior e menor resistividade presentes no SCGR-II.

As **Figuras 7.42 a 7.44** ilustram seções de resistividade no plano XY e variando em Z. É possível visualizar com clareza as anomalias condutivas e resistivas descritas anteriormente com destaque para os seguintes trechos:

- a) Contrastes condutivos:** Anomalia entre  $Y=3$  a  $7\text{m}$  – tambores de aço vazios (linha1) e  $Y=1$  a  $3\text{m}$  – muro de tijolos (linha 2);  $Y=17$  a  $19\text{m}$  - tambores de aço vazios (linha1);  $Y=25\text{m}$  – cano metálico guia (todas as linhas);  $Y=34\text{m}$  – tubos de ferro fundido (linha2). A partir de  $Y=20\text{m}$  e em  $Z>2,5\text{m}$ , nota-se um único corpo condutivo, associado ao nível aquífero da área de estudos.
- b) Contrastes resistivos:** Anomalia em  $Y=1\text{m}$  – tambor de plástico vazio (linha 1);  $Y=27\text{m}$  – manilha vertical de concreto (linha 1);  $Y=27$  a  $32\text{m}$  – jarros de cerâmica e brita de cerâmica (linha 2);  $Y=36$  a  $39\text{m}$  – brita de granito e caixa de areia (linha 2);  $Y=39\text{m}$  – manilhas horizontais de concreto (linha 1);  $Y=45\text{m}$  – manilha de concreto horizontal.

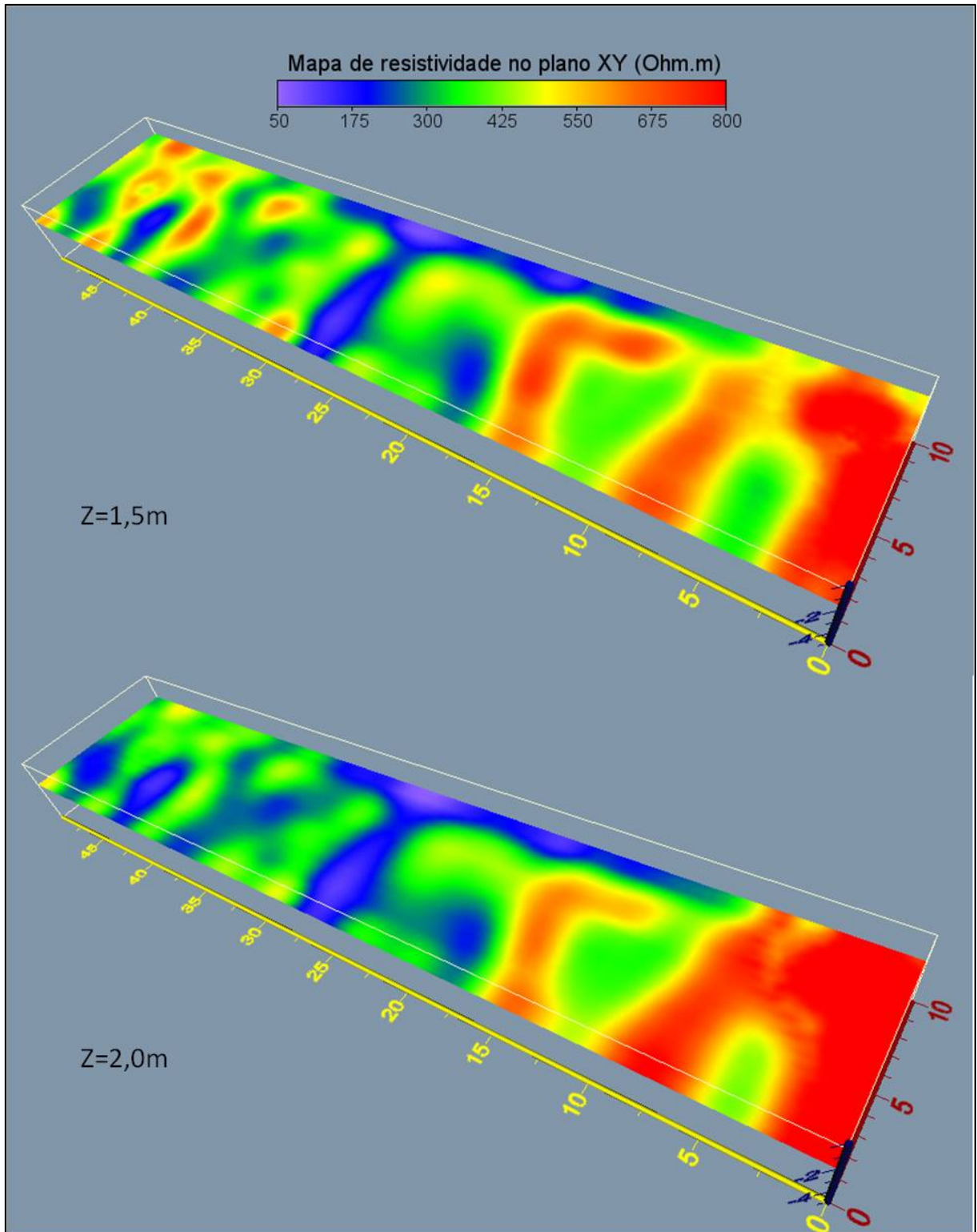
As anomalias não destacadas acima e que foram comentadas na análise 2D não apresentam boa visualização nas seções 3D. Este comportamento pode estar relacionado com a escala de cores utilizada nas seções 3D, dificultando a visualização do contraste necessário para a caracterização dos referidos alvos. Vale ressaltar que, para a análise 2D utilizou-se diferentes escalas de cores para cada trecho, com o intuito de se realçar os contrastes e de melhorar a interpretação; para o caso da análise 3D, a mesma escala de cores é utilizada para todo o conjunto de dados considerado, o que pode dificultar a interpretação das anomalias observadas e mascarar alguns trechos observados na análise 2D. Devido a isso, a análise 2D torna-se de fundamental importância para a caracterização das anomalias em três dimensões, devendo os resultados de ambos serem utilizados em conjunto.

Devido à complexidade do solo do SCGR-II, no qual apresenta forte contraste natural de resistividade – principalmente contrastes muito resistivos em diversos trechos (ver figuras do *background*) – a análise 3D dos dados mostrou-se mais adequada, para este caso em específico, na identificação de anomalias condutivas, delimitando as de maneira mais clara quando comparadas com as anomalias resistivas, que em alguns trechos podem se confundir com o contraste natural já presente anteriormente à instalação dos alvos.

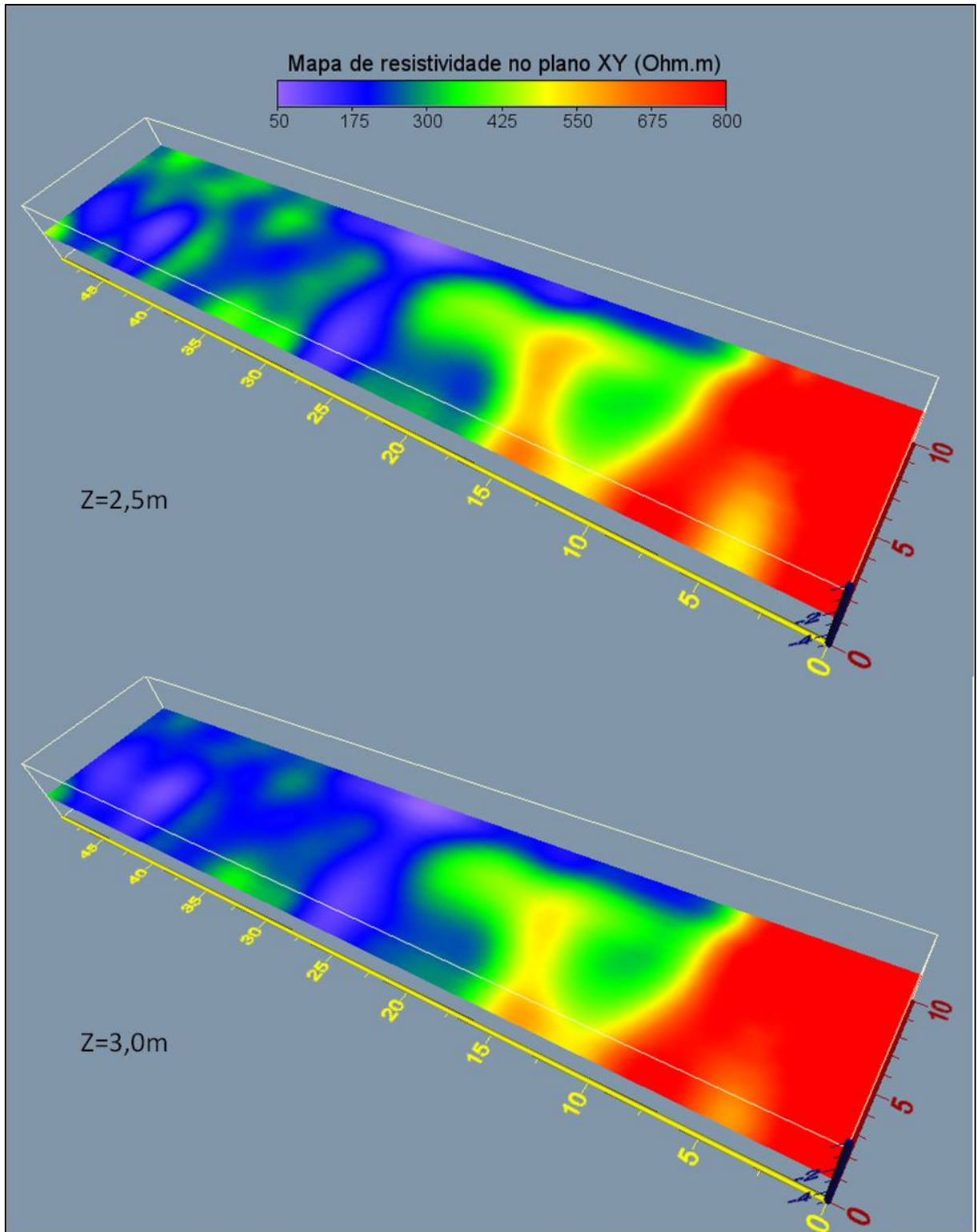


**Figura 7.42.** Seção de resistividade real no plano XY para as profundidades de Z=0,5 (superior) e Z=1,0m (inferior) – interface do programa Voxler (GOLDEN SOFTWARE, 2012).





**Figura 7.43.** Seção de resistividade real no plano XY para as profundidades de Z=1,5 (superior) e Z=2,0m (inferior) – interface do programa Voxler (GOLDEN SOFTWARE, 2012).

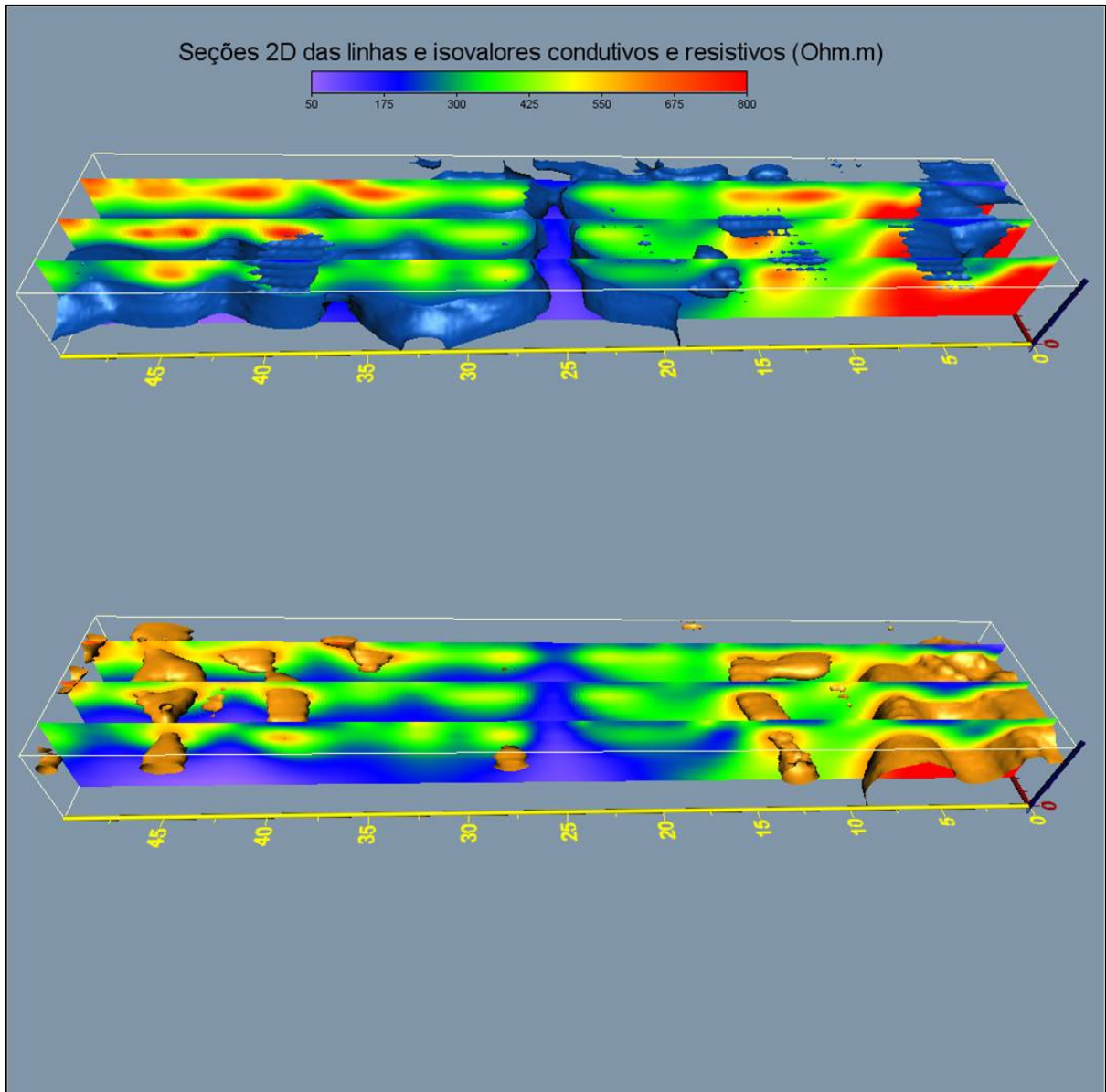


**Figura 7.44.** Seção de resistividade real no plano XY para as profundidades de Z=2,5 (superior) e Z=3,0m (inferior) – interface do programa Voxler (GOLDEN SOFTWARE, 2012).

Na **Figura 7.45** são observadas as seções 2D das três linhas do SCGR-II, interligadas através de curvas de isovalores condutivas e resistivas. Como explicitado

anteriormente, a análise 3D apresenta boa demarcação de contrastes condutivos – como entre os tambores de aço presentes em Y=17 e 19m na linha 1 e no cano metálico guia em Y=25m nas três linhas. Os contrastes resistivos não são tão bem demarcados em alguns trechos como em Y=27 a 32m quando comparados com a análise 2D e em outros trechos podem se confundir com o contraste natural, sendo necessário uma análise mais apurada para a definição dos alvos.

De forma geral, a análise 3D é uma ferramenta interessante para a caracterização dos alvos, contribuindo para uma melhor interpretação e visualização das anomalias observadas. Portanto, é recomendável que sejam realizadas análises 2D e 3D em conjunto para um melhor entendimento dos resultados.



**Figura 7.45.** Seções 2D das três linhas do SCGR-II (linhas 1,2 e3 de baixo para cima), interligadas através de curvas de isovalores de resistividade condutivas (superior) e resistivas (inferior) – interface do programa Voxler (GOLDEN SOFTWARE, 2012).

## 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este projeto teve como principal objetivo compreender o funcionamento, em área controlada, do equipamento OhmMapper e possibilitar o estudo de alvos pontuais enterrados através da metodologia capacitiva de aquisição de dados de resistividade.

Anteriormente a instalação do SCGR-II, realizou-se uma campanha de aquisição dos dados de resistividade da área de estudos com o intuito de se conhecer o comportamento geoeletrico natural do terreno, o que possibilitou comparar as anomalias de resistividade observadas antes e depois da instalação do SCGR-II. Para o melhor entendimento do método utilizado foram realizados experimentos de campo preliminares a aquisição definitiva dos dados, o que possibilitou a escolha da técnica mais adequada de aquisição de dados para a situação encontrada. Juntamente com as campanhas de teste realizadas, foi desenvolvido um modelo sintético que objetivou simular as condições reais de campo e compreender o padrão de anomalias esperado para o SCGR-II, utilizando-se como parâmetro de modelagem um arranjo de eletrodos que mais se aproximasse do método capacitivo real de campo. Após a definição da melhor técnica de aquisição de dados, juntamente com o conhecimento do padrão geoeletrico natural e do modelo de resistividade esperado, foi realizada campanha de aquisição de dados na área do SCGR-II, realizando-se a posterior análise 2D e 3D com as informações levantadas.

Para a definição da melhor técnica de aquisição dos dados foram utilizadas as informações coletadas nas três primeiras campanhas após a instalação dos alvos, descritas no item 5.3 desta dissertação, no qual se levou em consideração a qualidade do perfil geoeletrico produzido, o tempo de aquisição dos dados de campo e o desgaste do equipamento. Após a análise destes fatores, concluiu-se que a técnica de aquisição contínua, com a marcação de posição a cada 10m, é a mais apropriada para o desenvolvimento deste projeto. Devido a isso, os dados de campo definitivos para a produção dos resultados – aquisição realizada em fevereiro de 2017 – foram adquiridos dessa forma.

Os dados de *background* (aquisição preliminar a instalação do SCGR-II) adquiridos na posição das linhas 1,2 e 3 da área de estudos ilustram regiões de fortes contrastes naturais de resistividade, onde são observados “bolsões” mais resistivos, os quais podem representar regiões de menor compactação do solo e, conseqüentemente, de maior quantidade de espaços vazios em meio ao material geológico. Os fortes contrastes resistivos também podem estar associados a raízes de árvores, uma vez que durante as escavações foram observados diversos trechos com grande concentração de raízes das árvores vizinhas às valas. Estas heterogeneidades resistivas dificultam a caracterização e a

interpretação final das anomalias referentes aos alvos enterrados e, devido a esta condição, os dados de campo foram analisados com maior detalhe, tendo sido necessário seccionar os dados em diversas partes para cada linha do SCGR-II.

A modelagem de dados realizada levou em consideração o arranjo utilizado pelo equipamento OhmMapper e as características físicas de cada alvo, respeitando-se os valores de resistividade individuais de cada material a sua localização nas linhas 1,2 e 3 do SCGR-II. Os resultados obtidos demonstram que o método sintético utilizado (descrito no item 6.2) é capaz de definir contrastes de resistividade em profundidades inferiores a 0,8m e em alvos que apresentem dimensões de no mínimo 10 cm, como em tubos de PVC, PEAD e de ferro com diâmetros iguais ou superiores a 10cm. O modelo escolhido também demonstrou que a composição do material é secundária em relação ao seu volume de espaços vazios onde, como exemplo, podem ser citadas as intensas anomalias resistivas presentes em tubos de aço, concreto, cerâmica, ferro ou PVC com diâmetro de no mínimo 10cm, materiais estes com valores de resistividade distintos – tambor de aço vazio em 7m e 13m da linha 1, manilha de concreto vazia em 38m da linha 1, vaso de cerâmica em 27m da linha 2, tubo de ferro em 34m da linha 2 e tubo de PVC em 38m da linha 2. O método sintético utilizado, bem como o arranjo de campo definido para esta modelagem, não são análogos ao método e arranjo utilizado pelo OhmMapper, porém é o que mais se aproxima do mesmo; como demonstrado com a análise dos resultados de campo, o modelo sintético criado apresenta algumas disparidades em relação ao método capacitivo utilizado, – sendo estas discutidas a seguir – resultado este esperado devido às diferenças práticas entre o modelo criado sinteticamente e o modelo real.

A análise dos dados reais adquiridos na última campanha demonstrou boa correlação com os ensaios sintéticos, exceto para alvos metálicos que apresentaram forte anomalia condutiva em relação ao entorno para os dados reais, enquanto que os mesmos alvos apresentaram anomalias resistivas no modelo sintético criado. Este comportamento demonstra a grande influência do material metálico em subsuperfície para o método capacitivo, mesmo em um alvo com grande volume de vazios em seu interior, demonstrando que o equipamento utilizado não se comporta puramente como um método eletrorresistivo, podendo se comportar, quando há ocorrência de materiais metálicos, como um método eletromagnético indutivo, induzindo e registrando uma corrente elétrica secundária significativa na superfície de materiais metálicos.

Com relação aos alvos condutivos, o método capacitivo utilizado demonstrou boa caracterização dos tambores de plástico cheios de água doce, tambores de aço vazios e do cano metálico guia, sendo possível a visualização de anomalias condutivas na região destes alvos. Os tubos de ferro alocados na linha 1 não apresentaram bom contraste condutivo

com o entorno; acredita-se que a ausência de anomalias condutivas para estes alvos seja reflexo da combinação entre o pequeno diâmetro dos alvos (10 e 20cm), o volume de vazios no interior e a resistividade heterogênea natural do solo no local, fatores estes capazes de mascarar uma possível anomalia de resistividade; um argumento concordante com a hipótese de encobrimento de uma possível anomalia condutiva para os tubos de ferro citados é o fato de ocorrer uma anomalia condutiva para os tubos de ferro presentes na linha 2, os quais se encontram justapostos, com o topo dos alvos em 0,5 e 1m de profundidade. O alvo de muro de tijolos também apresentou contraste condutivo em relação ao seu entorno e é provável que a mesma seja devido ao material de fabricação do alvo (tijolos de argila), que apresentam resistividade entre 10 a 20 Ohm.m e possuem menor resistividade em relação aos valores médios registrados na linha 2 antes da instalação dos alvos (resistividade média de 361,56 Ohm.m – ver tabela 6.1). As chapas de alumínio localizadas na linha 2 apresentaram forte contraste resistivo com o seu entorno, porém esperava-se um comportamento condutivo devido a sua composição; acredita-se que o alvo tenha sofrido a influência de vazios entre as chapas de alumínio ou de outros objetos em sua proximidade, deixando em aberto a interpretação do comportamento observado para este alvo. Os tubos de ferro de diâmetros menores ou iguais a 10cm presentes na linha 3 também apresentaram anomalia condutiva em relação ao entorno, porém devido ao comportamento observado com os tubos de ferro, de 20cm de diâmetro, na linha 1, é prudente correlacionar esta informação com outras técnicas e métodos de aquisição geofísica para caracterizar este tipo de alvo. Os tubos de cerâmica e de PVC, ambos preenchidos pela metade com água, na linha 3, apresentaram contraste condutivo com o entorno, não sendo o método utilizado capaz de individualizar este conjunto de alvos; este comportamento demonstra a influência dos tubos de cerâmica e PVC preenchidos com água, e em 0,5m de profundidade, nas seções geoeletricas produzidas.

Com relação aos alvos resistivos, o método capacitivo demonstrou boa caracterização, com fortes contrastes resistivos, de tambores de plástico vazios e em posição vertical (linha 1), manilha de concreto de 80cm de diâmetro em posição vertical (linha 1) e caixa de areia acoplada a tubo vertical de PVC (linha 2). Anomalias resistivas, também bem caracterizadas pelo método capacitivo, porém com contraste menos intenso são observadas em manilhas de concreto de grande diâmetro, horizontalizadas (linha 1), em vasos de cerâmica vazios (linha 2), caixa com material cerâmico (linha 2), caixa com brita de granito (linha 2) e tubos de PEAD vazios (linha 2). Notam-se contrastes mais intensos em alvos verticalizados e de maior diâmetro (maiores que 0,5m) em alvos resistivos, demonstrando maior influência de alvos com essa geometria nos registros de resistividade do equipamento capacitivo utilizado. A linha 3 apresenta trechos de alta resistividade para

alvos de pequeno diâmetro e que se encontram em 0,5m de profundidade, não sendo o método capaz de caracterizar individualmente os alvos resistivos de pequeno diâmetro, porém demonstrando sofrer a influência dos materiais resistivos dos alvos, contrastando significativamente da seção de *background* deste trecho; o método não demonstra boa resposta ao mesmo conjunto de alvos com o incremento da profundidade para 1m ou superiores, estando as anomalias observadas muito semelhantes às anomalias presentes na seção geométrica de *background*.

A análise das seções 2D do SCGR-II demonstrou boa resposta do método capacitivo utilizado para a caracterização geométrica de tambores de plástico cheios de água, tambores de aço vazios, cano metálico e tubos de cerâmica e PVC com água – anomalias condutivas, tambores de plástico vazios, manilhas de concreto de grande diâmetro e vazias, caixa de areia acoplada a tubo vertical de PVC, vasos de cerâmica vazios, caixa com material cerâmico, caixa com brita de granito, tubos de PEAD vazios e tubos de polietileno e PVC de pequeno diâmetro e em até 0,5m de profundidade – anomalias resistivas. Os demais alvos não apresentaram boas respostas e devem ser caracterizados correlacionando-se informações de outras técnicas e métodos geofísicos.

Os dados 3D sumarizam as anomalias apresentadas nas diversas seções 2D, auxiliando na visualização dos contornos condutivos e resistivos do SCGR-II. São observadas nas seções 3D boa demarcação de contrastes condutivos – como entre os tambores de aço presentes na linha 1 e no cano metálico guia. Os contrastes resistivos não são tão bem demarcados em alguns trechos como em Y=27 a 32m quando comparados com a análise 2D e em outros trechos podem se confundir com o contraste natural, sendo necessário uma análise mais apurada para a definição dos alvos. De forma geral, a análise 3D é uma ferramenta interessante para a caracterização dos alvos, contribuindo para uma melhor interpretação e visualização das anomalias observadas. Portanto, é recomendável que sejam realizadas análises 2D e 3D em conjunto para um melhor entendimento dos resultados.

Recomenda-se que a caracterização dos alvos pontuais seja, sempre que possível, realizada com o uso mútuo de no mínimo dois equipamentos distintos em suas técnicas e métodos, de forma a se evitar a interpretação precipitada das anomalias observadas e a reduzir os erros implícitos a interpretação, garantindo boa correlação com os dados diretos de campo.



## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENDERITTER, Y., JOLIVET, A., MOUNIR, A., AND TABBAGH, A. 1994. Application of the electrostatic quadripole to sounding in the hectometric depth range, *Journal of Applied Geophysics*, 31, 1-6.
- ADAMS, A. H. 2008. Capacitive Array Resistivity with an Inductive Source. Tese de doutorado, RMIT University, Melbourne, Austrália, 243p.
- BORGES, W. R. 2007. Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo Sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. Tese de doutorado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP, Campus do Butantã – SP, 256p.
- BRAGA, A. C de O, 2006. Métodos da Resistividade e Polarização Induzida aplicados no estudo da captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e prática. Trabalho de Livre Docência. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro.
- BROOMFIELD, J., MILLARD, S. 2002. Concrete: Measuring Concrete Resistivity to Assess Corrosion Rate . Current Practice Sheet No. 128.
- CALLEGARY J. B., FERRÉ TY P. A., GROOM R.W. 2007. Vertical Spacial Sensitivity and Exploration Depth of Low-Induction Number Eletromagnetic-Induction Instruments. *Vadose Zone Journal*. 6:158-167.
- CHAVERINI, V. 1977. Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento. v. 2. 2.ed. Mc Graw Hill, New York, 315p.
- DOBRIN, M. B. 1960. Introduction to geophysical prospecting. Mc Graw Hill, New York, 446p.
- EDWARDS, L. S. A. 1977. Modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, p. 1020-1036.
- ELIS, V. R. 1999. Avaliação de aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP, 264 p.
- FINK, J. B., MCALISTER, E. O., STERNBERG, B. K., WIEDUWILT, W. G., WARD, S. H. 1990 - Induced polarization applications and case histories. Tulsa: SEG, 417 p.
- GEOMETRICS, INC. 2001. OhmMapper TR1 29005-01 REV. F – Operation Manual, 147p.
- GEOTOMO SOFTWARE. RES2DINV, version 3.53, Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-square method – Geoelectrical Imaging 2-D & 3-D, Geotomo Software, Penang, Malaysia. 129 p. 2003.

- GOLDEN SOFTWARE, INC. VOXLER, version 3.3.1843 – Jun 22 2012 Voxler, Golden Software Inc. 809 14<sup>th</sup> Street Golden, Colorado 80401-1866.
- GRARD, R., TABBAGH, A., 1991. A mobile for-electrode array and its application to the electrical survey of planetary grounds at shallow depths: *J. Geophys. Res.*, 96, nº B3, 4117-4123.
- GROOM, D. 2008. Common misconceptions about capacitively-coupled resistivity (CCR): what it is and how it works. *Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*. Environmental and Engineering Geophysical Society, pp. 1345–1350.
- INMAN, J. 1975. Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics*, 40. P. 798 – 817.
- INTERPEX LIMITED. RESIX IP2DI. 1996. Resistivity and Induced Polarization Data Interpretation Software. Interpex, Golden Colorado.
- JANASI, V.A., ULBRICH, H.H.G.J. 1991. Late proterozoic granitoid magmatism in the state of São Paulo, southeastern of Brazil. *Precambrian Research*, 51:351-374.
- JULIANI, C. 1992. O embasamento pré-cambriano da Bacia de São Paulo. In: ABAS/ABGE/SBG-SP, *Problemas geológicos e geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo*. São Paulo, p 3-20.
- KURAS, O., 2002. The capacitive resistivity technique for electrical imaging of the shallow subsurface: Ph.D. thesis, University of Nottingham. 286 p.
- KURAS, O., BEAMISH, D., MELDRUM, P.I., OGILVY, R.D., 2006. Fundamentals of the capacitive resistivity technique. *Geophysics*, 71 (3), p. G135-G152.
- LEPSCH, I. F. 2002. *Formação e conservação dos solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 178 p.
- LIG-IGc-USP: Laboratório de Informática Geológica – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo. 1998 – Projeto Alto Tietê. Website: [http://geolig.igc.usp.br/geoindex.php/?page\\_id=50](http://geolig.igc.usp.br/geoindex.php/?page_id=50)
- LOKE, M. H. BARKER, R. D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44. P. 131-152.
- LOKE, M. H., DAHLIN, T. 2002. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 49(3): 149-162.
- LOKE, M. H. 2004. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 136 p. Disponível em : <http://www.goelectrical.com>.
- LOKE, M. H., CHAMBERS, J.E., RUCKER, D.F., KURAS, O., WILKINSON, P.B. 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95, p. 135-156.

- MOULSON, A. J., HERBERT, J.M. 2003. *Electroceramics*, 2 edição, Wiley.
- MCNEILL J.D. 1980. *Eletromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers*. Technical Note TN-6. Geonics Limited.
- NEUKIRCH, M., KLITZSCH, N. 2010. Inverting capacitive resistivity (line electrode) measurements with direct current inversion programs. *Vadose Zone J.* 9, p. 882–892.
- NEUKUM C., GRÜTZNER C., AZZAM R.; REICHERTER K. 2009. Mapping Buried Karst Features with Capacitive-Coupled Resistivity System (CCR) and Ground Penetrating Radar (GPR). *Advances in Research in Karst Media*, pp.429-434.
- NIU Q., WANG Y. H., ZHAO K. 2014. Evaluation of the capacitively coupled resistivity (line antenna) method for the characterization of vadose zone dynamics. Hong Kong, China. *Journal of Applied Geophysics*, 106, p. 119-127.
- ONDENBORGER G. A., LEBLANC A. M. 2013. Capacitive resistivity inversion using effective dipole lengths for line antennas. *Journal of Applied Geophysics*, 98, p. 229-236.
- OLDENBORGER G. A., LEBLANC A. M. 2015. Geophysical characterization of permafrost terrain at Iqaluit International Airport, Nunavut. *Journal of Applied Geophysics*, 123, p. 36-49.
- OSELLA, A., BONGIOVANNI, M. V., DE LA VEGA, M., 2012. Development of a geoelectric device of capacitive contact for studying archaeological targets in very resistive zones, Near Surface Geoscience, 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, EAGE.
- PAN, L., ADAMCHUK, V.I., PRASHER, S., GEBBERS, R., TAYLOR, R.S., DABAS, M., 2014. Vertical soil profiling using a galvanic contact resistivity scanning approach, *Sensors (Switzerland)*, 14 (7), p. 13243-13255.
- PARASNIS, D. S., 1997. *Principles of Applied Geophysics*: Chapman & Hall, London, 5<sup>th</sup> edition.
- PORSANI, J. L., BORGES, W. R.; ELIS, V. R., DIOGO, L. A., HIODO, F. Y, MARRANO, A., BIRELLI, C. A. 2004. Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 22 (3): 245 – 258.
- PORSANI, J. L., 2015. Avaliação de métodos geofísicos (GPR e ER) para localização de interferências no subsolo urbano. Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento. Convênio COMGAS/IAG/USP.
- RICCOMINI, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 256p.

- RICCOMINI, C., COIMBRA, A. M. 1992. Geologia da Bacia de São Paulo. In: Aspectos Geológicos e Geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo, ABMS, São Paulo, 59p.
- RIJO, L. 1977. Prospecção geofísica nas regiões de Ponta de Pedra e Soure na Ilha de Marajó. In: Simpósio De Geologia Do Nordeste, 8., Campina Grande. Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Nordeste. p. 58-59.
- ROCHA, G. A., GONÇALVES, V. G., REBOUÇAS, A. C., BARRETO, L. M. B. 1989. Hidrogeologia da Bacia de São Paulo: estágio atual de conhecimento. Workshop Geologia da Bacia de São Paulo. Coletânea das Comunicações. Instituto de Geociências/ Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, p.44-59.
- RODRIGUEZ, S. K., TAKIYA, H. 2004. Evolução Geológica de São Paulo. In: Atlas Ambiental do Município de São Paulo – O Verde, o Território, o Ser Humano: diagnóstico e bases para a definição de políticas públicas para as áreas verdes do Município de São Paulo.
- SANTOS, F. M., 2006. Manual de Prospecção Geofísica I. Capítulo 4: Técnicas para investigação de estruturas superficiais – O método da resistividade. Instituto Dom Luis. Pode ser encontrado em <http://idl.ul.pt/node/32?destination=node/32>. Acessado dia 19/08/2016.
- TASSINARI, C. C. G., KAWASHITA, K., SCHMUSS. R. V., TAYLOR, P. N. 1998. As idades das rochas e dos eventos metamórficos da região sudeste do Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35. Belém, 1998. Anais...Belém, SBG. V.6, p. 2840-2853.
- TELFORD, W. M., GERALD, L. P, SHERIFF, R. E., 1990. Applied Geophysics, Cambridge University Press, 2<sup>nd</sup> edition. Cambridge University Press 860p.
- TIMOFEEV, V. M., 1973. Experience in the use of high frequency electrical geophysical methods in geotechnical and geocryological field studies: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Permafrost, NAUKA, 238-247.
- VOGT, C. A. 2002 - Modelos e modelagens. Com Ciência, Campinas, v. 29.
- WALKER J. P. AND HOUSER P. R. 2002. Evaluation of the OhmMapper Instrument for Soil Moisture Measurement. Soil Science Society Am. J. 66:728-734.
- WARD, S. H. 1990. Resistivity and induced polarization methods. In: Geotechnical and Environmental Geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, V.1: Review and Tutorial, p.147-189.
- YAMASHITA, Y., GROOM, D., INAZAKI, T., HAYASHI, K., 2004. Rapid near surface resistivity survey using the capacitively-coupled resistivity system: OhmMapper, Proceeding of 7th SEGJ International Symposium, p. 292-295.